

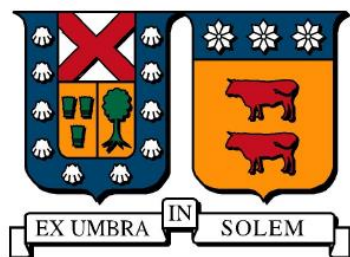


ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE
BLOCK CAVING

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

SANTIAGO - CHILE



“ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING”

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS

JAVIERA IGNACIA ZARABIA LEAL

Profesor Patrocinante

RODRIGO ESTAY HUIDOBRO

Profesor Co-Referente

RAÚL CASTRO

NOVIEMBRE – 2021



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING



Resumen

El uso del método por hundimiento block caving es bastante exitoso en la minería subterránea masiva para depósitos minerales extensos y profundos. Este método se caracteriza por la fragmentación progresiva y natural del macizo rocoso, que, sometido a esfuerzos internos y a la gravedad, desplazan el mineral hacia el punto de extracción.

La presencia de material fino y agua durante la producción tiene la potencialidad de generar dilución, retrasos y grandes riesgos operacionales, para el personal, maquinaria e infraestructura, ocasionando cierres parciales o totales del punto de extracción, sectores o más. Existe poca investigación relacionada al tema de eventos de agua-barro, por lo que hace esencial ampliar la data en los modelos de estudios predictivos, sin exponer las vidas de los trabajadores y de manera económicamente viable. Para este fin se usará, un modelo físico con los mecanismos formadores, perturbación, un punto de descarga para desplazarse, material fino y agua, con el propósito de encontrar la consistencia donde comienzan a generarse los eventos de agua-barro, perjudiciales durante la extracción de mineral.

Esta investigación tiene por objetivo, comprender los mecanismos formadores de los eventos de agua-barro durante la extracción de mineral desde una batea, utilizando un modelo físico con un punto de extracción aislado a escala 1:75.

El material utilizado fue seleccionado y caracterizado en base a ensayos desarrollados y presentados en esta memoria de título. La consistencia de la muestra determinó, que los experimentos se realizarán con porcentajes de 16% a 26% de humedad del material. Esta mezcla fue extraída con un equipo electrónico LHD escalado de 14 yd³ por un punto de extracción.

A partir de los resultados obtenidos, el punto crítico para la formación de los eventos de agua-barro es a un 20% de humedad, correspondiente al límite seco-plástico. Desde este punto de transición, pueden presentarse eventos con diferentes características, en cuanto a extensión lineal y velocidad de desplazamiento. Además, se visualiza una tendencia del comportamiento según la consistencia del material (de 16% a 24% de humedad), la cual muestra que las colgaduras disminuyen considerablemente a medida que los eventos de agua-barro aumentan, y por ende, la masa entre colgaduras se ve acrecentada, en la medida que aumenta el porcentaje de humedad.

Por lo tanto, dependiendo de las condiciones, existen consistencias del material con las cuales podría ser posible el desarrollo productivo autónomo. Mientras se pueda mitigar el riesgo, esto podría llegar a ser beneficioso para la operación.



Abstract

The use of the block caving method is of outstanding effectiveness in massive underground mining for extensive and deep mineral deposits. This method is characterized by the progressive and natural fragmentation of the massif rock, that, submitted to internal stress and its gravity, displaces the mineral towards the extraction point.

The presence of fine material and water during the production has the potential to generate dilution, delays and significant operational risks, for personnel, machinery and infrastructure, causing partial or total closures of the extraction point, sectors or worse. Currently, there is not enough related research on the issue of mud events, making it essential to expand the data in predictive study models, without exposing the lives of the workers and in an economically viable way. For this, a physical model with triggering mechanics, disturbance, an unloading point to move, fine material and water is applied in order to find the consistency where these mud events begin, that would be harmful during the mineral extraction.

The objective of this research is to understand the mechanisms that form mud events during the mineral extraction, using a physical model with an isolated extraction point at a 1:75 scale.

The material used was selected and characterized based on tests developed and presented in this work memory. The consistency of the sample determined that the experiments take into account percentages of 16% to 26% of moisture. This mixture was extracted with an electronic LHD equipment scaled 14 yd³ by an extraction point.

From the results obtained, the critical point for the formation of mud events is at 20% moisture, corresponding to dry-plastic limit. From this transition point, events with different characteristics can occur, in terms of linear extension and displacement velocity. Moreover, it is visualized as a behavior tendency according to the material consistency (for moistures from 16% to 24%), which shows how the hanging decreases considerably as the mud events increase, and therefore, the mass between hangings is increased, as far which increases the moisture percentage.

Therefore, depending on the conditions, some consistencies of the material could make autonomous productive development possible. As long as the risk can be mitigated, this could prove to be beneficial to the operation.



Agradecimientos

Debo agradecer primero a mi Familia. Por la paciencia y falta de esta, que tuvieron conmigo en diferentes circunstancias; por el cariño, los valores y el apoyo educativo incondicional que me brindaron; por las situaciones de estrés y relaxo que me dieron; por el soporte, cobijo y falta de estos para otras situaciones; por haber generado las oportunidades para adquirir el gusto de conocer, aprender y relacionarme con diferentes culturas y realidades; por los mimos, prohibiciones y demás. Diferentes aportes de cada integrante de mi gran familia, desde los más adultos, a los más jóvenes. Finalmente, por acompañarme de una forma u otra. ¡Gracias!

Al profesor Raúl Castro por confiarme este proyecto, la paciencia y acogerme dentro de su grupo de trabajo, muchas gracias por la confianza brindada y más. Al jefe de carrera Rodrigo Estay, por los años compartidos como educador, la gran ayuda con los problemas administrativos que tuve y el compromiso como profesor guía de esta investigación. Al profesor René Gómez por el apoyo académico, las propuestas investigativas y la retroalimentación.

Debo referirme también a Anisse Pizarro, la encargada del laboratorio de Procesamiento de la Universidad de Chile, el equipo de administración y control de gestión de AMTC (Paulet Riveros, Carlo Díaz, Guillermo Navarro, Renée Kellinghusen), a los encargados y compañeros del BCLab, por toda la ayuda, apoyo, gestión, eficiencia y buena onda entregadas.

A los Profesores que tuve a lo largo de mi vida, a los simpáticos, y a los no tanto, por los momentos que me hicieron pasar, todo para forjar la actitud laboral con la que estoy saliendo hoy día a enfrentar la vida.

Una mención especial al profesor Víctor Encina, por la paciencia, disposición y enseñanzas entregadas a lo largo de la carrera. Al profesor Leonelo Iturriaga por su dedicación docente, y disponibilidad en esos primeros años de incertidumbre, aprendiendo a ser una alumna universitaria.

A mis amigos y compañeros en la vida, por aparecer, acompañarme y/o ayudar en las situaciones que compartimos, proyectos, anécdotas, actividades, fracasos, victorias, tristezas, alegrías, decepciones, ilusiones, tensiones, calma, entre muchas otras. Destacando a aquellos que me soportaron en los momentos menos tolerables, los que fueron mi suplemento en las circunstancias más críticas, los que fueron apoyo y mostraron preocupación de una u otra forma, a los que me aguantaron de una a mil cosas, y a los que me perjudicaron e hicieron las cosas más difíciles o desafiantes en algún momento, para los que siguen y ya no siguen conmigo, gracias por todas las experiencias que acontecieron en mi día a día, son lecciones que ahora llevo conmigo.



En resumen, gracias a todos por ayudar a potenciar mis aptitudes y actitudes, algunas que en un principio ni siquiera imaginé que podría llegar a desarrollar, ni creí necesitarlas, espero haber aportado o hecho más ameno algún momento de sus vidas.

Una mención adicional para todos los investigadores relacionados al tema que me preceden, sin ustedes esta memoria no hubiera sido posible, gracias por su arduo trabajo.

Y un agradecimiento a ti, querido lector, por darte el tiempo de leer este estudio, espero que encuentres lo que necesitas o buscabas...

Éxito en la vida.



“LA PIEDRA”

El distraído tropezó con ella.

El violento la utilizó como proyectil.

El emprendedor construyó con ella.

El campesino cansado la usó como asiento.

Para los niños fue un juguete.

David mató a Goliat, y Miguel Ángel le saco la más bella escultura.

En todos los casos, la diferencia no estuvo en la piedra, sino en la persona.

No existe piedra en el camino que no puedas aprovechar para tu propio crecimiento.

-Antonio Pereira (Apon)-



Índice de Contenidos

Resumen	VI
Abstract	VII
Agradecimientos	VIII
Índice de Contenidos	2
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	10
1 Introducción	12
1.1 Hipótesis.....	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Principal	13
1.2.2 Específicos	13
1.3 Alcances	14
2 Revisión Bibliográfica.....	15
2.1 Flujo Gravitacional.....	15
2.2 Concepto de evento agua-barro.....	16
2.3 Historial de agua-barro en faenas.....	18
2.3.1 Kimberley y De Beers, Sudáfrica.....	19
2.3.2 Ue, Zambia.....	19
2.3.3 Hubei, China.....	19
2.3.4 Dutoitspan mine, Sudáfrica	19
2.3.5 IOZ y DOZ, Indonesia	20
2.3.6 El Teniente, Chile.....	20
2.3.7 Acciones para enfrentar el agua-barro.....	20
2.4 Clasificación para PT Freeport Indonesia	21
2.5 Clasificación para División El Teniente (DET)	21
2.6 Variables formadoras de agua-barro	23



2.7	Consolidación.....	24
2.8	Colgadura cohesiva en el proceso productivo.....	25
2.9	Modelos físicos de flujo gravitacional	27
2.9.1	Análisis de similitud.....	28
2.10	Conclusiones de la revisión bibliográfica	29
3	Metodología	32
3.1	Ensayos geotécnicos.....	32
3.2	Dimensionamiento del modelo físico.....	33
3.2.1	Factores de similitud	34
3.3	Protocolo experimental	34
3.3.1	Preparación de la muestra.....	35
3.3.2	Experimentos realizados	36
3.3.3	Sistema de análisis de imágenes.....	37
3.4	Resumen metodológico del trabajo	39
4	Caracterización del material.....	41
4.1	Asentamiento y fluidez.....	41
4.2	Resistencia al corte.....	43
4.3	Granulometría	44
4.4	Pérdida de humedad natural	45
4.5	Densidad, gravedad específica y absorción.....	46
4.6	Humedad en baldada productiva	48
5	Resultados experimentales.....	50
5.1	Caso base: experimentos con 16% de humedad.....	50
5.2	Experimento 1, 1.2 y 1.3: experimentos con 18% de humedad	52
5.3	Experimento 2, 2.1, 9, 10 y 11: experimentos con 20% de humedad	53
5.4	Experimento 8: experimento con 21% de humedad.....	56
5.5	Experimento 5, 6 y 7: experimentos con 22% de humedad	57



5.6	Experimento 4: experimento con 24% de humedad.....	60
5.7	Experimento 3: experimento con 26% de humedad.....	61
6	Discusión y análisis.....	62
6.1	Análisis del material.....	62
6.2	Análisis de producción.....	63
6.3	Análisis de colgaduras.....	65
6.4	Análisis de colgaduras y eventos	67
6.5	Análisis punto de transición	69
6.6	Análisis de imagen	70
7	Conclusiones y Recomendaciones	74
7.1	Conclusiones	74
7.2	Recomendaciones.....	75
8	Bibliografía	77
9	Anexos.....	82
9.1	Anexo A: Mecanismos de barro externo.....	82
9.2	Anexo B: Clasificación de humedad cualitativa en puntos de extracción.....	83
9.3	Anexo C: Estados operacionales en puntos de extracción	84
9.4	Anexo D: Referencia compresión y consolidación	85
9.5	Anexo E: Protocolos ensayos de caracterización del material geotécnicos	85
9.5.1	Ensayo de asentamiento y extensión de flujo.....	85
9.5.2	Compactación máxima y mínima.....	86
9.5.3	Consolidación.....	88
9.5.4	Granulometría.....	88
9.5.5	Cohesión.....	89
9.5.6	Gravedad específica	89
9.5.7	Humedad natural	91
9.6	Anexo F: Resultados ensayos caracterización.....	92



9.6.1	Asentamiento y fluidez.....	92
9.6.2	Resistencia al corte.....	94
9.6.3	Pérdida de humedad natural	102
9.6.4	Densidad, gravedad específica y absorción.....	105
9.7	Anexo G: Resultados experimentos	106
9.7.1	Caso base.....	106
9.7.2	Experimento 1	108
9.7.3	Experimento 2	111
9.7.4	Experimento 3	113
9.7.5	Experimento 4	114
9.7.6	Experimento 5	115
9.7.7	Experimento 6	116
9.7.8	Experimento 7	117
9.7.9	Experimento 8	118
9.7.10	Experimento 9	119
9.7.11	Experimento 10	120
9.7.12	Experimento 11	121
9.7.13	Extensión lineal de los eventos	122



Índice de Figuras

Fig. 2.1-1: Fotografías y representaciones esquemáticas de modelos físicos del flujo gravitacional. A la izquierda, propuesto por [23]. A la derecha, propuesto por [24].	15
Fig. 2.2-2: (A) Barro fluido en Cullinan (De Beers, Sudáfrica). (B) Barro viscoso (mina Northparkes, Australia) [2].	16
Fig. 2.2-3: Mecanismo primario para la ocurrencia de un bombeo interno [4].	17
Fig. 2.2-4: Mecanismo secundario para la ocurrencia de bombeo interno. (A) Descarga de barro producto de la compactación rápida de la pila de material quebrado al interior de la columna de extracción. (B) Drenaje reducido en quebrado y en estéril sobre el quebrado [4].	18
Fig. 2.8-5: Esquema de distintos puntos de extracción, para reducción o descolgadura de zanjas, según GOB-DET.2018 [3].	26
Fig. 2.8-6: Tipos de colgaduras en un pique de traspaso: (a) arco mecánico y (b) arco cohesivo [32].	26
Fig. 2.9-7: (A) Representación de similitud cinemática y (B) representación de similitud dinámica.	29
Fig. 2.10-8: Esquema general de la metodología de trabajo propuesta para el estudio.	31
Fig. 3.2-1: Esquema de la columna de mineral con el dimensionamiento del modelo físico utilizado [14].	33
Fig. 3.3-2: Fotografía del modelo físico no confinado utilizado – Escala 1:75.	35
Fig. 3.3-3: Imagen del cargamento del modelo físico con la muestra, realizado en el experimento 6.	36
Fig. 3.3-4: Imagen del LHD, antes de comenzar un nuevo experimento.	36
Fig. 3.3-5: Imágenes de (A) un evento de agua-barro de larga extensión escurriendo hacia el balde, destacado por la circunferencia turquesa, durante el experimento 4, (B) un descuelgue manual, realizado en el experimento 9.	37
Fig. 3.3-6: Imagen de la medición de un evento de corta extensión de agua-barro, durante en el experimento 9.	38
Fig. 3.3-7: Imágenes de las vistas usadas durante los registros de video, extraída del experimento 9, con la delimitación de la zanja.	39
Fig. 4.1-1: Gráfico con los datos de asentamiento de las muestras de material A y B, con sus duplicados, para los diferentes porcentajes de humedad ensayados.	42
Fig. 4.2-2: Gráfico de los esfuerzos del ensayo de corte de las muestras de material A y B, para las cargas con 5 Kg, 15 Kg y 30 Kg de masa vertical, a una velocidad de corte de 2 mm/min.	43
Fig. 4.3-3: Gráfico de la curva granulométrica usada, curva alpha se realiza con 15 puntos de la curva, mientras que la curva beta con 4 puntos.	44
Fig. 4.4-4: Gráfico porcentual de la pérdida de humedad acumulada por ambiente, para muestras de barro con 16%, 20% y 24% de humedad, durante dos días (31 horas de toma de datos).	46
Fig. 4.5-5: Fotografía de un procedimiento del método por picnómetro. Picnómetro con muestra conectado a la bomba de vacío para quitar el aire atrapado.	48



Fig. 4.6-6: Gráfico de distribución porcentual de la humedad para cada extracción, de los experimentos base con 16 % de humedad.....	48
Fig. 4.6-7: Gráfico de distribución porcentual de la humedad para cada extracción, de los experimentos 1 con 18% de humedad.....	49
Fig. 4.6-8: Gráfico de distribución porcentual de la humedad para cada extracción, de los experimentos 2 con 20% de humedad.....	49
Fig. 5.1-1: Imagen de una colgadura generada bajo la batea, a causa del sobre tamaño presente en la muestra (el ángulo de reposo del material fue de -68° , el cual está delimitado por la línea roja punteada).	51
Fig. 5.1-2: Imágenes del punto en operación (A) y del punto intacto con filtración (B), para el experimento base 2.....	51
Fig. 5.2-3: Imágenes del punto de operación, colgado en el techo de la galería zanja (A), mientras que a la derecha el mismo punto descolgado (B); para el experimento 1, el tipo de descuelgue fue manual.	53
Fig. 5.3-4: Imágenes del punto de operación, colgado en el techo de la galería zanja (A), mientras que a la derecha el mismo punto descolgado (B); para el experimento 2, el tipo de descuelgue fue manual.	54
Fig. 5.3-5: Imágenes de los eventos considerados como más importantes cronológicamente (los eventos con mayor desplazamiento lineal), ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 11 se relaciona con alguna colgadura previa.	54
Fig. 5.3-6: Imágenes de los eventos más importantes cronológicamente, ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 9, se relaciona con alguna colgadura previa.	55
Fig. 5.3-7: Imágenes de los eventos considerados como más importantes cronológicamente (los eventos con mayor desplazamiento lineal), ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 10 se relaciona con alguna colgadura previa.	56
Fig. 5.4-8: Imagen del único caso de evento de agua-barro durante este experimento, no se manifestó posterior a ninguna colgadura.	57
Fig. 5.5-9: Imágenes del punto de operación, colgado en el techo de la galería zanja (A), mientras que a la derecha el mismo punto descolgado (B); para el experimento 5, el tipo de descuelgue fue manual.	58
Fig. 5.5-10: Imagen de la vista superior interior del modelo físico con una subsidencia atestada de agua. Para este experimento se presentó un evento violento de agua-barro (posterior a una colgadura), el cual tuvo un alto desplazamiento lineal sin embargo no fue tan veloz.	59
Fig. 5.5-11: Imágenes de los eventos más importantes cronológicamente, ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 7 se relaciona con alguna colgadura previa.	60
Fig. 5.6-12: Imágenes de los eventos más importantes cronológicamente, (A) y (C) surgieron posterior a un descuelgue, estos avanzaron más allá del pique, y fueron de los eventos más rápidos registrados de toda la experiencia, (B) se generó seguidamente del evento (A), este si bien fue de corta extensión, fue el tercero más rápido de toda la experiencia; el tipo de descuelgue fue manual.	61
Fig. 5.7-13: Imagen de la vista superior interior del modelo físico con la muestra trabajada para el experimento 3, después que fluyera el material.	61



Fig. 6.2-1: Representación gráfica de la productividad por baldada expuesta en la tabla anterior.	65
Fig. 6.3-2: Representación gráfica de la masa entre colgaduras según la humedad del experimento, clasificado mediante el cono de Abrams; para las mediciones bajo 20% de humedad, solo hay riesgos de colgaduras.	66
Fig. 6.4-3: Representación gráfica de las colgaduras y los eventos según la humedad del experimento, para las mediciones mayor o igual a 20% de humedad, hay riesgos de eventos de agua-barro.....	68
Fig. 6.5-4: Gráfica radial de las frecuencias de colgaduras y eventos para un 20% de humedad.	70
Fig. 6.6-5: Gráfico de dispersión de las diferentes velocidades para cada tipo de evento según su humedad. Se excluye la información de los eventos de muy corta distancia lineal.	72
Fig. 9.1-1: Mecanismo por extracción directa de barro y relaves [4].....	82
Fig. 9.1-2: Mecanismo por falla en tapones de relleno de caserones [4].	82
Fig. 9.1-3: Mecanismo por falla en taludes con material blando [4].....	83
Fig. 9.2-4: (A) Punto de extracción en estado seco ($H=0$). (B) Punto de extracción en estado de baja humedad ($H=1$). (C) Punto de extracción en estado de humedad ($H=2$). (D) Punto de extracción en estado de barro incipiente ($H=3$). (E) Punto de extracción en estado de barro ($H=4$). (F) Punto de extracción con agua ($H=A$).	84
Fig. 9.5-5: Cono de Abrams	86
Fig. 9.5-6: Consistencia de agregados según su asentamiento en [cm]. Norma europea BS 8500.....	86
Fig. 9.5-7: Ejemplo de grafica de la curva de compactación.	87
Fig. 9.5-8: Imagen referencia de tamices superpuestos.....	89
Fig. 9.5-9: Referencia de horno de secado de acero inoxidable.....	91
Fig. 9.6-10: Fotografías del ensayo 2, muestra de material A (café) del “Cono de Abrams”.92	
Fig. 9.6-11: Fotografías del ensayo 3, muestra de material B (gris) del “Cono de Abrams”. 92	
Fig. 9.6-12: Fotografías del ensayo 4, muestra de material B (gris) del “Cono de Abrams”. 93	
Fig. 9.6-13: Fotografías del ensayo 5, muestra de material A (café) del “Cono de Abrams”.93	
Fig. 9.6-14: Gráfico de dilatación, cambio volumétrico de la muestra de material B (gris), comportamiento del material al ser sometido a diferentes cargas.....	98
Fig. 9.6-15: Gráfico de dilatación, cambio volumétrico de la muestra de material A (café), comportamiento del material al ser sometido a diferentes cargas.....	102
Fig. 9.6-16: Gráfico de variación de la pérdida de masa húmeda por ambiente en el tiempo.	104
Fig. 9.6-17: Gráfico de variación de humedad por ambiente en el tiempo.	105
Fig. 9.7-18: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento base 1. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	107
Fig. 9.7-19: Histograma de masa por baldadas, para el experimento base 1.	107
Fig. 9.7-20: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento base 2. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	108
Fig. 9.7-21: Histograma de masa por baldadas, para el experimento base 2.	108
Fig. 9.7-22: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 1. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	109
Fig. 9.7-23: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 1.....	109



Fig. 9.7-24: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 1.2. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	110
Fig. 9.7-25: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 1.2.....	110
Fig. 9.7-26: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 1.3. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	111
Fig. 9.7-27: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 1.3.....	111
Fig. 9.7-28: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 2. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	112
Fig. 9.7-29: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 2.....	112
Fig. 9.7-30: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 2.1. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	113
Fig. 9.7-31: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 2.1.....	113
Fig. 9.7-32: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 4. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	114
Fig. 9.7-33: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 4.....	114
Fig. 9.7-34: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 5. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	115
Fig. 9.7-35: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 5.....	115
Fig. 9.7-36: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 6. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	116
Fig. 9.7-37: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 6.....	116
Fig. 9.7-38: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 7. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	117
Fig. 9.7-39: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 7.....	117
Fig. 9.7-40: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 8. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	118
Fig. 9.7-41: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 8.....	118
Fig. 9.7-42: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 9. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	119
Fig. 9.7-43: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 9.....	119
Fig. 9.7-44: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 10. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	120
Fig. 9.7-45: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 10.....	120
Fig. 9.7-46: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 11. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.	121
Fig. 9.7-47: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 11.....	121
Fig. 9.7-48: Gráfico de barras de los tipos de evento según su humedad. Se excluye la información de los experimentos sin eventos de agua-barro, pero se tiene consideración que los experimentos 2 (20% humedad), 2.1 (20% humedad) y 5 (22% humedad) tienen humedades dentro de entre rango, y se excluye el exp. 3 (26% humedad) dado que no se consiguió estabilizar.....	122



Índice de Tablas

Tabla 2.4-1: Matriz de clasificación del estado de los puntos en mina DOZ (traducido [8]) [3].	21
Tabla 2.5-2: Definiciones de eventos de agua-barro según División El Teniente [3].	21
Tabla 2.5-3: Matriz de criticidad utilizada actualmente en El Teniente [31].	23
Tabla 2.5-4: Comentarios de la escala de colores de la matriz de criticidad.	23
Tabla 2.6-5: Resumen de variables que influyen en ingreso de agua-barro [31].	24
Tabla 2.8-6: Tabla comparativa del porcentaje de fino, para la constitución de arcos cohesivos, consideraciones diferentes según autor.	27
Tabla 2.9-7: Resumen de modelos físicos de flujo gravitacional [38].	27
Tabla 2.9-8: Resumen de los valores de factores de escala en función del factor de escala de longitud [42].	29
Tabla 3.1-1: Ensayos geotécnicos, con ventajas y desventajas [43].	32
Tabla 4.1-1: Clase de consistencia según el rango de asentamiento.	42
Tabla 4.2-2: Resultados extraídos de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.	43
Tabla 4.3-3: Indicadores de distribución granulométrica.	45
Tabla 4.5-4: Datos para muestras sobre 4.75 mm, medidos en el laboratorio.	46
Tabla 4.5-5: Datos para muestras bajo 4.75 mm, medidos en el laboratorio.	47
Tabla 4.5-6: Resumen de resultados de densidades, gravedades específicas y absorción del material.	47
Tabla 5.1-1: Parámetros generales de los experimentos base 1 y base 2.	50
Tabla 5.2-2: Parámetros generales de los experimentos 1, 1.2 y 1.3.	52
Tabla 5.3-3: Parámetros generales de los experimentos 2, 2.1 y 11.	53
Tabla 5.3-4: Parámetros generales de los experimentos 9 y 10.	55
Tabla 5.4-5: Parámetros generales del experimento 8.	56
Tabla 5.5-6: Parámetros generales de los experimentos 5 y 6.	57
Tabla 5.5-7: Parámetros generales del experimento 7.	59
Tabla 5.6-8: Parámetros generales del experimento 4.	60
Tabla 6.1-1: Clasificación de tamaños de partículas USCS y porcentaje de muestra.	62
Tabla 6.2-2: Resumen de características y productividad por baldada.	63
Tabla 6.3-3: Clase de consistencia según el rango de humedad.	66
Tabla 6.6-4: Resumen de los eventos de interés durante la investigación, se excluyen los eventos de muy corta extensión lineal.	71
Tabla 9.3-1: Clasificación operativa de los puntos de extracción según sus condiciones [3].84	
Tabla 9.3-2: Clasificación de colores del estado operativo de los puntos según su área y disponibilidad [3].	85
Tabla 9.4-3: Valores típicos para coeficiente de consolidación e índice de compresión [57].	85
Tabla 9.5-4: Gramos a utilizar según el tipo de suelo, asociado a dimensiones de picnómetro.	90
Tabla 9.6-5: Datos registrados para todos los ensayos realizados con el Cono de Abrams. ...	94
Tabla 9.6-6: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.	94



Tabla 9.6-7: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.....	95
Tabla 9.6-8: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.....	96
Tabla 9.6-9: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.....	98
Tabla 9.6-10: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.....	99
Tabla 9.6-11: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.....	100
Tabla 9.6-12: Resultados para la muestra con 16% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 1.....	102
Tabla 9.6-13: Resultados para la muestra con 16% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 2.....	103
Tabla 9.6-14: Resultados para la muestra con 20% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 1.....	103
Tabla 9.6-15: Resultados para la muestra con 20% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 2.....	103
Tabla 9.6-16: Resultados para la muestra con 24% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 1.....	104
Tabla 9.6-17: Resultados para la muestra con 24% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 2.....	104



1 Introducción

Block caving o hundimiento de bloques, se aplica en minería subterránea, en su mayoría a cuerpos masivos de mediana a baja ley y con una alta presencia de fracturas. El mineral es socavado basalmente para iniciar el hundimiento natural de la columna, los esfuerzos del terreno y la acción de la gravedad son los encargados de la fragmentación del mineral y de su transporte hacia el punto de extracción. El transporte mecánico de mineral va desde el punto de extracción y se realiza con equipos denominados Load Haul Dump (LHD); la propagación del hundimiento es continua en la medida que la roca fragmentada sea extraída [1].

En la medida que el hundimiento se va propagando, el mineral quebrado de mayor granulometría puede generar migración preferencial de material fino [1]. Los componentes como aguas superficiales (de filtraciones, deshielos, lluvias y acuíferos) y materiales finos arcillosos (por la conminución del macizo u otras fuentes) en determinadas proporciones, generan acumulación y en algunos casos eventos de barro en el punto de extracción, dadas por la capacidad de fluidez proporcionada por el agua [2]. Dependiendo del flujo de la mezcla, estos eventos que discurren tendrán asociado un nivel de peligrosidad (menor a mayor) como deslizamiento, escurrimiento y bombeo [3]. La mezcla genera problemas en la extracción, algunos eventos pueden ser repentinos y violentos, ocasionando accidentes o fatales laborales, pérdida temporal o permanente de equipos e infraestructura, cierre parcial o total de sectores productivos, siendo estos, algunos de los riesgos asociados que se vive en la minería, causando dilución, problemas de seguridad y retrasos productivos, entre otros [4].

Se han realizado estudios para explicar y prevenir la entrada de barro durante la explotación minera [5], identificándose ciertos factores principales que contribuyen a la generación de estos eventos: (i) humedad, (ii) material de granulometría fina, (iii) perturbación dentro de la columna y (iv) punto de descarga. Algunas herramientas preventivas, de apoyo y mitigación para la entrada de barro, serían: (i) uniformidad de extracción, (ii) control de altura extraída, (iii) túneles o galerías de drenaje, (iv) tablas de criticidad cualitativa del barro, (v) inspección frecuente de puntos riesgosos con equipo especializado y (vi) equipos LHD tele-comandados [6] [7] [5] [8] [9] [2]. No es posible cuantificar los efectos que tienen estas variables con el fenómeno, pero existen estudios que estiman la probabilidad y relación, a través de modelamientos predictivos de entrada de barro [10] [11] [12]. Sin embargo, estas investigaciones requieren una gran base de datos para su precisión. Existen pocas simulaciones en modelos físicos de block caving con presencia de finos húmedos en la extracción, focalizándose en la generación de colgaduras [13] [14], por lo que esta investigación está orientada a los eventos de barro generados en un punto de extracción aislado.



1.1 Hipótesis

Varios estudios [15] [16] [17] reconocen la presencia de finos como un factor significativo en el negocio productivo de cobre, no siendo lo óptimo, dado que generan efectos adversos en diversas operaciones unitarias. La presencia de agua afecta de forma considerable la fluidez de material, esto asociado a que interfiere en la mecánica global de distribución. Lo cual, sometidos a vibraciones y/o perturbaciones externas con disponibilidad de una cara libre, perjudican la eficiencia y seguridad de la operación en el punto de extracción.

1.2 Objetivos

1.2.1 Principal

El objetivo de este estudio es comprender los mecanismos formadores de los eventos de agua-barro durante la extracción de mineral desde una batea, utilizando un modelo físico con un punto de extracción aislado a escala 1:75. Para estos efectos, se utilizó una granulometría con material fino y agua, proporcionando una perturbación y un punto de descarga para desplazarse.

1.2.2 Específicos

Para cumplir con lo anterior, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Definir las condiciones del trabajo exploratorio experimental, estandarizando la metodología e identificando las características del material a utilizar.
- Determinar un rango de humedades con las que se trabajará dada la consistencia del material.
- Estudiar la productividad usando material fino y variando las condiciones de humedad.
- Identificar un estimado del porcentaje de la humedad crítica para la ocurrencia de eventos de agua-barro.
- Relacionar la humedad con los eventos de agua-barro y observar las características que puedan presentar estos eventos en el punto de descarga.



1.3 Alcances

El presente trabajo se centra en un estudio experimental de laboratorio donde:

- Los experimentos se realizaron en un modelo físico de flujo gravitacional no confinado a escala reducida (1:75).
- El material se extrajo por un punto aislado, con un dispositivo a escala que se ocupa del rol de un LHD.
- El mineral utilizado sigue una curva granulométrica escogida arbitrariamente.
- La extracción se realiza hasta que acaba la jornada laboral del día o se consigan los 200 ciclos u ocurra algún evento que impida la continuación del experimento.
- Se excluye estudio de reología, mineralogía, fragmentación del mineral, forma de partículas, efecto de temperatura, efecto de pH, efecto de la distribución granulométrica, duración e intervención de esfuerzos de carga.
- Se establece un plan experimental, variando los porcentajes de agua, para hallar la humedad crítica, y a estos se les hace repeticiones para validar o aportar más información.
- Se estudia el efecto de: la presencia de finos y agua.

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Flujo Gravitacional

El block caving o hundimiento de bloques, es un método utilizado en la minería subterránea, debido a sus ventajas respecto a bajos costos y alta productividad. La base de este proceso es el flujo gravitacional mediante el cual se mueven fragmentos de rocas desde su origen hasta un punto de extracción, las características del flujo dependen de la gravedad del mineral y los residuos que lo componen [18]. La masa rocosa acumulada en el punto de extracción es removida por equipos de carguío LHD, debido a que estos equipos extraen el material depositado a baldadas, el proceso de hundimiento suele ser bastante lento por lo cual el flujo generado no tendrá un carácter permanente, ni fuerzas dinámicas [19].

Mediante un método de hundimiento, el flujo del material tiene un bajo coste energético para el transporte, dado que el trabajo de su desplazamiento desde el origen hasta el punto de extracción es realizado por la fuerza gravitacional terrestre [20]. Si no existe cohesión entre los granos, todas las fuerzas que aparecen son repulsivas, de modo que cualquier forma que adopte el material está determinada por las condiciones de borde impuestas y la gravedad [21]. La movilidad de los fragmentos está determinada por el ángulo de fricción a lo largo de los puntos de contacto entre las partículas [22]. La distribución de fuerzas que actúan sobre la superficie de contacto cambia con la geometría del empaquetamiento de los granos [22]. A medida que fluye el material, existe una sucesiva formación de arcos (estables o inestables), donde todo el peso que se apoye sobre éstos es repartido en sus apoyos laterales, dejando el área bajo el arco libre de esfuerzos. Estas estructuras de fuerzas tienen la característica de ser muy inestables y cualquier perturbación puede producir una redistribución total de fuerzas [21].

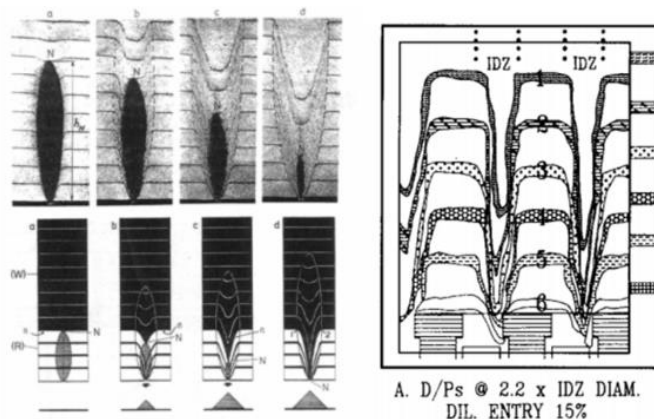


Fig. 2.1-1: Fotografías y representaciones esquemáticas de modelos físicos del flujo gravitacional. A la izquierda, propuesto por [23]. A la derecha, propuesto por [24].

2.2 Concepto de evento agua-barro

Es una afluencia más o menos repentina de turba, arena, grava, limo o cualquier otro material de granulometría fina anegado en trabajos mineros, generándose por la presencia de una perturbación para iniciar el movimiento y un punto de descarga [5]. La perturbación crea las condiciones para propiciar la descarga de barro, mientras que el agua se encarga del movimiento de éste hacia la cara libre. Esta ocurrencia repentina en un punto de extracción afecta directamente la seguridad de la faena, dado que puede causar pérdidas significativas en infraestructura, personal y maquinaria. Los bombeos pueden ocurrir cuando más del 30% del material presenta un tamaño menor a 5 cm y una humedad mayor al 8.5% [8].

Los eventos agua-barro se pueden clasificar según su movilidad y según su mecanismo. En el primer caso, es el agua la encargada de dar la movilidad a la mezcla [2]. Se dividen en:

- Barro fluido: Puede alcanzar un 50% de agua, incluye rocas de hasta 3 m de tamaño. El barro en este caso se asemeja a una suspensión fina y generalmente se asimila a una descarga de agua. En la Fig. 2.2-2(A) se muestra un ejemplo del barro fluido.
- Barro viscoso: Tiene un bajo contenido de humedad (17%–23%); no fluye libremente por gravedad, debe someterse a esfuerzos y ciertas condiciones para ser movilizado y expulsado por el punto de extracción [2]; En la Fig. 2.2-2(B) se muestra un ejemplo de barro viscoso.

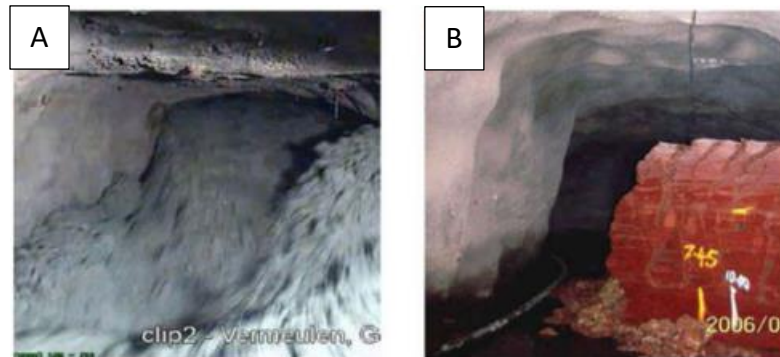


Fig. 2.2-2: (A) Barro fluido en Cullinan (De Beers, Sudáfrica). (B) Barro viscoso (mina Northparkes, Australia) [2].

