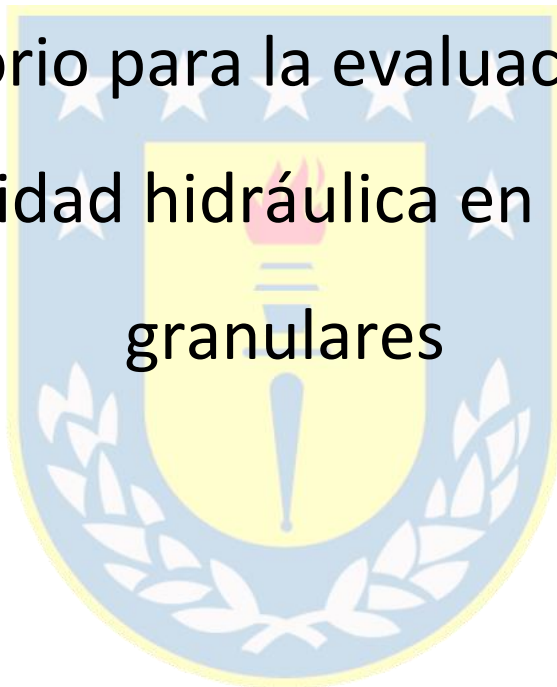




UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Guía
Dr. Ramón Díaz Noriega
Profesor Co-Guía
Dr. Roberto Gómez Espina

Diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para la evaluación de la conductividad hidráulica en materiales granulares



Diego Bustos Martínez

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Julio 2024

Agradecimientos.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra forma, han contribuido a la culminación de este importante proyecto en mi vida académica y personal.

En primer lugar, mis más profundos agradecimientos son para mis padres Isabel y Romilio, por su amor incondicional, apoyo constante y múltiples sacrificios, que me han permitido llegar hasta este punto. Gracias también a mi pareja, Karen, cuyo amor y comprensión han sido un pilar fundamental en este viaje. A mis hermanas, Eva y Catalina, por su constante motivación y cariño, quienes siempre me han impulsado a seguir adelante. Además, quisiera agradecer de ante mano la llegada de mi futuro hijo, Exequiel, cuya inminente llegada, ha sido una fuente inmensa de motivación e inspiración para mí, impulsándome a dar lo mejor de mí en este proyecto y en todos los aspectos de mi vida.

En segundo lugar, deseo expresar mi gratitud a mi amigo más cercano, Ignacio, por su amistad incondicional y por estar siempre a mi lado, tanto en los buenos momentos como en los difíciles. Su apoyo y compañía durante esta última etapa de mi carrera han sido invaluable para mí.

En tercer lugar, expreso mi gratitud a mis profesores guías, por su infinita paciencia, orientación y sabiduría que han sido cruciales para el desarrollo de esta tesis. Agradezco especialmente a profesor Ramón y don Edgardo, por su dedicación y apoyo a lo largo de este proceso, su experiencia y consejos han sido de gran valor para mí.

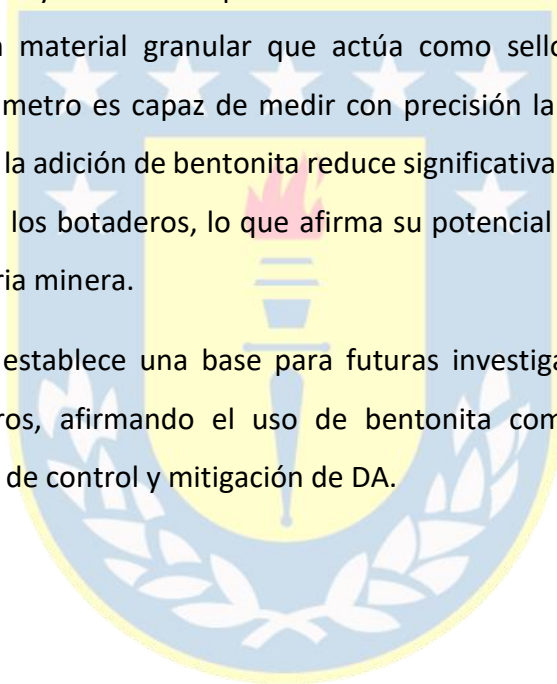
A todos ustedes, gracias por su apoyo, comprensión y motivación. Este logro no hubiera sido posible sin ustedes.

Resumen.

Este informe presenta el diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para evaluar la conductividad hidráulica en materiales granulares, con el objetivo de controlar el drenaje ácido (DA) en botaderos de residuos mineros en Chile. Los botaderos son estructuras que contienen grandes volúmenes de materiales granulares, como los residuos sulfurados, que, al interactuar con agua, oxígeno y bacterias, generan contaminantes nocivos para el medio ambiente.

El estudio se centra en la evaluación de la conductividad hidráulica de estos materiales, un factor crucial en la generación y propagación del DA. Para ello, se diseña un permeámetro de laboratorio y se realizan pruebas con cinco muestras que combinan residuos sulfurados y bentonita, un material granular que actúa como sello. Los resultados obtenidos demuestran que el permeámetro es capaz de medir con precisión la conductividad hidráulica de materiales granulares y que la adición de bentonita reduce significativamente esta conductividad en los materiales presentes en los botaderos, lo que afirma su potencial como solución efectiva para controlar el DA en la industria minera.

Este trabajo establece una base para futuras investigaciones y aplicaciones en la gestión de residuos mineros, afirmando el uso de bentonita como un material clave en la composición de tecnologías de control y mitigación de DA.

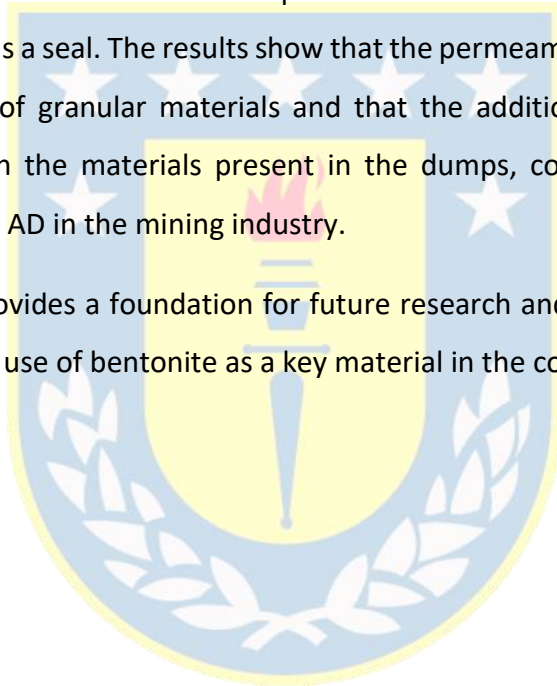


Abstract.

This report presents the design and construction of a laboratory device to evaluate the hydraulic conductivity of granular materials, with the aim of controlling acid drainage (AD) in mine waste dumps in Chile. Waste dumps are structures that contain large volumes of granular materials, such as sulfide waste, which, when interacting with water, oxygen, and bacteria, generate harmful environmental pollutants.