Según el mecanismo de ocurrencia se pueden clasificar de las siguientes formas o una mezcla de ambos [5]:

- Barro externo: Proviene de la formación de barro en condiciones externas a las presentadas en el entorno subterráneo del macizo rocoso, produciéndose por tres fuentes: deposición de relaves, material de rellenos y fallas de taludes [25]. Las representaciones mecánicas de este tipo de barro se encuentran detalladas en el anexo A.
- Barro interno: Proviene de la formación de barro producido por la conminución del mineral y de los finos (esquistos y otras formadoras de arcillas), ubicados en la columna de mineral quebrado dentro de la zona de hundimiento. También se incluyen finos que se acumulan como resultado de procesos mineros anteriores. A continuación, se presentan dos esquemas de los mecanismos para bombeos internos.

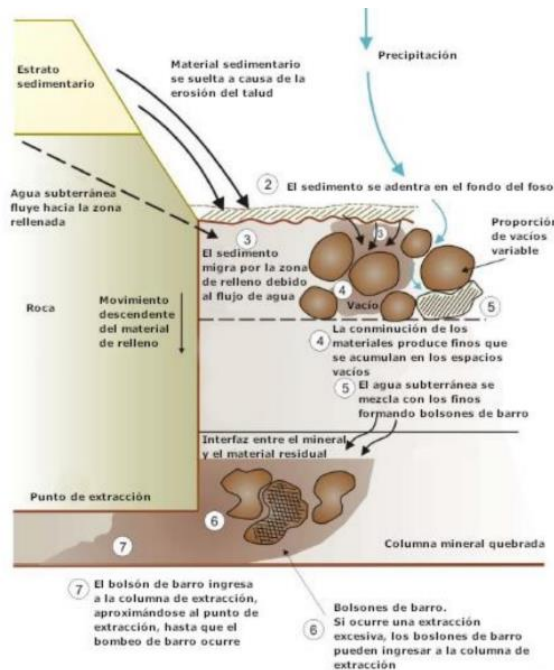


Fig. 2.2-3: Mecanismo primario para la ocurrencia de un bombeo interno [4].

Para su ocurrencia se requiere una depresión en la superficie sobre la actividad extractiva subterránea, ya sea por una mina superficial predecesora o un cráter de subducción. Producto de la erosión se acumula material fino en el fondo de la depresión o excavación, llenando los espacios vacíos que puedan existir entre los fragmentos de roca más grande. Una vez que el agua percola a través del terreno, se mezcla con el material fino, generando bolsones de barro, los cuales, si la actividad subterránea es lo suficientemente intensiva, terminan siendo alcanzados por la columna de extracción, ingresando al nivel de producción.

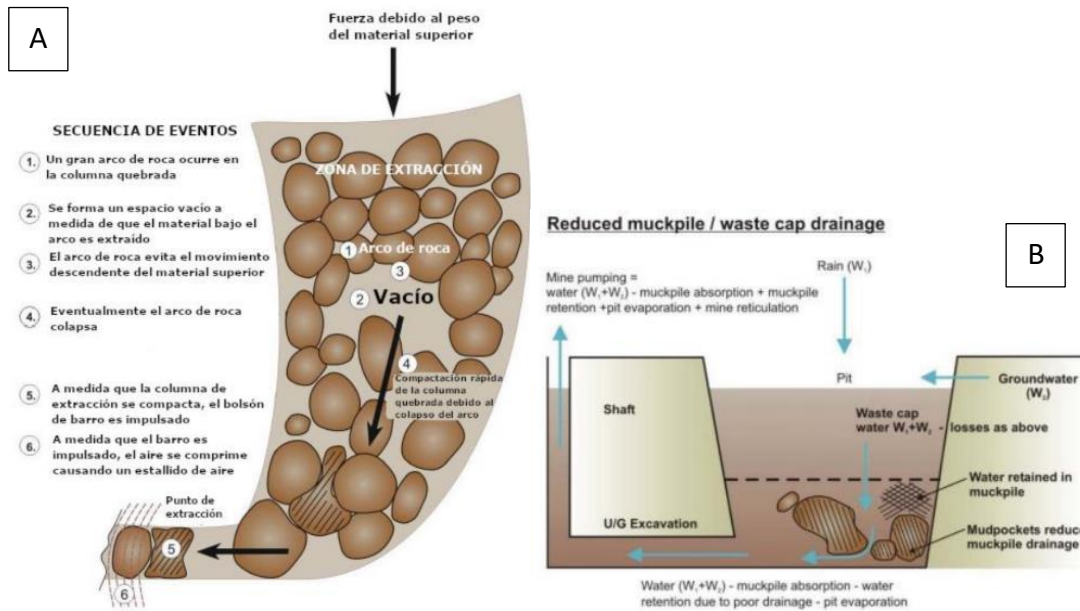


Fig. 2.2-4: Mecanismo secundario para la ocurrencia de bombeo interno. (A) Descarga de barro producto de la compactación rápida de la pila de material quebrado al interior de la columna de extracción. (B) Drenaje reducido en quebrado y en estéril sobre el quebrado [4].

La descarga de barro producto de la compactación de la columna fragmentada, supone la formación de un arco al interior de la columna de extracción y la generación de un vacío bajo éste a medida que se extrae material. El arco eventualmente colapsa compactando el material inferior al interior de la columna. A medida que se compacta la columna, los bolsones de barro son impulsados a través del punto de extracción.

2.3 Historial de agua-barro en faenas

Los eventos relacionados a agua-barro representan un riesgo para el efectivo desarrollo de la operación, transgrediendo la seguridad mina. A lo largo de los años se han presentado diversas instancias problemáticas para la explotación de diferentes yacimientos alrededor del mundo, a pesar de la escasa documentación de estos, algunas minas han conseguido implementar soluciones reactivas, mientras que otras han operado con prevención, control y ayuda de los avances tecnológicos [26]. A continuación, se presentan algunos casos registrados:



2.3.1 Kimberley y De Beers, Sudáfrica

Las minas de diamante de Kimberley y De Beers, constituyen los primeros casos documentados respecto de escurrimientos de agua-barro registrados, es una operación a cielo abierto, sus reportes datan de la década de 1890, las causas de estos eventos surgen de la mezcla de aguas lluvias y finos de kimberlita (arcilla y esquistos) y lutita, minerales con alto contenido de arcilla [5].

La problemática se trató construyendo túneles, los cuales iniciaron su desarrollo en 1891, permitiendo un aumento del drenaje en la zona, sin embargo, el agua lluvia se infiltró igualmente llegando a los niveles subterráneos.

2.3.2 Ue, Zambia

La mina Mufulira fue explotada inicialmente mediante el método de Block Caving y posteriormente por Sublevel Caving, en 1970 sufrió una irrupción de 1 millón de toneladas de relave, lo que conllevó a la muerte de 89 personas.

Proponen que una de las capas de arcilla en la sección inferior de la prensa pudo actuar como superficie flexible facilitando la deformación del terreno, por lo que el peligro de un derrame no solo proviene de los residuos mismo del barro, sino que también presenta un riesgo debido a la debilidad estructural del relleno subterráneo [27].

2.3.3 Hubei, China

La mina de hierro ubicada en Hubei (China) explotada por Sublevel Caving, sufrió un gran bombeo en 2004, en donde se lamentó la muerte de un trabajador [2]. La hipótesis que se postula está relacionada a unos eventos extremos de lluvia e inundaciones en 1988 lo que implicó que elementos finos y arcilla se desplazaran en la columna de extracción, facilitando el ingreso 14.000 m^3 aproximadamente de barro, lo que explicaría la presencia de arcilla, ya que la roca de hierro es muy competente y prácticamente no posee excesivos finos.

2.3.4 Dutoitspan mine, Sudáfrica

Explotada por Kimberly Mining Joint Venture, mediante Sublevel Caving, sufrió un ingreso de 4.420 m^3 de barro estimado a las labores mineras en el nivel 870 m de producción, en noviembre de 2011. Las causas identificadas se relacionan al escaso control y/o bloqueo de las galerías de drenaje superficial y a la filtración en las aguas subterráneas de los pozos.



2.3.5 IOZ y DOZ, Indonesia

Existe un complejo minero de oro y cobre en el distrito de Ertberg, ubicado en la provincia de Papúa (Indonesia), operado por PT Freeport Indonesia, a una elevación de 3000 a 4500 m.s.n.m., las operaciones incluyen el rajo Grasberg y el yacimiento Deep Ore Zone (DOZ), es la tercera mina explotada con el método panel caving en el Sistema Ertberg Medio Skarn (SETS). Este yacimiento posee características topográficas, hidrológicas y geológicas complejas para la explotación, que sumado a las altas precipitaciones de la zona (5500 mm de promedio anual), y al material fino producido por el método de extracción (Block Caving), generan gran cantidad de ingreso de agua-barro en los niveles de producción (1.200 m bajo el nivel de la superficie) [8].

2.3.6 El Teniente, Chile

Es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta, está ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Este yacimiento ha experimentado una serie de bombeos en los sectores productivos, asociados al agua proveniente de los deshielos y el material fino producido por la sobre extracción, llevándose, como consecuencia, varias vidas humanas [28].

2.3.7 Acciones para enfrentar el agua-barro

A continuación, se presenta a modo resumen, las medidas para mitigar los riesgos o la solución del problema de diferentes yacimientos mineros.

- Desarrollo de galerías o túneles de drenaje, para la activa extracción continua de agua. (Kimberley y de beers, Dutoitspan mine, PT Freeport Indonesia y otras)
- Perfiles de tiraje uniforme, incorporando criterios hidrogeológicos [4].
- Mayor capacitación al personal sobre las condiciones características de barro húmedo. (PT Freeport Indonesia)
- Un equipo especializado en la problemática de agua-barro realizando seguimiento a las intervenciones posibles de agua. (PT Freeport Indonesia)
- Inspección frecuente en los puntos riesgosos a la exposición de agua-barro, realizada por ingenieros geotécnicos, hidrólogos e ingenieros de operación [29].
- Equipos LHDs tele-comandados en áreas con agua-barro [29].
- Ejecutar procedimientos operativos estandarizados, según sistemas de clasificación personalizados [29].



2.4 Clasificación para PT Freeport Indonesia

A continuación, se muestra el sistema de clasificación de agua-barro (según granulometría-humedad) y su tipo de manipulación (cargador requerido) [29].

Tabla 2.4-1: Matriz de clasificación del estado de los puntos en mina DOZ (traducido [8]) [3].

Humedad/Contenido de agua	Tamaño de material ≥ 5 [cm] (M)			Tipo de cargador:
	M > 70% (dominado por grano grueso)	$30\% < M \leq 70\%$	M $\leq 30\%$ (dominado por grano fino)	
< 8.5% (seco)	A1	B1	C1	Cualquiera Con supervisión Telecomandado
8.5% - 11%	A2	B2	C2	
$\geq 11\%$ (húmedo)	A3	B3	C3	

Notar: Para clases B2 y A3, es crítica la consideración de altura de la columna y fragmentación.

La figura anterior exhibe que, conforme a la disminución del porcentaje de tamaño de partículas superior a 5 cm (M en la tabla anterior) y aumento del porcentaje de humedad, el punto se vuelve crítico y con una alta probabilidad potencial de bombeo.

2.5 Clasificación para División El Teniente (DET)

A continuación, se presenta una clasificación realizada por División El Teniente según rapidez, violencia de la descarga saturada y la distancia lineal que alcanza en las galerías [3] [30]:

Tabla 2.5-2: Definiciones de eventos de agua-barro según División El Teniente [3].

Tipo de evento	Descripción
Bombeo	Descarga violenta de agua-barro que se produce en la zona de influencia de un área de extracción, a través de la infraestructura existente al interior de la mina subterránea, tales como zanjas, puntos de extracción, chimeneas y labores. El desplazamiento del barro cubre una superficie significativa de las labores involucradas (sobre la gradiente por distancias mayores a 10 m lineales de labor), interrumpiendo el proceso operacional, pudiendo ocasionar daño a la infraestructura y/o personas.
Escurrimiento	Deslizamiento de material barroso infiltrado desde los niveles superiores a través de la infraestructura existente al interior de la mina subterránea, tales como zanjas, puntos de extracción, chimeneas y labores. El deslizamiento de este material barroso se produce en forma lenta y acotada, alcanzando distancias cercanas a los 10 m lineales, no afectando la infraestructura del sector.
Deslizamiento	Desplazamiento de material del talud en el punto de extracción, o al interior del buzón de pique de traspaso, producto de la saturación por humedad o agua, el cual no involucra un movimiento relevante de la columna del mineral. El desplazamiento de este material puede o no proyectarse a la galería, sin sobrepasar la gradiente, su influencia es menor a un escurrimiento y no provoca interferencias significativas al proceso productivo.



A través de la recopilación de información de casos históricos analizados de agua-barro en División El Teniente, los cuales determinan los parámetros importantes para la ocurrencia de escurrimientos y bombeos de agua-barro [28], se realiza una clasificación cualitativa de humedad (anexo B):

- Seco ($H=0$): El punto de extracción se observa sin presencia de humedad. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas se separan unas de otras y el guante permanece seco.
- Baja humedad ($H=1$): El punto de extracción se observa con el material fino (inferior a 5 cm) con baja humedad y de un color más oscuro que el seco. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas se separan unas de otras, dejando el guante con trazas de humedad.
- Humedad ($H=2$): El punto de extracción se observa con material húmedo. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas tienden a cohesionarse y formar una masa frágil que, frente a una presión, se rompe.
- Barro incipiente ($H=3$): El punto de extracción se observa con humedad y a la vista se presenta con una textura pastosa. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y al liberarlo, las partículas tienden a cohesionarse y formar una masa resistente que, aunque sea lanzada contra una superficie plana, no pierde su forma comprimida.
- Barro ($H=4$): El punto de extracción se observa con humedad y a la vista se presenta con una textura barrosa y presenta un brillo propio de la presencia de saturación de agua. En terreno, el guante debe comprimir un puñado de material, y comprobar que el barro se escurre y es incapaz de formar una masa comprimida.
- Agua ($H=A$): El punto de extracción se observa con material con una granulometría media a gruesa (superior a 25 cm), permitiendo que el agua escurra sin provocar mayores complicaciones operacionales.

Bajo estos parámetros, la granulometría, se considera fina a una partícula de tamaño inferior a 25 cm. A continuación, se presenta una matriz de criticidad creada por la Superintendencia de Gestión de Producción (SGP) [28].



Tabla 2.5-3: Matriz de criticidad utilizada actualmente en El Teniente [31].

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cm)			
		G(x) < 25%	25% ≤ G(x) < 50%	50% ≤ G(x) < 75%	G(x) ≥ 75%
Humedad cualitativa	H0: Seco				
	H1: Levemente húmedo				
	H2: Húmedo				
	H3: Barro incipiente				
	H4: Barro				
	A: Agua				

Tabla 2.5-4: Comentarios de la escala de colores de la matriz de criticidad.

Leyenda		Comentario
	Normal	Humedad y granulometría favorable para la continuidad operacional.
	Observación	Observación de la evolución de humedad y granulometría, existe una no despreciable probabilidad de ocurrencia de evento de agua-barro, estos puntos se clasifican como Limitados.
	Alerta	Alerta por la condición de humedad y granulometría, estos son declarados en agua-barro.

A continuación, se presentan algunos de los estados de los puntos de extracción adoptados por DET [31]. Para visualizar la versión extendida ir al anexo C:

- Limitados: Su extracción está restringida a una cuota por un período de tiempo.
- Barrera: Punto que presenta riesgo de bombeo.
- Agua-barro: Implica el cierre de los puntos de extracción (temporal o definitivamente) debido a su peligrosidad, significando una pérdida productiva y de reservas.

La matriz se considera como una referencia, esta debe ser respaldada con inspecciones en terreno realizadas por personal técnico capacitado [31].

2.6 Variables formadoras de agua-barro

A continuación, se identifica la siguiente tabla resumen, con aspectos relevantes o variables que pueden afectar para la formación de agua-barro en el punto de extracción:



Tabla 2.6-5: Resumen de variables que influyen en ingreso de agua-barro [31].

Variable	Tipo	Comportamiento esperado
Altura de columna primario [m]	Entorno	A mayor altura de primario, menor riesgo de ingreso de agua-barro
Altura de columna in-situ [m]	Entorno	A mayor altura in-situ, menor riesgo de ingreso de agua-barro
Altura a topografía [m]	Entorno	A mayor altura a topografía, menor riesgo de ingreso de agua-barro
Razón de extracción de columna in-situ [%]	Operacional	A mayor razón de extracción de columna in-situ, mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Uniformidad [%]	Operacional	A mayor uniformidad, menor riesgo de ingreso de agua-barro
Velocidad de extracción [t/m ² -día]	Operacional	A mayor velocidad de extracción, mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Estación del año	Entorno	Al estar en época de deshielo, mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Bajo zona de riesgo	Entorno	A estar bajo zona agua-barro, mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Drenaje [m ³]	Operacional	A mayor volumen de agua drenada, menor riesgo de ingreso de agua-barro
Granulometría (un)	Entorno	A mayor presencia de finos en punto de extracción, mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Humedad (un)	Entorno	A mayor humedad en punto de extracción, mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Vecino Barro (un)	Entorno	Al tener vecinos declarados agua-barro hay mayor riesgo de ingreso de agua-barro

Las principales variables relacionadas con el ingreso de agua-barro son la extracción, tamaño del mineral, humedad, velocidad de extracción y altura de columna in-situ extraída.

2.7 Consolidación

Es la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de cargas estáticas. También puede darse por pérdida de aire o agua, o por un reajuste de la geometría a nivel partículas.

Considerando una masa de suelo saturada, esta se encontrará afectada por un esfuerzo efectivo (σ'), que se define como la diferencia entre, los esfuerzos generados por el terreno a una profundidad Z (σ) y el esfuerzo intersticial o de poros (U), donde este último es generado por el fluido ocupando el volumen dejado entre partículas.

$$\sigma' = \sigma - U$$

Al aplicar una carga sobre el terreno, este se verá afectado, de manera que el fluido presente recibirá una variación en los esfuerzos presentes y este comenzará a fluir. En el transcurso del tiempo los esfuerzos serán absorbidos por las partículas del suelo, disminuyendo el esfuerzo intersticial generado por el fluido de manera gradual, hasta llegar a un equilibrio donde el esfuerzo intersticial es igual al hidrostático.



La consolidación puede ser primaria o secundaria. En el caso de la primaria, esta ocurre cuando la reducción del volumen debido a una carga aplicada en el suelo que expulsa el agua y transfiere la carga soportada por el agua a las partículas del medio. Mientras que la secundaria, es cuando ocurre el reajuste en la geometría que están dispuestas las partículas, haciendo que la carga aplicada este casi toda soportada por éstas y no por el fluido presente.

Este fenómeno se visualiza, cuando en minería, una columna de mineral somete cierto esfuerzo sobre el material húmedo, desplazando el agua contenida; y para el caso de material fino húmedo, se promueven los arcos cohesivos, impidiendo el flujo del mineral hacia el punto de extracción.

La consolidación permite conocer la relación entre tiempo y deformaciones. Esta se cuantifica mediante el coeficiente de consolidación, que en principio, es constante para cada fase y por lo tanto característico de cada suelo. En la sección de anexo D se presentan referencias de valores para índice de compresión y coeficiente de consolidación, en distintos tipos de suelos.

2.8 Colgadura cohesiva en el proceso productivo

Una colgadura corresponde a la formación de un arco estable de rocas de mineral o bloques que obstruyen en la columna de extracción, dejando inoperante el punto afectado, impidiendo el libre flujo gravitacional en la zona de tránsito del mineral [32]. Se distinguen principalmente dos tipos de colgaduras: asociados a rocas formadoras de arcos y/o por presencia de material cohesivo.

La colgadura cohesiva se genera por la compresión del material fino con presencia de humedad, al interior de la batea en la parte inferior de la pila de material fragmentado, originando una cohesión de la fracción fina, la que mantiene unidas a las partículas más grandes, impidiendo así el flujo del mineral [33].

A continuación, se muestran las condiciones recurrentes de los tipos de colgaduras que presentan los puntos de extracción, según División El Teniente [3]:

TIPO / VISTA	PUNTOS COMPACTADOS	PUNTOS CON ARCOS COHESIVOS	PUNTOS CON ARCOS MECANICOS	PUNTOS COLGADOS CON PRESENCIA DE CHIMENEA	PUNTOS CON ARCOS MECANICOS + FINO + AGUA
VISTA FRENTE					
VISTA PERFIL					
OBS.	Corresponden a la formación de un muro compacto de mineral seco, formado por la falta de movimiento por un tiempo prolongado, a un punto que presentó material fino y humedad necesaria para consolidarse.	Corresponden a la formación de una cavidad sustentable en forma de arco, con material fino.	Corresponden a la formación de una cavidad en forma de arco autosustentable con material grueso, debido al acomodamiento de colpas.	Corresponde a colgaduras generadas por el desprendimiento de material focalizado en un área específica del techo, formando una chimenea natural.	Corresponden a la formación de una cavidad en forma de arco autosustentable con material grueso, debido al acomodamiento de colpas. Sin embargo, presenta humedad y material fino entre ellas.

Fig. 2.8-5: Esquema de distintos puntos de extracción, para reducción o descolgadura de zanjas, según GOB-DET,2018 [3].

Las colgaduras son más complicadas de deshacer dependiendo de la locación donde se generen. Las originadas en la zona de tránsito del flujo del material, son más complejas de tratar que las ocurridas en la zona de descarga, dada la dificultad de acceso que tienen.

Los arcos mecánicos tienen más probabilidades de formarse en rocas fragmentadas de distribución de tamaño grueso (2.8-6(a)), mientras que el arco cohesivo (2.8-6(b)), requiere una proporción importante de finos en el material. Por lo que el porcentaje de finos en la distribución global del material influye en la frecuencia de posibles colgaduras causadas por arcos cohesivos.

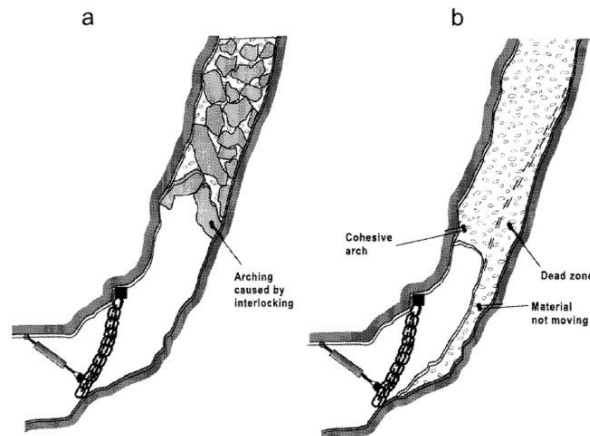


Fig. 2.8-6: Tipos de colgaduras en un pique de traspaso: (a) arco mecánico y (b) arco cohesivo [32].



A continuación, se resume la sugerencia de diferentes autores, con respecto al umbral crítico de finos y su respectiva medición definida, en un pique de traspaso [32].

Tabla 2.8-6: Tabla comparativa del porcentaje de fino, para la constitución de arcos cohesivos, consideraciones diferentes según autor.

Autor	Porcentaje de fino	Definición de finos
Kvapil	>10%	<0.07 mm*
Beus	20%	<0.07 mm*
Jenike	>10%	<0.25 mm*

*: Comúnmente se acepta que los finos se definen como <0.07 mm, sin embargo, Jenike los define como <0.25 mm.

La cohesión es sensible al porcentaje de fino que contiene, por lo que la hace bastante impredecible; una variación en la humedad del material es capaz de cambiar la cohesión (agua para el control de polvo, aumento de humedad, drenaje por gravedad, otros). Un arco cohesivo fallará si el peso del arco excede la resistencia al corte donde este se apoya. Mantener un buen control de tronadura, a través de la extracción activa y vigilancia de la generación de finos, ayuda a prevenir la formación de arcos cohesivos [33].

2.9 Modelos físicos de flujo gravitacional

Para resolver problemáticas reales, en la ingeniería, se usan diferentes técnicas para hallar soluciones. Los modelos físicos son representaciones bidimensionales o tridimensionales a una escala reducida, permitiendo estudios basados en observaciones y mediciones no peligrosas. Con el flujo gravitacional en estos modelos, se intenta simular el proceso del caving, utilizando diferentes materiales granulares [23] [34] [35] [36] [37] [20]. En la tabla siguiente, se presentan algunos de los modelos físicos utilizados para representar el flujo gravitacional, con distintos medios granulares y sus respectivos resultados.

Tabla 2.9-7: Resumen de modelos físicos de flujo gravitacional [38].

Año	Autor(es)	Materiales	Objetivos	Resultados
1916	G.I.heman	Mineral chancado	Estudiar recuperación minera (Miami <i>copper mine</i>).	Efectos del tamaño del punto de extracción sobre la recuperación.
1946	McNicholas	Mineral chancado	Estudiar recuperación minera (Climax <i>molybdenum mine</i>).	Diferencias en el tamaño de los puntos de extracción dependiendo del tamaño de las partículas.
1965	Kvapil	Arena	Proveer relaciones matemáticas respecto al flujo de materiales granulares en silos.	Teoría de Elipsoides de Movimiento y Extracción.
1966	Janelid y Kvapil	Arena	Extender modelo de silos de Kvapil a mina de hierro en Suecia explotada mediante el método de <i>Sublevel Caving</i> .	Criterios de diseño para <i>Sublevel Caving</i> basados en la teoría de elipsoides.
1972	Janelid y Kvapil	Mineral chancado	Estudiar escalamiento desde modelo a escala mina.	Resultados similares entre prototipo y modelo; diferencias asociadas a mayor movilidad y menor compactación en modelo.



Año	Autor(es)	Materiales	Objetivos	Resultados
1984	Peters	Grava	Estudiar el efecto del tamaño de partícula en la forma de la zona de extracción.	Ancho de la zona de extracción no depende del tamaño de partícula.
1994	Laubscher	Arena	Diseñar modelo 3D para observar y estudiar la interacción entre puntos de interacción adyacentes.	Teoría del Tiraje Interactivo.
2001	Castro	Grava	Escalamiento de modelo físico para estudio de flujo gravitacional en minería por hundimiento.	Las fuerzas preponderantes corresponden a la gravedad y la fricción. El movimiento de las partículas se limita a un elipsoide caracterizado por altura (H) y ancho (W).
2004	Power	Grava	Revisión de las escalas utilizadas en modelos físicos.	Resultados similares entre escala mina y modelo a la escala (1:30), destaca diferencia entre modelos 2D y 3D.
2004	Susaeta	Arena	Estudio velocidad flujo gravitacional para tiraje aislado, tiraje interactivo.	Índice de Uniformidad (IU). A mayor uniformidad del tiraje, más tardía será la entrada de dilución.
2006	Castro	Grava	Estudio flujo gravitacional en modelo 3D a gran escala.	La masa extraída y la altura de extracción tienen gran influencia sobre la zona de extracción aislada.
2017	Sánchez	Material de varios puntos de extracción Mina Esmeralda	Caracterizar el flujo de mineral granular fino en condiciones de humedad a través de ensayos controlados de laboratorio para el diseño de minas explotadas por block/panel caving.	Resultados similares entre prototipo y modelo, e indican que las variables que afectan la geometría de las zonas de flujo son la humedad y la masa de extracción acumulada.

La principal ventaja entre los ensayos a escala mina sobre los modelos físicos a escala reducida, es porque la escalabilidad de los resultados es directa. Un ensayo físico a escala mina, satisface la similitud geométrica, cinemática y dinámica. La desventaja existente de los experimentos a escala mina, se vincula a la obtención de mediciones in situ, la variación de parámetros en orden de cuantificar el efecto de ellos (por ejemplo: fragmentación, ángulo de fricción, espaciamiento de los puntos de extracción, alturas de columna, interferencias y/o perturbaciones, y otras cualidades que se marginan para fines del estudio) y los costos asociados a realizar pruebas a esa escala. Todo esto sin incluir la intervención de agua en el proceso.

Las operaciones mineras dependiendo de su geografía o tipo de minería, se ven alteradas por la incorporación de agua. Esta variable, agregada en un caso de minería subterránea cuyo método de explotación es por hundimiento, se encuentra expuesta al riesgo de presentar eventos de barro [2].

2.9.1 Análisis de similitud

El objetivo de construir un modelo físico en minería es que permita observar los fenómenos presentes del flujo gravitacional de material granular, volviendo más eficientes algún aspecto a nivel productivo del proyecto minero. La similitud implica homología o correspondencia entre dos sistemas, de los cuales uno está denominado como prototipo y el otro como modelo [20]. Para que un modelo y un prototipo sean considerados similares, se deberá cumplir con los tres tipos de similitudes, siendo estas, geométrica, cinemática y dinámica [39].

Para que dos sistemas sean geoméricamente similares, existe un factor de escala λ_L , el cual debe ser igual para cada una de las dimensiones homólogas de ambos sistemas. Dos sistemas son cinemáticamente similares, cuando se cumple que una partícula ocupa la misma posición en el tiempo (λ_T) que su homólogo respectivo. De igual manera esta similitud se da para el caso de la velocidad y aceleración. Dos movimientos son similares dinámicamente, cuando el factor de escala se mantiene constante para fuerzas homólogas aplicada a los dos sistemas.

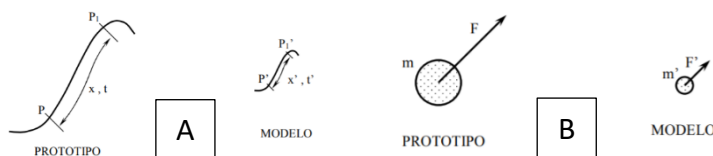


Fig. 2.9-7: (A) Representación de similitud cinemática y (B) representación de similitud dinámica.

Para el caso de la minería, el obtener un modelo físico de hundimiento que satisfaga todas las similitudes para muchos autores, es difícil de construir [35]. Generalmente la similitud geométrica y cinética se pueden lograr en la mayoría de los modelos, mientras que la similitud dinámica rara vez se logra en la práctica (anónimo 1942). Por esto algunos autores como Fuentes (1996)¹ [40], y Lifshitz (1956)², afirman que es posible estimar las fuerzas que afectan al medio granular, dependiendo del tamaño de partícula en estudio. A continuación, se presentan los factores de escala mencionados por los distintos autores [41].

Tabla 2.9-8: Resumen de los valores de factores de escala en función del factor de escala de longitud [42].

Variable	Factor	Factor de escala
Longitud	λ_L	λ_L
Área	λ_A	λ_L^2
Volumen	λ_{Vol}	λ_L^3
Velocidad	λ_V	$\lambda_L^{1/2}$
Tiempo	λ_T	$\lambda_L^{1/2}$
Peso	λ_W	λ_L^3
Tasa de extracción	λ_Q	$\lambda_L^{5/2}$
Esfuerzos	λ_σ	λ_L
Ángulo de fricción	$\lambda_{tan(\phi)}$	1

2.10 Conclusiones de la revisión bibliográfica

Los proyectos con modelos físicos relacionados a material húmedo, a pesar de permitir generar una preparación experimental bajo condiciones controladas, son escasos, a diferencia de la bibliografía

¹ Citado en Castro (2001) [58]

² Citado en Pineda (2012)



para el material seco, pero existe un vasto material teórico, con numerosos estudios explicativos de los eventos de agua-barro:

- (i) Definiciones cualitativas para explicar y caracterizar esta clase de eventos.
- (ii) Estudios analíticos con la recopilación de la data histórica de algunas minas afectadas por estos eventos en sus puntos de extracción, y propuestas para resolverlos o evitarlos.
- (iii) Modelos numéricos predictivos, con diferentes condiciones iniciales de formación.

Se postula que la formación de los eventos de agua-barro son ocasionados por material fino, presencia de agua, una perturbación y un punto de descarga. Adicionalmente, existen estudios que desglosan otros parámetros que influyen en la ocurrencia de estos, como la velocidad de extracción, vecino barro, el tamaño del mineral y altura de columna in-situ extraída, entre otros.

También existen herramientas para prevenir o mitigar los riesgos, con desarrollo de galerías o túneles de drenaje, perfiles de tiraje uniforme, inspección con personal capacitado, etc.; el equipo humano especializado, utiliza una matriz de riesgo clasificando el estado del punto de extracción, según el tamaño del material y humedad contenida.

Dada la complejidad de establecer un control riguroso de los diferentes parámetros estudiados que generan estos eventos (según diversos autores), solo queda observar con mayor detención la variabilidad de los efectos ocasionados por el problema de agua-barro, para comprender el comportamiento del flujo del material en un ambiente controlado, y potencialmente prevenir peligros de esta índole, habilitando la posibilidad de extracción continua en los puntos abandonados a causa de estos eventos.

El flujo (o caudal), según la física, se refiere a un volumen el cual se desplaza durante cierto tiempo, sin embargo, la clasificación cualitativa de los eventos, tabla 2.5-2, plantea que la violencia y/o tiempo de ocurrencia de éstos, está directamente relacionada con el desplazamiento lineal, siendo que la medición del flujo muestra que son variables totalmente independientes una de otra, por lo que motiva a realizar un estudio de los eventos considerando mediciones independientes de estos parámetros (desplazamiento lineal y tiempo). A modo genérico investigativo, se recomienda, abastecer de una mayor información experimental, utilizando modelos físicos, trabajando con una diversidad de factores, para complementar y suministrar los modelos numéricos predictivos, por lo que se estudiarán los eventos ocurridos durante la extracción de mineral a diferentes humedades y muestras granulométricas.

A continuación, se presenta un diagrama general del trabajo a realizar.

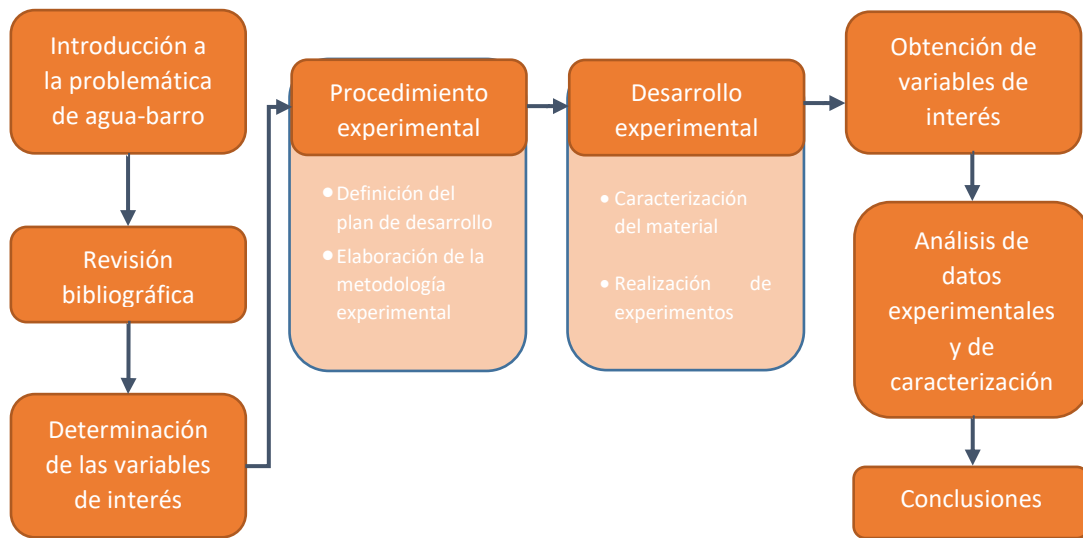


Fig. 2.10-8: Esquema general de la metodología de trabajo propuesta para el estudio.

3 Metodología

3.1 Ensayos geotécnicos

Cuando se trabaja con suelos, hay que tener noción de la variabilidad existente en la conducta de éste, dependiendo de las propiedades fisicoquímicas que lo compongan. Son cualidades intrínsecas del material, asociados a su formación. En caso de suelos superficiales o intervenidos, las propiedades pueden ir modificándose a lo largo de los años. Sin embargo, para el caso de esta memoria de título, se estudiarán propiedades geotécnicas, con el propósito de identificar las características de la muestra con la que se trabaja.

Tabla 3.1-1: Ensayos geotécnicos, con ventajas y desventajas [43].