The study focuses on evaluating the hydraulic conductivity of these materials, a crucial factor in the generation and propagation of AD. For this purpose, a laboratory permeameter is designed, and tests are conducted with five samples that combine sulfide waste and bentonite, a granular material that acts as a seal. The results show that the permeameter can accurately measure the hydraulic conductivity of granular materials and that the addition of bentonite significantly reduces this conductivity in the materials present in the dumps, confirming its potential as an effective solution to control AD in the mining industry.

This work provides a foundation for future research and applications in mine waste management, affirming the use of bentonite as a key material in the composition of AD control and mitigation technologies.



Índice de contenidos.

1. Introducción.....	1
1.1.Planteamiento del problema.	1
1.2. Objetivos.	2
1.3.Metodología de trabajo.	3
2. Antecedentes.....	1
2.1.Depósitos de estériles en minería.....	1
2.2. Drenaje ácido en minería.	4
2.3.Conductividad hidráulica de materiales granulares.	12
2.3.1. Métodos para medir conductividad hidráulica de materiales granulares.....	13
3. Desarrollo experimental.....	17
3.1.Diseño del permeámetro.	17
3.1.1. Soporte del dispositivo.....	18
3.1.2. Tapas perforadas.....	19
3.1.3. Columna principal.	22
3.1.4. Sistema de control.....	23
3.2.Construcción del permeámetro.	26
3.2.1.Soporte del dispositivo.....	26
3.2.2.Tapas perforadas.....	27
3.2.3.Columna principal	30
3.2.4.Sistema de control.	30
3.2.5.Ensamblaje final de los componentes del equipo.	32
3.3.Preparación de la muestra.	32
3.3.1.Recolección del material.	33

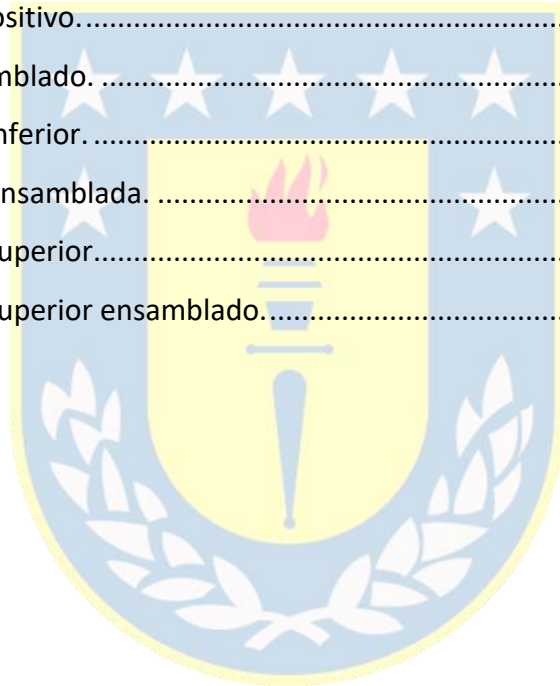
3.3.2. Selección del tamaño máximo de roca recolectada.	33
3.3.3. Reducción de tamaño.	34
3.3.4. Caracterización granulométrica.	35
3.3.5. Obtención de muestras para pruebas preliminares.	36
3.4. Pruebas preliminares de funcionamiento del permeámetro.	39
3.4.1. Modalidad de saturación	41
3.4.2. Modalidad con carga constante.....	42
3.4.3. Modalidad con carga variable.....	43
4. Conclusiones y recomendaciones.	46
Referencias.	48
Anexos.	51



Índice de figuras.

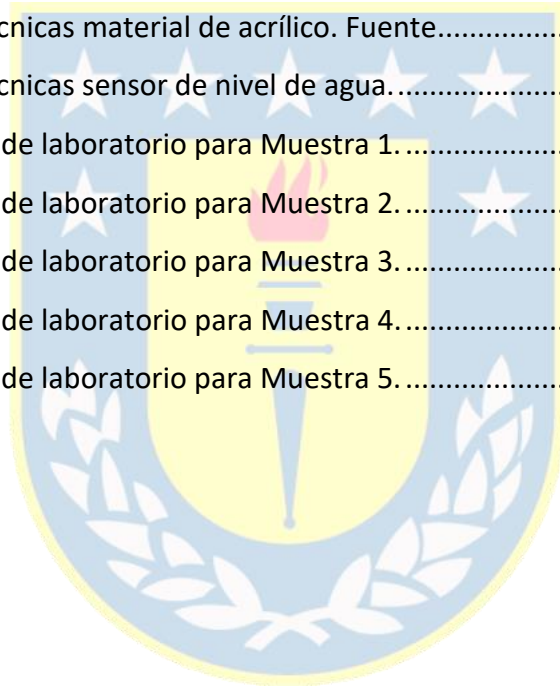
Figura 1. Curva granulométrica de una muestra de botadero, Mina Andina, División CODELCO. Fuente:(Linero et al., 2007).....	2
Figura 2. Esquema de ensayo según modalidad de carga constante y variable.....	18
Figura 3. Base de soporte.....	19
Figura 4. Tapa perforada compuesta.	20
Figura 5. Tapa perforada superior.....	20
Figura 6. Tapa perforada inferior.	21
Figura 7. Columna principal del dispositivo.	23
Figura 8. Esquema de conexiones del Arduino UNO y accesorios.....	25
Figura 9. Disposición de bidones de alimentación y sistema de control en estante del equipo.....	27
Figura 10. Construcción de tapas perforadas con láser.....	28
Figura 11. Tapa perforada compuesta.....	28
Figura 12. Receptáculo cóncavo moldeado en trozo de acrílico transparente de 6 mm de espesor.	29
Figura 13. Tapa perforada inferior con válvula de bola y terminal de 3/8" a 5/8".....	29
Figura 14. Tapa perforada superior.....	29
Figura 15. Sistema de control del equipo.	30
Figura 16. Recipiente contenedor del dispositivo.....	31
Figura 17. Recipiente de alimentación del dispositivo.	31
Figura 18. Ensamblaje final del dispositivo.	32
Figura 19. Proceso de preparación de muestra adoptado para la investigación.	32
Figura 20. Muestra de mineral obtenida de residuos utilizados en ensayos de compresión uniaxial en Laboratorio de Mecánica de Rocas, DIMET.	33
Figura 21. Chancador primario de mandíbula.	34
Figura 22. Chancador secundario de cono.....	34
Figura 23. Resultado de chancado primario mediante chancador de mandíbula.....	35
Figura 24. Resultado de chancado secundario mediante chancador de cono.	35
Figura 25. Agitador de tamices MATEST®.	35