Propiedad o Característica	Objetivos	Obtención en Laboratorio	Características Ensayo	
			Ventaja	Desventaja
Granulometría	Caracterización de material	Tamizaje (ASTM D6913)	Simple, barato	Medición sobre 75 micrones
	Definición de ensayos	Hidrometría (ASTM)	Bajo 75 micrones	Indirecto
		Difracción de rayos	Bajo 75 micrones	Alto costo
Límites de Atterberg	Estado del material según humedad	Límite líquido (ASTM D4318)	Simple, bajo costo	Sólo bajo 0,425 [mm]
	Caracterización de porción fina	Límite plástico (ASTM D4318)		
Gravedad Específica	Junto a compactación rango de índice de vacíos posibles	Picnómetro (ASTM D854)	Simple, bajo costo	Bajo 4,75 [mm]
		Masa sumergida (ASTM C127)	Simple, bajo costo	Sobre 4,75 [mm]
Compactación máxima y mínima	Rango de densidades posibles del material	Densidad mínima (ASTM D4254)	Simple, bajo costo	Suelo seco, bajo 4,75 [mm]
		Densidad máxima (JSSFME)	Simple, bajo costo	Suelos con pocos finos, bajo 4,75 [mm]
	Junto a gravedad específica, rango de índice de vacíos posibles	Proctor Modificado (ASTM D1557)	Simple, bajo costo	Bajo 3/4 de pulgada
Consolidación	Curva en el plano e-p del material	Odómetro (ASTM D2435)	Simple	Larga duración bajo 0,425 [mm], paredes rígidas
		Triaxial (ASTM)	Exacto	Caro, complejo, bajo 4,75 [mm]
Cohesión	Parámetro c del modelo de falla Mohr-Coulomb	Compresión no Confinada (ASTM D2166)	Simple, bajo costo	Bajo 4,75 [mm]
		Triaxial (ASTM)	Exacto	Alto costo, complejo, bajo 4,75 [mm]
Ángulo de fricción	Parámetro Φ del modelo de falla Mohr-Coulomb	Ángulo reposo sumergido (Santamarina & Cho, 2001)	Simple, bajo costo	Aproximado
		Triaxial (ASTM)	Exacto	Caro, complejo, bajo 4,75 [mm]
Asentamiento y extensión de flujo	Determinación cualitativa de la fluidez del mineral	Uso de cono de Abrams (ASTM C143, JSCE)	Simple, bajo costo, material íntegro	Cualitativo, poco utilizado en suelos

Los datos recopilados son presentados en la sección de resultados del presente informe, adicionalmente se estudia un parámetro de humedad natural, dada las condiciones de experimentación, siguiendo el protocolo ASTM D2216 (secado en horno). Algunos de los ensayos de caracterización realizados, fueron ejecutados externamente con colaboración de la Universidad de Concepción.

Además, en el anexo E se encuentra una mayor explicación de la metodología de los ensayos considerados [44] [45] [46] [47].

3.2 Dimensionamiento del modelo físico

Existen varias investigaciones con modelos físicos relacionado a flujo gravitacional, con factor de escala 1:30 [37], 1:75 [13], 1:100 [20] y 1:200 [39], utilizados por diferentes autores, evidenciando la factibilidad de los resultados. Se señala que, los modelos físicos con un mayor tamaño replican de mejor manera los fenómenos de la naturaleza, pero su manejo, construcción y tiempo de ejecución son algunas de las dificultades presentes [48].

Para el desarrollo experimental con el modelo físico, se trabajó en una maqueta de acrílico a escala laboratorio de 1:75 construida previamente, para estudios con material que requieren mantener la fuerza de gravedad gobernando el flujo y no otras como las interpartículas [14]. Las dimensiones del modelo emulan una columna de 50 m de altura, 39.1 m de ancho y 25 m de profundidad (66.7 cm, 52.1 cm y 33.3 cm, respectivamente escaladas), con una malla extractiva de 34 x 25 m (distancia entre calles y entre zanjas) siendo un poco más grande a la usada en la mina Diablo Regimiento (34 x 20 m) [49]. A continuación, se presenta una figura del modelo utilizado.

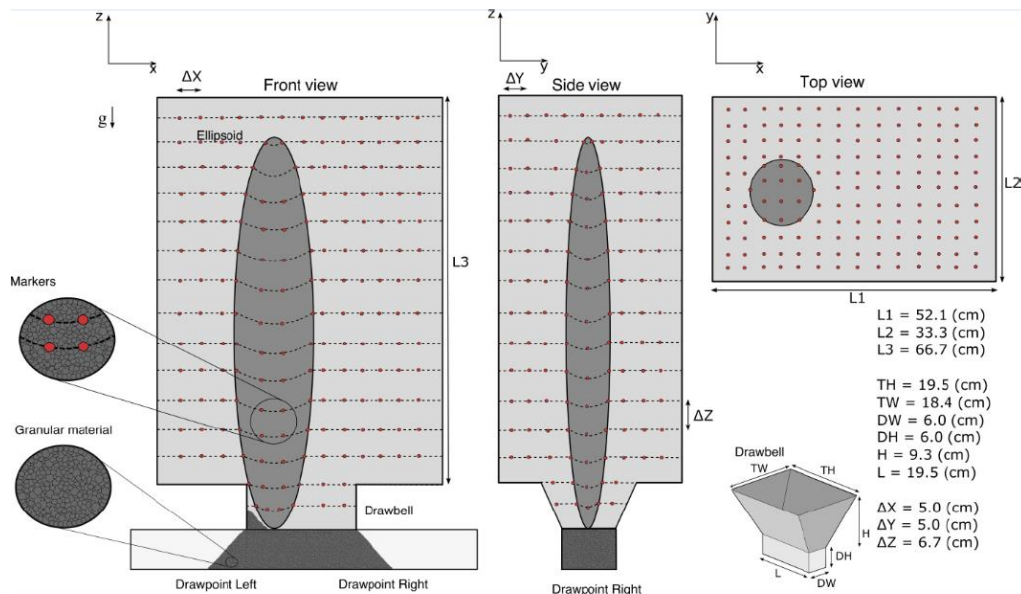


Fig. 3.2-1: Esquema de la columna de mineral con el dimensionamiento del modelo físico utilizado [14].



Las dimensiones de la batea son 7 m de alto y 14.6 m de largo (9.33 cm y 19.50 cm, respectivamente escalado). La dimensión de la galería zanja es de 20.25 m² (36 cm² escalado). Para la zona de extracción se dispone de un equipo LHD de 14 yd³ a una escala de laboratorio de 2.52x10⁻⁵ m³, accionado eléctricamente.

3.2.1 Factores de similitud

3.2.1.1 Granulometría utilizada

La granulometría del modelo físico está compuesta por material particulado grueso de hasta 25.4 mm, material fino menor a 0.15 mm y de ultrafino que está bajo los 0.075 mm de diámetro. El tamaño de partículas que más se repite es 9.5 mm y de 1.18 mm, lo cual se muestra en la curva granulométrica presente en fig. 4.3-3.

3.2.1.2 Fuerzas presentes en el flujo granular

La fuerza predominante dentro de este modelo es la gravitatoria, debido a que gran parte del material presente es mayor a 0.075 mm considerándose un material sin cohesión, donde se tiende a formar una estructura granular estable sin que exista una fuerza adhesiva entre partículas. En el caso del porcentaje restante del material particulado, las fuerzas entre partículas tienen un predominio sobre las fuerzas gravitatorias, generando un cambio en el flujo del material, es por esto que las reglas de escalamiento no aplican a todos los flujos granulares y deben ser eventualmente modificadas, dependiendo de las fuerzas dominantes del problema en particular [50]. Una de las fuerzas entre partículas presentes, según estudio realizado [51], determinó que las partículas esféricas con un diámetro de 100 um pueden presentar las fuerzas de Van der Waals. Para esta investigación, las partículas bajo 0.15 mm de tamaño se consideran regidas por estas fuerzas. Dado lo anterior, se concluye que para la experimentación realizada en esta memoria se tiene que el 10.64% del material se verá gobernado por fuerzas entre partículas, mientras que el 89.36% del material granular, presentará un predominio de la fuerza gravitatoria, por lo cual se considera semejante al predominio de fuerzas a escala mina.

3.3 Protocolo experimental

En esta sección se presentarán los diferentes procedimientos usados cotidianamente durante los experimentos, centrándose en los temas de la obtención de datos de los ensayos, tanto de los métodos presenciales como virtuales, ejecutados durante esta investigación.

A continuación, se presenta el modelo utilizado con las unidades que lo componen visualmente.

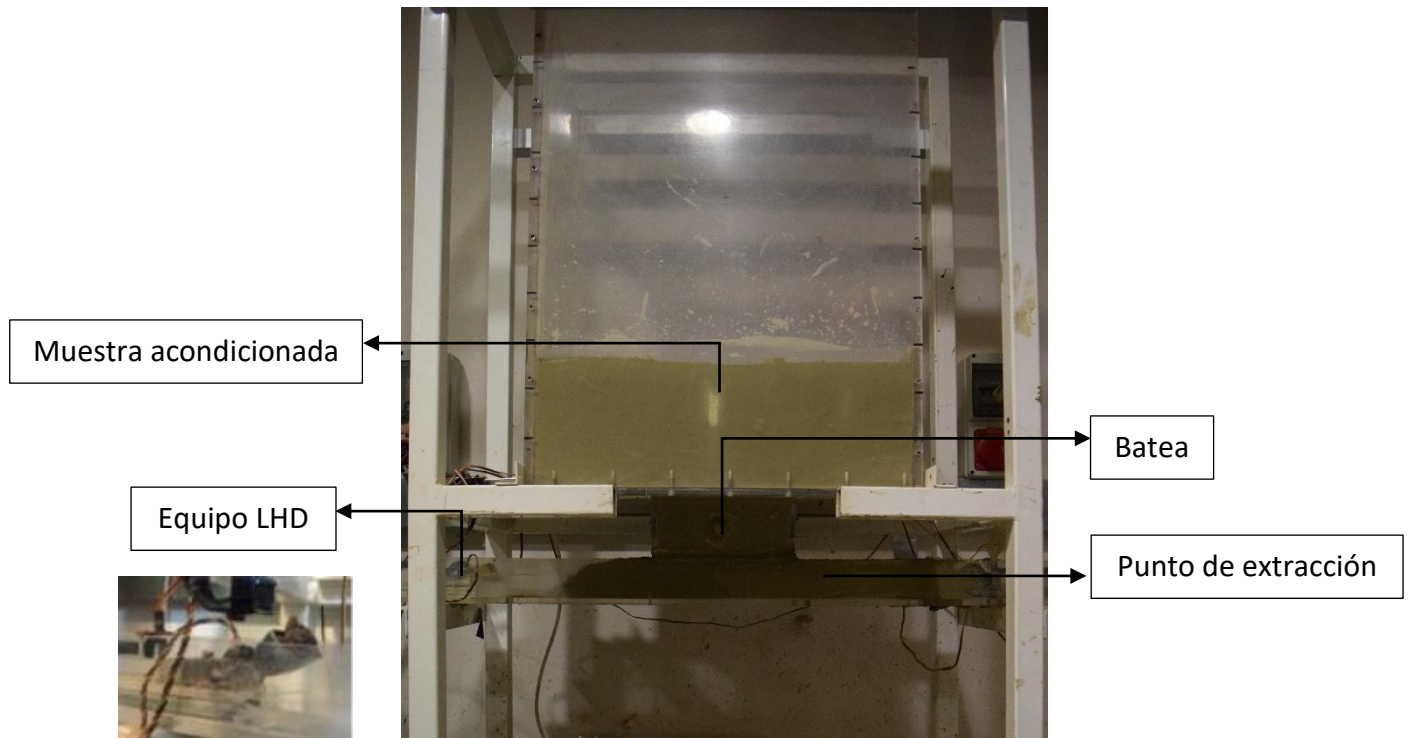


Fig. 3.3-2: Fotografía del modelo físico no confinado utilizado – Escala 1:75.

3.3.1 Preparación de la muestra

Antes de comenzar con los experimentos, el material era secado en un horno para luego ser llevado a tamizaje según la norma, como se explica en el anexo E. Posteriormente, el material secado y tamizado, era segregado según la curva granulométrica presentada en la sección de “Caracterización del material”. Este era llevado a un divisor de muestras rotatorio, para luego ser agrupados en baldes para su traslado, dada la cantidad de material usado (detallándose más adelante).

Según el experimento, se usa una humedad entre 16% a 26%, el porcentaje de humedad necesario se definía en los litros de agua que debían ser añadidos a cada balde, para la cantidad de kilogramos de cada recipiente; estos eran homogeneizados manual e independientemente, para luego, ser depositados cuidadosamente en el modelo físico, como lo muestra la siguiente figura. La porción del material experimental asegura una extracción sin efectos por sobrecarga para la generación de evento de agua-barro.

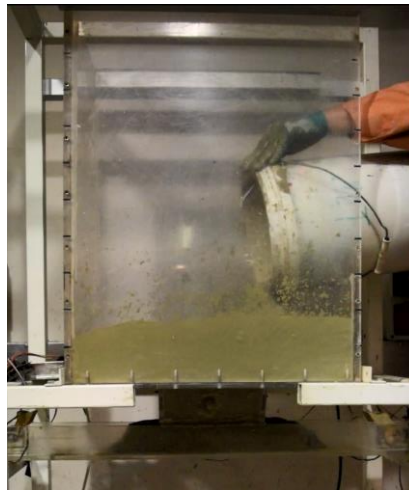


Fig. 3.3-3: Imagen del cargamento del modelo físico con la muestra, realizado en el experimento 6.

Una vez finalizado cada experimento, se realizaba el desmontaje de la muestra desde el modelo físico a los baldes, con el propósito de limpiar el área de trabajo. Repitiendo el ciclo de preparación de muestra, para comenzar con el siguiente experimento.

3.3.2 Experimentos realizados

Antes de comenzar cada experimento, se verifica que las herramientas de laboratorio estén dispuestas y operativas, por ejemplo, instrumento para descolgar, software para telecomandar el LHD (vía red y/o internet), ficha usada para anotar la información, LHD (tanto mecánica como electrónicamente), balanza de precisión para registrar las masas, entre otros.

El LHD, presentado en la figura siguiente, tenía una interfaz con opciones de trabajo a diferentes velocidades (alta, media y baja); botones de on/off, para pausarlo en cualquier instante que fuese necesario; un modo vibracional de la pala, para maniobrar la adherencia del material al cargar; y un botón de levante para adelantar la carga, por si estaba más próxima a la pala.



Fig. 3.3-4: Imagen del LHD, antes de comenzar un nuevo experimento.

Una vez montado el modelo físico y todo preparado, se comenzaban los experimentos registrándose manualmente la información, como el número de la extracción, la masa húmeda, eventos y comentarios/observaciones.

Tras cada extracción aislada del LHD, se iba anotando el peso de la baldada en la balanza de precisión, lo que una vez cumplida las condiciones operativas para dar por finalizado el experimento, se terminaba la actividad investigativa del día.

Durante algunos experimentos se presentaron colgaduras, las cuales eran tratadas con intervención del experimentador para su descuelgue. En los eventos de agua-barro, se dejaban fluir hasta la extensión que alcanzase, registrándose los de larga y corta extensión. Entendiéndose que, los casos de larga extensión eran todos aquellos que llegaban hasta el balde dispuesto bajo el modelo, y los de corta extensión, una vez estabilizados, eran aquellos a los que se les midió su distanciamiento lineal.

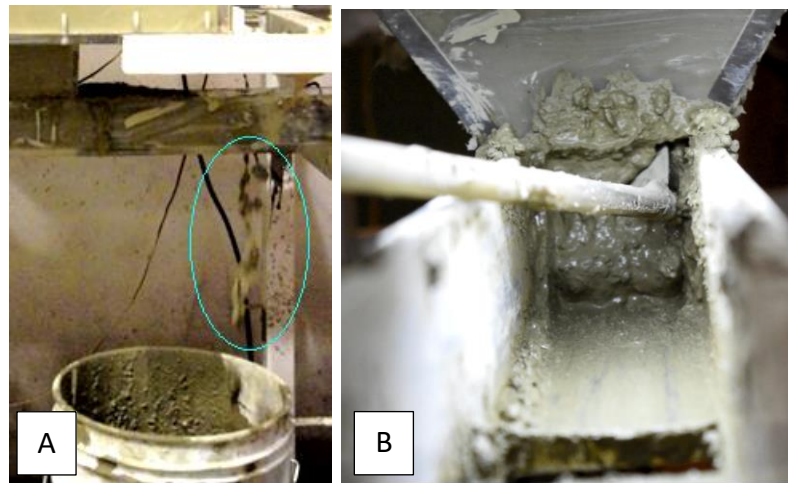


Fig. 3.3-5: Imágenes de (A) un evento de agua-barro de larga extensión escurriendo hacia el balde, destacado por la circunferencia turquesa, durante el experimento 4, (B) un descuelgue manual, realizado en el experimento 9.

Dada la consistencia del material, este se adhería al techo de la zanja o base de la batea, haciendo necesario aplicar ciertas maniobras con el LHD para lograr su “descuelgue”, sin embargo, para esta investigación se definió como colgadura cuando se necesita descuelgue con ayuda del experimentador en forma manual, por lo que estas maniobras solo se consideraban como extracciones normales laboriosas.

3.3.3 Sistema de análisis de imágenes

Durante los experimentos se registraron dos vistas, captando información en simultáneo, como se muestra en la fig. 3.3-7 de esta sección.

La metodología usada, considera una base de datos fotográficos y de grabación mientras se desarrollaba la experimentación. Cuando ocurría algún evento considerable se realizaba una medición con regla para establecer la extensión de éste (Fig. 3.3-6).



Fig. 3.3-6: Imagen de la medición de un evento de corta extensión de agua-barro, durante en el experimento 9.

Dada la consistencia del material trabajado, un análisis del estado del flujo en el punto de extracción, la batea o cualquier otra sección del modelo físico, era improbable con alguna herramienta profesional, producto a que el material se adhería al acrílico imposibilitando la visibilidad interior, por lo que cuesta identificar cómo se estructuran los tamaños de partículas que lo componen, tanto para eventos de agua-barro como para las colgaduras.

Durante el estudio se utilizó el tiempo registrado por las grabaciones, en los diferentes ensayos; en el caso de los eventos de agua-barro, cuando estos ocurrían, se observaba el tiempo desde que comenzaba a producirse hasta que llegaba a un equilibrio, y ahí se terminaba el cronómetro, mientras que, cuando los eventos excedían la delimitación (línea azul) presentada en la figura siguiente, se consideraban eventos de larga extensión y se detenía el tiempo, dado que posterior a esta no se tiene información de la extensión del evento (solo se cuenta con el largo de la zanja).

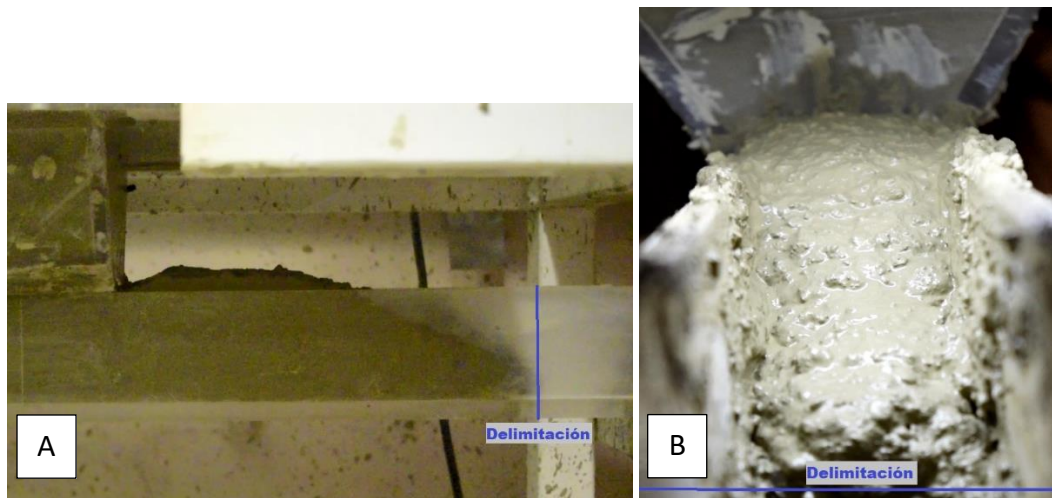


Fig. 3.3-7: Imágenes de las vistas usadas durante los registros de video, extraída del experimento 9, con la delimitación de la zanja.

Como se puede apreciar de los registros fotográficos, una de las limitaciones del modelo, se encuentra cuando ocurren estos eventos de larga extensión, dado que exceden el techo de la zanja, lo que sería imposible si se tratase de una mina subterránea. Al presentarse una colgadura u otro evento que requiera intervención del experimentador en este sector, si se dispusiera de un techo de acrílico para la zanja, complicaría considerablemente el acceso a ésta para resolverlo.

3.4 Resumen metodológico del trabajo

Para el cumplimiento de los objetivos del proyecto de memoria y con el propósito de corroborar o refutar la hipótesis planteada, se llevan a cabo experimentos con una muestra húmeda, siendo extraída en un modelo físico por un punto aislado, cuyos resultados abordarán los aspectos que no han sido reportados en la literatura respecto a la comprensión de los mecanismos de eventos de agua-barro.

Dentro de un estudio, hay que conocer la muestra con la que se trabaja, las variables y cómo influyen dentro del desarrollo del experimento. Por lo que se aplican diversos ensayos geotécnicos para conocer las facultades y características del material seco a trabajar. Además, se realiza una estandarización metodológica previamente a la experimentación. Todo con una base científica de investigación práctica y teórica del tema en estudio.

Las variables formadoras de estos eventos y con las que se trabaja, son: (i) humedad, (ii) presencia de finos, (iii) perturbación y (iv) punto de descarga. Para abastecer la comprensión de los



mecanismos de formación de los eventos de agua-barro, hay que establecer un rango de humedad con la que se trabajará, según ensayos de consistencia del material.

Teniendo el rango de humedad y material caracterizado, se realizan los experimentos tomando mediciones de la masa de las baldadas productivas, realizando comentarios y observaciones que puedan evidenciar peculiaridades o aspectos de interés.

Para realizar los experimentos, hay que preparar el material, según una curva granulométrica definida por el experimentador, homogeneizarlo y posteriormente mezclar con la humedad que corresponda. Adicionalmente, hay herramientas dentro de la experimentación que hay que verificar cada vez que se inicia la actividad, como las condiciones del LHD, el sistema digital de su manejo y componentes electrónicos para su movilidad. Existen más unidades para la preparación de la muestra, pero éstas son las trascendentales.

El análisis de los resultados obtenidos busca cumplir con los objetivos dispuestos, contempla desarrollo de la información medida, análisis de producción, de colgaduras, de eventos de agua-barro y las características percibidas de estos eventos.



4 Caracterización del material

Para conocer las cualidades de la muestra con la que se trabaja, se requiere hacer un estudio mediante ensayos de laboratorio de las propiedades geotécnicas que posee. El mineral dispuesto proviene de una mina chilena, la cual clasificó el material como saturado, en puntos de extracción de la mina. Estas muestras presentan diferentes cualidades, la primera que se aprecia es visual, una es de tono café (denominada muestra de material A) mientras que la otra es grisácea (denominada muestra de material B). Esta propiedad se puede atribuir a los respectivos niveles de oxidación del material.

4.1 Asentamiento y fluidez

El asentamiento se realiza al colapsar una muestra moldeada. El colapso se efectúa bajo su propio peso, ya que no se aplican esfuerzos adicionales en el cono del material, este ensayo se centra en la consistencia o fluidez del material.

Se realizó inicialmente un ensayo base con la muestra del material A, para practicar la metodología del experimento, posteriormente se repitió con la misma muestra de material y luego con la muestra de material B, ambas con replicado, para visualizar el comportamiento de los dos materiales, y ver la posibilidad de mezclarlos para la experimentación.

Para el caso de prueba, se midió el asentamiento de la muestra con humedades desde 8% hasta 24%, con un intervalo de 2%, por referencia de estudios realizados con la misma muestra [14]. Sin embargo, la muestra con humedades de 8% a 12% no mostraba las características de viscosidad y/o cohesión que se necesitaban para esta investigación. Para el siguiente experimento con la muestra de material A, se comenzó con una humedad de 16% (humedad con asentamiento cercano a 0) terminando en 28%, con intervalos de 2%. Para el primer experimento con la muestra de material B, se inició en 12% (se decide una humedad menor en esta muestra para no generar incertidumbre) terminando en 28%, con intervalo de 2%. Las réplicas, se hicieron para validar la información de las características del comportamiento, manteniendo las mediciones de humedades para sus respectivas réplicas (16%-28% la muestra de material A y 12%-28% la muestra de material B, ambas con un intervalo de 2%), las imágenes de las mediciones se encuentran en la sección de anexo 8.6.1.

A partir de los resultados de los ensayos de asentamiento (en los que se utilizó un cono de Abrams y se muestran en la sección de anexo 8.6.1), y las categorías de la Tabla 4.1-1 (Tabla mostrada con las



consistencias según el cono de Abrams), se construye una gráfica de asentamiento según el porcentaje de humedad.

Tabla 4.1-1: Clase de consistencia según el rango de asentamiento.

Consistencia	Rango de Asentamiento [cm]
Seco	[0-4.5]
Plástico	[4.5-9.5]
Blando	[9.5-15.5]
Fluido	[>15.5]

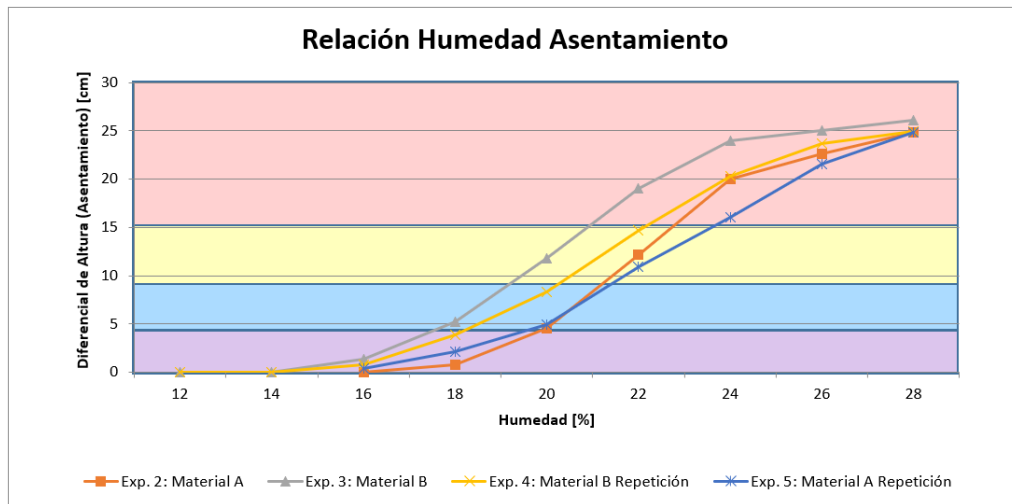


Fig. 4.1-1: Gráfico con los datos de asentamiento de las muestras de material A y B, con sus duplicados, para los diferentes porcentajes de humedad ensayados.

Del gráfico anterior se puede observar una tendencia del asentamiento relacionado al porcentaje de humedad para ambas muestras. Los cambios de consistencias difieren bastante entre las muestras, mientras una exhibe un comportamiento plástico (20% de humedad; muestra material A), la otra está en la sección de blando (con los mismos 20% de humedad; muestra material B).

Se decide trabajar exclusivamente con la muestra del material A en el modelo físico, dado que para las respectivas humedades están en el mismo rango de consistencia, además, es la muestra con mayor cantidad de material disponible. Se decidió realizar los experimentos con humedades de 16% - 26%, así para la muestra de material A parte con un estricto 0 de asentamiento y termina corroborando el estado fluido con un segundo punto en 26%.

4.2 Resistencia al corte

Para este ensayo se utilizaron 2 kg de cada muestra de material (A y B) seco y homogeneizado, con la intención de conocer las características de las muestras, para seleccionar la más adecuada. Se enviaron a las instalaciones del laboratorio de mecánica de rocas, departamento de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad de Concepción, los resultados se encuentran en la sección de anexo 8.6.2. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de este ensayo:

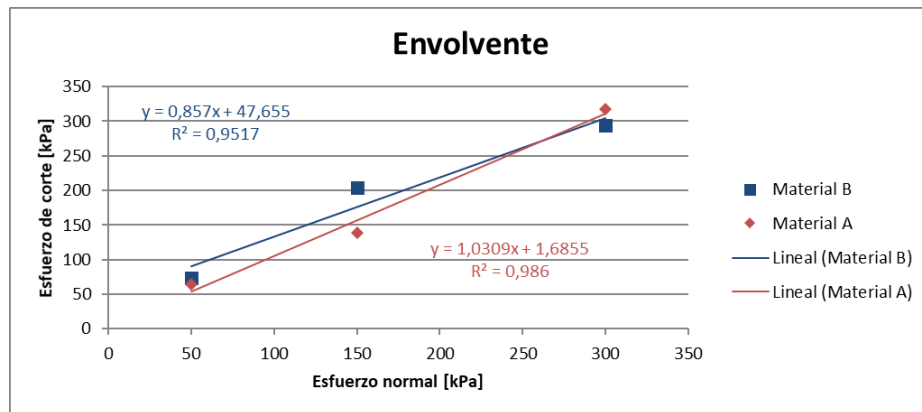


Fig. 4.2-2: Gráfico de los esfuerzos del ensayo de corte de las muestras de material A y B, para las cargas con 5 Kg, 15 Kg y 30 Kg de masa vertical, a una velocidad de corte de 2 mm/min.

Por teoría, se sabe que las curvas de esta gráfica son lineales, dado que la estructura de la recta debiera ser la siguiente ecuación, correspondiente al criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante [kpa]

c : Cohesión del material [Kpa]

σ_n : Esfuerzo normal [Kpa]

ϕ : Ángulo de fricción interna [°]

Por lo que se obtienen los siguientes parámetros para las diferentes muestras de material:

Tabla 4.2-2: Resultados extraídos de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.

	Material B	Material A
Cohesión del material [Kpa]	47,66	1,69
Ángulo de fricción [°]	40,60	45,87

En física la cohesión se refiere a la tensión, mientras que en mecánica de suelos representa la resistencia al cortante, producida por la adherencia entre las partículas. Los suelos no cohesivos, se

reflejan con un valor de “c” igual a cero, son suelos eminentemente granulares, en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material adherente. Por lo que se puede ver de los resultados anteriores, ambas muestras son cohesivas, sin embargo, para la muestra de material A es menor, por lo que se seleccionó este material como el designado para realizar los ensayos de laboratorio, con el objetivo de minimizar la variabilidad no controlable.

El ángulo de fricción depende de varios factores [52] algunos de los más importantes son: tamaño de los granos, forma de los granos, distribución de los tamaños de granos y densidad. Por lo que es bastante sensible a los cambios en la granulometría que pudieran ocurrir entre los experimentos.

4.3 Granulometría

Para los experimentos se trabajó con 60 Kg de la muestra del material A, aplicando la norma de tamizaje explicada en el anexo E, la cual permite conocer distribuciones de tamaño desde 300 a 0.075 milímetros. Los experimentos se realizaron con la siguiente distribución granulométrica:

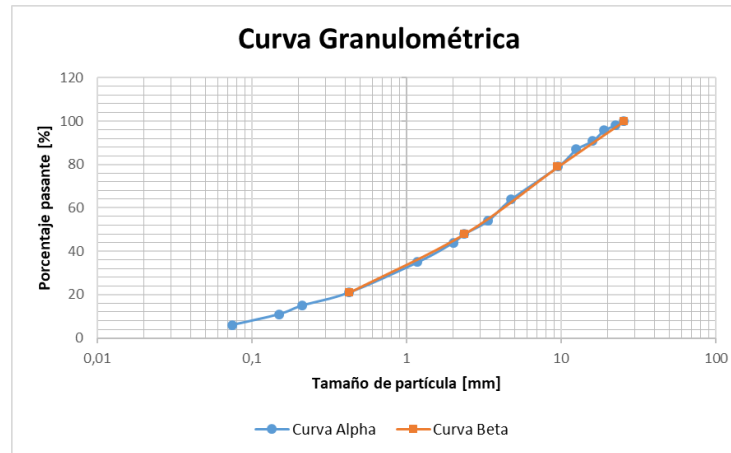


Fig. 4.3-3: Gráfico de la curva granulométrica usada, curva alpha se realiza con 15 puntos de la curva, mientras que la curva beta con 4 puntos.

Para establecer los parámetros metodológicos de experimentación, se realizó un experimento base, en el cual se estableció el descarte del material sobre 1”, la muestra se caracteriza principalmente con un d80 de 9.6 mm y d50 de 3.1 mm, llenando el 33.33% del modelo aproximadamente con la muestra, a una humedad definida según la experimentación que corresponda (de 16% a 26% de humedad).



Para optimizar el tiempo en la preparación del material, en algunos ensayos se usaron menos puntos de la curva granulométrica, si bien, es la misma curva, a modo de referenciación, se denominan Curva Alpha (curva con 15 puntos) y Curva Beta (curva con 4 puntos).

El diámetro o tamaño por debajo del cual queda el respectivo porcentaje del suelo, en peso, se describe como $D_{\%}$. Utilizando los indicadores de distribución granulométrica para D_{10} , D_{30} y D_{60} , se estudia la gradación del material usado durante los experimentos. Aplicando las siguientes ecuaciones:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} (\text{Coef. de uniformidad}) \quad y \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} (\text{Coef. de curvatura})$$

Tabla 4.3-3: Indicadores de distribución granulométrica.

D_{10} [mm]	D_{30} [mm]	D_{60} [mm]	C_u	C_c
0,14	0,81	4,13	30,52	1,17

El material trabajado no presenta una granulometría uniforme; es un suelo bien graduado, tiene distintos tamaños de partículas, por lo que los vacíos son menores.

4.4 Pérdida de humedad natural

Para determinar la pérdida de humedad porcentual del material, se tomaron 3 vasos con 225 gr aproximadamente de muestra secada a 100°C. A cada muestra se le añadió un porcentaje diferente de agua, para representar un 16%, 20% y 24% de humedad. Las muestras se situaron colindante a la parte inferior del modelo físico, para realizar una simulación más adecuada. Cabe recordar que al igual que los vasos, la parte superior del modelo es abierta y expuesta al ambiente. Se registró la masa de las muestras cada una hora, por dos días, durante el horario laboral (por lo que se realizaron 8 mediciones diarias), en la sección de anexo 8.6.3 se puede apreciar la información recopilada más detallada.

A continuación, se muestra la pérdida de humedad acumulada por ambiente, en el tiempo:

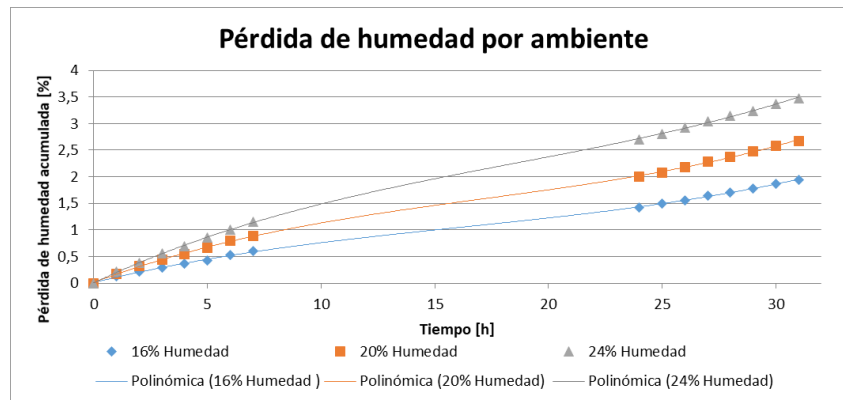


Fig. 4.4-4: Gráfico porcentual de la pérdida de humedad acumulada por ambiente, para muestras de barro con 16%, 20% y 24% de humedad, durante dos días (31 horas de toma de datos).

Con lo anterior se puede deducir que, la muestra en el transcurso de 31 horas lo máximo que puede perder de humedad natural por ambiente, sería de un 3,5% para un 24% de humedad inicial, considerando que la única pérdida de masa fuera por la evaporación del agua. Con esta información se podría operar dos días continuos en el modelo físico, sin embargo, para un experimento de mayor duración, podría presentar pérdidas significativas de humedad, como lo muestra la tendencia de la gráfica anterior.

4.5 Densidad, gravedad específica y absorción

Se utilizan los métodos de laboratorio, explicados en el anexo E, para trabajar separadamente tamaños bajo y sobre el tamiz número cuatro (4,75 milímetros). A continuación, se presenta la información de tres muestras de masa del material A.

Tabla 4.5-4: Datos para muestras sobre 4.75 mm, medidos en el laboratorio.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa Seca [gr]	573,1	574,7	596,2
Masa Saturada Seca [gr]	602,51	602,41	622,21
Masa Sumergida [gr]	377,81	379,48	392,76

Se presentan los resultados según los datos obtenidos, para la densidad, densidad relativa (gravedad específica), aparente y absorción, las nomenclaturas utilizadas son GS (gravedad específica),

OD (secado en horno) y SSD (saturado superficialmente seco), el detalle del cálculo de estos parámetros es presentado en la sección de anexo 8.6.4.

Tabla 4.5-5: Datos para muestras bajo 4.75 mm, medidos en el laboratorio.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa OD [gr]	100,1	100,2	100,2
Masa del matraz [gr]	166,5	166,9	167,3
Masa del matraz con muestra [gr]	266,6	267,1	267,5
Masa del matraz con muestra y agua [gr]	759,4	759,3	759,6
Masa del matraz con agua [gr]	694,5	694,5	694,5
Densidad del agua (según temperatura del agua) [gr/cc]	0,99878 (17°C)	0,99878 (17°C)	0,99878 (19°C)

Tabla 4.5-6: Resumen de resultados de densidades, gravedades específicas y absorción del material.

Parámetros de caracterización del material		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Muestra sobre 4.75 mm	GS OD	2,55	2,58	2,60
	GS SSD	2,68	2,70	2,71
	GS	2,93	2,94	2,93
	Absorción de agua [%]	5,13	4,82	4,36
	Densidad OD [gr/cc]*	2,54	2,57	2,59
	Densidad SSD [gr/cc]*	2,67	2,69	2,70
	Densidad [gr/cc]*	2,92	2,93	2,92
Muestra bajo 4.75 mm	Densidad [gr/cc]	2,84	2,83	2,85
	Gravedad específica	2,84	2,83	2,85

*Para obtener la densidad de la muestra sobre 4.75 mm, se utiliza 0,9957 gr/cc como densidad del agua (23°C).