Figura 26. Curva granulométrica del material recolectado y chancado.	36
Figura 27. Curvas granulométricas de Muestras 1 y 2.	37
Figura 28. Curva granulométrica representativa del material residual menor a 3/8" y mayor que #200.	38
Figura 29. Proceso de llenado y compactación del material dentro del permeámetro.	40
Figura 30. Muestra 5 en proceso de saturación.	41
Figura 31. Cañería con diámetro "a" para régimen variable ubicada a un costado del estante.	44
Figura 32. Variación de la conductividad según el contenido de bentonita de cada muestra.	45
Figura 33. Planos del dispositivo de laboratorio.	52
Figura 34. Soporte del dispositivo.	53
Figura 35. Dispositivo ensamblado.	53
Figura 36. Tapa perforada inferior.	53
Figura 37. Tapa perforada ensamblada.	53
Figura 38. Tapa perforada superior.	54
Figura 39. Tapa perforada superior ensamblado.	54



Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de materiales granulares según tamaño de partícula. Fuente:.....	13
Tabla 2. Clasificación de materiales granulares y determinación de permeabilidad según valores de permeabilidad. Fuente: Modificado de (Juarez Badillo, 2000).	15
Tabla 3. Distribución granulométrica de la fracción de interés reducida en tamaño.	39
Tabla 4. Tabla de resultados.....	45
Tabla 5. Materiales y servicios comprados para cumplir con el diseño propuesto.....	51
Tabla 6. Especificaciones técnicas de la bomba de agua.	66
Tabla 7. Especificaciones técnicas Arduino R3 SMD.	66
Tabla 8. Especificaciones técnicas material de acrílico. Fuente.....	66
Tabla 9. Especificaciones técnicas sensor de nivel de agua.....	67
Tabla 10. Registro de datos de laboratorio para Muestra 1.....	67
Tabla 11. Registro de datos de laboratorio para Muestra 2.....	68
Tabla 12. Registro de datos de laboratorio para Muestra 3.....	68
Tabla 13. Registro de datos de laboratorio para Muestra 4.....	69
Tabla 14. Registro de datos de laboratorio para Muestra 5.....	69



1. Introducción.

1.1. Planteamiento del problema.

La gestión de botaderos de residuos mineros constituye uno de los principales desafíos para la industria minera, especialmente en yacimientos de pórfidos cupríferos. Estos yacimientos se caracterizan por una mineralización de sulfuros metálicos, donde destaca la presencia de la pirita, uno de los sulfuros no comerciales más comunes (Vaziri et al., 2022). La oxidación de la pirita al entrar en contacto con agua y oxígeno desempeña un papel fundamental en la generación de aguas ácidas, lo que da origen al drenaje ácido (DA) (Zhang et al., 2023).

El DA es una forma de contaminación del agua con un pH ácido originado por la actividad minera. Se manifiesta como resultado de la exposición de sulfuros al agua y oxígeno, caracterizándose por su alta acidez y la presencia de elevadas concentraciones de metales pesados y sulfatos (Chen et al., 2021). La falta de control preventivo puede acarrear costos económicos considerables para las empresas mineras, además de generar impactos químicos, físicos, ecológicos y socioeconómicos significativos en el medio ambiente (Zhang et al., 2023).

En Chile, el marco legal que regula la prevención del DA se encuentra establecido en el Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería, el Reglamento de Seguridad Minera. Este documento obliga a los titulares de concesiones mineras a presentar un plan de manejo ambiental que contemple la prevención y control del drenaje ácido, indicando la secuencia de explotación que permita extraer el mineral sin afectar la estabilidad de la mina.

Para prevenir y mitigar los impactos del DA, Skousen et al. (2019) clasifican las herramientas de control y técnicas de manejo en predicción, prevención, tratamiento y remediación. La etapa de predicción es fundamental, ya que condiciona las medidas de prevención, tratamiento y remediación en función de la presencia o ausencia de potencial para la generación de DA. Por lo tanto, es importante contar con dispositivos y estudios de laboratorio controlados que permitan obtener datos para desarrollar estrategias de prevención y mitigación.

Una forma de prevenir impactos es reduciendo la conductividad hidráulica de los materiales que componen un depósito de residuos y, por lo tanto, la superficie expuesta de los botaderos de residuos mineros (Kotsiopoulos & Harrison, 2015). La caracterización precisa de la

conductividad hidráulica de los materiales granulares que componen estos botaderos es fundamental para diseñar e implementar medidas de control de impactos efectivas.

1.2. Objetivos.

Objetivo General:

Implementar un dispositivo a escala de laboratorio que permita evaluar la conductividad hidráulica de materiales granulares.

Objetivos Específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos y dispositivos utilizados para evaluar conductividad hidráulica de materiales granulares.
2. Diseñar un dispositivo a escala de laboratorio para llevar a cabo pruebas de conductividad hidráulica bajo carga constante y variable.
3. Construir el dispositivo a escala de laboratorio para evaluar conductividad hidráulica.
4. Preparar muestras de materiales granulares para ser sometidas a las pruebas de funcionamiento del permeámetro.
5. Evaluar la conductividad hidráulica mediante pruebas preliminares de funcionamiento del equipo.
6. Determinar el efecto de la aplicación de bentonita en la conductividad hidráulica de los materiales granulares.

1.3. Metodología de trabajo.

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica sobre los métodos y dispositivos utilizados para evaluar la conductividad hidráulica de materiales granulares. Esta etapa incluye la recopilación de información de estudios previos, artículos científicos y libros especializados para comprender las metodologías existentes e identificar las mejores prácticas.

A continuación, se diseña un dispositivo a escala de laboratorio destinado a realizar pruebas de conductividad hidráulica bajo condiciones de carga constante y variable. Durante esta fase, se elaboran planos detallados del dispositivo, considerando los requerimientos técnicos y las especificaciones necesarias para su correcta funcionalidad.

Finalizado el diseño, se procede a la construcción del dispositivo, seleccionando materiales y componentes que cumplan con las especificaciones técnicas necesarias para evaluar la conductividad hidráulica de manera precisa y confiable.

Posteriormente, se preparan las muestras de materiales granulares para las pruebas de funcionamiento del dispositivo. Este paso tiene por objetivo que las pruebas se lleven a cabo en condiciones controladas y representativas.

Finalmente, se ejecutan pruebas preliminares de funcionamiento del dispositivo, evaluando su capacidad para medir la conductividad hidráulica de manera precisa. Durante todo el proceso, se analizan y comparan los resultados obtenidos para muestras con diferentes proporciones de bentonita, con el objetivo de determinar la influencia de este material en la conductividad hidráulica de materiales granulares.

2. Antecedentes.

2.1. Depósitos de estériles en minería

A lo largo del ciclo productivo, las operaciones mineras generan volúmenes considerables de desechos minerales que tienden a acumularse en extensos depósitos, según señalan Vaziri et al. (2022). Las actividades de extracción dan lugar a la formación de botaderos, mientras que las actividades de procesamiento de minerales producen relaves que se acumulan en instalaciones específicas.

Los botaderos pueden abarcar vastas áreas y alcanzar alturas de hasta cientos de metros, acumulando una variedad heterogénea de residuos, tanto en términos físicos como en aspectos geoquímicos y mineralógicos (Lefebvre et al., 2001). Estos depósitos se caracterizan por su considerable tamaño, a menudo entre decenas de millones de toneladas, y por la variabilidad intrínseca de su granulometría. Un aspecto crítico es la presencia común de sulfuros como la pirita y la pirrotita, en proporciones variables, según las observaciones de Petruk (2000). La oxidación de estos sulfuros, al entrar en contacto con agua y oxígeno, da lugar a la generación de acidez, metales y sulfatos, potencialmente resultando en el drenaje ácido, si no se dispone de minerales neutralizantes suficientes, según detallan Elghali et al. (2019).

El manejo y la remediación de estos depósitos de residuos mineros son desafíos críticos que las empresas y los gobiernos deben abordar para minimizar los impactos ambientales y proteger la salud de las comunidades aledañas.

Los depósitos de roca estéril generados en actividades mineras presentan una serie de características físicas y mineralógicas que influyen en su comportamiento geoquímico y ambiental a lo largo del tiempo. Estas características desempeñan un papel clave en los procesos que ocurren dentro de los botaderos y deben ser comprendidas para una adecuada gestión y mitigación de los impactos asociados. Amos et al. (2015), resumen las principales características de los botaderos como sigue:

2.1.1 Características físicas de los botaderos.

Estructura interna y heterogeneidad.

Los botaderos mineros suelen tener una estructura interna heterogénea debido a los diferentes procesos de colocación y compactación utilizados durante su construcción

Esta heterogeneidad afecta las propiedades físicas y químicas dentro del botadero.

Tamaño de partícula.

El tamaño de partícula dentro de los botaderos varía ampliamente, desde bolones de 1 m hasta partículas finas de 0,01 mm como muestra la Figura 1, correspondiente a la curva granulométrica de una muestra de residuos mineros provenientes directamente desde la tronadura en División Andina, CODELCO (Linero et al., 2007).

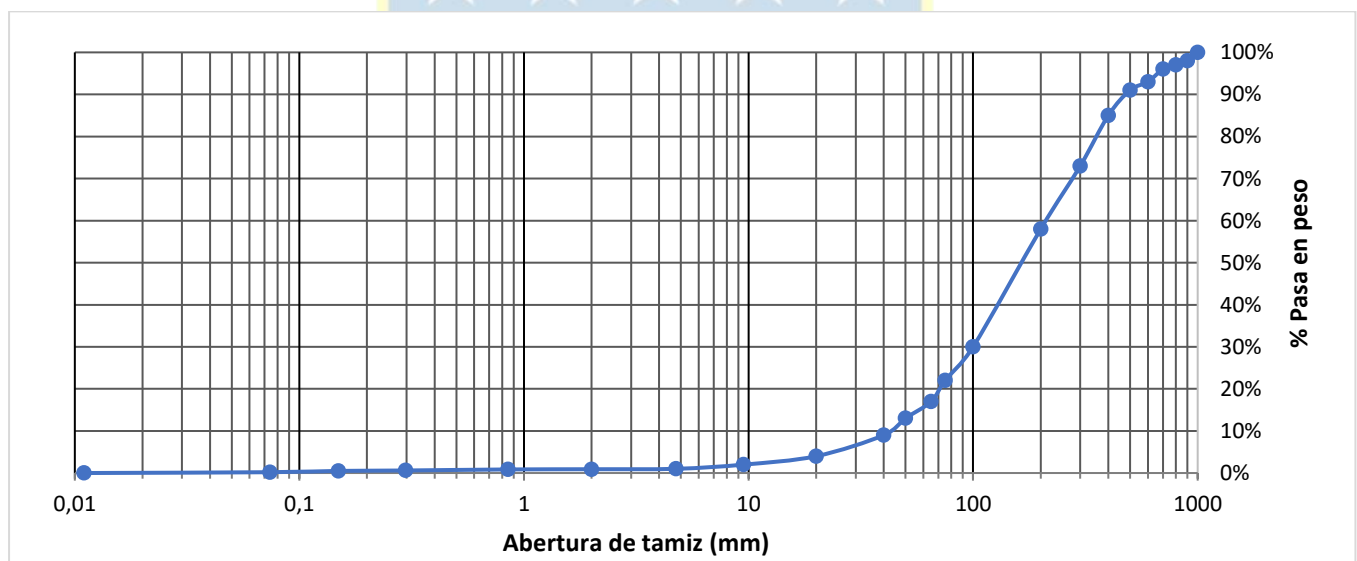


Figura 1. Curva granulométrica de una muestra de botadero, Mina Andina, División CODELCO. Fuente:(Linero et al., 2007).

Según estudios de Amar et al. (2021) y Elghali et al. (2019), y en consideración con el efecto del tamaño de partícula en la reactividad de las muestras de residuos mineros, un tamaño de partícula de 2,4 mm se considera crítico para la liberación de pirita, uno de los principales factores que contribuyen a la generación de drenaje ácido.

Conductividad hidráulica.

Los estudios realizados en botaderos indican que los valores de conductividad hidráulica van desde $9 \cdot 10^{-13}$ hasta $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. Este valor resulta alto debido a la heterogeneidad en el tamaño de partícula y la estructura del material que lo compone. Esta característica implica que el agua, el aire y otros fluidos pueden moverse con facilidad a través de los botaderos, lo cual es una consideración importante en la gestión de aguas residuales y en la mitigación de impactos ambientales. La variabilidad en la conductividad hidráulica puede ser atribuida a la mezcla de diferentes tipos de rocas y minerales, además de la porosidad en el material depositado. Este alto valor de conductividad hidráulica puede facilitar la lixiviación de contaminantes y la generación de aguas ácidas, lo que destaca la necesidad de una gestión adecuada y constante monitoreo de los botaderos para prevenir la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua circundantes.

Conductividad térmica.

La conductividad térmica de los botaderos de estéril es esencial ya que puede afectar comportamiento térmico del terreno, influyendo en procesos críticos como la generación de ácido y la movilización de metales pesados. Esta propiedad depende de la composición mineralógica, la porosidad y el contenido de humedad del material. Un aumento en la humedad puede mejorar la conductividad térmica debido a la formación de puentes térmicos entre partículas.

Factores como la densidad del material y la temperatura ambiente también juegan un papel importante. En climas fríos, la formación de hielo puede incrementar significativamente la conductividad térmica, mientras que en climas cálidos, la evaporación de agua puede reducirla.

Las variaciones estacionales afectan la conductividad térmica, siendo más alta en invierno debido a la formación de hielo y más baja en verano debido a la evaporación. La estructura del botadero, incluyendo la compactación y el tamaño de los granos, también puede influir en la conductividad térmica (Amos et al., 2015).

2.1.2. Características mineralógicas de los botaderos.

Los depósitos de estériles generados en actividades mineras presentan una composición mineralógica compleja y diversa. Estos materiales suelen contener una variedad de

minerales que influyen significativamente en su comportamiento y evolución geoquímica a lo largo del tiempo.