Los resultados para el caso de la muestra sobre 4.75 mm, considerando que provienen del mismo material, presenta una variación significativa, tanto entre las gravedades (no deben diferir más de 0.01) como para los porcentajes de absorción (0.1% máximo). Si bien se sacaron de una muestra con la caracterización utilizada, entre ellas no se estandarizó una granulometría estricta, dada la disponibilidad fraccionada del material, ocasionando la variación entre las muestras. Por el contrario, la metodología utilizada para la muestra bajo 4.75 mm (fig. 4.5-5), exhibe una conducta de poca variabilidad entre la densidad y gravedad específica.



Fig. 4.5-5: Fotografía de un procedimiento del método por picnómetro. Picnómetro con muestra conectado a la bomba de vacío para quitar el aire atrapado.

Con los resultados de la gravedad específica, se puede deducir que, independiente de la variabilidad entre ellas, la muestra no consiste en un material con definición de poroso y/u orgánico (con GS inferior a 2), la muestra tampoco contiene, predominantemente, sustancias pesadas (cuando la muestras es superior a 3).

4.6 Humedad en baldada productiva

Durante los experimentos, en el punto de extracción, la muestra presentó una consistencia variable en el tiempo, característica que puede ir ligada a la consolidación del material [43]. Por lo que se realizó un estudio de la humedad en cada baldada productiva, con el material a 16%, 18% y 20% de humedad. Cada baldada fue masada y secada en horno, para obtener el porcentaje de humedad presente con la ecuación de la sección de anexo F.

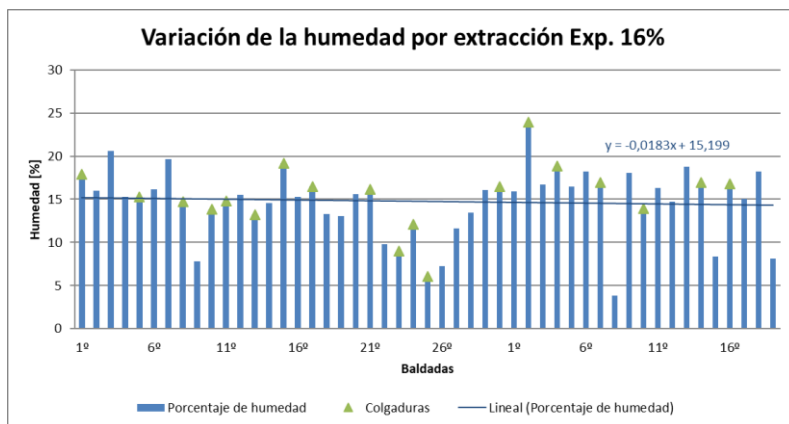


Fig. 4.6-6: Gráfico de distribución porcentual de la humedad para cada extracción, de los experimentos base con 16 % de humedad.

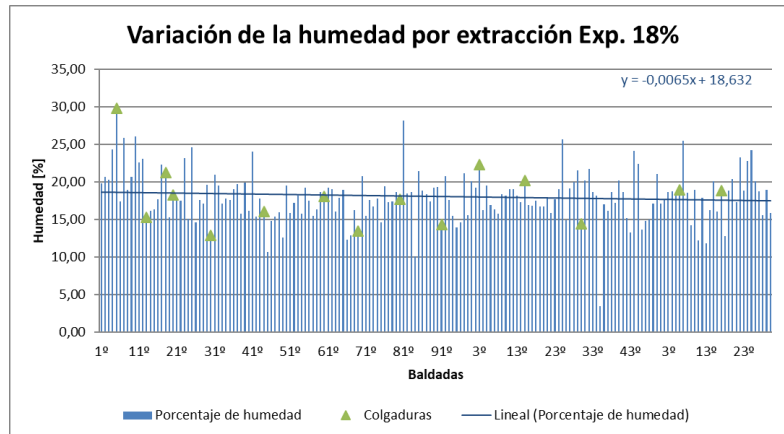


Fig. 4.6-7: Gráfico de distribución porcentual de la humedad para cada extracción, de los experimentos 1 con 18% de humedad.

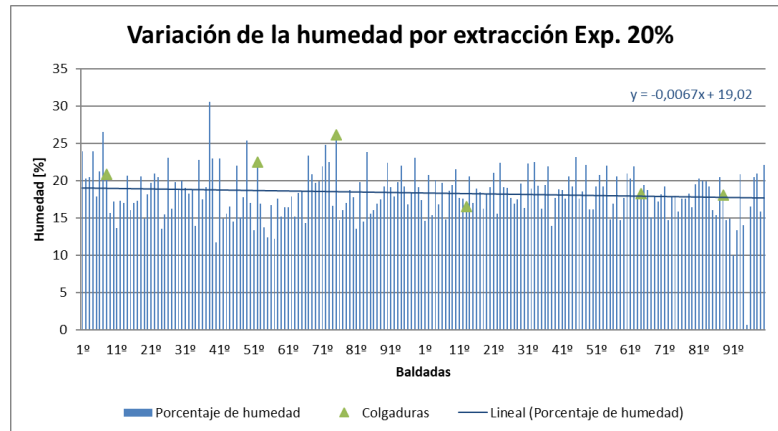


Fig. 4.6-8: Gráfico de distribución porcentual de la humedad para cada extracción, de los experimentos 2 con 20% de humedad.

Las baldadas de los gráficos siguen la serie correspondiente a la extracción diaria, cada vez que parte en 1º, implica que la medición se realizaba al comienzo del día laboral, el registro es cronológico, y el máximo de días (3 días seguidos) se visualiza para el 18% de humedad. Al comienzo de cada día laboral se le añadió el porcentaje de agua por la parte superior del modelo físico, que podría haber perdido durante la noche, según el estudio de pérdida de humedad por ambiente; generando una acumulación de agua que posteriormente se iba filtrando a través del material. Cabe destacar que el modelo, a diferencia del estudio de pérdida de humedad, presenta filtraciones durante la extracción, tanto por el punto activo como por el inactivo.

Se aprecian extracciones con humedades excesivamente altas y otras bastante reducidas, las cuales visualmente no se podrían atribuir a ningún evento de colgadura.



5 Resultados experimentales

Esta sección expondrá los resultados conseguidos de los experimentos realizados, los cuales consisten en la extracción del material A previamente caracterizado por la curva granulométrica de la Fig. 4.3-3. Se usan 66 kg de material y adicionalmente agua, para que la muestra fluctúe entre 16% y 26% de humedad, los cuales son extraídos por un punto aislado. Se muestran los resultados de las mediciones de masas según baldadas y parámetros relacionados a cada experimento. El detalle de la información y su visualización está en el anexo G.

5.1 Caso base: experimentos con 16% de humedad

Este experimento se ejecutó con 16% de humedad, utilizando la curva alpha para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). El trabajo fue realizado en dos días, por lo que las secciones experimentales se dividen como base 1 y base 2. La diferencia o pérdida de agua entre un día y otro, le fue añadida en la parte superior del modelo (aproximadamente un 2%). A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo los parámetros generales de ambas mediciones:

Tabla 5.1-1: Parámetros generales de los experimentos base 1 y base 2.

Parámetros de medición	Experimento base 1	Experimento base 2
Porcentaje de Humedad [%]	16	16
N° de extracciones	30	19
N° de colgaduras	13	6
Masa total extraída [kg]	1,22	0,74
Porcentaje de extracción [%]	1,84	1,13
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	40,50 ± 27,97	39,18 ± 18,64
Eventos de barro	0	0

Ambos experimentos se desarrollaron con una alta complejidad, dada su frecuencia de colgaduras, esto debido al sobre tamaño existente en la muestra, con material sobre 2,54 cm (1”), por lo que para futuros experimentos se deciden excluir de la muestra, promoviendo una extracción continua. A continuación, se presenta una de las colgaduras:

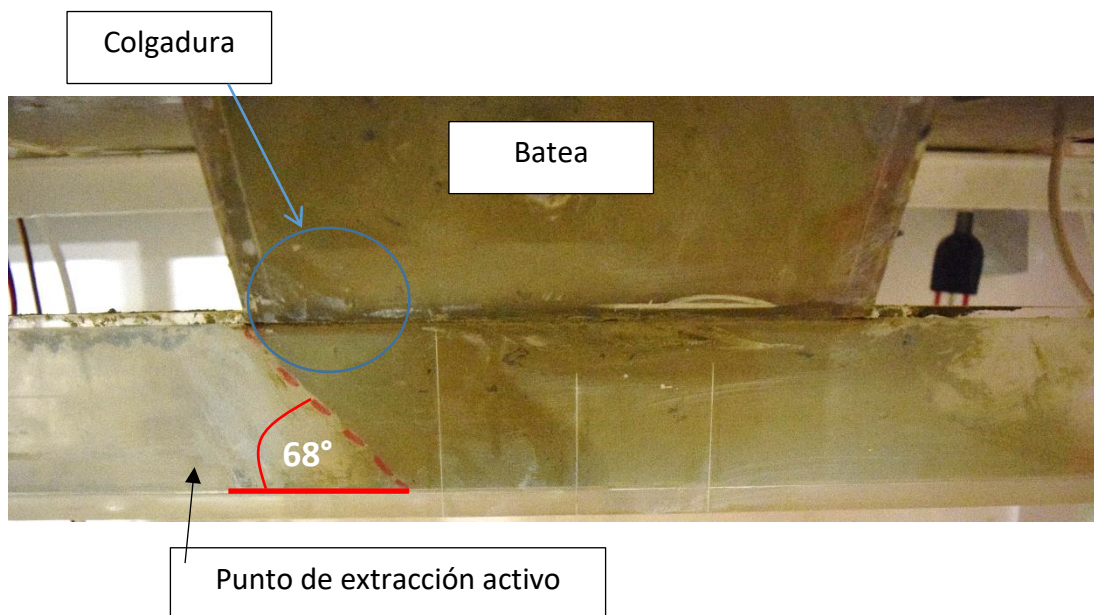


Fig. 5.1-1: Imagen de una colgadura generada bajo la batea, a causa del sobre tamaño presente en la muestra (el ángulo de reposo del material fue de -68° , el cual está delimitado por la línea roja punteada).

Al adicionar el agua faltante al experimento base 2, se ocasionó una zona inundada, la cual fue extraída por el punto que se operaba y filtrada por el punto intacto. A continuación, se muestran ambos casos (Fig.5.1-2):

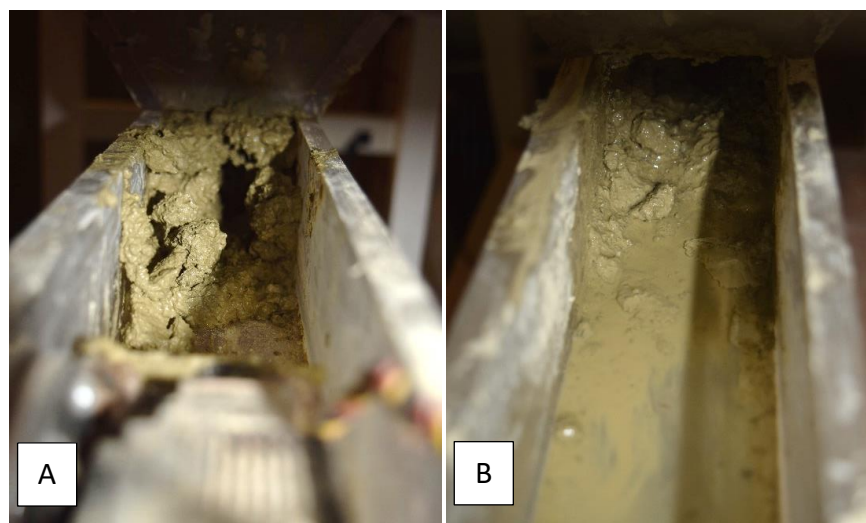


Fig. 5.1-2: Imágenes del punto en operación (A) y del punto intacto con filtración (B), para el experimento base 2.

El experimento se dio por terminado cuando el LHD tuvo que caer en mantención por un sobre tamaño, estableciéndose así, como criterio para finalizar los experimentos, lo siguiente:



- Se realizarán máximo 200 extracciones.
- El experimento finaliza cuando acaba la jornada del día.
- El experimento puede terminarse anticipadamente por algún contratiempo.

5.2 Experimento 1, 1.2 y 1.3: experimentos con 18% de humedad

Este experimento se ejecutó con 18% de humedad, utilizando la curva alpha para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). El trabajo fue realizado en tres días consecutivos, por lo que las secciones experimentales se dividen como 1, 1.2 y 1.3, la diferencia o pérdida de agua entre un día y otro, le fue añadida en la parte superior del modelo (aproximadamente un 2%). A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo los parámetros generales de las tres mediciones:

Tabla 5.2-2: Parámetros generales de los experimentos 1, 1.2 y 1.3.

Parámetros de medición	Experimento 1	Experimento 1.2	Experimento 1.3
Porcentaje de Humedad [%]	18	18	18
Nº de extracciones	98	50	30
Nº de colgaduras	10	3	2
Masa total extraída [kg]	4,83	2,79	2,14
Porcentaje de extracción [%]	7,33	4,23	3,24
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	49,34 ± 29,41	55,79 ± 26,89	71,21 ± 45,53
Eventos de barro	0	0	0

En el anexo G, la curva correspondiente a la variación de la masa por extracción exp. 1.3, muestra una gran variabilidad de las baldadas productivas. En el caso de los máximos, con extracciones robustas, se ocasionan por las características semi plásticas del material (adherencia con la misma pala) y la poca prolijidad con el manejo del LHD (por intermitencias del software). Dada estas condiciones, la pala tuvo algunos ingresos excesivos en el material, extrayendo muestra por ambos lados.

Al añadir el agua correspondiente (para mantener su 18% de humedad), se esperaba ver algún evento de agua-barro. Sin embargo, solo se presentaron algunas colgaduras como la siguiente:

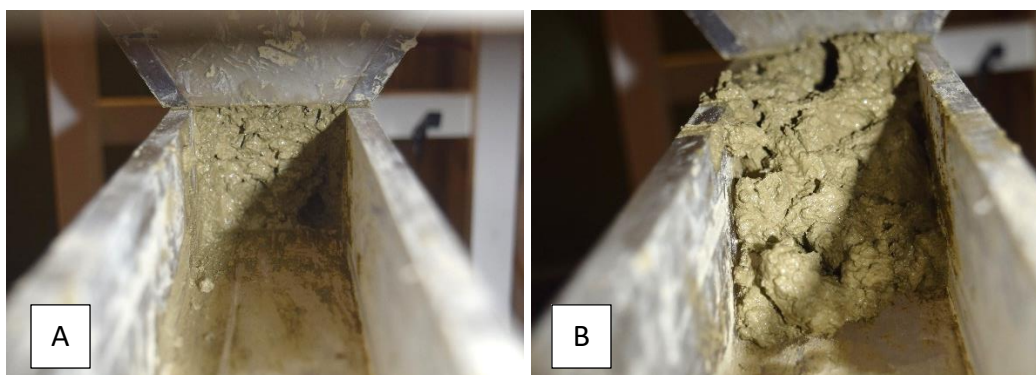


Fig. 5.2-3: Imágenes del punto de operación, colgado en el techo de la galería zanja (A), mientras que a la derecha el mismo punto descolgado (B); para el experimento 1, el tipo de descuelgue fue manual.

5.3 Experimento 2, 2.1, 9, 10 y 11: experimentos con 20% de humedad

Los experimentos 2, 2.1 y 11 se ejecutaron con 20% de humedad, utilizando la curva alpha para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). El trabajo de los experimentos 2 y 2.1 fue realizado en dos días consecutivos, la diferencia o pérdida de agua entre un día y otro, le fue añadida en la parte superior del modelo. El experimento 11 es una réplica de los experimentos mencionados anteriormente y se realizó meses después. Si bien tienen las mismas condiciones, en este caso el material fluyó por el punto opuesto de la extracción, hasta llegar a una estabilidad natural. A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo parámetros generales de las mediciones:

Tabla 5.3-3: Parámetros generales de los experimentos 2, 2.1 y 11.

Parámetros de medición	Experimento 2	Experimento 2.1	Experimento 11
Porcentaje de Humedad [%]	20	20	20
N° de extracciones	100	100	200
N° de colgaduras	3	3	0
Masa total extraída [kg]	5,18	4,97	11,69
Porcentaje de extracción [%]	7,85	7,53	17,71
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	51,79 ± 23,53	49,69 ± 14,95	58,45 ± 12,06
Eventos de barro	0	0	3

El experimento 2.1 como fue la continuación del 2, se le añadió el agua faltante para mantener su 20% de humedad; para las colgaduras correspondientes a esta sección, dada las condiciones del material, hubo descuelgues externos, es decir intervenidos por experimentador. A continuación, se presenta el antes y el después de una colgadura (Fig. 5.3-4):

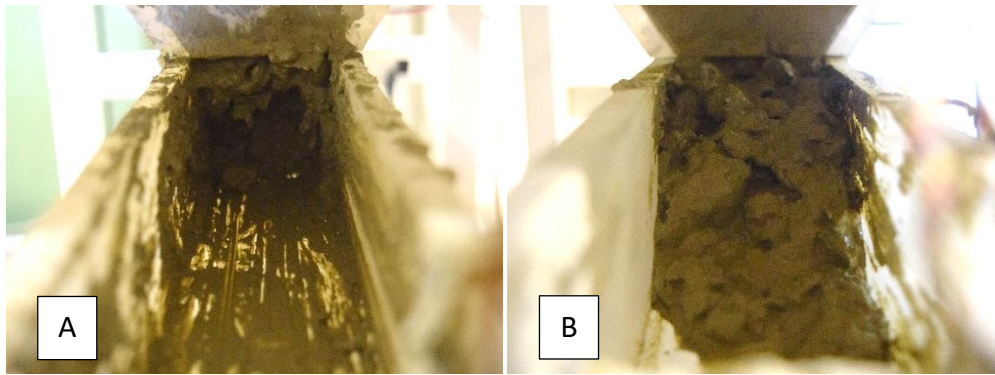


Fig. 5.3-4: Imágenes del punto de operación, colgado en el techo de la galería zanja (A), mientras que a la derecha el mismo punto descolgado (B); para el experimento 2, el tipo de descuelgue fue manual.

Durante el experimento 11 se observó en su mayoría un flujo continuo, lo que se ve reflejado en la nula cantidad de colgaduras. Presentó varios eventos de agua-barro, de los cuales todos fueron lentos de corta extensión lineal, sin llegar al pique. A continuación, se presentan alguno de los casos:

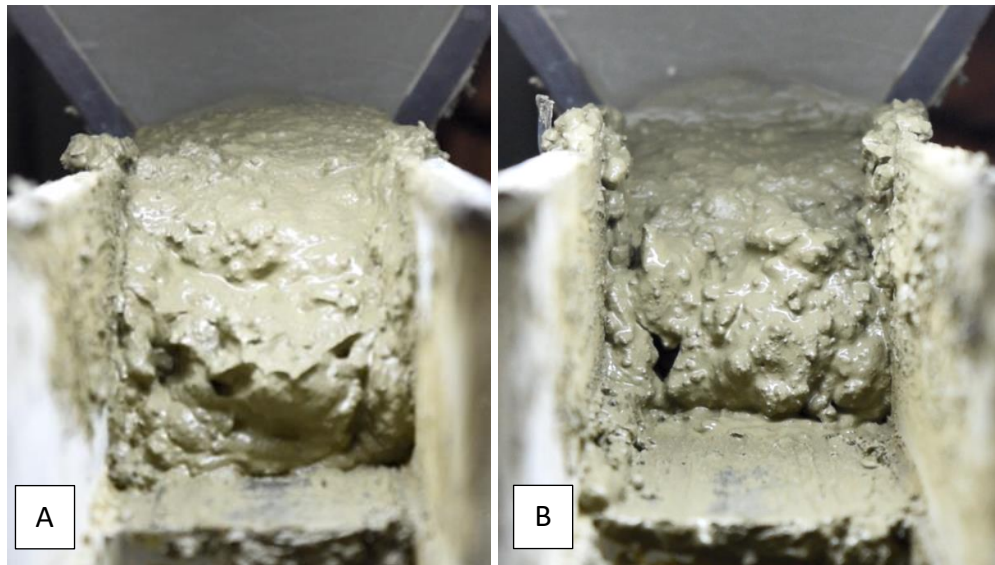


Fig. 5.3-5: Imágenes de los eventos considerados como más importantes cronológicamente (los eventos con mayor desplazamiento lineal), ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 11 se relaciona con alguna colgadura previa.

Los experimentos 9 y 10 fueron una “réplica” de los experimentos 2 y 2.1, utilizando la curva beta para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). Para estos casos inicialmente, el material fluyó a través de la galería, por lo que se tuvo que inducir la estabilidad del material (preparado y homogeneizado). Estos experimentos fueron realizados independientemente en su preparación y experimentación, es

decir, no hubo ninguna adición de humedad, ni continuación experimental entre ellos. A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo parámetros generales de las mediciones:

Tabla 5.3-4: Parámetros generales de los experimentos 9 y 10.

Parámetros de medición	Experimento 9	Experimento 10
Porcentaje de Humedad [%]	20	20
N° de extracciones	200	122
N° de colgaduras	1	2
Masa total extraída [kg]	13,31	7,30
Porcentaje de extracción [%]	20,16	11,06
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	66,53 ± 16,12	59,81 ± 14,19
Eventos de barro	11	7

El experimento 9 presentó varios eventos de agua-barro, los cuales fueron lentos y no llegaron hasta el pique, en su mayoría bastante cortos (Fig. 5.3-6).

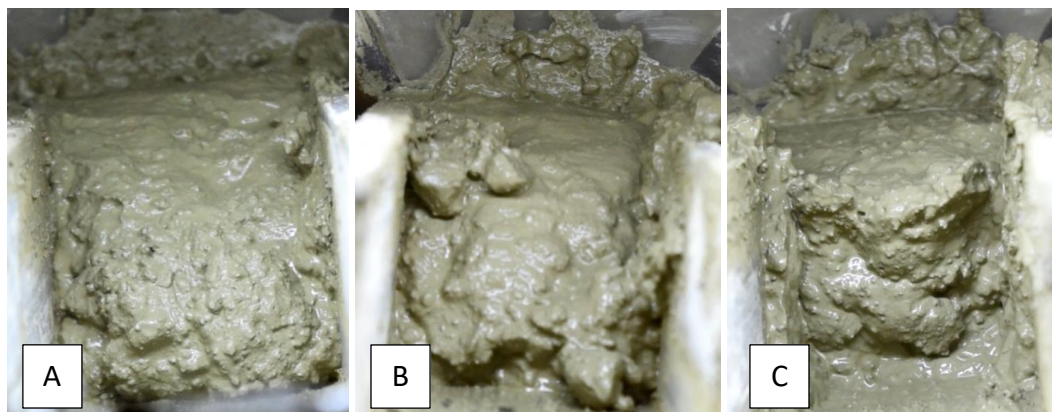


Fig. 5.3-6: Imágenes de los eventos más importantes cronológicamente, ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 9, se relaciona con alguna colgadura previa.

El experimento 10 presentó varios eventos de agua-barro, de los cuales todos fueron lentos, sin embargo, hubieron de larga y corta extensión lineal a través de la galería. A continuación, se presenta alguno de los casos (Fig. 5.3-7):

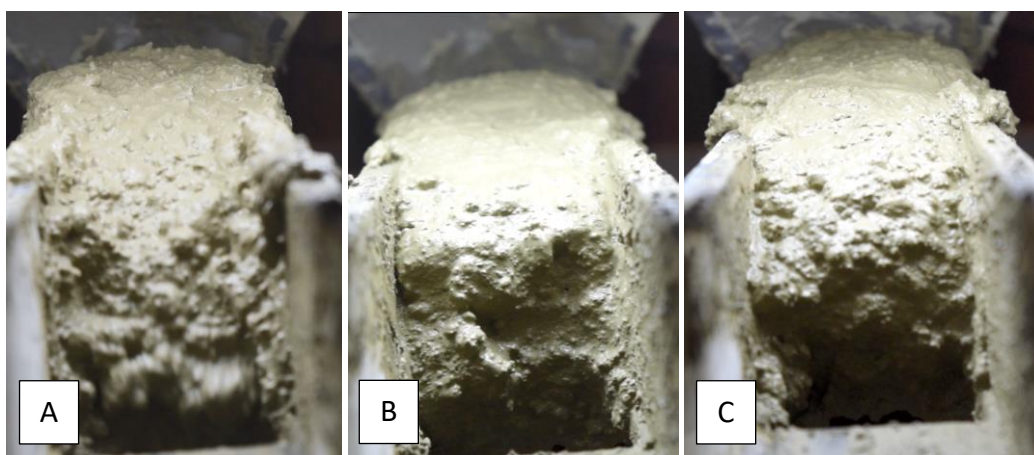


Fig. 5.3-7: Imágenes de los eventos considerados como más importantes cronológicamente (los eventos con mayor desplazamiento lineal), ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 10 se relaciona con alguna colgadura previa.

Dado los resultados se puede apreciar como la humedad afecta el número de colgaduras, y estos eventos de agua-barro, potencian el flujo del material, favoreciendo la extracción; se puede establecer que desde un 20% de humedad para las condiciones experimentales se originan los eventos de agua-barro.

5.4 Experimento 8: experimento con 21% de humedad

Este experimento se ejecutó con 21% de humedad; para hallar el valor crítico de humedad donde se presentan eventos violentos de agua-barro. Al igual que con varios experimentos previos, para este caso, se tuvo que inducir la estabilidad del material (preparado y homogeneizado). La curva granulométrica con la que se trabajó fue la beta (Fig. 4.3-3). A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo los parámetros generales de las mediciones:

Tabla 5.4-5: Parámetros generales del experimento 8.

Parámetros de medición	Experimento 8
Porcentaje de Humedad [%]	21
N° de extracciones	200
N° de colgaduras	9
Masa total extraída [kg]	10,27
Porcentaje de extracción [%]	15,56

Masa húmeda promedio por cada palada [g]	51,34 ± 16,62
Eventos de barro	1

El experimento 8 presentó un evento de agua-barro, el cual fue lento y no llegó hasta el pique (relativamente corto). A continuación, se presenta el caso:



Fig. 5.4-8: Imagen del único caso de evento de agua-barro durante este experimento, no se manifestó posterior a ninguna colgadura.

5.5 Experimento 5, 6 y 7: experimentos con 22% de humedad

Los experimentos 5 y 6 se ejecutaron con 22% de humedad, utilizando la curva alpha para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). Al comienzo del experimento 5, el material fluyó a través de la galería, sin embargo, eventualmente la muestra generó la estabilidad necesaria para trabajar con el material sin intervención; el experimento 6 es una réplica del 5. Al comienzo el material también fluyó a través de la galería, sin embargo, este no se estabilizó, por lo que se indujo la estabilidad del material con intervención de la sección de granulometría gruesa (preparada y homogeneizada). Cabe destacar que estos eventos son días y preparaciones independientes. A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo los parámetros generales de las mediciones:

Tabla 5.5-6: Parámetros generales de los experimentos 5 y 6.

Parámetros de medición	Experimento 5	Experimento 6
Porcentaje de Humedad [%]	22	22
N° de extracciones	100	200
N° de colgaduras	4	5

Masa total extraída [kg]	5,15	9,84
Porcentaje de extracción [%]	7,80	14,91
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	51,48 ± 27,67	49,19 ± 25,08
Eventos de barro	0	1

El experimento 5 no presentó eventos de agua-barro, siendo que, para la caracterización del asentamiento y fluidez, este material pertenecía a la sección con capacidad necesaria para fluir, sin embargo, se visualizaron colgaduras como en el experimento 2 (Fig. 5.5-9).

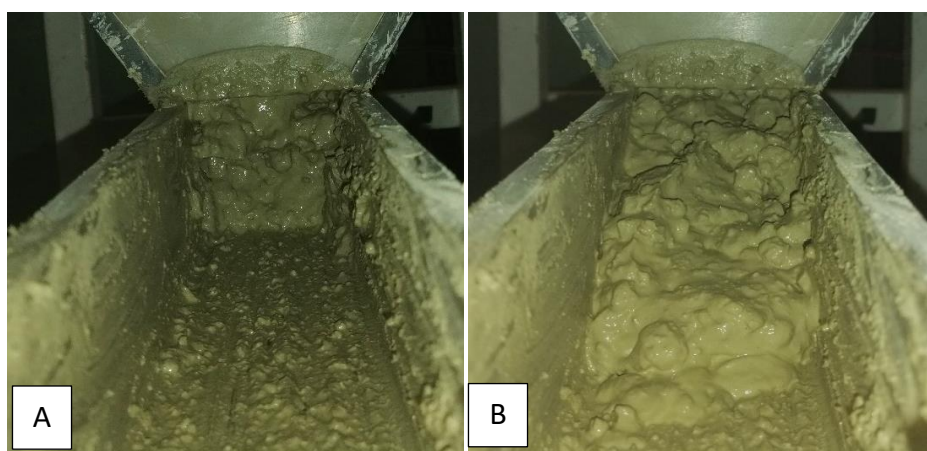


Fig. 5.5-9: Imágenes del punto de operación, colgado en el techo de la galería zanja (A), mientras que a la derecha el mismo punto descolgado (B); para el experimento 5, el tipo de descuelgue fue manual.

Para el experimento 6, se decidió hacer 60 extracciones adicionales a las 200 estipuladas por criterio experimentado (sin medirlas). Dado que las condiciones de la vista superior del modelo diferían de extracciones similares anteriores (Fig. 5.5-10). La subsidencia generada se abastecía con el agua por el proceso de consolidación del material.



Fig. 5.5-10: Imagen de la vista superior interior del modelo físico con una subsidencia atestada de agua. Para este experimento se presentó un evento violento de agua-barro (posterior a una colgadura), el cual tuvo un alto desplazamiento lineal sin embargo no fue tan veloz.

El experimento 7 es una “réplica” del experimento 5, pero utilizando la curva beta para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). Dado que el material fluyó a través de la galería, al cargar dos veces el modelo, se tuvo que aplicar una estabilidad inducida. Seleccionando material preparado y homogeneizado para la estructura sostenedora en la batea. Se consiguió la estabilidad del material en la cuarta carga del modelo. A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo parámetros generales de las mediciones:

Tabla 5.5-7: Parámetros generales del experimento 7.

Parámetros de medición	Experimento 7
Porcentaje de Humedad [%]	22
N° de extracciones	130
N° de colgaduras	5
Masa total extraída [kg]	10,02
Porcentaje de extracción [%]	15,18
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	77,05 ± 31,78
Eventos de barro	5

El experimento 7 presentó varios eventos de agua-barro, a continuación, se presentan algunos casos:

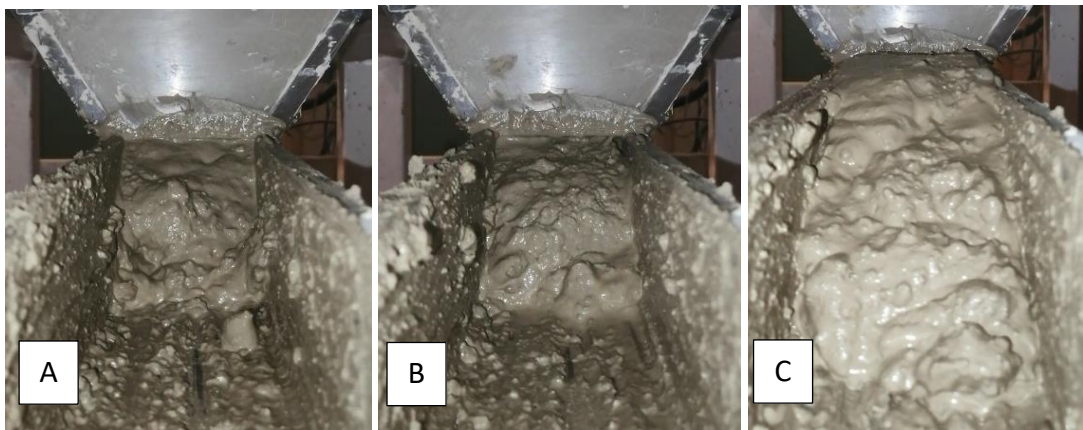


Fig. 5.5-11: Imágenes de los eventos más importantes cronológicamente, ninguno de los eventos de agua-barro manifestados durante el experimento 7 se relaciona con alguna colgadura previa.

5.6 Experimento 4: experimento con 24% de humedad

Este experimento se ejecutó con 24% de humedad, utilizando la curva alpha para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). Al cargar el modelo, dada la consistencia del material este fluyó a través de la galería, pero a diferencia del experimento con 26% de humedad, la muestra se pudo intervenir y manipular. Se extrajo la sección de granulometría gruesa de la muestra (preparada y homogeneizada), y se indujo una estructura sostenedora en la batea. Consiguiendo estabilizar el material para cargar el modelo, permitiendo proseguir con las extracciones por el punto aislado. A continuación, se muestra una tabla resumen exhibiendo parámetros generales de las mediciones:

Tabla 5.6-8: Parámetros generales del experimento 4.

Parámetros de medición	Experimento 4
Porcentaje de Humedad [%]	24
N° de extracciones	67
N° de colgaduras	2
Masa total extraída [kg]	3,27
Porcentaje de extracción [%]	4,95
Masa húmeda promedio por cada palada [g]	48,79 ± 27,32
Eventos de barro	4

El experimento 4 presentó eventos de agua-barro, los cuales fueron de larga y corta extensión lineal a través de la galería (llegaron o no al pique), hubo algunos rápidos y otros relativamente lentos,

y dada la complejidad de continuar la operación con ellos, es que se detiene anticipadamente. A continuación, se muestran algunos de los eventos:

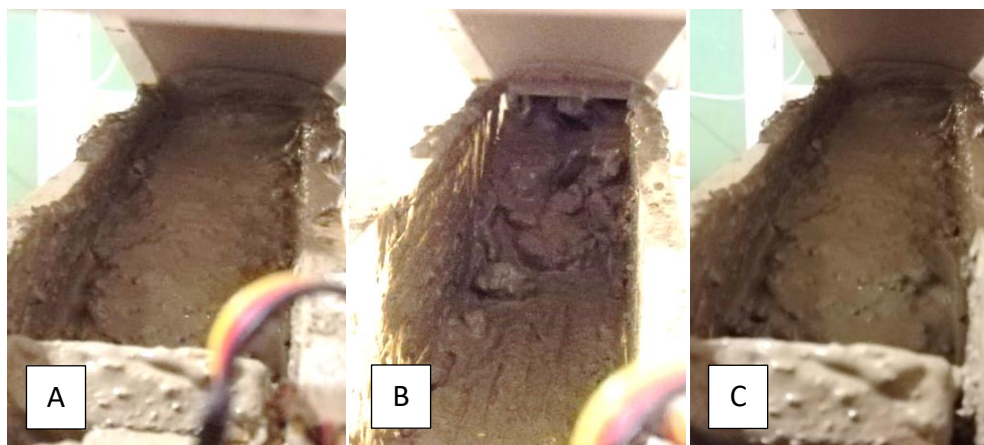


Fig. 5.6-12: Imágenes de los eventos más importantes cronológicamente, (A) y (C) surgieron posterior a un descuelgue, estos avanzaron más allá del pique, y fueron de los eventos más rápidos registrados de toda la experiencia, (B) se generó seguidamente del evento (A), este si bien fue de corta extensión, fue el tercero más rápido de toda la experiencia; el tipo de descuelgue fue manual.

5.7 Experimento 3: experimento con 26% de humedad

Se realiza el experimento con un 26% de humedad, utilizando la curva alpha para los tamaños de partícula (Fig. 4.3-3). Al intentar llenar el modelo, el material fluyó a través de la galería, luego de varios intentos de estabilizar manualmente el material, se admite que no se consigue soportar la muestra, por lo que el experimento termina sin conseguir resultados numéricos y considerando este porcentaje como un límite máximo de estudio para la muestra de material trabajada.



Fig. 5.7-13: Imagen de la vista superior interior del modelo físico con la muestra trabajada para el experimento 3, después que fluyera el material.

6 Discusión y análisis

6.1 Análisis del material

Dependiendo del autor o muestra de trabajo del operador, la definición del límite para considerarlos como finos es un parámetro variado. Por lo que, para el análisis de la muestra A, que fue la utilizada, se usará la clasificación de USCS (“Unified Soil Classification System”). El material extraído de puntos con agua-barro, se perciben con un gran contenido de finos (bajo 2 mm) [53].

Tabla 6.1-1: Clasificación de tamaños de partículas USCS y porcentaje de muestra.

Denominación USCS		Rango de tamaño [mm]		Curva Alpha	Curva Beta
Bolos		75	300	0%	0%
Grava	Gruesa	19	75	4,26%	4%
	Fina	4,75	19	31,92%	32%
Arena	Gruesa	2	4,75	20,21%	20%
	Mediana	0,425	2	22,34%	24%
	Fina	0,075	0,425	14,9%	20%
Limo y arcilla		0	0,075	6,37%	

Alrededor del 90% corresponde a grava y arena para las curvas utilizadas. La muestra A de tono café, se podría atribuir a cierta oxidación en la especie del mineral debido a la exposición ambiental [54].