Un componente importante en muchos depósitos de estériles son los minerales de sulfuro, como la pirita (FeS_2) y la pirrotina (Fe_{1-x}S). Estos minerales son propensos a la oxidación cuando entran en contacto con el oxígeno y el agua, lo que puede generar drenaje ácido.

Además de los sulfuros, los depósitos de estériles también pueden contener otros minerales como silicatos (cuarzo, feldespatos, micas), carbonatos (calcita, dolomita) y óxidos e hidróxidos de hierro (hematita, goethita, ferrihidrita). Estos minerales pueden tener un efecto neutralizante al reaccionar con el ácido generado por la oxidación de los sulfuros, o pueden actuar como sumideros de elementos contaminantes al incorporarlos en su estructura cristalina.

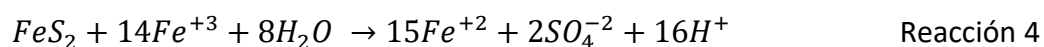
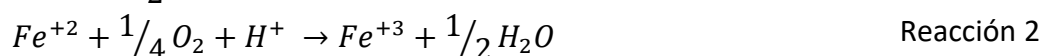
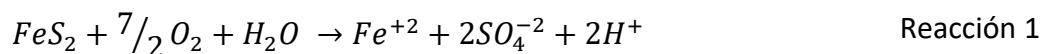
Asimismo, la formación de minerales secundarios como los sulfatos de hierro (melanterita, rozenita) y los oxi-hidróxidos de hierro (goethita, ferrihidrita), pueden influir en la movilidad y el transporte de metales y metaloides en el sistema.

2.2. Drenaje ácido en minería.

El drenaje ácido es un problema ambiental crítico en la industria minera. Este fenómeno implica la formación de aguas ácidas cargadas de metales pesados, que pueden contaminar suelos y cuerpos de agua, afectando ecosistemas y comunidades cercanas.

2.2.1. Generación de drenaje ácido.

En minería, el drenaje ácido se refiere principalmente al flujo de agua producto de la actividad extractiva con un pH que varía entre 2 y 8 (Skousen et al., 2019). Este fenómeno tiene su origen en la interacción entre minerales sulfurados, oxígeno y agua, con la participación de bacterias catalizadoras como la *Thiobacillus Ferrooxidans*. Este proceso desencadena una serie de reacciones químicas (Reacción 1 a 4), que se inician con la oxidación de la pirita (Akcil & Koldas, 2006).



La Reacción 1 ilustra la oxidación de la piritita por medio del oxígeno como agente oxidante, generando iones de hierro en su forma ferrosa (Fe^{+2}), iones sulfato (SO_4^{-2}) y protones (H^+). Esta reacción conlleva a un aumento en la concentración de sólidos disueltos y en la acidez del entorno, lo que resulta en una disminución del pH, a menos que la acidez generada sea neutralizada por la presencia de minerales alcalinos. El ion ferroso (Fe^{+2}) se oxida en presencia de oxígeno (O_2), transformándose en ion férrico (Fe^{+3}), tal como se representa en la Reacción 2.

En un rango de pH entre 2,3 y 3,5, el ion férrico producido en la Reacción 1 se precipita a través de hidrólisis en forma de hidróxido de hierro ($Fe(OH)_3$), liberando más acidez en el entorno, según se describe en la Reacción 3. Finalmente, cuando el pH desciende por debajo de 3, el ion férrico (Fe^{+3}) se convierte en el principal agente oxidante, según se muestra en la Reacción 4. Bajo estas condiciones, y gracias a la acción de bacterias catalizadoras, que operan en condiciones de pH inferiores a 3, la oxidación de la piritita se acelera notablemente (de 10 a 100 veces más rápido que la oxidación con oxígeno). Esto resulta en una mayor producción de iones ferrosos (Fe^{+2}), sulfatos (SO_4^{-2}) y protones (H^+) en el sistema (Akcil & Koldas, 2006; Jiao et al., 2023).

El drenaje ácido representa uno de los desafíos ambientales más sustanciales vinculados a la actividad minera. De no ser gestionado de manera adecuada, este fenómeno puede generar consecuencias adversas de índole química, física, ecológica, biológica y socioeconómicas de gran relevancia. Entre los impactos negativos que resultan de la generación de drenaje ácido, se destaca la contaminación química del agua, suelos y sedimentos, lo que compromete la calidad y seguridad de los recursos hídricos. Además, se observa una degradación física de los paisajes circundantes, afectando la biodiversidad y alterando los ecosistemas acuáticos y terrestres. A nivel biológico, el DA puede causar la muerte de organismos acuáticos y afectar la salud de la flora y fauna, generando desequilibrios en las cadenas tróficas (Zhang et al., 2023).

2.2.2. Predicción de drenaje ácido.

Predecir el drenaje ácido implica anticipar y evaluar el comportamiento químico de los desechos mineros una vez que estos entren en contacto con el agua y el oxígeno del medio ambiente.

Este proceso de predicción permite identificar aquellos materiales que tienen mayor riesgo de producir drenaje ácido, así como las tasas a las que se generaría este efluente contaminante. Mediante el análisis de factores clave como la composición mineralógica, el potencial de neutralización, la presencia de elementos traza y la cinética de las reacciones químicas, se puede anticipar la calidad y la evolución del drenaje a lo largo del tiempo.

Los resultados obtenidos en esta etapa de predicción son fundamentales para planificar e implementar las medidas de mitigación más efectivas, ya sean de carácter preventivo o de tratamiento del drenaje una vez generado. De esta manera, la predicción del drenaje ácido se convierte en un elemento clave para la gestión integral de los recursos hídricos en el contexto de las operaciones mineras.

Existen dos enfoques fundamentales para predecir el DA: cualitativo y cuantitativo. Las metodologías cualitativas se basan principalmente en la caracterización mineralógica y geoquímica de los residuos mineros para determinar su potencial de generación de acidez, como la prueba de balance ácido-base (BAB). Si bien proporcionan una evaluación inicial, no predicen de manera confiable la calidad del drenaje a largo plazo.

Por otro lado, las metodologías cuantitativas emplean modelos numéricos y pruebas cinéticas, como las celdas de humedad, para simular las condiciones reales y predecir las tasas de generación de DA, así como la calidad del efluente en el tiempo. Estas pruebas cinéticas permiten obtener datos más precisos sobre las tasas de reacción involucradas en la formación de DA y la influencia de factores ambientales. Ambos enfoques se complementan para realizar predicciones más integrales y confiables sobre el potencial de generación de DA.

Las metodologías cuantitativas han demostrado su eficacia a nivel global (INAP, 2009). A medida que evolucionan y se perfeccionan, estas metodologías de predicción constituyen un pilar esencial en la planificación y ejecución de estrategias preventivas ante los potenciales impactos negativos del DA.

La combinación de pruebas estáticas y cinéticas mejora la precisión de las predicciones del DA. Las pruebas estáticas evalúan las propiedades geoquímicas de los minerales presentes en los residuos mineros bajo condiciones iniciales específicas, proporcionando

información valiosa sobre el potencial ácido (PA), potencial de neutralización (PN) y la liberación de metales. Las pruebas cinéticas, como las celdas de humedad, simulan condiciones dinámicas y temporales, midiendo la velocidad de las reacciones químicas asociadas a la generación de DA. La integración de estos enfoques fortalece la capacidad predictiva de los estudios y proporciona una base sólida para el diseño de estrategias preventivas y mitigadoras a lo largo del ciclo de vida de las operaciones mineras (Sapsford & Williams, 2009; Dold, 2017).

Dentro de los ensayos cinéticos se encuentran las columnas de lixiviación y las celdas de humedad, estas pruebas estudian la generación de acidez y lixiviación de metales. Las pruebas de columna se diferencian por tener un diseño que permite que los contaminantes liberados por los minerales primarios precipiten a su ritmo natural como minerales secundarios. Por otro lado, las celdas de humedad son las más empleadas. Estas celdas, normadas bajo la norma ASTM 2242-21, simulan los procesos geoquímicos de meteorización mediante ciclos de humedad e inundación. Durante estos ciclos se genera un lixiviado que se libera y recoge para su posterior análisis químico, proporcionando concentraciones de elementos a pequeña escala. Aunque ofrecen una aproximación de la posible evolución química de la meteorización de la roca, es importante tener en cuenta que las condiciones de laboratorio difieren de las condiciones de campo.

2.2.3. Metodologías preventivas.

Las metodologías de prevención del drenaje ácido tienen como objetivo reducir la interacción de los minerales sulfurosos con el agua, el oxígeno y/o microorganismos, como las bacterias. Estas metodologías se clasifican principalmente en bactericidas, barreras de oxígeno, tecnologías de pasivación y microencapsulación (Chen et al., 2021).

En condiciones de pH menor a 3, la presencia de bacterias cataliza la formación de drenaje ácido al acelerar la transformación de ion ferroso (Fe^{+2}) a ion férrico (Fe^{+3}). La sustitución de Fe^{+3} por O_2 como agente oxidante de la pirita provoca una aceleración significativa en la producción de hidrogeniones. Por lo tanto, la formación de drenaje ácido puede reducirse eliminando o inhibiendo la actividad microbiana que se desarrolla en condiciones altamente ácidas ($\text{pH} < 3$), pero que requiere un pH intracelular neutro para sobrevivir. Los bactericidas actúan sobre la membrana celular bacteriana, permitiendo la entrada de protones y causando un aumento en la acidez intracelular, lo que resulta en la muerte de las bacterias. Ejemplos de bactericidas eficaces incluyen

el sulfato de dodecilo sódico, el sulfonato de dodecilbenceno sódico y ácidos orgánicos (Chen et al., 2021).

Las barreras de oxígeno emergen como la tecnología más ampliamente adoptada a nivel mundial para prevenir y controlar la formación de drenaje ácido. Este enfoque implica la aplicación de coberturas que combinan o recubren homogéneamente materiales potencialmente formadores de acidez (PFA), como los sulfuros, con materiales no formadores de acidez (NFA) o materiales alcalinos como la caliza, hidróxido de sodio y algunos subproductos industriales. La esencia de esta práctica radica en mitigar la infiltración de agua y la difusión de oxígeno a través de los poros de la roca, reduciendo así la oxidación de sulfuros que produce el drenaje ácido, como en el caso de la pirita (Abfertiawan et al., 2020).

Existen dos categorías principales de cubiertas: las secas, con materiales inorgánicos y orgánicos, y las húmedas, que, aunque altamente eficientes por la baja difusión de oxígeno en medio acuoso, se consideran imprácticas en zonas áridas por la escasez del recurso hídrico. Estas barreras no solo constituyen un método efectivo para prevenir la formación de drenaje ácido, sino que también destacan por su versatilidad al adaptarse a diversas condiciones geográficas y climáticas, subrayando así su prominencia en la gestión sostenible de desechos mineros.

Por otro lado, las tecnologías de pasivación y microencapsulación generan una capa hidrofóbica en la superficie de los minerales sulfurados, para disminuir su exposición al agua y al oxígeno. Se identifican dos modalidades de pasivación, diferenciadas principalmente por el material que compone el agente pasivante.

La pasivación orgánica implica la formación de un recubrimiento hidrofóbico orgánico selectivo sobre el mineral sulfurado mediante el uso de oleato de sodio o materia orgánica natural como ácido húmico, ácido oxálico o lignina. Sin embargo, presenta la desventaja de incertidumbre en la estabilidad a largo plazo, ya que los recubrimientos podrían fallar o degradarse bajo condiciones climáticas complejas.

La pasivación a base de silano, por otro lado, es más resistente a ambientes ácidos y altas temperaturas. Utiliza átomos de silicio inorgánico y grupos funcionales orgánicos para proporcionar durabilidad, adhesión, flexibilidad y resistencia al agrietamiento. Ejemplos incluyen

tetraetoxisilano (TEOS), mercaptopropiltrimetoxisilano (PropS-SH) y n-propiltrimetoxisilano (nPS). No obstante, sus desventajas comprenden un alto costo, el consumo elevado de energía y la contaminación severa.

La microencapsulación busca actuar sobre la superficie de los minerales sulfurados, formando un recubrimiento hidrofóbico que limita su exposición al agua y al oxígeno atmosférico. Agentes pasivantes como fosfatos, silicatos y grupos orgánicos se utilizan con este fin. Aunque se han desarrollado numerosas tecnologías, los materiales utilizados presentan limitaciones en cuanto a su estabilidad a largo plazo y selectividad, especialmente en presencia de minerales complejos que contienen cuarzo y aluminosilicatos.

Sin embargo, las tecnologías tradicionales de microencapsulación desperdician reactivos usando complejos metaloides orgánicos estables en solución. En respuesta a esta limitación, surgen las tecnologías de microencapsulación al portador (*Carrier-microencapsulation*), que actúan selectivamente sobre la superficie de diferentes tipos de minerales sulfurados, generando un recubrimiento hidrofóbico que reduce su exposición al agua y al oxígeno.

Aunque estas tecnologías se centran en la fase inicial de un proyecto minero, deben mantener su efectividad a lo largo de toda la vida útil de la mina y más allá. Cada área presenta nuevos desafíos de ingeniería debido a las diversas condiciones en las que se ubican los sitios mineros de interés. Aunque la minería chilena está predominantemente ubicada en zonas áridas según indica SERNAGEOMIN (2022), los periodos de precipitación pueden aumentar el riesgo de drenaje ácido minero, destacando la importancia de abordar estos desafíos de manera continua.

2.2.4. Metodologías de tratamiento y remediación.

La aplicabilidad y adecuación de una metodología de tratamiento dependen de la naturaleza del drenaje ácido, su concentración inicial, así como de los costos y el impacto ambiental asociados con la operación. Entre los métodos de tratamiento más utilizados se encuentran la neutralización, métodos microbiológicos, humedales artificiales, adsorción y separación mediante membranas (Ighalo et al., 2022; Jiao et al., 2023).