Los ensayos de caracterización son muy significativos, dado que los resultados presentes en esta investigación no deberían ser los mismos si cambiamos la composición del mineral. Una muestra diferente de mineral podría discrepar en el rango de humedades para las respectivas consistencias del material. Producto que los minerales se comportan distintos con la presencia de agua (límite líquido y plástico a modo de ejemplo), modificando su comportamiento mecánico, el cual se podría ver reflejado en la cantidad de colgaduras y/o eventos de agua-barro. Modificando análisis y conclusiones dispuestos en esta memoria. Esta investigación es un resultado experimental con las condiciones que se definen en este informe.

6.2 Análisis de producción

Se muestra una tabla resumen con alguna de las características diferenciadoras entre los experimentos, además de sus respectivas productividades por baldadas (LHD de 14 yd³ escalado) para cada experimento:

Tabla 6.2-2: Resumen de características y productividad por baldada.

Experimento	Tipo de Estabilidad	Curva granulométrica	Porcentaje de humedad	Productividad por baldada	
				Experimental [gr/extracción]	Escala Mina* [ton/extracción]
Exp. Base 1	Natural	Con 15 puntos	16%	40.50 ± 27.97	17.09 ± 11.50
Exp. Base 2	Natural	Con 15 puntos	16%	39.18 ± 18.64	16.53 ± 7.86
Exp. 1	Natural	Con 15 puntos	18%	49.34 ± 29.41	20.81 ± 12.41
Exp. 1.2	Natural	Con 15 puntos	18%	55.79 ± 26.89	23.54 ± 11.34
Exp. 1.3	Natural	Con 15 puntos	18%	71.21 ± 45.53	30.04 ± 19.21
Exp. 2	Natural	Con 15 puntos	20%	51.79 ± 23.53	21.85 ± 9.93
Exp. 2.1	Natural	Con 15 puntos	20%	49.69 ± 14.95	20.96 ± 6.31
Exp. 3	No ocurrió	Con 15 puntos	26%	-	-
Exp. 4	Inducida	Con 15 puntos	24%	48.79 ± 27.32	20.58 ± 11.52
Exp. 5	Natural	Con 15 puntos	22%	51.48 ± 27.67	21.72 ± 11.67
Exp. 6	Inducida	Con 15 puntos	22%	49.19 ± 25.08	20.75 ± 10.58
Exp. 7	Inducida	Con 4 puntos	22%	77.05 ± 31.78	32.51 ± 13.41
Exp. 8	Inducida	Con 4 puntos	21%	51.34 ± 16.62	21.66 ± 7.01
Exp. 9	Inducida	Con 4 puntos	20%	66.53 ± 16.12	28.07 ± 6.80
Exp. 10	Inducida	Con 4 puntos	20%	59.81 ± 14.19	25.23 ± 5.99
Exp. 11	Natural	Con 15 puntos	20%	58.45 ± 12.06	24.66 ± 5.09

*Se considera un escalamiento del peso por extracción, y no como una tasa de extracción, dado que no está relacionado con el tiempo.

En esta memoria se clasifican las baldadas bajo 30 gr como una peor productividad, se presentan frecuentemente en los casos base (con 16% de humedad, con estabilidad natural y 15 puntos de la curva granulométrica). Cabe mencionar que para esta experiencia había material sobre 2.54 cm (1''), el cual fue excluido para los futuros experimentos. Mientras que los mejores casos de productividad son para el experimento 7 (con 22% de humedad, con estabilidad inducida y 4 puntos de la curva granulométrica) y el experimento 1.3 (con 18% de humedad, con estabilidad natural y 15 puntos de la curva



granulométrica). Dejando en evidencia que la media de la baldada productividad se ve afectada por otros parámetros, además de la cantidad de puntos de la curva granulométrica, el tipo de estabilidad y el porcentaje de humedad, presentados en esta tabla.

Los histogramas presentados en el anexo G, muestran la variación de masa por extracción para cada experimento, las colgaduras y los eventos de agua-barro. Dada la particularidad adherente del material, este se pegó en diferentes zonas: pala y techo, éste último de la galería zanja, justificando así ciertas alzas y bajas productivas, respectivamente. La mayoría de las colgaduras se relaciona con una baja productiva, infiriendo una tendencia que, a mayor cantidad de colgaduras más bajas productivas habrá. El experimento 8 (con 21% de humedad) muestra que todas sus bajas productivas se deben a las colgaduras presentadas. Los experimentos base 1 y 2, presentan colgaduras con baldadas productivas, aunque sus producciones medias son las más bajas de los experimentos. Los experimentos realizados a 16% y 18% de humedad (experimento base 1 y 2; experimento 1, 1.2 y 1.3), son los que presentan mayor frecuencia de colgaduras por baldadas, sin embargo, su productividad media es bastante variada entre ellas. El experimento 1.3 se presenta como uno de los más productivos, independientemente de la cantidad de colgaduras presentadas.

Algunas bajas productivas que se relacionan a extracciones laboriosas dada a la particularidad antes descrita, se puede asociar a los descuelgues con la pala, pero no se consideran como tal durante la investigación.

Dada la singularidad del material húmedo podría ser beneficioso y perjudicial dependiendo del caso (factores que afecten), enfocado a nivel de productividad promedio, mientras que a 16% presenta las peores, a 18% (experimento 1.3) y 22% (experimento 7), exhiben las mejores productividades promedios.

De los gráficos de variación de masa en el anexo G, como se muestra en la mayoría de los experimentos posterior a los eventos de agua-barro, existe un alza en la baldada o varias extracciones continuas productivas. Ocuriendo lo mismo tras un descuelgue, sin embargo, las colgaduras por sí mismas representan una baja en la producción, mientras que los eventos de agua-barro no presentan la misma lógica.

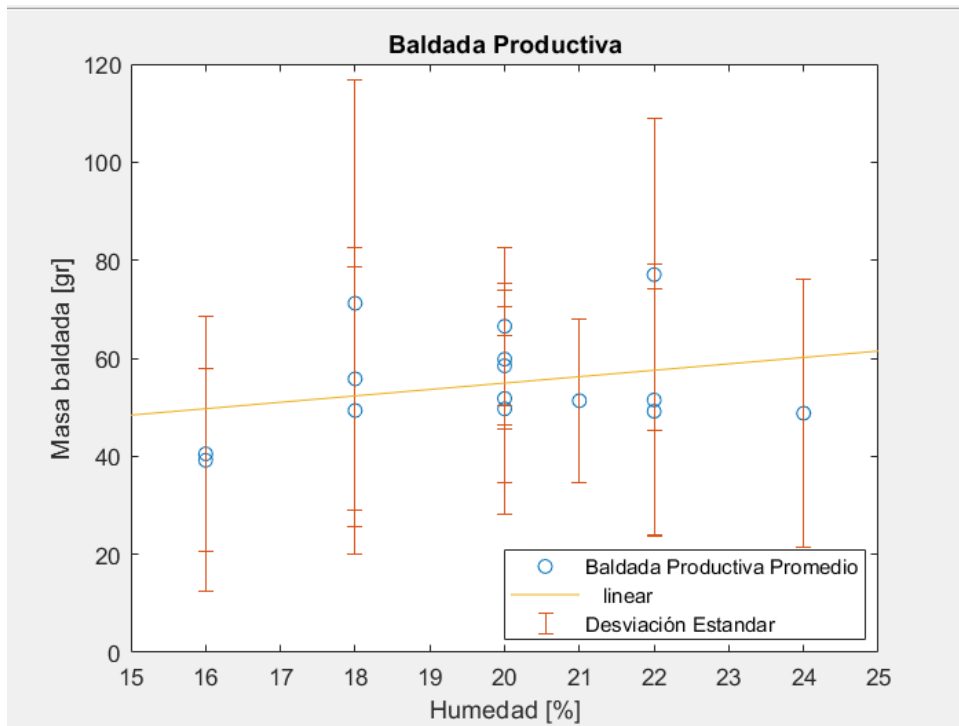


Fig. 6.2-1: Representación gráfica de la productividad por baldada expuesta en la tabla anterior.

Con la Fig. 6.2-1, se puede ver como la curva de tendencia es positiva con el aumento porcentual de la humedad. Sin embargo, se percibe que la media no es un indicador apropiado para variaciones tan grandes dentro de los datos, dado que se ve altamente afectado por las alzas y bajas productivas, la mediana debería representar mejor la distribución.

6.3 Análisis de colgaduras

Las colpas de gran tamaño son el principal factor para la ocurrencia de colgaduras en los puntos de extracción. La fluidez disminuye al incrementar el confinamiento (carga vertical) y el porcentaje de finos presentes. Las colgaduras varían dependiendo de las variables que influyan, cuando contienen cierto porcentaje de humedad y finos, estas pueden ser de menor altura y aumentar su frecuencia de ocurrencia. Si se aumentaran la presencia de finos (sobre 20%) y humedad (hasta 8%), o se aplicaran cargas verticales más altas (de 10 MPa) [13] [55], la fluidez en la extracción empeoraría, aumentando la ocurrencia de colgaduras, al punto que podría observarse una detención absoluta del flujo.

Para humedad mayor a 6% (hasta 8%), las fuerzas interpartículas tienen un efecto que impide la movilidad del material. El contenido de fino, mientras no se considere en las mallas actuales, estas serán muy amplias para los elipsoides generados, quedando material aislado entre ellas. En puntos de extracción aislados, los diámetros son largos y las alturas pequeñas. Para extracción doble, se genera elipsoides con menores diámetros y mayores alturas. La humedad produce una cohesión aparente que modifica las características de resistencia del material extraído, promoviendo arcos cohesivos [14].

Ambas investigaciones consideran porcentajes bajos de humedad máxima (Olivares 6% y Sánchez 8%), por lo que se hace esencial estudiar el comportamiento de la fluidez al aumentar el porcentaje de humedad.

Durante esta experiencia las únicas consideradas como colgaduras, fueron las que requerían intervención externa para continuar la extracción. Dado que algunas ocasionaban interferencias en el flujo del material, producto de consolidación de material cohesivo, como lo indica la definición. A continuación, se muestra cómo el porcentaje de humedad en la masa afecta entre colgaduras:

Tabla 6.3-3: Clase de consistencia según el rango de humedad.

Consistencia	Rango de humedad [%]
Seco	[0-20]
Plástico	[20-21.5]
Blando	[21.5-23]
Fluido	[>23]

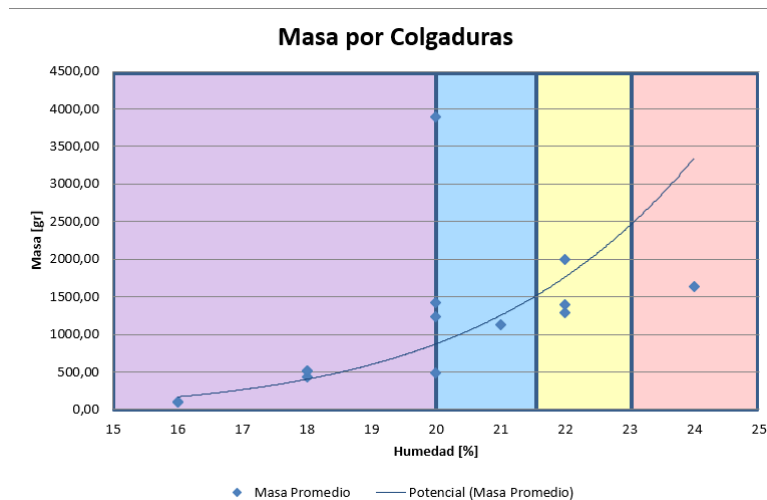


Fig. 6.3-2: Representación gráfica de la masa entre colgaduras según la humedad del experimento, clasificado mediante el cono de Abrams; para las mediciones bajo 20% de humedad, solo hay riesgos de colgaduras.

En la figura anterior se visualiza que, a mayor porcentaje de humedad (de 16% a 24%), mayor masa entre colgaduras. Para esta gráfica se excluyen los experimentos que no tuvieron colgaduras



durante su desarrollo, el experimento 3 con 26% de humedad que no se estabilizó, y el experimento 11 con 20% de humedad que no presentó colgaduras. El experimento 9 (20% de humedad) sale de la tendencia, dado que fue el experimento que más eventos de agua-barro presentó, todos de corta extensión y con mayor extracción de gramos totales para sus 200 baldadas. El experimento 4 (con 24% de humedad) que sale de la tendencia por debajo, fue el primer experimento al que se le aplicó una estabilidad inducida, por lo que se podría haber aplicado una sobre intervención, generando más colgaduras de las necesarias para la estabilidad del material.

Durante esta investigación al aumentar el porcentaje de humedad, supera el límite cohesivo de las partículas que irrumpen en el flujo de la productividad, cambiando las propiedades del material y ayudando al movimiento hacia el punto de extracción.

En terreno existen planes de producción que ayudan a prevenir colgaduras, con la extracción y movimiento de las zonas de flujo de puntos colindantes. Dado que en esta investigación se acota a la extracción por un punto aislado, se podría inferir una sobrestimación de la frecuencia de colgaduras. Si se consideran los esfuerzos asociados a la profundidad de la extracción, se podría decir que las frecuencias de colgadura se estarían subestimando. Estas son algunas de las condiciones que no se replicaron durante los experimentos que podrían explicar cierta variabilidad con otras investigaciones.

6.4 Análisis de colgaduras y eventos

La tabla 2.5-2 define los tipos de eventos de agua-barro según sus características, como desplazamiento y violencia, para esta investigación se trabaja sin usar tal clasificación, solo las variables de interés de la definición, como desplazamiento (de larga y corta extensión lineal) y velocidad.

De la tabla 6.6-4, los seis eventos de larga extensión se presentan durante los experimentos 4, 6 y 10, con humedades de 24%, 22% y 20%, respectivamente, según la tabla 6.3-3 para consistencias de plástico a fluido. Como se puede apreciar de los gráficos de variación de masa por extracción, las 68 colgaduras ocurridas durante toda la investigación, presentados en el anexo G, por lo general no eran precursoras de los eventos de agua-barro. Sin embargo, de los 32 eventos ocurridos, dos de larga extensión se presentaron posterior a una colgadura, de la fig. 6.6-5, los dos de mayor velocidad durante el experimento 4 (24% humedad). Dado que la tercera parte de los eventos de larga extensión se relacionan con una colgadura como precursora, hace riesgosa cualquier intervención de descuelgue.

Al disminuir la altura del arco se incrementan los esfuerzos en los muros del punto de extracción, y estos podrían intervenir los efectos de las partículas en suspensión. Dada las características del

material, era bastante complicado ver la estructura de las colgaduras cualitativamente. Se plantea para futuras investigaciones, la posibilidad del uso de sensores en la sección de la batea, para relacionar experimentalmente las colgaduras con la generación de los eventos de agua-barro.

A continuación, se representa el comportamiento de las colgaduras y los eventos según porcentaje de humedad:

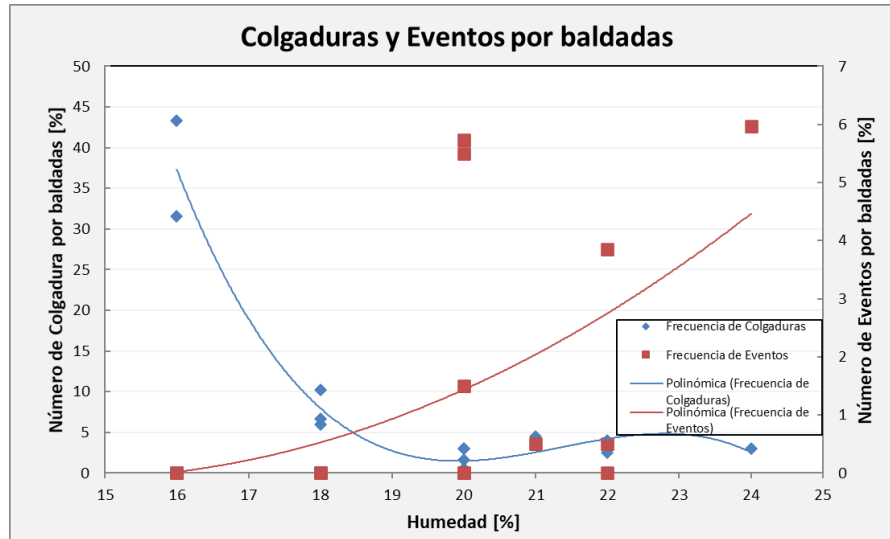


Fig. 6.4-3: Representación gráfica de las colgaduras y los eventos según la humedad del experimento, para las mediciones mayor o igual a 20% de humedad, hay riesgos de eventos de agua-barro.

En la figura anterior se visualiza una disminución de colgaduras y aumento de eventos de agua-barro a mayor porcentaje de humedad. Para esta gráfica, se excluye el experimento 3 con 26% de humedad dado que no presentó estabilidad. La frecuencia de eventos considerada no está diferenciada por tipo ni características de estos, justificando los valores fuera de la tendencia. Por ejemplo, en la fig. 9.7-48, el experimento 4 (24% humedad) presentó tres eventos, dos de larga y uno de corta extensión, siendo los tres más rápidos registrados; el experimento 9 (20% humedad) tuvo once eventos, siendo todos de corta extensión y menor velocidad; el primero está cercano a la tendencia mientras que el segundo no.

En la tabla 6.3-3, se muestra como estos eventos comienzan a presentarse en algunos experimentos de la consistencia plástica. Con la figura 9.7-48 del anexo G, se deduce que, a mayor porcentaje de humedad, mayor probabilidad de eventos de larga extensión. La tabla 6.6-4 presenta la información de los eventos de larga y corta extensión, adicionalmente cada uno de los experimentos 4 (24% humedad), 10 y 11 (20% humedad), presentó un evento de muy corta extensión.



Los puntos que salen por lo alto de la tendencia de los eventos de agua-barro, son los experimentos 9 y 10 (20% humedad), ambos se realizaron con la curva beta y estabilidad inducida, el experimento 10 presentó tres de larga y tres de corta extensión. Por debajo de la tendencia, están los experimentos 5 y 6 (22% de humedad), el primero se estabilizó naturalmente y tuvo cero eventos, el segundo fue una estabilidad inducida y tuvo un evento de agua-barro, el cual fue de larga extensión. Con las figuras 6.3-2 y 6.4-3, los puntos que salen por lo alto de la tendencia se presentan en la transición hacia la zona plástica, mientras que los experimentos que salen por lo bajo de la curva están en la zona de blando. Existe cierta variabilidad experimental, en la medida que la consistencia se vuelve más cercana a fluido existe un tamaño de partícula donde el sólido en suspensión hace más aleatorio su movimiento. Adicionalmente los esfuerzos naturales a los que está sometida la extracción, se modifican producto a que se van reestructurando con el movimiento del material, aumentando la variabilidad experimental.

La física que estudia los medios continuos, el estudio de la deformación y el fluir de la materia, el pH es un parámetro importante, una pequeña modificación de esta variable incide drásticamente en el comportamiento de las suspensiones (tensión de fluencia y viscosidad de una muestra) [56]. La duración total de la experimentación fue cerca de un año, y dada las medidas de agua requerida durante cada experimentación, siempre se extrajo agua directamente de la cañería (exponiéndose a diferentes temperaturas percibidas entre experimentos). Según un estudio realizado por NIVA Chile, “los distintos parámetros de calidad de agua varían significativamente dependiendo la fuente de agua, la región y la estación del año”, “en los meses secos, el pH, dureza y alcalinidad del agua aumentan y, por el contrario, en invierno, estas disminuyen notablemente” (NIVA Chile *Workshop* 2018). Existieron ocasiones en que las cañerías presentaron problemas durante la extracción de agua, sin embargo, solo se obtuvo la cantidad de litros requeridos para obtener el porcentaje de humedad necesario, ignorando composición y características de este recurso. Hubo factores que quizás influyeron en las mediciones y no se consideraron durante la investigación, por lo que se toma como parte de la variabilidad experimental.

6.5 Análisis punto de transición

A continuación, se representan las frecuencias de colgaduras y eventos, para todos los experimentos con 20% de humedad:

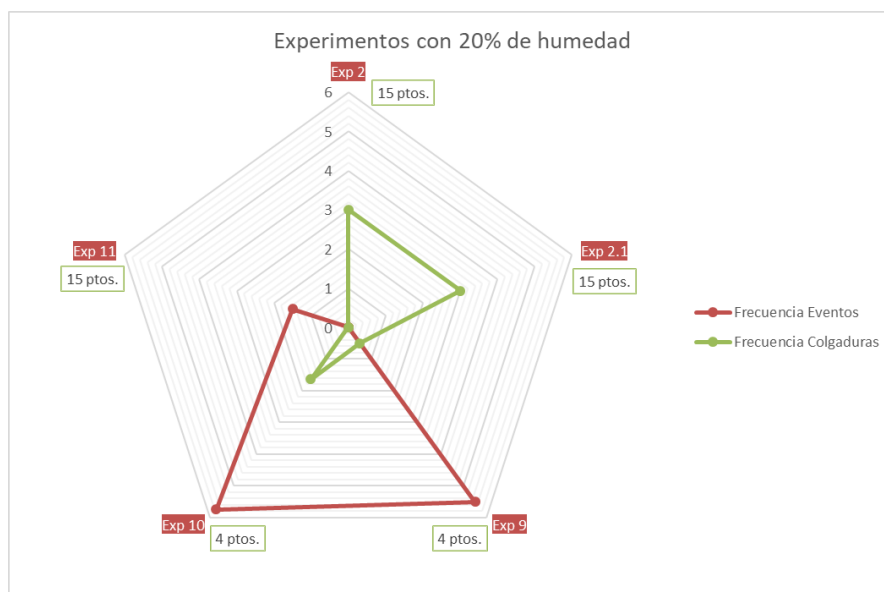


Fig. 6.5-4: Gráfica radial de las frecuencias de colgaduras y eventos para un 20% de humedad.

De la gráfica anterior se aprecian, tres experimentos con algún tipo de evento de agua-barro, y cuatro experimentos con colgaduras. Según la figura 6.3-2, para este porcentaje la consistencia del material cambia de seco a plástico, por lo que las propiedades varían entre experimentos con las mismas características.

Los asimétricos polígonos de frecuencias exhiben afinidad entre dos pares de experimentos, para la curva Alpha (experimentos 2 y 2.1) y beta (experimentos 9 y 10) de la curva granulométrica. Usando la tabla 6.3-3, se infiere que los experimentos 9 y 10 fueron de consistencia plástica, los experimentos 2 y 2.1 seca, y el experimento 11 mixta. Cualquier otra diferencia quedan atribuida a la variabilidad de la experimentación, dada la cantidad de puntos tomados de la curva para optimizar el proceso de preparación del material, y/o características del material que podrían estar interviniendo y no fueron cuantificadas durante la experimentación. (pH, temperatura, tiempo, otros).

6.6 Análisis de imagen

La tabla 2.5-2, define tres clasificaciones de los eventos de agua-barro, inspirando la caracterización de algunos parámetros cuantitativos. Con la información visual registrada durante el desarrollo de los experimentos, se realizó un análisis de imagen a los eventos de agua-barro, utilizando la duración y extensión lineal de estos. Un evento interesante con desplazamiento lineal de corta



extensión mide menos de 18,75 m lineales (largo de la zanja), mientras que los de larga extensión serán todos aquellos que sobrepasen esa medida lineal, delimitada en la figura 3.3-7.

A continuación, se presenta una tabla resumen con las diferentes velocidades de los eventos más significativos, para cada humedad:

Tabla 6.6-4: Resumen de los eventos de interés durante la investigación, se excluyen los eventos de muy corta extensión lineal.

Porcentaje de humedad	Experimento	Tipo de evento según extensión lineal	Velocidad Evento	
			Experimental [cm/s]	Escala Mina [m/min]
20 [%]	Exp. 9	Corta extensión	0,08	0,43
		Corta extensión	0,12	0,61
		Corta extensión	0,13	0,65
		Corta extensión	0,1	0,52
		Corta extensión	0,13	0,69
		Corta extensión	0,2	1,04
		Corta extensión	0,23	1,19
		Corta extensión	0,3	1,56
		Corta extensión	0,2	1,04
		Corta extensión	0,25	1,3
	Exp. 10	Corta extensión	0,15	0,78
		Corta extensión	0,5	2,6
		Corta extensión	0,4	2,08
		Corta extensión	0,17	0,87
		Larga extensión	0,21	1,08
		Larga extensión	0,19	1
	Exp. 11	Larga extensión	0,18	0,93
		Corta extensión	0,267	1,39
21 [%]	Exp. 8	Corta extensión	0,25	1,3
		Corta extensión	0,225	1,17
22 [%]	Exp. 6	Larga extensión	1,25	6,5
	Exp. 7	Corta extensión	0,46	2,4
		Corta extensión	0,33	1,73
		Corta extensión	0,29	1,51
		Corta extensión	0,73	3,81
		Corta extensión	0,5	2,6
24 [%]	Exp. 4	Larga extensión	3,13	16,24
		Corta extensión	1,4	7,27
		Larga extensión	5	25,98

En la tabla anterior se muestra que, a mayor porcentaje de humedad mayor es la velocidad de los eventos, independiente del tipo que corresponda. Dado que hay eventos de larga extensión con bajas velocidades en consistencia plástica, y un evento de corta extensión con la tercera velocidad más rápida de todos los experimentos en consistencia fluida. Por lo que se sugiere, tener más consideraciones al tener que clasificar o definir los tipos de eventos de agua-barro. A continuación, se presenta una gráfica con la información antes dispuesta:

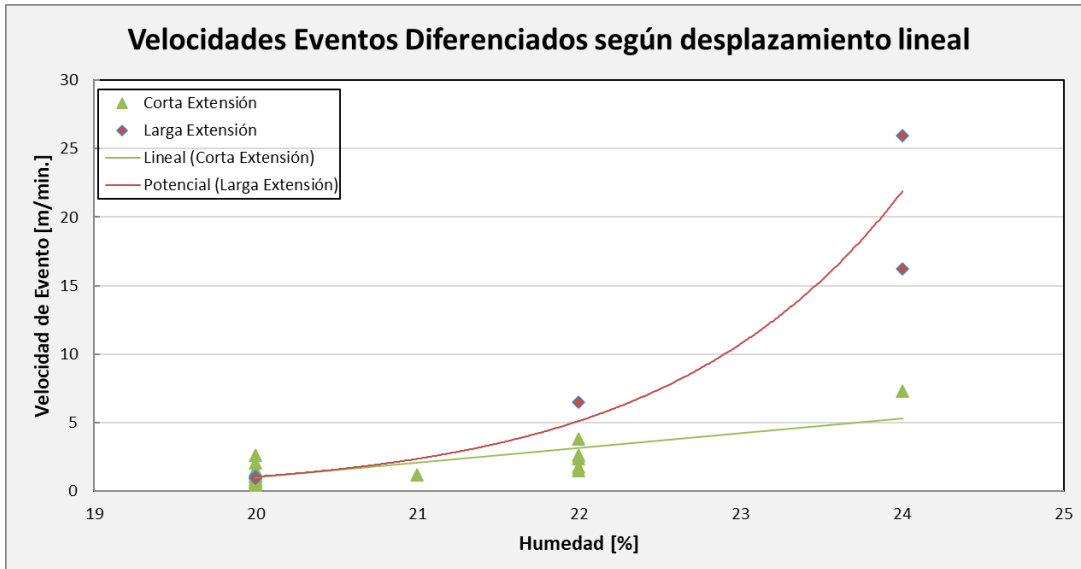


Fig. 6.6-5: Gráfico de dispersión de las diferentes velocidades para cada tipo de evento según su humedad. Se excluye la información de los eventos de muy corta distancia lineal.

La figura anterior representa gráficamente la tabla 6.6-4 con los parámetros a escala mina. Para los eventos que excedieron el largo de la zanja, es desconocido el alcance real total hacia el resto de la galería. La diferencia de eventos rápidos o lentos queda a criterio del experimentador, usando como referencia los valores obtenidos durante esta memoria. La medición de tiempos de los eventos está sujeta y estandarizada a la reacción del operador experimental.

Con la magnitud de los eventos de agua-barro a diferentes consistencias, se presenta que no todos tienen la potencialidad de ser peligrosos. Un evento de corta extensión que ocurra abruptamente podría ser catastrófica para el personal y maquinaria dispuestas durante la extracción. Mientras que uno de larga extensión y lento, podría dar tiempo de preparación para posibilitar una posterior extracción continua sin daños. Teniendo en consideración los riesgos asociados y las diferencias de estas variables durante un evento de agua-barro, se podrían categorizar y trabajar en los casos operables, relacionando la magnitud de los eventos y clasificando por tipo para las diferentes consistencias.



Similar a los sismos, estos eventos representan liberación de energía. Considerando las distintas masas liberadas con estos eventos y sus velocidades, se podría calcular la energía cinética de cada tipo y hacer un balance comparativo, buscando la relación de la liberación de energía con los diferentes tipos de eventos según su consistencia.

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

El número de colgaduras se ve aumentada, para muestras con material fino y presencia de agua, a humedades menores de 6% o con aplicación de esfuerzos externos [13] [14]. Complementando con la información de esta memoria, las características cohesivas del material dependiendo de la humedad que posea, cambia las propiedades mecánicas de este.

Se pudo concretar un estudio exploratorio y controlado, en un modelo escalado 1:75. Mediante la extracción aislada (perturbación con punto de descarga), con presencia de material fino y agua, posibilitando visualizar eventos de agua-barro con diferentes características.

La muestra de material A, usada para los experimentos, provenía de un punto saturado de una mina en Chile, presentando características de oxidación dado su tono café. Esta muestra de material fue sometida a diferentes ensayos para ver comportamiento mecánico. Con el ensayo de asentamiento se estudió la consistencia a diferentes porcentajes de humedades, dado que interesaba saber la conducta de seco a fluido, se definió el trabajo a humedades de 16% a 26%.

A partir de una consistencia plástica se empiezan a presentar eventos de agua-barro, relacionándose la humedad con: (i) colgaduras, (ii) producción y (iii) velocidad de eventos. A mayor porcentaje de humedad, mayor era la frecuencia de los eventos y menor era la frecuencia de las colgaduras, por ende, mayor es la masa entre colgaduras. La tendencia de la productividad promedio es positiva a un mayor porcentaje de humedad. Con las características del material, las baldadas productivas son muy variadas, por lo que el promedio exhibe una gran desviación estándar en la mayoría de los experimentos. Deduciendo que la media no es una información muy representativa para esta investigación.

Hubo diversidad en la magnitud y ocurrencia de los eventos para las diferentes consistencias, según: (i) desplazamiento lineal (de larga o corta extensión), (ii) velocidad (lentos o rápidos) y (iii) relacionado o no a una colgadura previa. La velocidad de los eventos tendió a crecer con el porcentaje de humedad, pero desde la consistencia plástica se presentaron eventos de larga, corta o muy corta extensión lineal. Con este estudio, no se puede predecir la combinación de características, ni anticipar el momento del evento con una colgadura, por lo que es fundamental lograr un conocimiento más acabado analizando el comportamiento del material.



Dado estos rasgos de la magnitud de los eventos, podría clasificarse nivel de peligrosidad. Mitigando los riesgos asociados, y teniendo en consideración las características del material, podría ser plausible y hasta beneficiosa una explotación autónoma para ciertas consistencias, definida según el material que se extrae.

7.2 Recomendaciones

Estudiar el efecto con una extracción doble y/o el comportamiento de la migración de puntos vecinos, bajo las condiciones de este informe, los resultados estarían sobreestimando la cantidad de eventos y/o colgaduras. Además, considerando la aplicación de esfuerzos externos, para estos porcentajes de humedades, se estarían subestimando los datos obtenidos.

El punto de transición de consistencia seca-plástica presenta una gran variabilidad, por lo que se propone estudiar otros factores que pudieran intervenir dada la extensión experimental. Se recomienda trabajar con diferentes versiones de curva granulométrica, variar la proporción de finos y agua, y/o adicionar la investigación de algunos parámetros reológicos (pH, temperatura, duración y otros).

Se desconoce si el flujo másico desplazado por estos eventos es rico en minerales o contiene un alto porcentaje de dilución. Se propone realizar un estudio de caracterización a la sección de muestra liberada por los eventos, para clasificar los parámetros de composición, dado que la granulometría y el contenido de agua pueden variar las propiedades fisicoquímicas de las muestras. Cubicar el material, determinar su mineralogía, humedad y granulometría, y obtener parámetros geotécnicos propios de la caracterización de materiales con el potencial de licuefacción. Con esta información se podría encontrar una relación entre las características formadoras de composición con los tipos de eventos que suceden.

Se sugiere establecer parámetros de riesgo utilizando la magnitud de estos eventos y otras variables, clasificando por tipo de evento para las diferentes consistencias, siendo un complemento de la información actual para prever situaciones de riesgos futuros.

Una observación técnica para investigaciones futuras sería encontrar alguna herramienta de sensores o programa, que pueda identificar las granulometrías con material barroso. Para analizar detallada y acertadamente la situación existente dentro del modelo a nivel estructural, en el desarrollo de colgaduras y/o eventos de agua-barro. Posibilitando la realización de esquemas de vistas transversales de la batea y la columna de mineral, u otras variables que no se incluyeron en esta investigación.



Se debería considerar estudiar diferentes diseños de bateas para ver la influencia estructural en esta clase de eventos. Estudiar la conducta en otro tipo de mineral, dado que tienen diferentes propiedades particulares, que se pueden ver reflejados cuantitativamente en los ensayos geotécnicos normados.

Mientras más se aumenta la base de datos relacionada al tema, se pueden buscar y verificar influencias para este tipo de eventos o colgaduras que se puedan presentar en la operación, llegándose a predecir con modelos multivariantes.



8 Bibliografía

- [1] «Brown, E., 2004. Block Caving Geomechanics. 2nd Ed. Brisbane: Julius Kruttschnitt Minerals Research Center, University of Queensland».
- [2] «Jakubec, J., Clayton, R., Guest, A., 2012. Mudrush Risk Evaluation, in Massmin 2012: Proceedings of The Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Ontario, Canada».
- [3] «Soto, I., 2018. Estudio y Análisis de Estrategias de Extracción de Agua-Barro en la Fase II de Mina Diablo Regimiento, Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [4] «Butcher, R., Joughin, W., and Stacey, T. R., 2000. Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines, The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC)».
- [5] «Butcher, R., Stacey, T., and Joughin, W., 2005. Mud Rushes and Methods of Combating Them, Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 105, pp. 817-824».
- [6] «Hubert, G., Dirdjosuwondo, D., Plaisance, R., & Thomas, L., 2000. Tele-Operation at Freeport to Reduce Wet Muck Hazards. MassMin 2000, 173-179».
- [7] «Laubscher, D. H., 2000. A Practical Manual on Block Caving. International Caving Study (1997-2000). Cap. Desing Topic - Dilution».
- [8] «Samosir, E., Basuni, J., Widijanto E., Syaifullah T., 2008. The Management of Wet Muck at PT Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine, in Massmin 2008: Proceedings of The Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining, Canadian Institute of Min».
- [9] «Widijanto, E., Sunyoto, W., Wilson, A., Yudanto, W., Soebari, L., 2012. Lessons Learned in Wet Muck Management in Ertzberg East Skarn System of PT Freeport Indonesia, in Massmin 2012: Proceedings of The Sixth International Conference & Exhibition on Mass».
- [10] «Castro, R., Garcés, D., Armijo, F., 2017. Quantifying Wet Muck Entry Risk for Long-Term Planning in Block Caving».
- [11] «Garcés, D., 2017. Wet Muck Entry Modeling for Block Caving, Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [12] «Garcés, D., Castro, R., Valencia, M., Armijo, F., 2016. Assessment of Early Mud Entry Risk for Long Term Cave Mining Applications, in U-Mining 2016: Proceedings



of the First International Conference of Underground Mining, Santiago, Chile, pp. 439-451».

- [13] «Olivares, D., 2014. Influencia de Fino y Humedad en Flujo Gravitacional Confinado, Memoria, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [14] «Sánchez, Y., 2017. Determinación y Caracterización de las Zonas de Extracción en un Flujo Gravitacional de Material Granular Fino en Presencia de Humedad, Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [15] «Bulatovic, Wyslouzil, & Kant, 1999. Effect of Clay Slimes on Copper, Molybdenum Flotation from Phoropyry Ores. Proceedings of Copper».
- [16] «Farrokhpay, 2012. The Importance of Rheology in Mineral Flotation: A Review. Minerals Engineering, Vol. 38, 272-278».
- [17] «Pownceby, M. I. & Johnson, C., 2014. Geometallurgy of Australian Uranium Deposits. Ore Geology Reviews, 56, pp.25–44».
- [18] «Julin, D., 1992. Block Caving. SME Mining Engineering Handbook, 2nd Edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration».
- [19] «Zúñiga, C., 2007. Estudio del Efecto de la Distribución Granulométrica en el Flujo Gravitacional. Memoria, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [20] «Castro, R., 2006. Study of the Mechanism of Gravity Flow for Block Caving, PhD Thesis, Queensland, University of Queensland, Australia».
- [21] «Jaeger, H. M., Nagel S. R. and Behringer, R. P., 1996. The Physics of Granular Materials. Physics Today, Abril 1996: 32-38».
- [22] «Yenge, L. I., 1981. Analysis of Bulk Flow of Materials Under Gravity Caving Proceedings. Part 2: Theoretical and Physical Modeling of Gravity Flow of Broken Rock. Quart. Col. Sch.Min, 76».
- [23] «Kvapil, R., 1965. Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers and Bins”. Part I and II. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. Vol. 2, 35-41».
- [24] «Laubscher, D., 1994. Cave Mining- The State of The Art. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, pp.279-293».
- [25] «Brown, E., 2003. Block Caving Geomechanics, Isles Road, Indooroopilly, Australia».
- [26] «García, P. S., 2012. Evaluación Técnico Económico de Recuperación de Reserva en Zona de Agua-Barro en Fase I de Diablo Regimiento, Rancagua, Chile: s.n».



- [27] «Fleischer, V. and Sandy, J. D. Failure and Subsidence Stabilization of No. 3 Dump at Mufulira Mine, Zambia, Trans, Instn. Metall., Section A, Vol. 85, 1976. pp. A144–A161».
- [28] «SGP-GRL-DET, 2010. "Definición de Matriz de Criticidad para el Control del Riesgo de Bombeo de Agua-Barro en la Mina", Codelco, Santiago, Chile».
- [29] «Putra, F., 2016. East DOZ Dewatering Program in DOZ Underground Mine, PT. Freeport Indonesia, Papua, Indonesia, Papúa: Underground Hydrology PT Freeport Indonesia».
- [30] «SGC-GRL-DET, 2017. "Procedimiento General para el Control del Riesgo de Bombeo de Agua-Barro en la Mina", Codelco, Santiago, Chile».
- [31] «Pérez, Á., 2017. Cuantificación del Riesgo de Ingreso de Agua-Barro en El Teniente, Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [32] «Hadjigeorgiou, J. L. J., and Lessard, J. F., 2007. Numerical Investigations of ore Pass Hang-Up Phenomena. En: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(6), pp 820-834, Quebec City, Canada».
- [33] «Society for Mining, 2001. Metalurgy and Exploration; Inc. (SME), Underground Mining Methods».
- [34] «McCormick, R. J., 1968. How Does a Drawpoint Draw? Engineering & Mining Journal, June, 106-116».
- [35] «Peters, D. C., 1984. "Physical Modeling of the Draw Behavior of Broken Rock in Caving", Quarterly of The Colorado School of Mines, Vol. 79 no 1».
- [36] «McNearney, R. L., and Abel, J. F., 1993. Large Scale Two-Dimensional Block Caving Model Tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomechan, 30:90-109».
- [37] «Power, G., 2004. Modelling Granular Flow in Caving Miners: Large Scale Physical Models and Full Scale Experiments. PhD Thesis, University of Queensland, Brisbane».
- [38] «Vergara, P., 2016. Estudio Experimental de Flujo Gravitacional en Minería de Panel Caving, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [39] «Pineda, M., 2012. Study of the Gravity Flow Mechanisms at Goldex by Means of a Physical Model. Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [40] «Fuentes, R., 1996. "Apéndice1: Consideraciones sobre Similitud y Escalamiento", CMM, Apéndices Informe Final PB5: "Similitud Física del Flujo Gravitacional", Santiago, Chile».



- [41] «Kvapil, D. R., 2008. Gravity Flow in Sublevel and Panel Caving – A Common Sense Approach».
- [42] «Iribarra, S., 2014. Estudio Experimental de Migración de Finos en Minería de Caving, Memoria, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [43] «Basaure, K., 2014. Caracterización Geotécnica de Mineral Saturado de Mina Diablo Regimiento, Codelco, División El Teniente, Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [44] «ASTM, 2001. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate».
- [45] «ASTM, 2002. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer».
- [46] «ASTM, 2003. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete».
- [47] «ASTM. Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. s.l.:s.n.».
- [48] «Orellana, L. F., 2012. Diseño de la Tecnología de Minería Continua a partir de Experimentos en Laboratorio, Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [49] «Castro, R., Vargas, R., De la Huerta, F., 2012. Determination of Drawpoint Spacing in Panel Caving: A Case Study at the El Teniente Mine, J. S. Afr. Inst. Min. Metall. Vol.112 n.10 Johannesburg».
- [50] «Castro, R., 2007. A Study of Isolated Draw Zones in Block Caving Mines by Means of a Large 3D Physical Model, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, pp. 44(6), 860-870».
- [51] «Seville, J. C. K., 2000. Interparticle Forces in Fluidisation: A Review. Powder Technology, pp. 113(3).261-268».
- [52] «Bilz, P., 1995. "Slope Stability in Partially Saturated Sandy Soils". Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, pp.257-264».
- [53] «Call & Nicholas, I., Freeport McMoRan Copper and Gold, C. & Hydrologic Consultants, I., 1998. IOZ Wet Muck Study. s.l.:s.n.».
- [54] «Vallejos, J, Basaure, K., Palma, S., Castro, R.L., 2017. Methodology for Evaluation of Mud Rush Risk in Block Caving Mining, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 117».



- [55] «Olivares, D., 2016. Experimental Characterization of the Flowability of Material in Block/Panel Caving, Tesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile».
- [56] «Klein, B., & Hallbom, D., 2002. Modifying the Rheology of Nickel Laterite Suspensions. Minerals Engineering, 15(10), 745–749».
- [57] «Lambe, W. & Whitman, R., 1979. Soil Mechanics. En: Soil Mechanics. s.l.:s.n.».
- [58] «Castro, R., 2001. Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Santiago, pp. 49-62».

9 Anexos

9.1 Anexo A: Mecanismos de barro externo

A continuación, se muestra la representación de los diferentes mecanismos de barro externo:

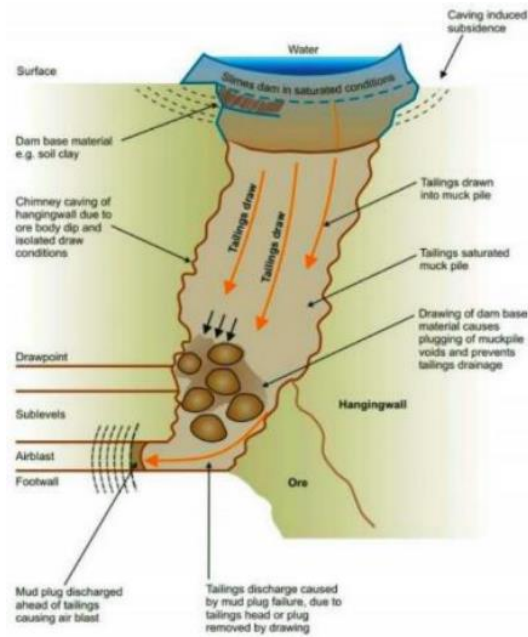


Fig. 9.1-1: Mecanismo por extracción directa de barro y relaves [4].

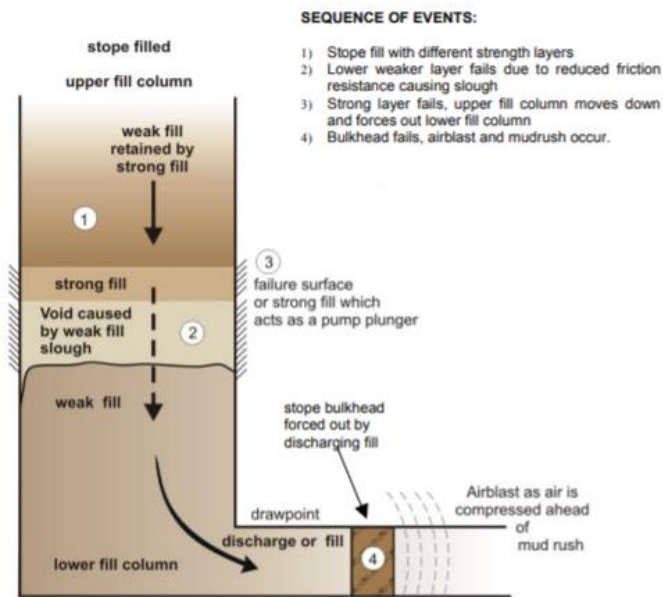


Fig. 9.1-2: Mecanismo por falla en tapones de relleno de caserones [4].

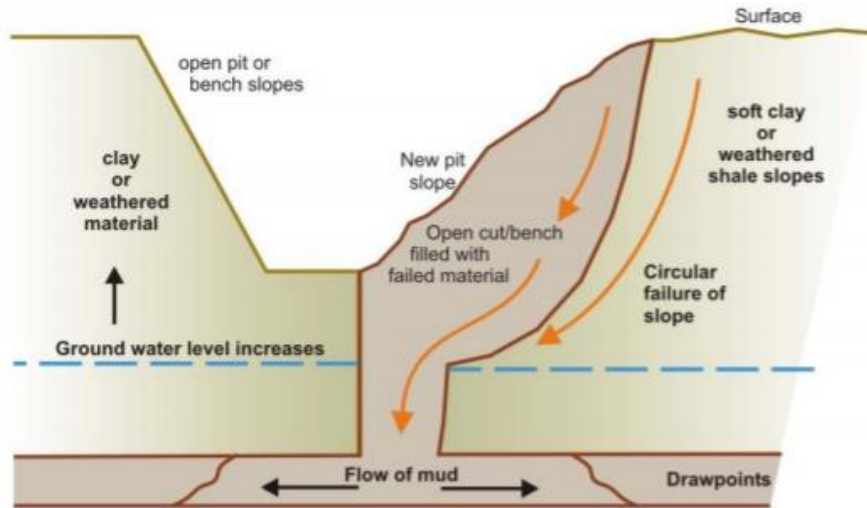


Fig. 9.1-3: Mecanismo por falla en taludes con material blando [4].

9.2 Anexo B: Clasificación de humedad cualitativa en puntos de extracción

A continuación, se presentan las referencias usadas para ilustrar y definir las categorías de humedad empleadas en la matriz de criticidad [28], en el informe de la Superintendencia Gestión de Procesos (SGP) [3].



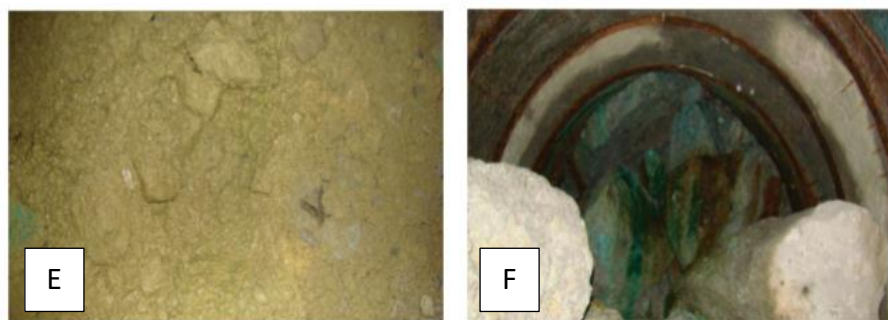


Fig. 9.2-4: (A) Punto de extracción en estado seco (H=0). (B) Punto de extracción en estado de baja humedad (H=1). (C) Punto de extracción en estado de humedad (H=2). (D) Punto de extracción en estado de barro incipiente (H=3). (E) Punto de extracción en estado de barro (H=4). (F) Punto de extracción con agua (H=A).

La humedad debe venir de la columna por filtración, dejándose fuera el agua infiltrada a través de la visera (fortificación de la zanja) o de la calle, las cuales provocan barro superficial y localizado en el punto. La presencia de finos oscuros, indican humedad en el punto de extracción, sin embargo, se puede confundir con partículas de tierra que ocasionan dilución. Existen pruebas de cohesión cualitativas, que consiste en la compresión con guantes del material extraído del punto.

9.3 Anexo C: Estados operacionales en puntos de extracción

Tabla 9.3-1: Clasificación operativa de los puntos de extracción según sus condiciones [3].

Estado	Código	Definición
Cortado Abandonado	I	Punto en que se termina definitivamente la extracción por razones de impurezas, condiciones de riesgo y otros, independiente del porcentaje de extracción.
Cortado Agotado	A	Punto en que se termina definitivamente la extracción por agotamiento de las reservas. La extracción del punto es igual o mayor que el 100% y presenta ley inferior a la ley de cierre.
Operativo	O	Punto en condiciones aptas para extracción.
Razón Operacional	W	Punto fuera de producción por trabajos especiales y temporales, tales como: sondajes en cruzado de acceso o vías de tráfico, desarrollo de labores cercanas, tránsito temporal de suministros, arreglo de carpeta, arreglo de punto de vaciado u otros.
Limitado	L	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un período determinado de tiempo.
Reabierto	S	Punto que pasa de un estado cortado a disponible para extracción.
Extracción Telecomandada	N	Punto que, debido a la penetración de barro, presenta riesgo a las personas, por lo tanto, su extracción debe ser realizada con equipo telecomandado.
Colgado	T	Punto en el que el flujo de mineral es interrumpido por un arco natural de soporte por más de 9 turnos, ya sea por planchones, colpas de gran tamaño o humedad.
Cerrado	C	Punto en que se detiene temporalmente la extracción por baja ley de Cu, impurezas o cumplimiento de programa.
Agua/Barro	B	Punto que debido a la penetración de agua y material fino presenta riesgo de bombeo.
Barrera	M	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral o barro de puntos adyacentes.
Reparación	R	Punto fuera de producción por arreglo de su estructura.
Hundido	H	Punto que ha sufrido quiebre del pilar y hundimiento del cerro.
Vacío	V	Punto en el cual solo se ha efectuado la voladura de zanja y no el polvorazo correspondiente al área del punto. Solo se utiliza para métodos de hundimiento convencional.
Futuro	F	Punto en el que no se ha realizado la voladura de zanja.
Quedado	Q	Punto sin material disponible, en el que se ha efectuado la voladura de zanja y polvorazo correspondiente al área y no se ha producido colapso de roca.



Tabla 9.3-2: Clasificación de colores del estado operativo de los puntos según su área y disponibilidad [3].

Clasificación	Color
Área abierta y disponible	Verde
Área abierta y no disponible	Amarillo
Área cerrada y abandonada	Naranja
Área cerrada y por hundir (solo Vacío y Futuro)	Rojo

9.4 Anexo D: Referencia compresión y consolidación

A continuación, se presentan los rangos de valores típicos para índice de compresión y coeficiente de consolidación, para distintos tipos de suelo [43].

Tabla 9.4-3: Valores típicos para coeficiente de consolidación e índice de compresión [57].

Tipo de Suelo		Índice de plasticidad	Coeficiente de consolidación C_v (m ² /año)		Índice de compresión C_c
			No perturbado	Remoldado	
Arcilla	Montmorillonita	Sobre 25	0,1 – 1	Alrededor de 25% a 50% de los valores no perturbados	Hasta 2,6 (Montmorillonita)
	Alta plasticidad				
	Plasticidad media	25 - 5	1 – 10		0,8 – 0,2
	Baja plasticidad	15 o menos	10 – 100		
	Limo		Sobre 100		

9.5 Anexo E: Protocolos ensayos de caracterización del material geotécnicos

9.5.1 Ensayo de asentamiento y extensión de flujo

Para ver la consistencia, fluidez o plasticidad del material fresco (fig. 9.5-6), se usa el Cono de Abrams (ASTM C143, Norma Japonesa JSCE-F503), un instrumento metálico que se emplea en ensayos de hormigón (fig. 9.5-5). El ensayo consiste en rellenar firmemente un molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas, en tres capas volumétricamente estandarizadas, aproximadamente a los 7 cm, 16 cm y hasta desbordarse. Se realizan 25 golpes distribuidos uniformemente tras llenar cada capa al interior del cono con una varilla, desde el perímetro hacia el centro en espiral, las varilladas solo deben traspasar de la capa más superficial a la anterior, y no llegar hasta el fondo del cono. Tras terminar la compactación, se carga el molde con las manos por las asas y dejando las pisaderas libres se levanta en dirección vertical sin perturbación. Para la medición del asentamiento, se rota el cono hasta estar invertido y se instala a un costado de la muestra, con la varilla y una regla en transversal, se mide la distancia entre la barra y el centro original de la cara superior del material. Nota: Si dos pruebas consecutivas muestran una caída o desprendimiento de una porción del concreto de la masa de la muestra, probablemente carezca de la plasticidad y cohesión necesaria para que sea aplicable la prueba de asentamiento.



Fig. 9.5-5: Cono de Abrams

Consistencia	Rango de Asentamiento [cm]	Aspecto
Seco	[0-4.5]	Suelto y sin cohesión
Plástico	[4.5-9.5]	Levemente cohesivo
Blando	[9.5-15.5]	Levemente fluido
Fluido	[>15.5]	Fluido

Fig. 9.5-6: Consistencia de agregados según su asentamiento en [cm]. Norma europea BS 8500.

9.5.2 Compactación máxima y mínima

9.5.2.1 Densidad mínima (ASTM D4254)

Dependiendo de la granulometría del material, se define la herramienta para depositar el material en el molde; para un tamaño de 75 mm se usa una pala o cuchara extragrande, para tamaños de 19-38.1 mm se utiliza un cucharón, en tamaños de 9.5 mm se utiliza un dispositivo de vertido de 25 mm de diámetro, y para menores de 4.75 mm se vierte el material con un dispositivo con diámetro de 13 mm.

Al depositar la muestra en el molde ésta debe ser colocada a un flujo constante, de manera que el material quede lo más suelto posible. El material al ser vertido, se debe encontrar a una altura mínima de ½ pulgada (13 mm) o a una altura que permita un flujo constante, sin que el dispositivo entre en contacto con la superficie del suelo depositado en el molde. El movimiento del material depositado debe ser en espiral de modo que las capas acumuladas sean lo más uniforme posible, de manera que, al llenar el molde se realice un recorte del material sobrante.

Se determina la masa del conjunto molde-suelo, posteriormente se calcula la masa del suelo (M_s), restando la del molde vacío a la ya definida del conjunto molde-suelo. Con el volumen del molde (V_m) utilizado, se mide la densidad mínima del suelo con la relación M_s/V_m , debido a que el suelo ocupa el volumen total del molde.

9.5.2.2 Densidad máxima (JSSFME)

Siguiendo la metodología de la densidad mínima, se considera una leve vibración del conjunto molde-suelo, logrando un reordenamiento del material, ocupando el máximo de espacio posible entre las partículas que componen el material utilizado. Registrando cada una de las masas obtenidas (molde-suelo, suelo y molde), junto al volumen del molde usado se determina la densidad máxima del suelo con la relación M_s/V_m .

9.5.2.3 Proctor modificado (ASTM D1557)

Según la norma ASTM D1557, se define considerar una muestra que no haya sido previamente compactada y que tenga un tamaño de partícula sobre el tamiz No 4. Teniendo presente que la muestra puede poseer humedad, ésta es secada para ser posteriormente tamizada.

Preparando de 4 a 5 muestras de material tamizado con distintos niveles de agua, con el fin de encontrar la cantidad de agua óptima, se deposita cada muestra de manera uniforme en un molde con una masa ya determinada anteriormente, colocando el molde con el material sobre una plataforma rígida y uniforme. Cada muestra es compactada con 5 capas, las cuales deben ser de espesores similares. Sobre las capas se realizan leves golpes con un compactador manual, dependiendo del espesor de las capas colocadas se realizan 25 golpes para las de 4 pulgadas y 56 golpes para las de 6 pulgadas. Posterior a la compactación, se determina el peso unitario y la humedad del material resultante comparando este valor con el de los demás ensayos.

Los valores resultantes son utilizados en la fig. siguiente, determinando el contenido de agua y peso unitario óptimo del material.

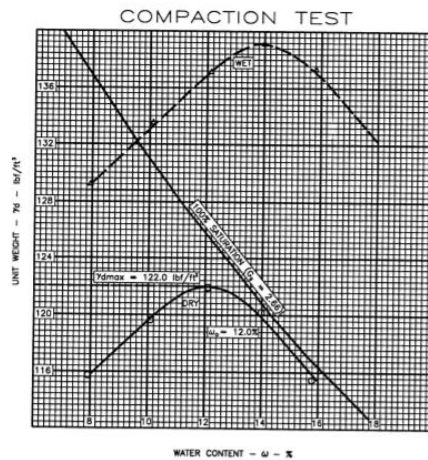


Fig. 9.5-7: Ejemplo de grafica de la curva de compactación.



9.5.3 Consolidación

Con el odómetro (ASTM D2435); para una muestra de suelo seco, el consolidómetro es ensamblado de tal manera que, al momento del ensayo, no se genera un cambio en el contenido del agua de la muestra. Se coloca un plástico suelto alrededor del consolidómetro o una membrana de goma, con el fin de evitar cambios de volumen en la muestra por la acción de la evaporación. Se coloca el consolidómetro en el dispositivo de carga con una presión de asiento de 5 kPa, en caso de generar una consolidación significativa, se deberá reducir a una presión de 2 o 3 kPa.

A lo largo del ensayo, la muestra es sometida a distintos incrementos de carga sobre el material, registrando el cambio de altura sufrido en cada medición, en un período aproximado de 24 horas dependiendo del tipo de suelo. Al terminar de ensayar se debe volver a la carga de asentamiento para evitar cambios drásticos en las dimensiones del material, posteriormente se registra la masa del material seco y su contenido de agua.

9.5.4 Granulometría

Para definir la distribución por tamaño de las partículas, se realiza el tamizaje (ASTM D6913) usando elementos de marco metálico con malla, en el que parte del material queda retenido. El material se necesita seco, por lo que es previamente pasado por un horno. Las diferentes mallas se superponen de manera vertical (fig. 9.5-8) con diámetros de aberturas de 125 mm hasta 0,075 mm (tamiz n°200), para colocarlas en un vibrador mecánico (Rot-up) durante 10-15 min, que separa el material según dimensiones.

En la determinación de la masa retenida, se retira el primer tamiz (mayor tamaño) verificando que no haya material particulado presente, en caso de existir, el material es transferido al siguiente tamiz y se realiza una agitación manual del set de tamices. En los tamices restantes, el material retenido es depositado en la balanza con el cuidado de no tener derrames ni generación de polvos, evitando su pérdida. Cualquier material residual en el tamiz debe ser cepillado y registrado en la balanza, posterior a la medición éste debe ser depositado en un contenedor, con el fin de corroborar la masa total del material. Con la masa obtenida en cada tamiz se obtiene una curva, modelando la distribución del tamaño de partícula presente en la muestra.

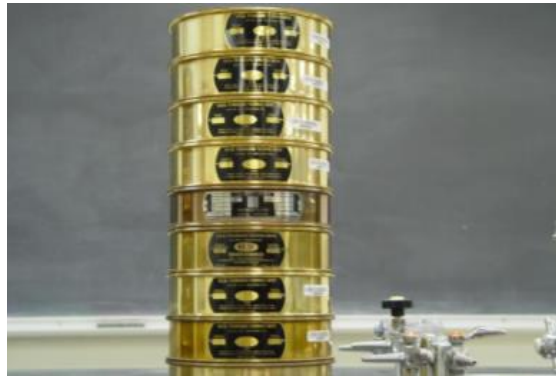


Fig. 9.5-8: Imagen referencia de tamices superpuestos.

9.5.5 Cohesión

Para la compresión no confinada (ASTM D2166), se coloca una probeta del material en estudio de manera centrada en el aparato de carga, manteniendo el indicador de deformación en cero. Se aplica una carga suficiente, para generar una deformación del 1,4% a 2% por minuto, registrando la deformación longitudinal y axial al aumentar la carga en el tiempo transcurrido (no se debe superar los 15 minutos antes de fallar).

Posteriormente a la falla generada, se registra mediante un bosquejo o fotografía la muestra con la falla, exponiendo el ángulo de la falla generada en la superficie de la probeta.

9.5.6 Gravedad específica

9.5.6.1 Picnómetro (ASTM D854)

Mediante un picnómetro de agua, se determina la gravedad específica de los sólidos del suelo, tanto seco como húmedos que logran pasar el tamiz 4.75 mm y que no son fácilmente diluidos. Dependiendo si la muestra es húmeda o seca se verá definida la metodología a seguir

Para la muestra seca, este debe venir de un tratamiento de secado según lo establecido en la norma ASTM D2216. Se utiliza la siguiente tabla guía donde se ve la relación del tipo de suelo, tamaño de la muestra y el tamaño del picnómetro a utilizar.



Tabla 9.5-4: Gramos a utilizar según el tipo de suelo, asociado a dimensiones de picnómetro.

Soil Type	Specimen Dry Mass (g) When Using 250 mL Pycnometer	Specimen Dry Mass (g) When Using 500 mL Pycnometer
SP, SP-SM	60 ± 10	100 ± 10
SP-SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
Silt or Clay	35 ± 5	50 ± 10

Antes del ensayo se debe realizar la calibración del picnómetro, el cual debe estar limpio y seco para evitar alteraciones por elementos externos al sistema. Se mide la masa del picnómetro vacío registrando su valor y repitiendo hasta que la desviación estándar de estos datos no supere los 0.02 g.

En la preparación de la muestra húmeda, se procede a medir la cantidad de agua presente como lo define la norma D2216, calculando el rango de masa húmeda, y así determinar según la tabla 9.5-4, el tamaño de picnómetro correspondiente. Se vierte 100 ml de agua en la muestra generando un lodo, que es depositado en su respectivo picnómetro mediante un embudo, enjuagando las partículas residuales en éste mediante un rocío. Para la muestra seca, después de ser sacado del horno y vertido en el picnómetro mediante un embudo, se procede a humedecer con 100 ml de agua.

Para ambos casos, tanto seco como húmedo, se vierte agua hasta llegar al punto que 1/3 o 1/2 del picnómetro esté cubierto, agitando hasta formar la suspensión de las partículas.

9.5.6.2 Masa sumergida (ASTM C127)

Para determinar la densidad específica del material, el ensayo permite obtener la densidad relativa de una cantidad de partículas de agregado grueso, sin considerar el volumen de vacío entre estas.

El procedimiento parte con una muestra a peso constante, secada en un horno a 110 ± 5 °C, para posteriormente sumergirla en agua a temperatura ambiente por un tiempo de 20 a 28 horas. Tras el período de reposo en agua, la muestra es retirada para eliminar las películas visibles de agua, mediante el rodamiento en un paño o con una corriente de aire en movimiento. Teniendo consideración que es un secado de la superficie del material, hay que evitar la evaporación del agua agregada a nivel de poros, para posteriormente determinar la masa de la muestra en condiciones de superficie saturada seca, considerando un error de 0.5 g o un 0.05% de la masa (aplicándose el mayor).

Con la masa del material ya definida, se deposita la muestra en un recipiente, determinando su masa aparente en agua a temperaturas de 23 ± 2 °C, suficiente para cubrir la muestra. Durante el proceso se agita el recipiente para quitar todo el aire presente entre partículas. Posteriormente se extrae la

muestra húmeda para ser secada en un horno a temperatura de 110 ± 5 °C, y luego dejar enfriar a temperatura constante de 1 a 3 horas, determinando la masa resultante.

9.5.7 Humedad natural

Se requiere realizar el secado en horno (fig. 9.5-9), según la norma ASTM D2216; el ensayo consiste en la determinación del contenido de agua en una muestra de roca, suelo y material similar, mediante el secado a una temperatura de 110 ± 5 °C de manera constante, atribuyendo la masa reducida a la masa de agua contenida.

Primero se determina la masa del recipiente (limpio y seco) que contendrá la muestra del espécimen en estudio, posteriormente se toma una muestra homogenizada del material, asegurando que no exista pérdida de humedad ni segregación, luego se coloca la muestra escogida en el recipiente y se determina la masa del conjunto recipiente-muestra, en una balanza que deberá cumplir con la norma D4753. Se introduce el recipiente con la muestra en un horno capaz de mantener la temperatura de forma constante y homogénea en toda la cámara. El material seco se retira del recipiente y se deja enfriar hasta que pueda ser manipulado, para medir la masa en una balanza. Usando la siguiente fórmula:

$$W = \left[\frac{(M_{cws} - M_{cs})}{M_{cs} - M_c} \right] * 100 = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

Donde:

W : Contenido de humedad [%]

M_{cws} : Peso de recipiente y el espécimen húmedo [g]

M_c : Peso del recipiente [g]

M_{cs} : Peso del recipiente y el peso del espécimen seco [g]

M_w : Peso del agua ($M_w = M_{cws} - M_{cds}$) [gr]

M_s : Peso de las partículas sólidas ($M_s = M_{cds} - M_c$) [gr]



Fig. 9.5-9: Referencia de horno de secado de acero inoxidable.

9.6 Anexo F: Resultados ensayos caracterización

9.6.1 Asentamiento y fluidez

Cuando la muestra exhibe desprendimiento o caída de una porción de masa para pruebas consecutivas, se determina que la muestra carece de la plasticidad y cohesión necesaria.

A continuación, se presentan las fotografías registradas durante este ensayo, para dos muestras de material, A (café) y B (gris).

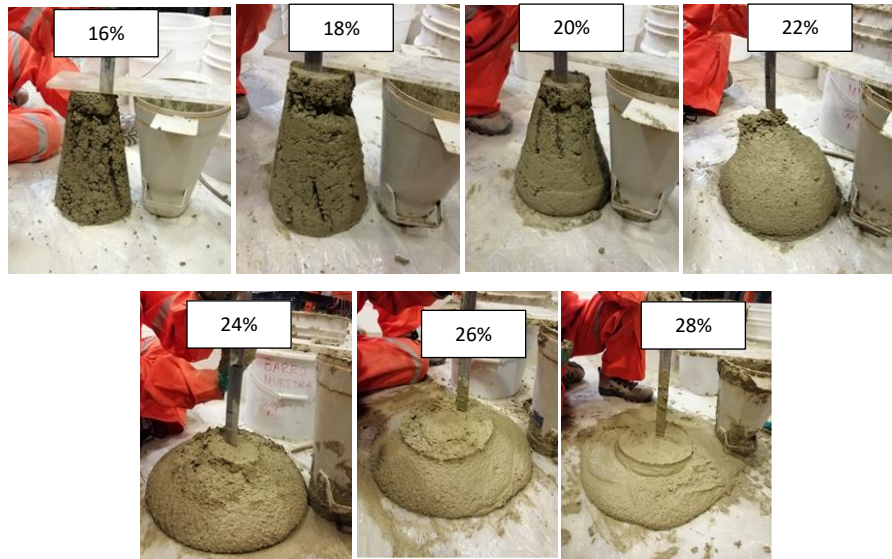


Fig. 9.6-10: Fotografías del ensayo 2, muestra de material A (café) del “Cono de Abrams”.

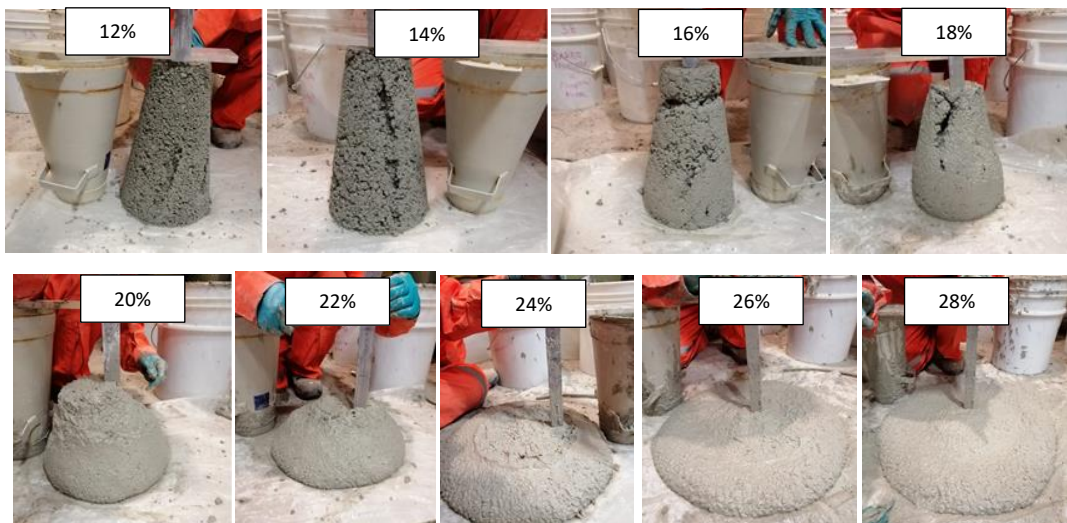


Fig. 9.6-11: Fotografías del ensayo 3, muestra de material B (gris) del “Cono de Abrams”.

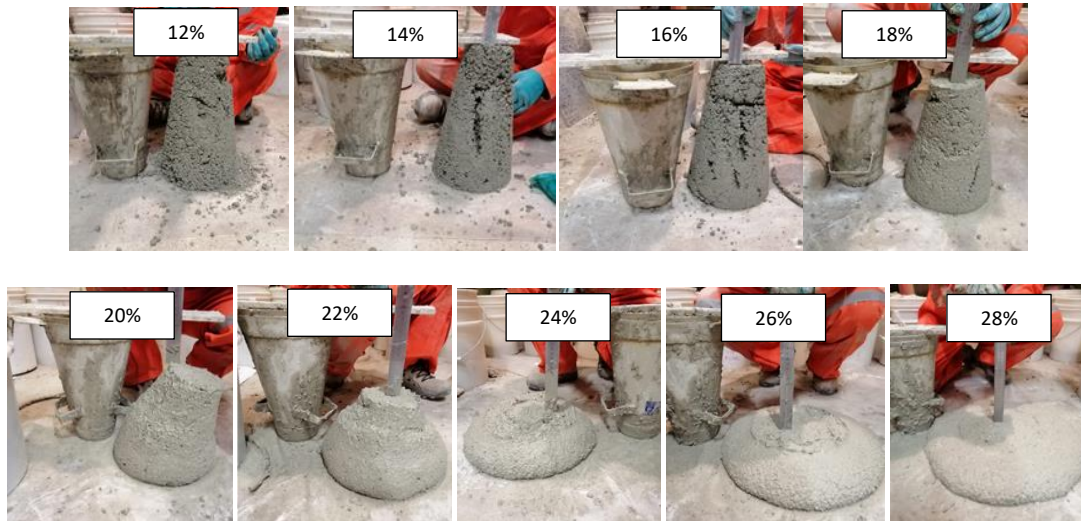


Fig. 9.6-12: Fotografías del ensayo 4, muestra de material B (gris) del "Cono de Abrams".



Fig. 9.6-13: Fotografías del ensayo 5, muestra de material A (café) del "Cono de Abrams".

Tabla 9.6-5: Datos registrados para todos los ensayos realizados con el Cono de Abrams.

Humedad [%]	Exp. 1 material A ensayo		Exp. 2 material A		Exp. 3 material B		Exp. 4 material B Rep		Exp. 5 material A Rep.	
	Δh [cm]	Consistencia	Δh [cm]	Consistencia	Δh [cm]	Consistencia	Δh [cm]	Consistencia	Δh [cm]	Consistencia
8	7,9	Seco								
10	9,1	Seco								
12	3,83	Seco			0	Seco	0	Seco		
14	2,9	Seco			0	Seco	0	Seco		
16	0,2	Seco	0	Seco	1,3	Seco	0,8	Seco	0,4	Seco
18	0	Seco	0,8	Seco	5,2	Plástico	3,9	Seco	2,1	Seco
20	0,4	Seco	4,5	Plástico	11,8	Blando	8,3	Plástico	4,9	Plástico
22	4,5	Plástico	12,2	Blando	19	Fluido	14,7	Blando	10,9	Blando
24	6	Plástico	20	Fluido	24	Fluido	20,3	Fluido	16	Fluido
26			22,6	Fluido	25	Fluido	23,7	Fluido	21,6	Fluido
28			24,8	Fluido	26,1	Fluido	24,9	Fluido	24,8	Fluido

9.6.2 Resistencia al corte

A continuación, se presenta la información para las dos muestras de material, A (café) y B (gris), recopilada durante este ensayo junto con sus respectivas graficas.

- Muestra de material B (gris)

Tabla 9.6-6: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.

	Masa Vertical [Kg]	5	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	73,79
1	0,03	0,02	0	0,054049	
2	0,08	0,13	-0,015	0,135464	
3	0,095	0,36	-0,018	0,1598885	
4	0,1	0,54	-0,025	0,16803	
5	0,12	0,73	-0,04	0,200596	
6	0,14	0,88	-0,048	0,233162	
7	0,16	1,055	-0,05	0,265728	
8	0,175	1,25	-0,056	0,2901525	
10	0,2	1,61	-0,057	0,33086	
12	0,22	2	-0,05	0,363426	



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING

	Masa Vertical [Kg]	5	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	73,79
14	0,25	2,34	-0,035	0,412275	
16	0,275	2,72	0,01	0,4529825	
18	0,292	3,08	0,015	0,4806636	
20	0,31	3,47	0,05	0,509973	
22	0,325	3,85	0,08	0,5343975	
24	0,34	4,21	0,11	0,558822	
26	0,36	4,61	0,15	0,591388	
28	0,375	4,99	0,19	0,6158125	
30	0,385	5,38	0,24	0,6320955	
32	0,398	5,77	0,272	0,6532634	
34	0,4	6,17	0,31	0,65652	
36	0,415	6,55	0,34	0,6809445	
38	0,425	6,94	0,38	0,6972275	
40	0,43	7,335	0,417	0,705369	
42	0,44	7,75	0,45	0,721652	
44	0,441	8,2	0,48	0,7232803	
46	0,443	8,57	0,515	0,7265369	
48	0,45	8,97	0,55	0,737935	
50	0,44	9,37	0,585	0,721652	

Tabla 9.6-7: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.