Según Jiao et al. (2023), La neutralización es la forma más común de tratar el DA dentro de las tecnologías de tratamiento conocidas hasta la fecha. Su metodología se basa en

reacciones de neutralización ácido-base, utilizando principalmente grupos hidroxilo (OH) como agentes neutralizadores que interactúan con los iones de metales pesados para producir precipitados insolubles. Los métodos de neutralización más comunes incluyen la adición de caliza, cal y una combinación de estas dos. La caliza es la fuente de alcalinidad más utilizada a nivel mundial gracias a su bajo costo, amplia disponibilidad y eficacia de neutralización que oscila entre el 75% y el 100%. Además, destaca por ser segura y de fácil manejo (Skousen et al., 2019).

En lo que respecta a los métodos microbiológicos para tratar el drenaje ácido, representan una estrategia innovadora y eficaz en la gestión de esta problemática ambiental. Este enfoque implica usar microorganismos específicos, como bacterias acidófilas, que catalizan reacciones biogeoquímicas para atenuar la acidez y liberar metales pesados. Estos microorganismos participan de manera activa en la reducción de sulfatos y la neutralización del pH, contribuyendo así a la restauración de la calidad del agua en áreas afectadas por el drenaje ácido. La implementación de métodos microbiológicos no solo persigue controlar la generación del problema, sino también fomentar procesos de remediación sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Los humedales artificiales son una estrategia de tratamiento ampliamente adoptada. Estos humedales desempeñan un papel clave en la descontaminación a través de mecanismos como la hidrólisis, la oxidación de metales pesados, la reducción de sulfato mediada por bacterias anaeróbicas, y el metasomatismo de metales facilitado por la presencia de materia orgánica. Este enfoque integral aprovecha la capacidad inherente de los humedales para promover procesos naturales, como la actividad microbiológica y las interacciones entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema acuático. Además, la implementación de humedales artificiales no solo contribuye a la remediación del drenaje ácido, sino que también promueve la restauración de hábitats acuáticos, proporcionando beneficios ecológicos adicionales (Jiao et al., 2023).

Los métodos de adsorción se fundamentan en el uso de moléculas adsorbentes dotadas de diversos grupos funcionales capaces de eliminar contaminantes mediante su interacción. La técnica implica la transferencia de partículas de soluto desde la fase acuosa hacia superficies sólidas adsorbentes, las cuales se categorizan comúnmente en varias clases, incluyendo material orgánico, arcillas/tierra, carbón activado/biocarbón, zeolitas, y cenizas volantes, entre otras.

En particular, el uso de material orgánico como adsorbente ha sido objeto de extensos estudios, ya que muestra eficacia para minimizar la presencia de contaminantes y presenta la ventaja de ser un recurso renovable. Por otro lado, las zeolitas, minerales cristalino-silicato con una estructura porosa tridimensional, destacan por su alta capacidad de adsorción y diversas propiedades, lo que las convierte en una opción atractiva para el tratamiento del drenaje ácido. Asimismo, la selección adecuada del adsorbente en función de las características específicas del agua y los contaminantes es esencial para garantizar la eficacia de este método de tratamiento.

Con una selección adecuada del adsorbente para tratar el drenaje ácido, es posible lograr una reducción significativa, que oscila entre el 50% y el 99% de la presencia de iones en el medio. No obstante, es esencial tener en cuenta que este enfoque presenta limitaciones notables al tratar aguas con una carga contaminante elevada, ya que los materiales empleados experimentan un agotamiento rápido de su capacidad adsorbente

Finalmente, los métodos de separación mediante membrana son una alternativa más eficaz que los métodos de adsorción, ya que pueden reducir la presencia de iones en más del 90%. Dentro de estas técnicas, destacan la nanofiltración y la ósmosis inversa como enfoques particulares. La eficiencia de estos procesos se rige por dos factores clave, según lo señalado por (Ighalo et al., 2022):

- Flujo: Representa la tasa de permeación del líquido que atraviesa la unidad de área de la membrana en una fracción de tiempo específica.
- Selectividad: Se refiere a la fracción de soluto retenida por la membrana durante el proceso.

Además, es imperativo considerar la necesidad de un mantenimiento periódico del sistema adoptado, ya que la precipitación y deposición de sales minerales insolubles en la superficie de la membrana pueden afectar su rendimiento en el tiempo. La consideración cuidadosa de estos aspectos contribuye a la optimización y eficacia continua de los procesos de separación por membrana en el tratamiento del drenaje ácido.

2.2.5. Uso de bentonita.

La bentonita, un grupo de arcillas compuestas esencialmente por esmécticas, se utiliza extensivamente en la ingeniería, incluyendo su aplicación como impermeabilizante, adsorbente y reductor de la concentración de metales pesados (Yuliana et al., 2023). Existen predominantemente dos tipos de bentonitas, la bentonita cálcica y sódica, siendo esta última, la que posee mejor capacidad de retención de agua. Su estructura es tridimensional y la componen cristales de aluminosilicatos hidratados, los que tienen cationes alcalinos o alcalinotérreos entre sus capas (Siregar & Irma, 2016; Sakinah, 2020).

La bentonita tiene una alta capacidad de retención de agua y baja permeabilidad, lo que ayuda a evitar la filtración de agua y oxígeno hacia las paredes de roca que contienen sulfuros, previniendo así la formación de drenaje ácido. Mejora la estabilidad física y química de las capas de protección, evitando la lixiviación de sustancias tóxicas. Su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas y geológicas la hace apta para la implementación en áreas mineras a nivel mundial. La eficacia de las bentonitas puede depender de factores como la calidad del material, las condiciones climáticas locales y el diseño ingenieril específico del depósito. La investigación continua y la evaluación específica son esenciales para optimizar su aplicación en la gestión de residuos mineros (Pusch, 2015; Proia et al., 2016; Kutzner, 2018).

En este contexto, Tripathi & Viswanadham (2012) presentan la evaluación de laboratorio de la conductividad hidráulica de mezclas de arena-bentonita, cuya baja permeabilidad y capacidad de retención de agua las hace adecuadas como barreras impermeabilizantes y para contener desechos. Se realizaron pruebas de carga variable con permeámetros de pared rígida y edómetros en diferentes mezclas arena-bentonita con contenidos de bentonita del 5% al 25% en peso seco.

2.3. Conductividad hidráulica de materiales granulares.

La conductividad hidráulica es fundamental en el contexto del DA, ya que determina la facilidad con la que el agua y el oxígeno pueden moverse en los materiales granulares que componen los depósitos de residuos mineros. Una mayor conductividad hidráulica implica una

mayor exposición de los minerales sulfurosos, como la pirita, al agua y al oxígeno, acelerando así las reacciones de oxidación que conducen a la formación de drenaje ácido.