	Masa Vertical [Kg]	15	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	204,06
1	0,06	0	-0,01	0,102898	
2	0,155	0,06	-0,05	0,2575865	
3	0,22	0,18	-0,1	0,363426	
4	0,27	0,3	-0,14	0,444841	
5	0,32	0,47	-0,155	0,526256	
6	0,35	0,62	-0,161	0,575105	
7	0,385	0,78	-0,17	0,6320955	
8	0,41	0,95	-0,178	0,672803	
9	0,43	1,11	-0,186	0,705369	
10	0,46	1,29	-0,2	0,754218	
12	0,505	1,63	-0,22	0,8274915	
14	0,545	1,99	-0,23	0,8926235	
16	0,58	2,35	-0,22	0,949614	



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING

	Masa Vertical [Kg]	15	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	204,06
18	0,62	2,7	-0,2	1,014746	
20	0,66	3,08	-0,18	1,079878	
22	0,7	3,46	-0,16	1,14501	
24	0,728	3,79	-0,15	1,1906024	
26	0,76	4,15	-0,14	1,242708	
28	0,79	4,52	-0,115	1,291557	
30	0,815	4,9	-0,09	1,3322645	
32	0,835	5,24	-0,07	1,3648305	
34	0,85	5,68	-0,04	1,389255	
36	0,865	6,05	-0,012	1,4136795	
38	0,89	6,44	0,015	1,454387	
40	0,9	6,82	0,04	1,47067	
42	0,92	7,2	0,07	1,503236	
44	0,935	7,59	0,09	1,5276605	
46	0,952	7,98	0,12	1,5553416	
48	0,955	8,38	0,14	1,5602265	
50	0,975	8,76	0,165	1,5927925	
52	0,99	9,15	0,19	1,617217	
54	1,05	9,54	0,15	1,714915	
56	1	9,95	0,45	1,6335	
58	1	10,33	0,7	1,6335	
60	0,99	10,74	0,9	1,617217	
62	1	11,18	1,1	1,6335	
64	1,1	11,7	1,34	1,79633	
66	1,15	12,2	1,45	1,877745	
68	1,25	12,7	1,61	2,040575	

Tabla 9.6-8: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.

	Masa Vertical [Kg]	30	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	293,61
1	0,09	0,05	-0,02	0,151747	
2	0,19	0,13	-0,06	0,314577	
3	0,3	0,21	-0,11	0,49369	
4	0,39	0,33	-0,14	0,640237	
5	0,46	0,44	-0,18	0,754218	
6	0,52	0,56	-0,21	0,851916	
7	0,48	0,81	-0,22	0,786784	



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING

	Masa Vertical [Kg]	30	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	293,61
8	0,46	1,04	-0,22	0,754218	
9	0,45	1,24	-0,23	0,737935	
10	0,45	1,45	-0,23	0,737935	
11	0,49	1,59	-0,23	0,803067	
12	0,59	1,69	-0,25	0,965897	
13	0,65	1,82	-0,29	1,063595	
14	0,71	1,96	-0,30	1,161293	
15	0,77	2,11	-0,32	1,258991	
16	0,815	2,26	-0,35	1,3322645	
17	0,87	2,40	-0,38	1,421821	
18	0,9	2,58	-0,40	1,47067	
19	0,935	2,74	-0,41	1,5276605	
20	0,98	2,89	-0,425	1,600934	
21	1,02	3,03	-0,43	1,666066	
22	1,05	3,19	-0,445	1,714915	
23	1,09	3,35	-0,45	1,780047	
24	1,115	3,53	-0,46	1,8207545	
25	1,15	3,69	-0,465	1,877745	
26	1,18	3,85	-0,47	1,926594	
27	1,21	4,01	-0,478	1,975443	
28	1,245	4,18	-0,48	2,0324335	
29	1,27	4,35	-0,482	2,073141	
30	1,3	4,53	-0,488	2,12199	
31	1,33	4,69	-0,49	2,170839	
32	1,36	4,86	-0,493	2,219688	
33	1,4	5,05	-0,494	2,28482	
34	1,44	5,22	-0,494	2,349952	
35	1,47	5,39	-0,494	2,398801	
36	1,495	5,54	-0,492	2,4395085	
37	1,51	5,71	-0,491	2,463933	
38	1,54	5,89	-0,49	2,512782	
39	1,57	6,05	-0,485	2,561631	
40	1,59	6,24	-0,48	2,594197	
41	1,615	6,42	-0,475	2,6349045	
42	1,63	6,59	-0,472	2,659329	
43	1,66	6,79	-0,47	2,708178	
44	1,68	6,94	-0,465	2,740744	
45	1,71	7,12	-0,455	2,789593	
46	1,74	7,29	-0,45	2,838442	

	Masa Vertical [Kg]	30	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	293,61
47	1,76	7,47	-0,44	2,871008	
48	1,78	7,66	-0,43	2,903574	
49	1,795	7,84	-0,42	2,9279985	
50	1,8	7,98	-0,41	2,93614	

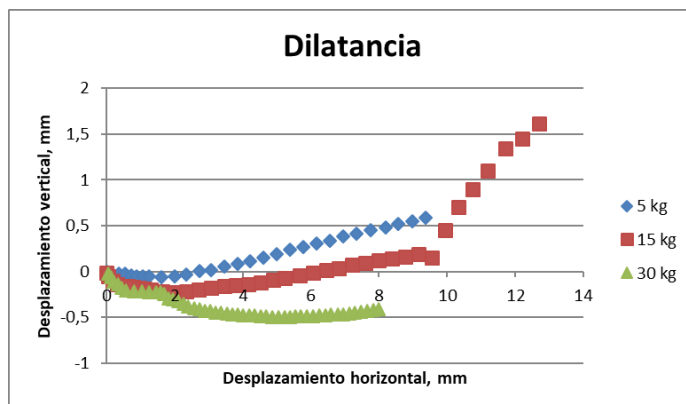


Fig. 9.6-14: Gráfico de dilatancia, cambio volumétrico de la muestra de material B (gris), comportamiento del material al ser sometido a diferentes cargas.

- Muestra de material A (café)

Tabla 9.6-9: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.

	Masa Vertical [Kg]	5	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	63,86
1	0,08	0,04	-0,27	0,135464	
2	0,085	0,21	-0,282	0,1436055	
3	0,09	0,41	-0,283	0,151747	
4	0,1	0,615	-0,284	0,16803	
5	0,101	0,81	-0,285	0,1696583	
6	0,101	1	-0,285	0,1696583	
8	0,15	1,36	-0,275	0,249445	
10	0,18	1,71	-0,275	0,298294	
12	0,215	2,05	-0,255	0,3552845	
14	0,245	2,42	-0,235	0,4041335	
16	0,269	2,8	-0,215	0,4432127	
18	0,28	3,18	-0,191	0,461124	
20	0,295	3,57	-0,197	0,4855485	



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING

	Masa Vertical [Kg]	5	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	63,86
22	0,31	3,93	-0,142	0,509973	
24	0,329	4,33	-0,118	0,5409107	
26	0,34	4,71	-0,09	0,558822	
28	0,349	5,1	-0,06	0,5734767	
30	0,359	5,5	-0,03	0,5897597	
32	0,369	5,89	-0,008	0,6060427	
34	0,375	6,28	0,02	0,6158125	
36	0,38	6,67	0,05	0,623954	
38	0,389	7,08	0,08	0,6386087	
40	0,39	7,48	0,105	0,640237	
42	0,4	7,88	0,14	0,65652	
44	0,405	8,27	0,17	0,6646615	
46	0,41	8,67	0,2	0,672803	
48	0,415	9,07	0,23	0,6809445	
50	0,418	9,28	0,245	0,6858294	

Tabla 9.6-10: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.

	Masa Vertical [Kg]	15	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	138,60
1	0	0	0	0,0052	
2	0,02	0,028	-0,01	0,037766	
3	0,128	0,115	-0,04	0,2136224	
4	0,19	0,218	-0,068	0,314577	
5	0,23	0,41	-0,1	0,379709	
6	0,265	0,55	-0,11	0,4366995	
8	0,34	0,85	-0,165	0,558822	
10	0,39	1,2	-0,21	0,640237	
12	0,43	1,55	-0,2	0,705369	
14	0,455	1,91	-0,255	0,7460765	
16	0,48	2,29	-0,265	0,786784	
18	0,512	2,66	-0,28	0,8388896	
20	0,548	3,02	-0,29	0,8975084	
22	0,575	3,39	-0,295	0,9414725	
24	0,597	3,77	-0,3	0,9772951	
26	0,62	4,14	-0,3	1,014746	
28	0,639	4,52	-0,3	1,0456837	
30	0,658	4,915	-0,293	1,0766214	



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING

	Masa Vertical [Kg]	15	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	138,60
32	0,679	5,29	-0,287	1,1108157	
34	0,688	5,755	-0,273	1,1254704	
36	0,71	6,1	-0,255	1,161293	
38	0,722	6,46	-0,249	1,1808326	
40	0,739	6,86	-0,232	1,2085137	
42	0,756	7,21	-0,22	1,2361948	
44	0,77	7,585	-0,198	1,258991	
46	0,785	7,99	-0,183	1,2834155	
48	0,79	8,4	-0,172	1,291557	
50	0,798	8,78	-0,155	1,3045834	
52	0,8	9,15	-0,134	1,30784	
54	0,81	9,586	-0,114	1,324123	
56	0,815	9,96	-0,1	1,3322645	
58	0,819	10,35	-0,082	1,3387777	
60	0,82	10,74	-0,08	1,340406	
62	0,825	11,15	-0,065	1,3485475	
64	0,83	11,46	-0,051	1,356689	
66	0,843	11,47	-0,04	1,3778569	
68	0,848	11,47	-0,04	1,3859984	

Tabla 9.6-11: Resultados de los ensayos realizados en la Universidad de Concepción, con los correspondientes parámetros.

	Masa Vertical [Kg]	30	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	318,04
1	0,00	0,01	0,00	0,0052	
2	0,07	0,03	-0,07	0,119181	
3	0,17	0,10	-0,14	0,282011	
4	0,28	0,22	-0,17	0,461124	
5	0,35	0,29	-0,25	0,575105	
6	0,44	0,42	-0,28	0,721652	
7	0,51	0,64	-0,31	0,835633	
8	0,43	0,85	-0,31	0,705369	
9	0,43	1,08	-0,31	0,705369	
10	0,43	1,24	-0,31	0,705369	
11	0,51	1,32	-0,32	0,835633	
12	0,58	1,45	-0,35	0,949614	
13	0,65	1,62	-0,36	1,063595	
14	0,70	1,75	-0,37	1,14501	



ESTUDIO EXPLORATORIO EXTRACTIVO DE EVENTOS DE BARRO EN UN MODELO FÍSICO PARA MINERÍA DE BLOCK CAVING

	Masa Vertical [Kg]	30	Vel. Corte [mm/min]	0,2	Corte Max [kPa]
Tiempo [min]	Deformación [mm]	Desplazamiento Horizontal [mm]	Deformación Vertical [mm]	Carga H (Axial) [kN]	318,04
15	0,75	1,87	-0,38	1,226425	
16	0,80	2,02	-0,41	1,30784	
17	0,84	2,16	-0,42	1,372972	
18	0,88	2,31	-0,43	1,438104	
19	0,91	2,46	-0,45	1,486953	
20	1,95	2,63	-0,46	3,180385	
21	0,99	2,84	-0,475	1,617217	
22	1,02	2,96	-0,48	1,666066	
23	1,05	3,12	-0,49	1,714915	
24	1,09	3,29	-0,50	1,780047	
25	1,12	3,48	-0,505	1,828896	
26	1,15	3,63	-0,51	1,877745	
27	1,17	3,82	-0,515	1,910311	
28	1,20	3,97	-0,52	1,95916	
29	1,23	4,13	-0,52	2,008009	
30	1,255	4,31	-0,52	2,0487165	
31	1,28	4,48	-0,525	2,089424	
32	1,31	4,64	-0,525	2,138273	
33	1,335	4,82	-0,525	2,1789805	
34	1,36	5,01	-0,525	2,219688	
35	1,38	5,22	-0,525	2,252254	
36	1,41	5,35	-0,525	2,301103	
37	1,43	5,53	-0,527	2,333669	
38	1,45	5,72	-0,525	2,366235	
39	1,47	5,89	-0,52	2,398801	
40	1,49	6,07	-0,52	2,431367	
41	1,51	6,22	-0,519	2,463933	
42	1,54	6,42	-0,518	2,512782	
43	1,56	6,59	-0,51	2,545348	
44	1,58	6,78	-0,505	2,577914	
45	1,60	6,95	-0,50	2,61048	
46	1,62	7,13	-0,49	2,643046	
47	1,64	7,30	-0,49	2,675612	
48	1,655	7,51	-0,48	2,7000365	
49	1,67	7,69	-0,48	2,724461	
50	1,68	7,81	-0,48	2,740744	

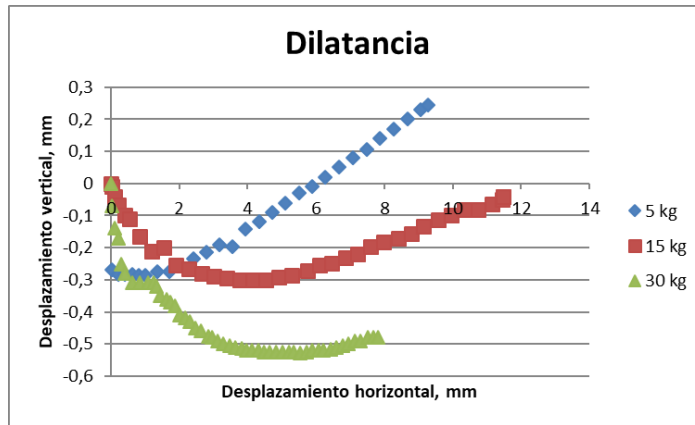


Fig. 9.6-15: Gráfico de dilatancia, cambio volumétrico de la muestra de material A (café), comportamiento del material al ser sometido a diferentes cargas.

9.6.3 Pérdida de humedad natural

Se toman datos cada una hora, considerando el horario laboral, se provee la información con 16 toma de datos en un período de 31 horas. Usando las siguientes ecuaciones, se desarrollan las tablas y gráficas exhibidas en este capítulo.

$$\text{Masa húmeda [g]} = \text{masa de agua [g]} + \text{masa seca [g]}$$

$$\text{Humedad [\%]} = \frac{\text{masa de agua [g]}}{\text{masa seca [g]}} = \frac{\text{masa húmeda [g]} - \text{masa seca [g]}}{\text{masa seca [g]}}$$

$$\text{Pérdida de humedad acumulada [\%]} = \text{Humeda inicial} - \text{Humeda instantanea}$$

- 224,64 g de muestra seca con 16% de humedad.

Tabla 9.6-12: Resultados para la muestra con 16% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 1.

Hora	Tiempo	Masa húmeda [g]	Humedad [%]	Pérdida de humedad acumulada [%]
10:45	0	260,6	16,007835	0
11:45	1	260,32	15,883191	0,12
12:45	2	260,1	15,785256	0,22
13:45	3	259,94	15,714031	0,29
14:45	4	259,79	15,647258	0,36
15:45	5	259,64	15,580484	0,43
16:45	6	259,42	15,48255	0,53
17:45	7	259,25	15,406873	0,60



Tabla 9.6-13: Resultados para la muestra con 16% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 2.

Hora	Tiempo	Masa húmeda [g]	Humedad [%]	Pérdida de humedad acumulada [%]
10:45	24	257,39	14,57888177	1,43
11:45	25	257,25	14,51655983	1,49
12:45	26	257,11	14,45423789	1,55
13:45	27	256,91	14,36520655	1,64
14:45	28	256,77	14,30288462	1,70
15:45	29	256,62	14,23611111	1,77
16:45	30	256,41	14,14262821	1,87
17:45	31	256,22	14,05804843	1,95

- 224,62 g de muestra seca con 20% de humedad.

Tabla 9.6-14: Resultados para la muestra con 20% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 1.

Hora	Tiempo	Masa húmeda [g]	Humedad [%]	Pérdida de humedad acumulada [%]
10:45	0	269,54	19,998219	0
11:45	1	269,14	19,820141	0,18
12:45	2	268,8	19,668774	0,33
13:45	3	268,54	19,553023	0,45
14:45	4	268,33	19,459532	0,54
15:45	5	268,06	19,339329	0,66
16:45	6	267,74	19,196866	0,80
17:45	7	267,54	19,107827	0,89

Tabla 9.6-15: Resultados para la muestra con 20% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 2.

Hora	Tiempo	Masa húmeda [g]	Humedad [%]	Pérdida de humedad acumulada [%]
10:45	24	265,04	17,99483572	2,00
11:45	25	264,86	17,91470038	2,08
12:45	26	264,64	17,81675719	2,18
13:45	27	264,41	17,71436203	2,28
14:45	28	264,2	17,6208708	2,38
15:45	29	263,98	17,52292761	2,48
16:45	30	263,74	17,41608049	2,58
17:45	31	263,53	17,32258926	2,68

- 224,28 g de muestra seca con 24% de humedad.



Tabla 9.6-16: Resultados para la muestra con 24% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 1.

Hora	Tiempo	Masa húmeda [g]	Humedad [%]	Pérdida de humedad acumulada [%]
10:45	0	278,07	23,983414	0
11:45	1	277,59	23,769395	0,21
12:45	2	277,21	23,599964	0,38
13:45	3	276,81	23,421616	0,56
14:45	4	276,52	23,292313	0,69
15:45	5	276,15	23,127341	0,86
16:45	6	275,8	22,971286	1,01
17:45	7	275,48	22,828607	1,15

Tabla 9.6-17: Resultados para la muestra con 24% de humedad, de los experimentos de pérdida de humedad por ambiente, día 2.

Hora	Tiempo	Masa húmeda [g]	Humedad [%]	Pérdida de humedad acumulada [%]
10:45	24	272,03	21,29035135	2,69
11:45	25	271,79	21,18334225	2,80
12:45	26	271,53	21,06741573	2,92
13:45	27	271,25	20,94257179	3,04
14:45	28	271,01	20,83556269	3,15
15:45	29	270,8	20,74192973	3,24
16:45	30	270,5	20,60816836	3,38
17:45	31	270,28	20,51007669	3,47

Con la información anterior se obtienen los siguientes gráficos relacionados:

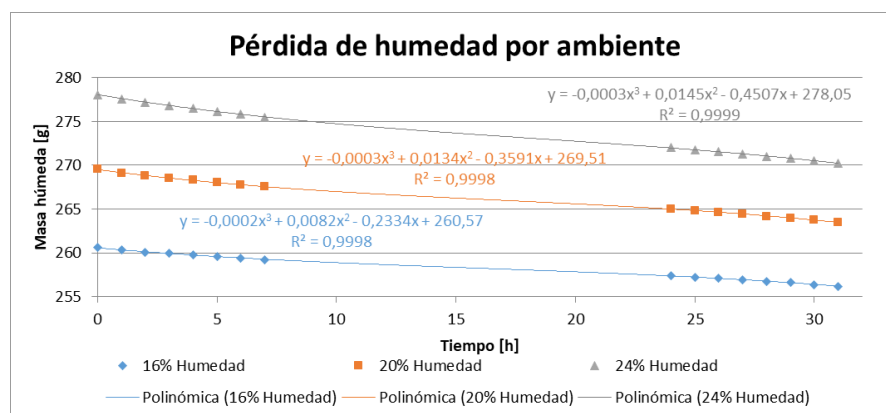


Fig. 9.6-16: Gráfico de variación de la pérdida de masa húmeda por ambiente en el tiempo.

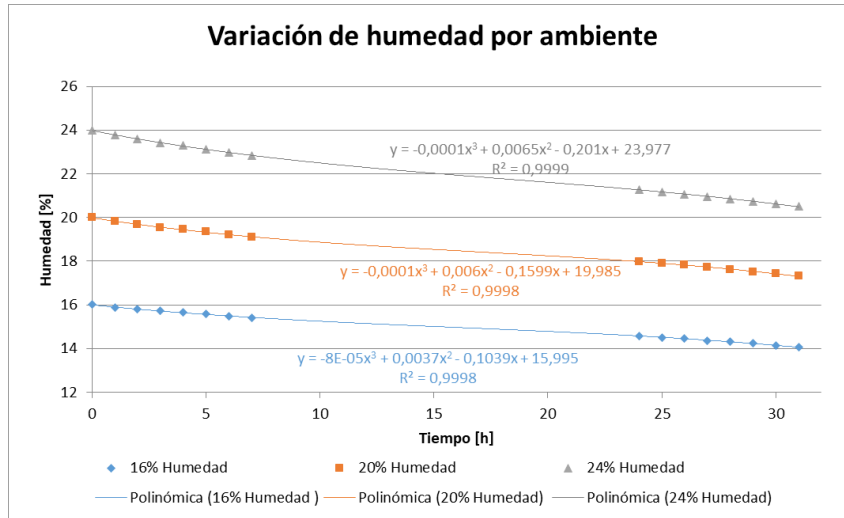


Fig. 9.6-17: Gráfico de variación de humedad por ambiente en el tiempo.

9.6.4 Densidad, gravedad específica y absorción

Para esta sección se utilizaron distintos métodos en la obtención de los datos, los cuales fueron explicados anteriormente en el anexo A, dependiendo del tamaño de partícula. Por lo que la sección se divide en datos y ecuaciones para muestras bajo y sobre 4.75 mm.

Las ecuaciones utilizadas para las muestras bajo 4.75 mm son las siguientes:

$$\rho_m = \frac{\rho_l \times (M2 - M1)}{(M2 - M1) - (M3 - M4)}$$

$$GS = \frac{\rho_m}{\rho_l} = \frac{(M2 - M1)}{(M2 - M1) - (M3 - M4)}$$

Donde:

ρ_m : Densidad del suelo [gr/cc]

ρ_l : Densidad del agua a cierta temperatura [°C]

GS: Gravedad específica del suelo

M1: Masa de matraz vacío [gr]

M2: Masa de matraz con muestra [gr]

M3: Masa de matraz con muestra y agua [gr]

M4: Masa de matraz con agua [gr]

Las ecuaciones utilizadas para las muestras sobre 4.75 mm (agregado grueso) son las siguientes:

$$GS_{OD} = \frac{A}{B - C}$$

$$GS_{SSD} = \frac{B}{B - C}$$



$$GS\ aparente = \frac{A}{A - C}$$

$$Absorción [\%] = \frac{(B - A)}{A} \times 100$$

$$Densidad\ OD = \rho_l \times \frac{A}{B - C}$$

$$Densidad\ SSD = \rho_l \times \frac{B}{B - C}$$

$$Densidad\ aparente = \rho_l \times \frac{A}{A - C}$$

Donde:

A: Masa de la muestra secada en horno [gr]

OD: Secada en horno

*B: Masa de la muestra con saturada
superficialmente seca [gr]*

SSD: Saturada superficialmente seca

C: Masa de la muestra saturada en agua [gr]

Para realizar el cálculo de densidades en agregados gruesos, si no está definida la densidad del agua, por procedimiento se usa 0,9975 gr/cc (23°C) o en la unidad que aplique.

9.7 Anexo G: Resultados experimentos

A continuación, se presentan los datos registrados durante los diferentes experimentos.

9.7.1 Caso base

Este experimento se ejecutó con 16% de humedad, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

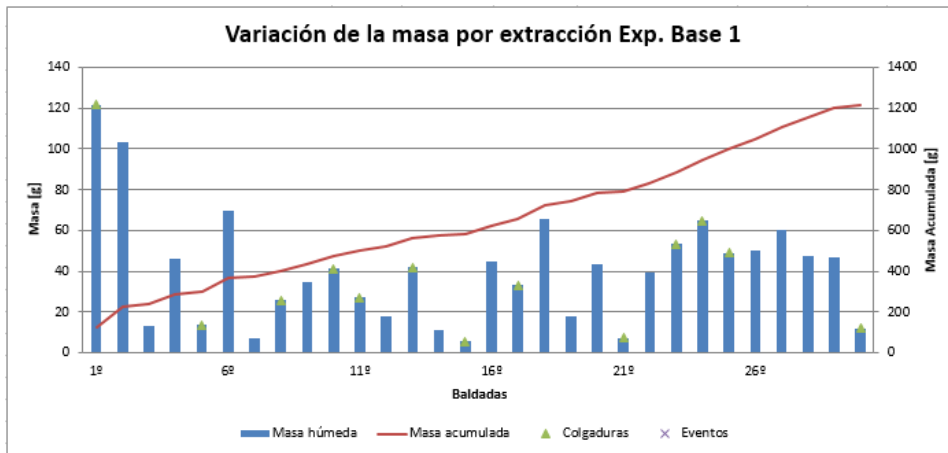


Fig. 9.7-18: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento base 1. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

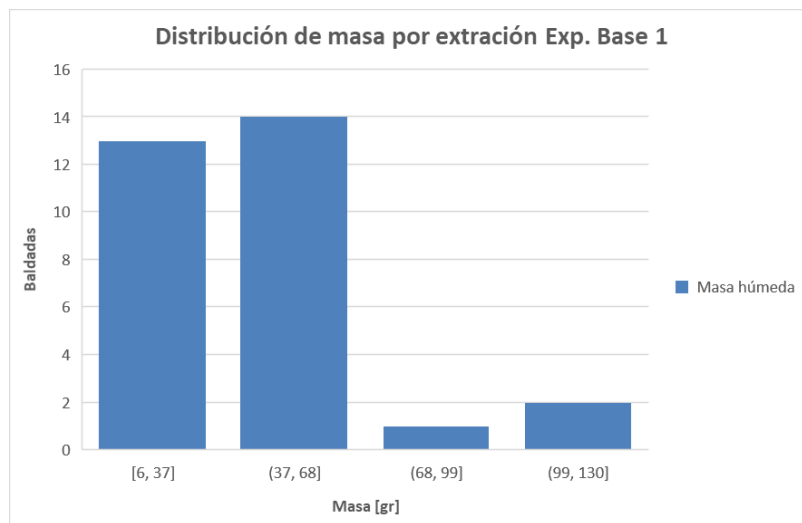


Fig. 9.7-19: Histograma de masa por baldadas, para el experimento base 1.

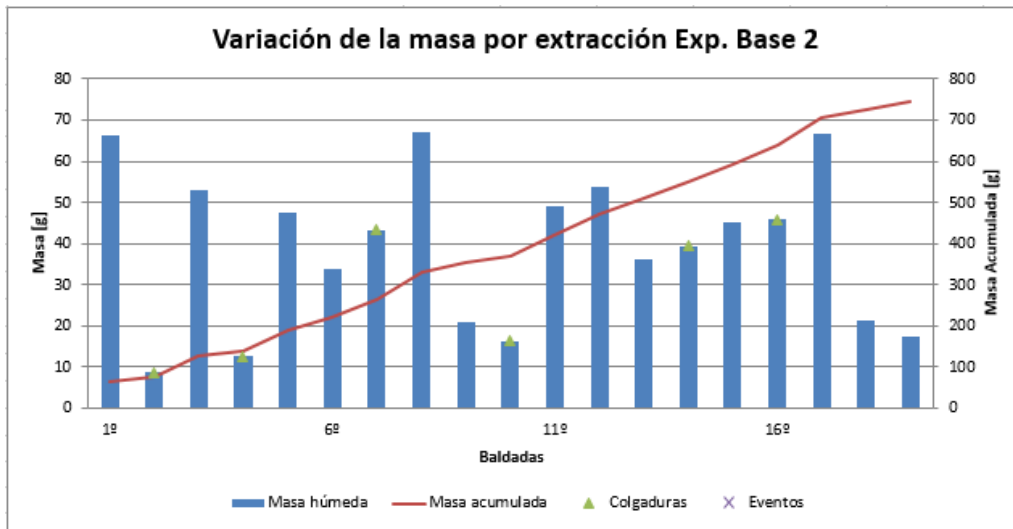


Fig. 9.7-20: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento base 2. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

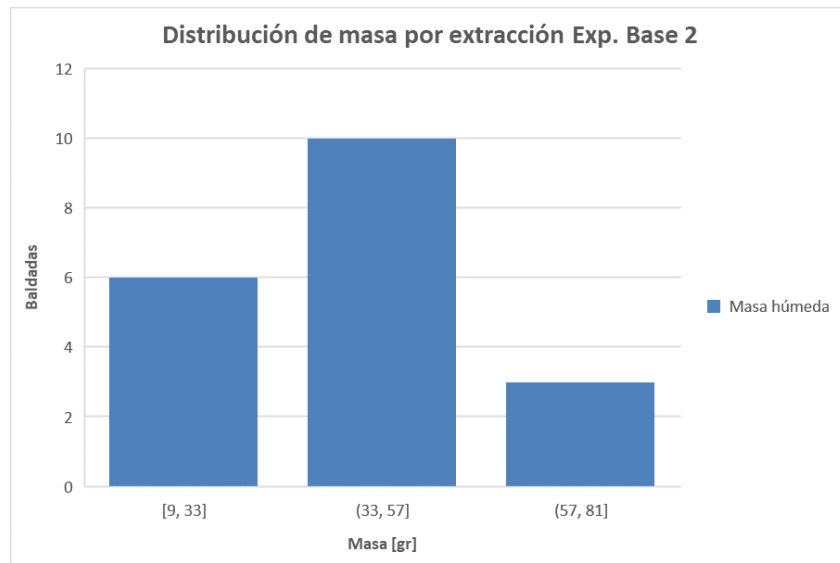


Fig. 9.7-21: Histograma de masa por baldadas, para el experimento base 2.

9.7.2 Experimento 1

Este experimento se ejecutó con 18% de humedad, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

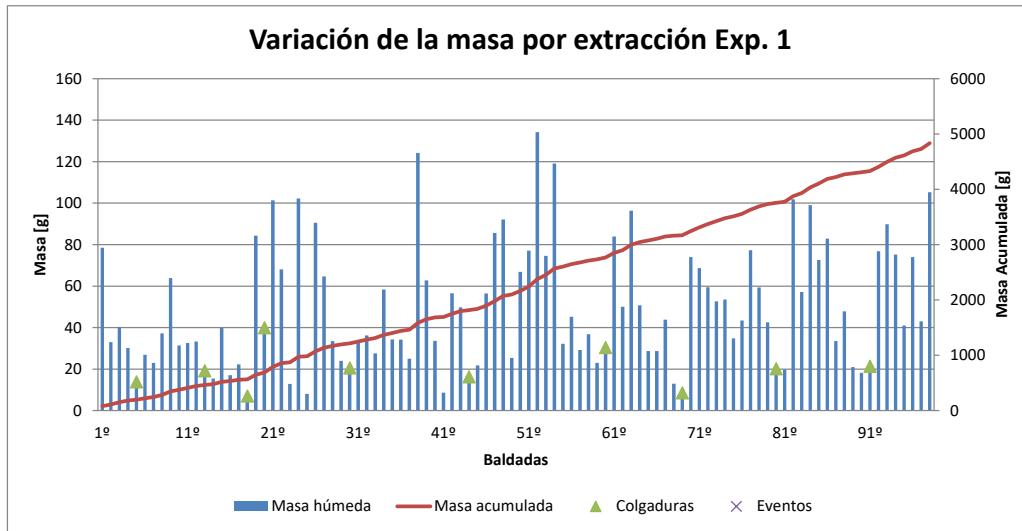


Fig. 9.7-22: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 1. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

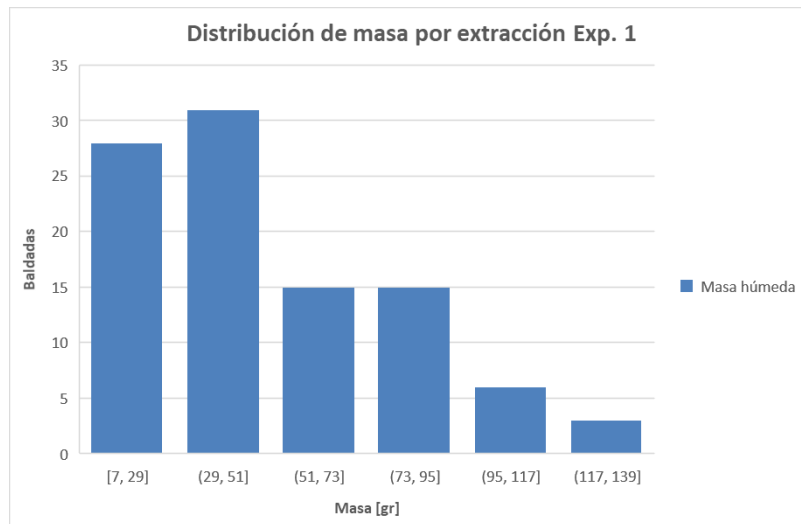


Fig. 9.7-23: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 1.

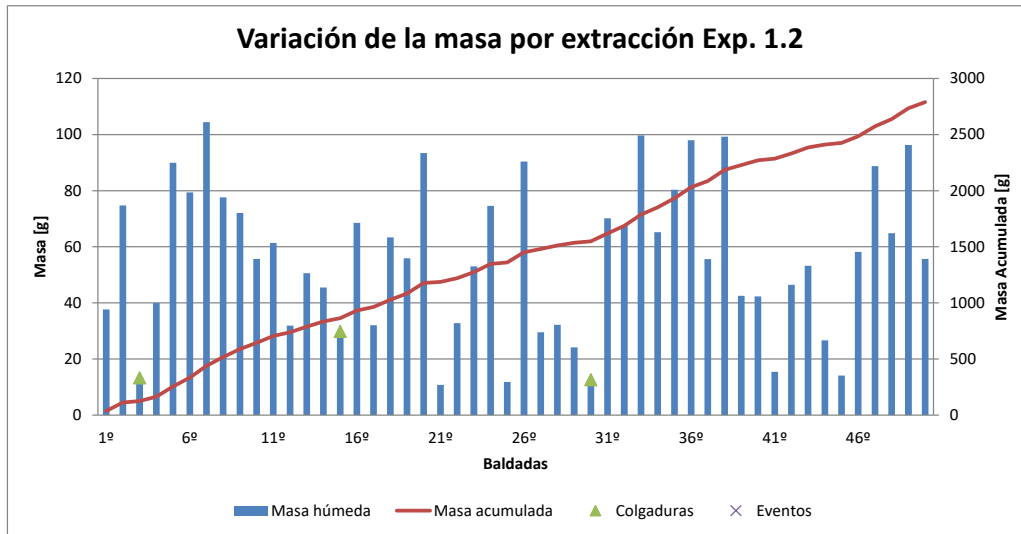


Fig. 9.7-24: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 1.2. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

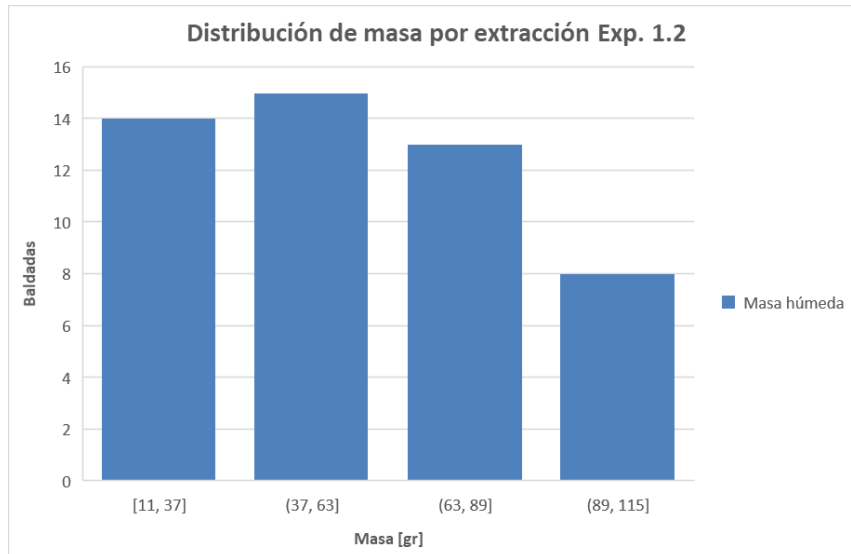


Fig. 9.7-25: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 1.2.

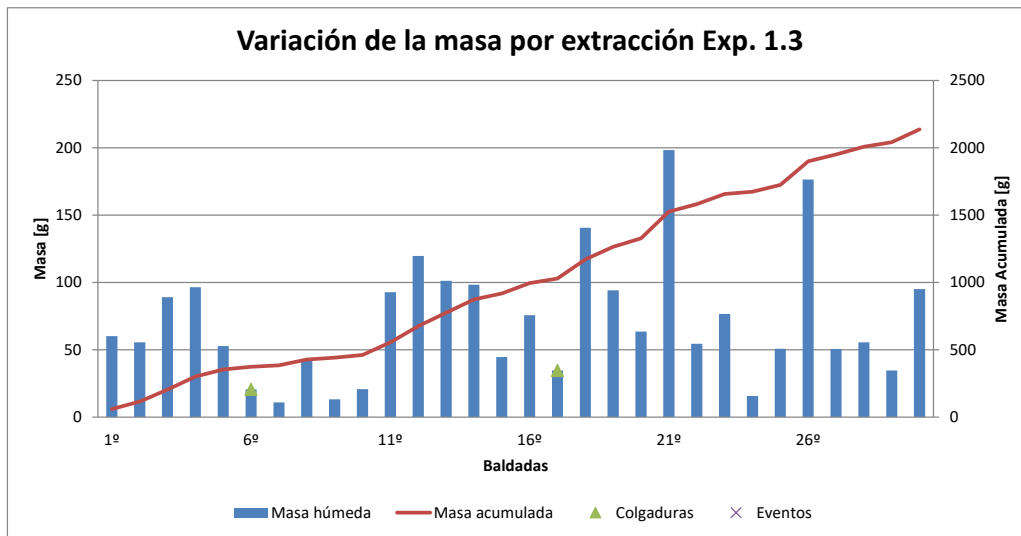


Fig. 9.7-26: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 1.3. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

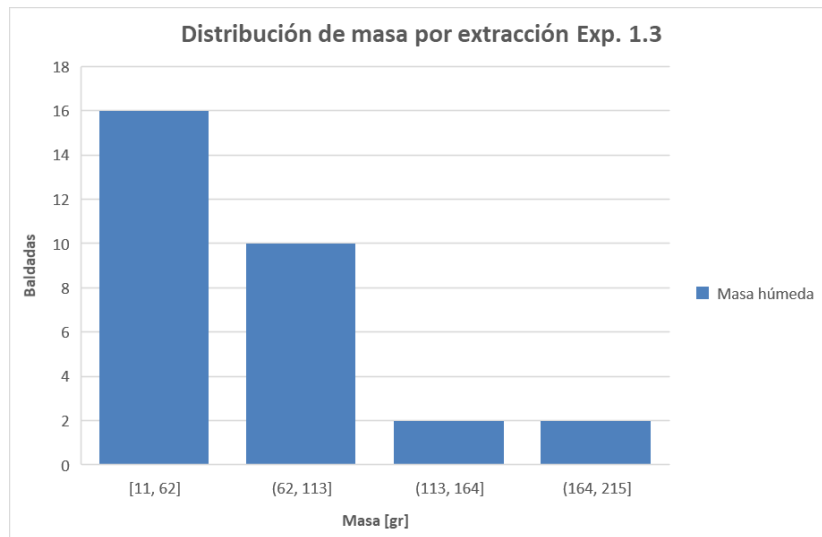


Fig. 9.7-27: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 1.3.

9.7.3 Experimento 2

Este experimento se ejecutó con 20% de humedad, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

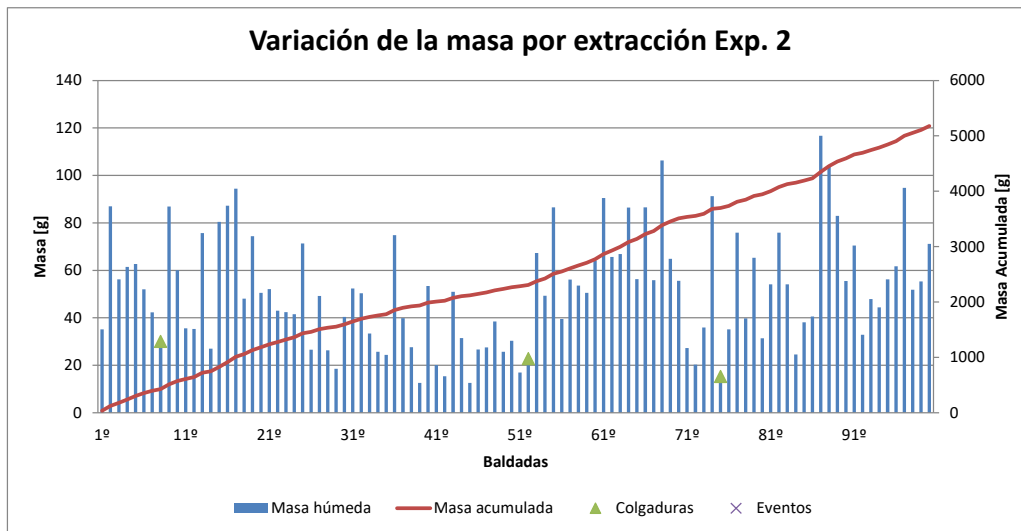


Fig. 9.7-28: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 2. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

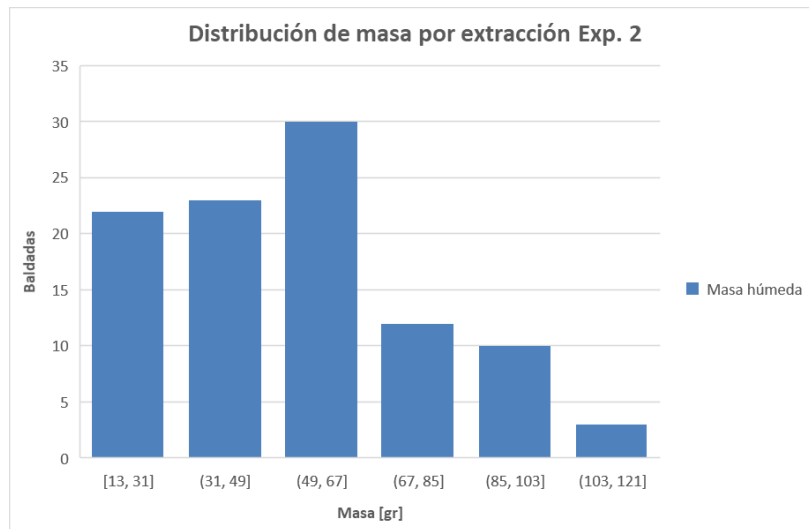


Fig. 9.7-29: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 2.

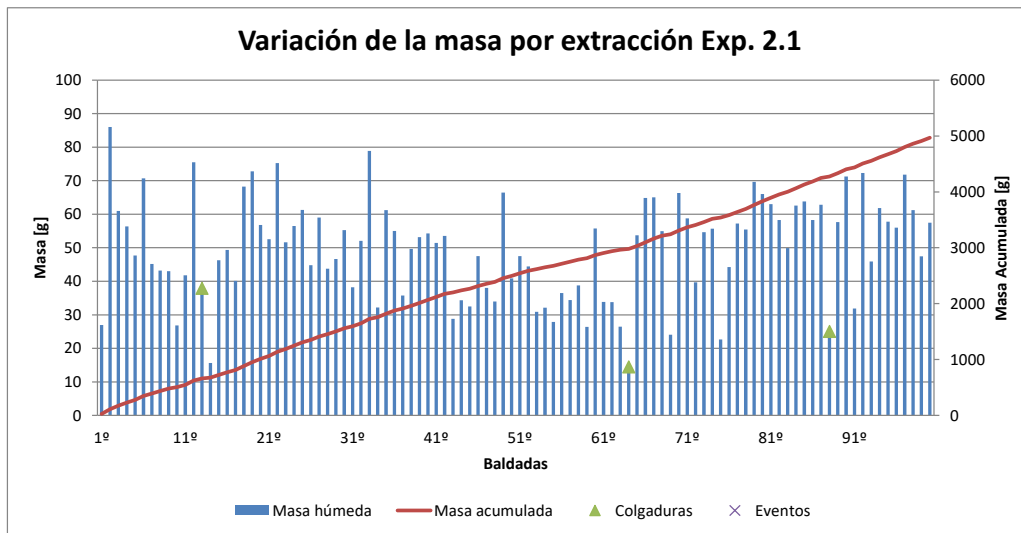


Fig. 9.7-30: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 2.1. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

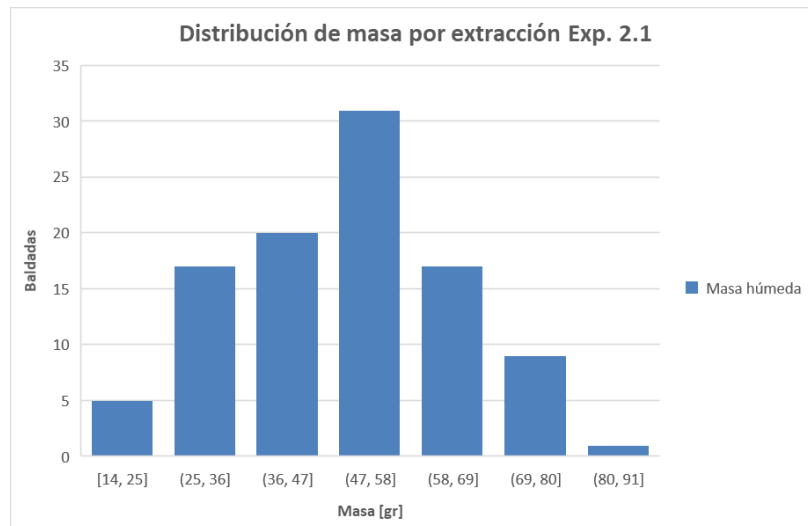


Fig. 9.7-31: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 2.1.

9.7.4 Experimento 3

Se trabajó con un 26% de humedad, pero no existe registro cuantitativo para este experimento.

9.7.5 Experimento 4

Este experimento se ejecutó con 24% de humedad, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

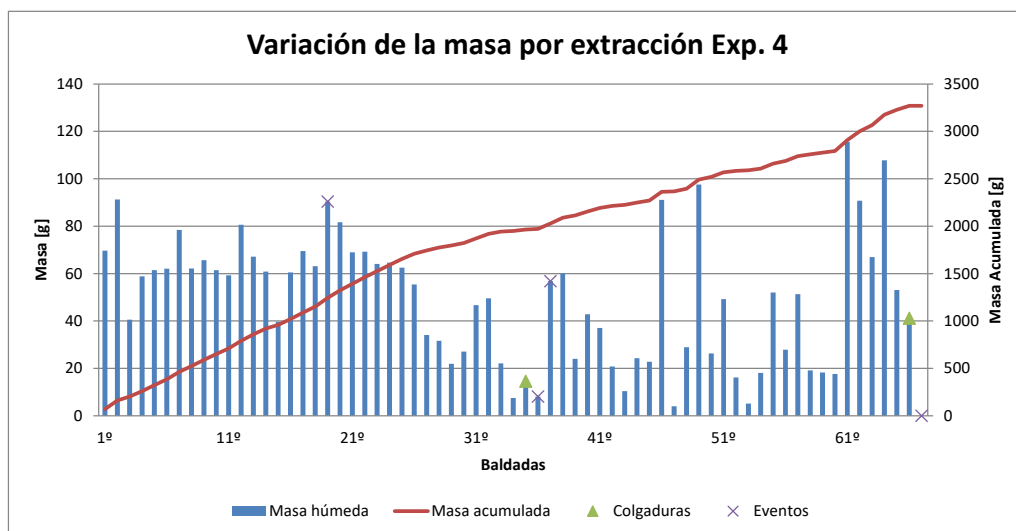


Fig. 9.7-32: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 4. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

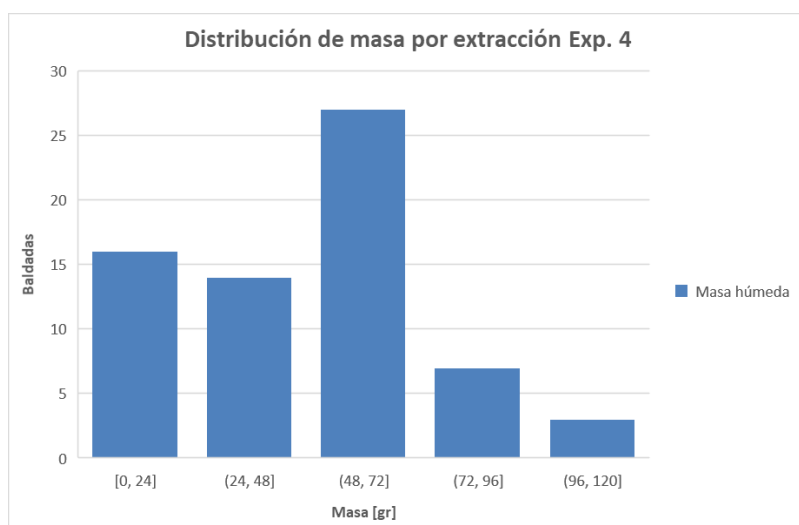


Fig. 9.7-33: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 4.

9.7.6 Experimento 5

Este experimento se ejecutó con 22% de humedad, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

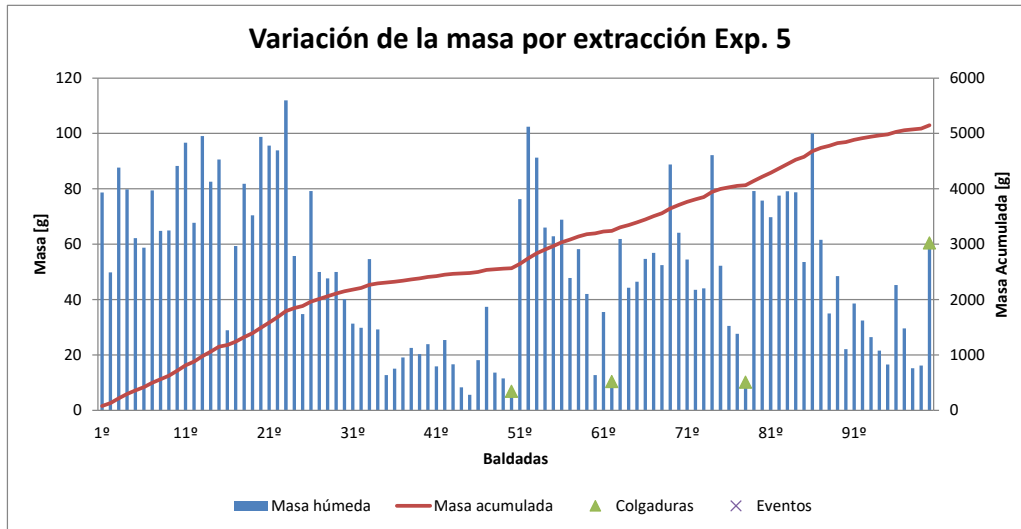


Fig. 9.7-34: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 5. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

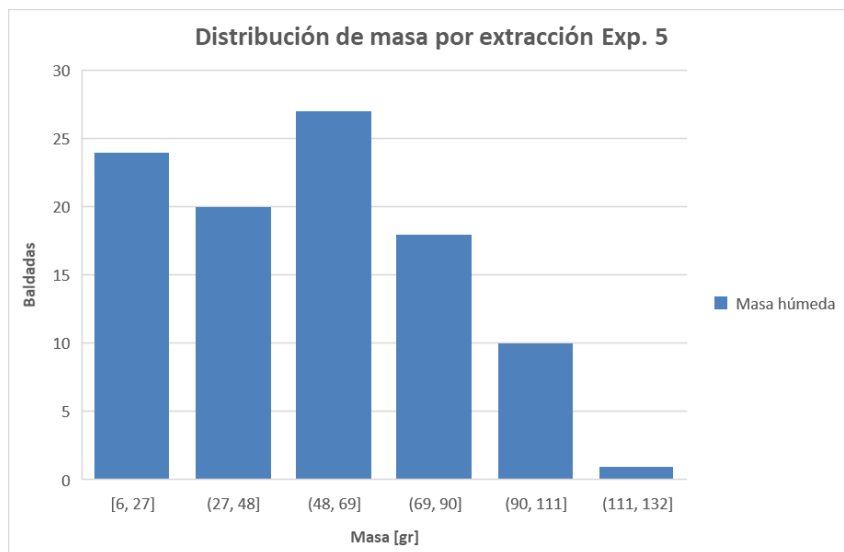


Fig. 9.7-35: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 5.

9.7.7 Experimento 6

Este experimento se ejecutó con 22% de humedad, siendo una réplica del experimento 5, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

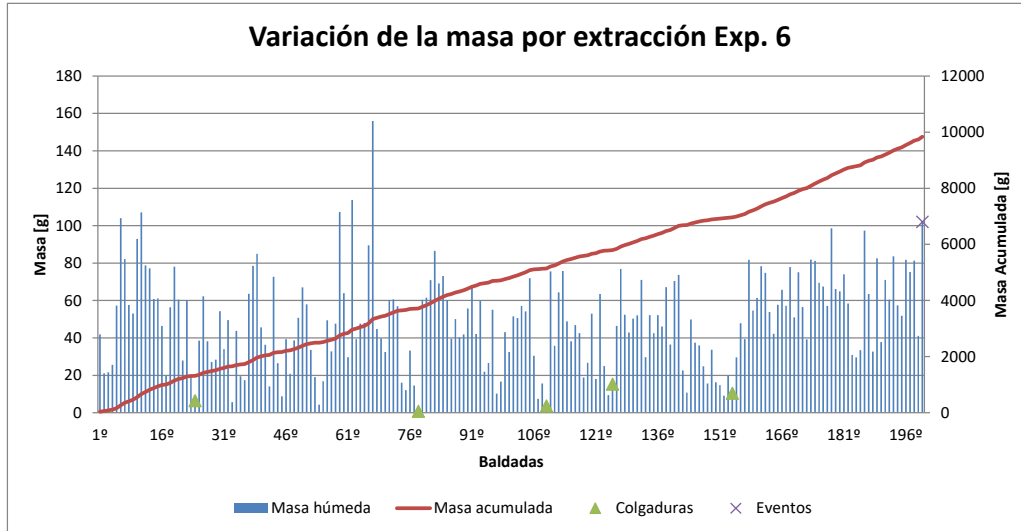


Fig. 9.7-36: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 6. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

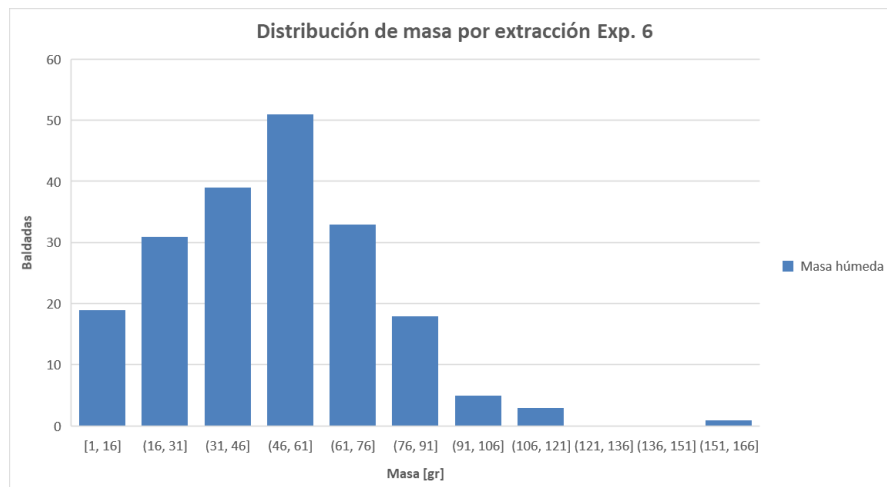


Fig. 9.7-37: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 6.

9.7.8 Experimento 7

Este experimento se ejecutó con 22% de humedad, siendo otra réplica del experimento 5, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

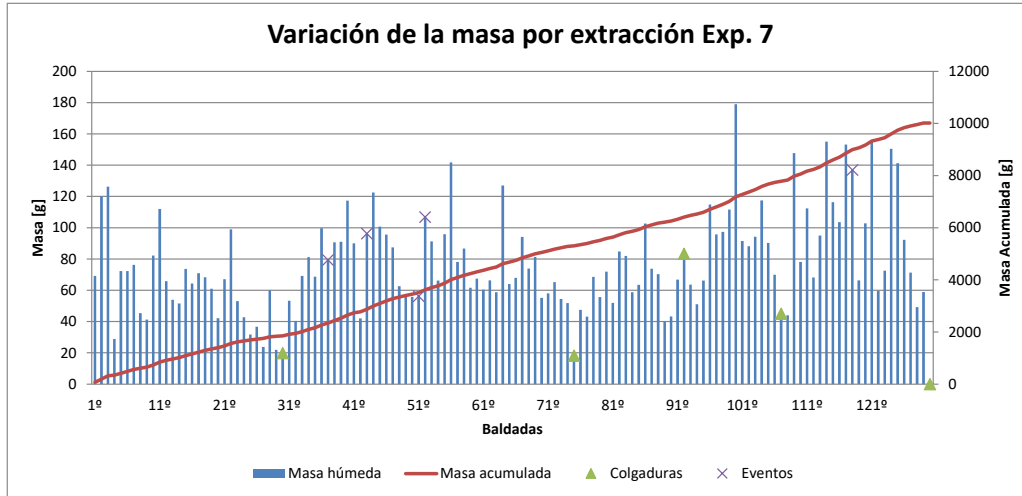


Fig. 9.7-38: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 7. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

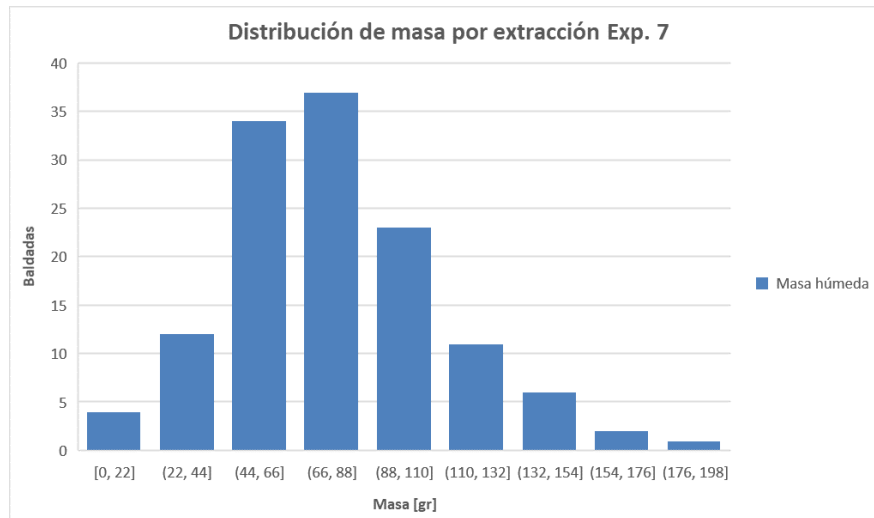


Fig. 9.7-39: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 7.

9.7.9 Experimento 8

Este experimento se ejecutó con 21% de humedad, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

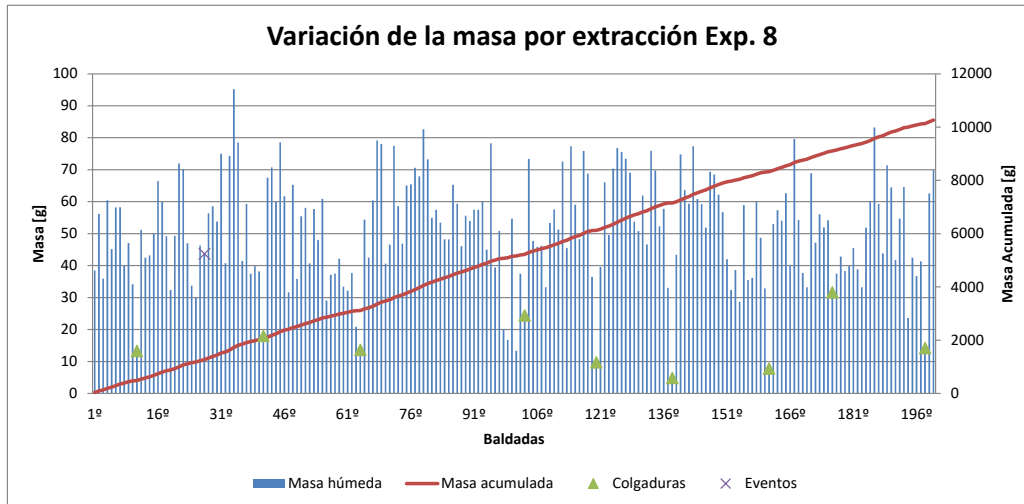


Fig. 9.7-40: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 8. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

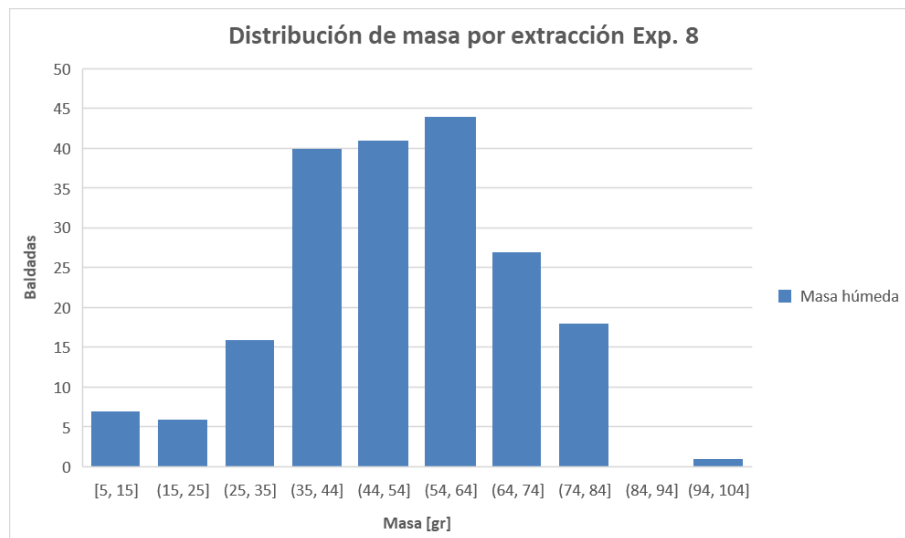


Fig. 9.7-41: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 8.

9.7.10 Experimento 9

Este experimento se ejecutó con 20% de humedad, siendo una réplica del experimento 2, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

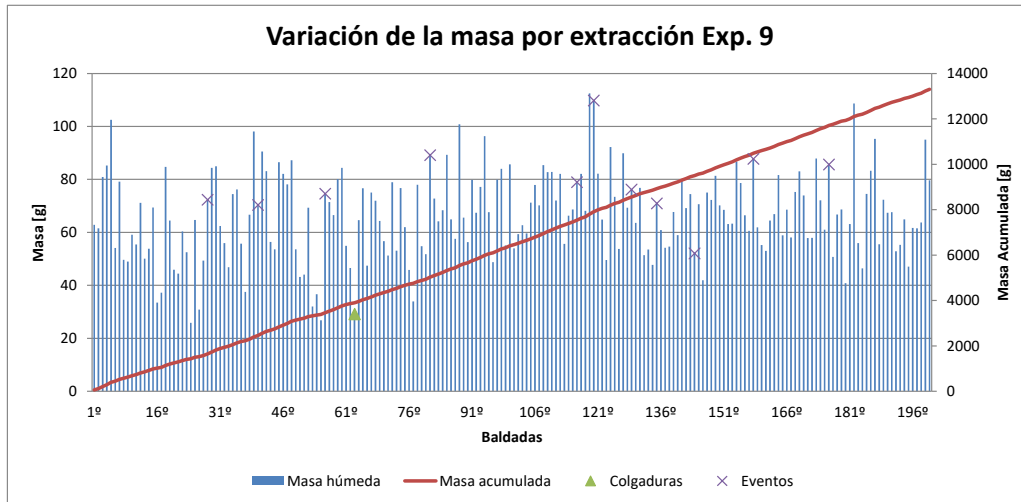


Fig. 9.7-42: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 9. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

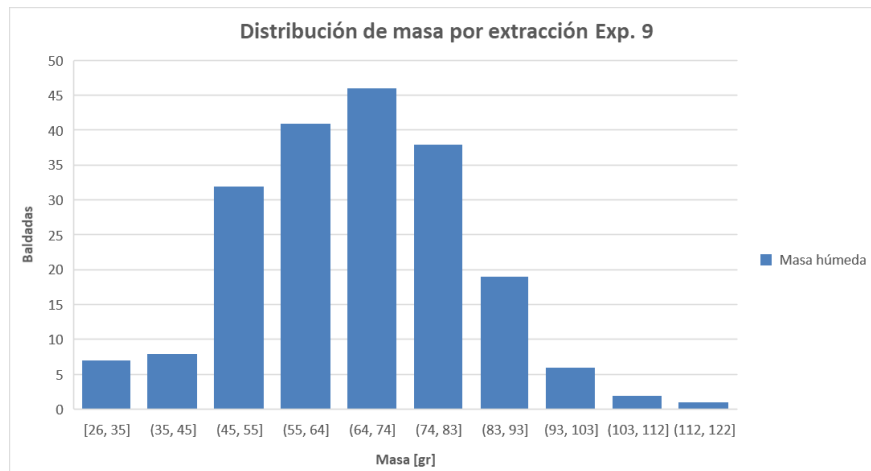


Fig. 9.7-43: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 9.

9.7.11 Experimento 10

Este experimento se ejecutó con 20% de humedad, siendo otra réplica del experimento 2, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

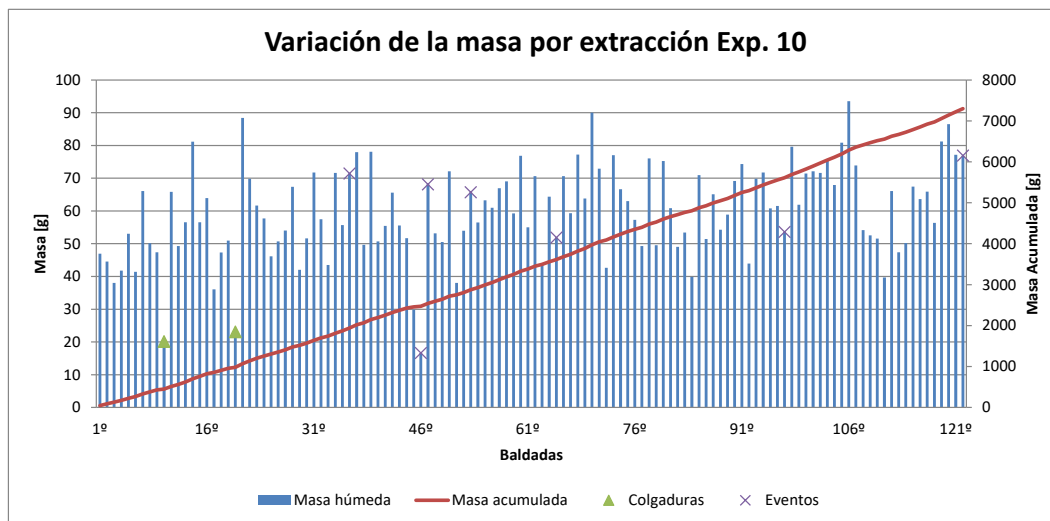


Fig. 9.7-44: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 10. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

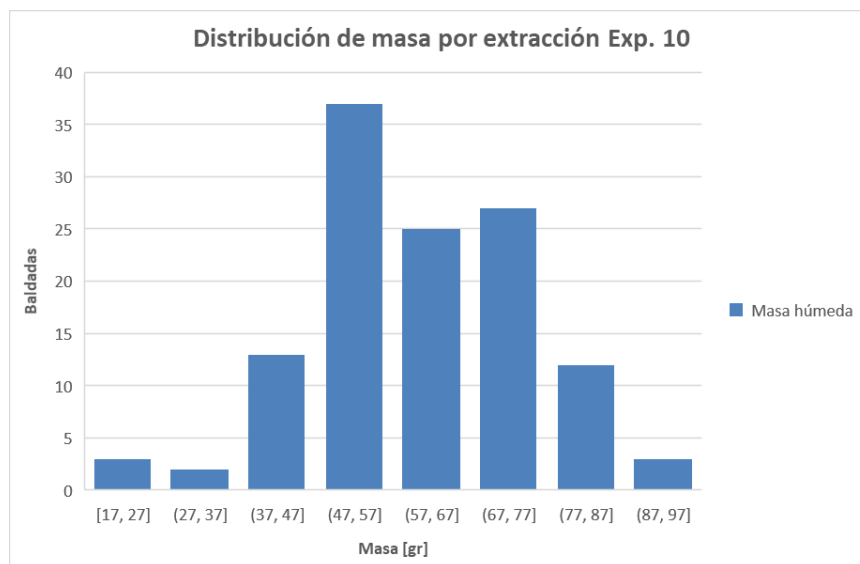


Fig. 9.7-45: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 10.

9.7.12 Experimento 11

Este experimento se ejecutó con 20% de humedad, siendo otra réplica del experimento 2, la información recopilada de la extracción se dispuso en una gráfica y un histograma de productividad.

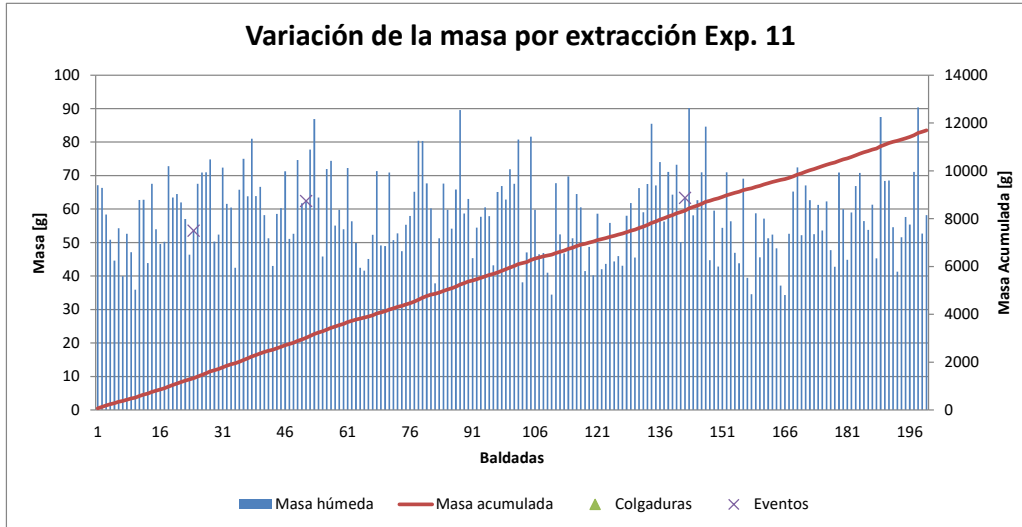


Fig. 9.7-46: Gráfico de productividad de extracción, para el experimento 11. Indicando la masa por baldada y su correspondiente masa acumulada.

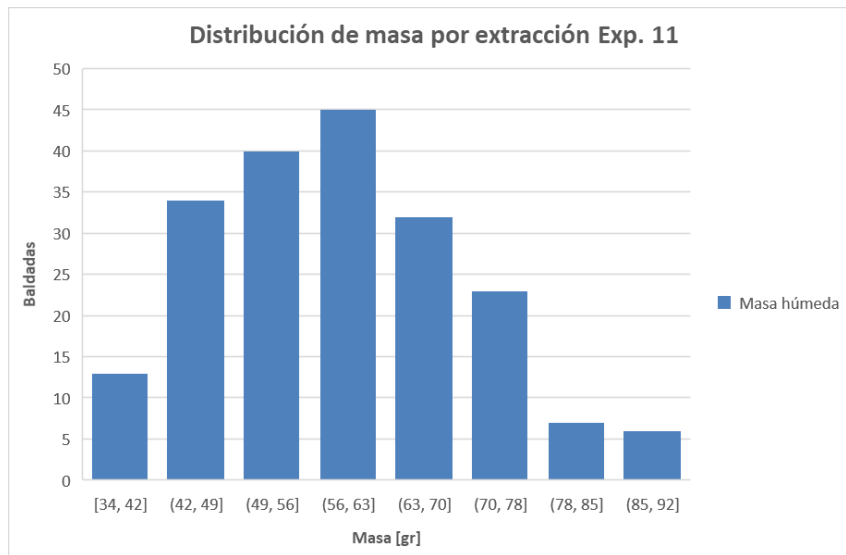


Fig. 9.7-47: Histograma de masa por baldadas, para el experimento 11.

9.7.13 Extensión lineal de los eventos

A continuación, una representación de los tipos de eventos presentados durante esta memoria, clasificados según la extensión lineal para las diferentes humedades del material:

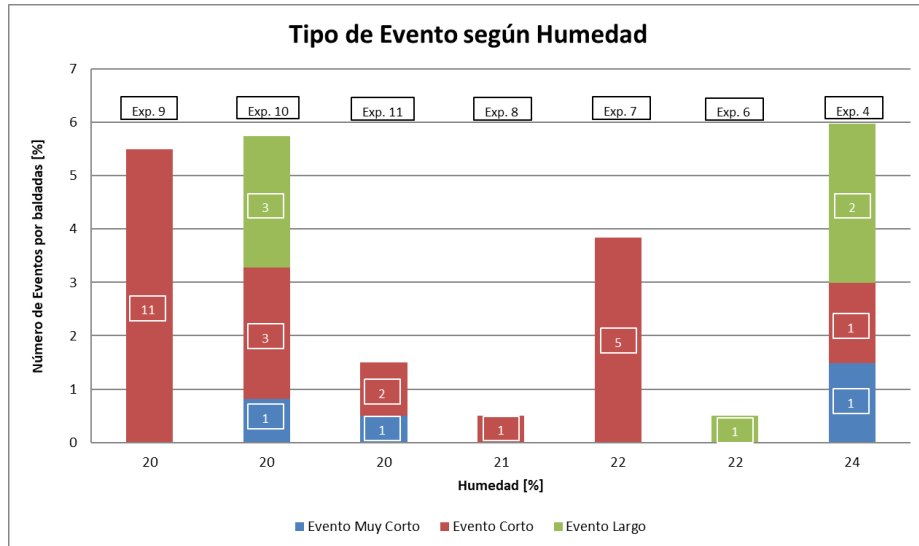


Fig. 9.7-48: Gráfico de barras de los tipos de evento según su humedad. Se excluye la información de los experimentos sin eventos de agua-barro, pero se tiene consideración que los experimentos 2 (20% humedad), 2.1 (20% humedad) y 5 (22% humedad) tienen humedades dentro de entre rango, y se excluye el exp. 3 (26% humedad) dado que no se consiguió estabilizar.