En los botaderos mineros, por ejemplo, la disposición heterogénea de los materiales granulares que incluyen rocas de diversas granulometrías y composiciones, da lugar a una distribución irregular de la conductividad hidráulica. Esto puede crear vías preferenciales para el flujo de agua y aire, lo que aumenta la probabilidad de que se produzcan reacciones de oxidación localizadas y, en consecuencia, la generación de DA (Kotsiopoulos & Harrison, 2015).

La evaluación precisa de la conductividad hidráulica de estos materiales es esencial para comprender y predecir el potencial de generación de drenaje ácido en los botaderos mineros. Esta información es fundamental para el diseño y la implementación de estrategias preventivas y de mitigación efectivas.

Los permeámetros de laboratorio son herramientas para determinar la conductividad hidráulica de los materiales granulares. Estos dispositivos permiten simular las condiciones hidráulicas y de flujo a pequeña escala, brindando información sobre la conductividad hidráulica de los materiales bajo estudio.

Al utilizar un permeámetro de laboratorio, es posible evaluar cómo la variación en la granulometría, la compactación y la composición mineralógica de los materiales afectan la permeabilidad de los materiales.

2.3.1. Métodos para medir conductividad hidráulica de materiales granulares.

Los materiales granulares se pueden clasificar según la Norma ASTM D-2487 según el tamaño de partícula que los componen, como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 1. Clasificación de materiales granulares según tamaño de partícula. Fuente: ASTM D-2487.

Clasificación	Tamaño de partícula
Arcilla	Menor que 0,005 mm
Limo	Entre 0,005 mm y 0,05 mm
Arena fina	Entre 0,05 mm y 0,25 mm
Arena gruesa	Entre 0,25 mm y 2,0 mm
Grava	Mayor que 2,0 mm

Existen varios procedimientos para la determinación de la conductividad hidráulica de los materiales granulares: unos de laboratorio y otros en terreno.

Las pruebas de laboratorio son herramientas para determinar la conductividad hidráulica de los materiales granulares. Estos dispositivos permiten simular las condiciones hidráulicas y de flujo en los botaderos mineros a pequeña escala, brindando información sobre la conductividad hidráulica de los materiales bajo estudio. Sin embargo, debido que los materiales en terreno suelen ser heterogéneos, los ensayos de laboratorio pueden no representar correctamente las condiciones del terreno.

2.3.1.1. Métodos de medición en laboratorio.

Según Sharma & Lewis (1994), los dos tipos de métodos de prueba de conductividad hidráulica son:

Permeámetro de carga constante.

En las pruebas de carga constante, la carga hidráulica (h) se mantiene constante a través de una muestra de longitud (L) y área (A). Se mide el volumen total de fluido (V) durante un período de tiempo (t). La conductividad hidráulica (k) se determina utilizando la siguiente relación:

$$k = \frac{VL}{Aht}$$

Ecuación 1

Para suelos de grano fino, el valor de k es muy pequeño. Por lo tanto, se modifican los equipos convencionales para aplicar cargas altas, o se acepta un período de prueba prolongado si se utiliza una carga constante. Por lo tanto, este método de prueba es generalmente adecuado para suelos permeables o de grano grueso.

Permeámetro de carga variable.

En las pruebas de carga variable, se miden las cargas h_1 en el tiempo t_1 y h_2 en el tiempo t_2 (causando una pérdida de carga (h) durante el período de tiempo (t)) en una pipeta o bureta de área (a) cuando el fluido fluye a través de un suelo de área (A) y longitud (L). La conductividad hidráulica (k) se determina utilizando la siguiente relación:

$$k = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Ecuación 2

Las principales ventajas de este método son que los flujos pequeños pueden medirse fácilmente utilizando una bureta y las cargas hidráulicas pueden aumentarse superponiendo una presión de aire. Esto puede reducir el tiempo de prueba para suelos de baja permeabilidad. Por lo tanto, el método se utiliza comúnmente para suelos de grano fino.

Juárez Badillo (2000) determinó que el método de prueba bajo carga constante se debe realizar para gravas y arenas, en cambio la metodología de carga variable es apta desde el grupo de arenas finas hasta arcillas y limo según la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de materiales granulares y metodología de medición según valores de conductividad hidráulica.
 Fuente: Modificado de (Juárez Badillo, 2000).

	10 ²	10	1.0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹ cm/s
Propiedad de drenaje	Buen drenaje			Mal drenaje					Prácticamente impermeable			
Tipos de suelo	Grava limpia	Arenas limpias Mezclas de Grava y Arena Limpias			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos. Mezclas de arena, limo y arcilla. Depósitos de arcilla estratificados, etc.				Suelos "impermeables"			
Metodología de determinación directa del coeficiente de permeabilidad	Prueba directa en posición original.											
	Permeámetro de carga constante											
				Permeámetro de carga variable								

Al utilizar un permeámetro de laboratorio, es posible evaluar cómo la variación en la granulometría, la compactación y la composición mineralógica de los materiales afecta la conductividad hidráulica y, por lo tanto, el potencial de generación de DA.

2.3.1.2. Métodos de medición en terreno

Aunque en la literatura se discuten ampliamente las categorías de metodologías de campo, una de las más utilizadas fue propuesta por Daniel (1989), quien clasificó las pruebas de conductividad hidráulica de terreno en cuatro categorías: pruebas de sondeo, sondas porosas, infiltrómetros y lisímetros. Los detalles de estas pruebas se discuten en varios documentos.

Pruebas de sondeo

- a. Permeámetro Boutwell: Este método se basa en la introducción de un tubo permeámetro en el suelo y la medición del caudal de agua que fluye a través de este a carga constante. Esto permite determinar la conductividad hidráulica del suelo in situ.
- b. Permeámetro de carga constante: Similar al permeámetro Boutwell, este método también introduce un tubo en el suelo, pero en este caso se mantiene una carga hidráulica constante y se mide el caudal para determinar la conductividad hidráulica.

Sondas porosas.

Estos dispositivos constan de una sonda porosa que se inserta en el suelo y está conectada a un reservorio de agua. Al crear un gradiente hidráulico, se puede medir el flujo de agua a través del suelo y calcular su conductividad hidráulica.

Infiltrómetros.

- a. Infiltrómetro de anillo único abierto: se coloca un anillo en el suelo y se mide la tasa de infiltración del agua que se vierte en su interior.
- b. Infiltrómetro de doble anillo abierto: similar al anterior, pero con dos anillos concéntricos, lo que permite estimar mejor la infiltración vertical.
- c. Infiltrómetro de anillo único sellado: el anillo se sella lateralmente para forzar la infiltración vertical.
- d. Infiltrómetro de doble anillo sellado: combina el doble anillo y el sellado lateral para optimizar la medición de la infiltración vertical.
- e. Permeámetro de entrada de aire: mide la presión de entrada de aire en el suelo, lo que permite estimar su conductividad hidráulica.

Lisímetros.

Estos dispositivos miden directamente la percolación o drenaje del agua a través del perfil del suelo, permitiendo calcular la conductividad hidráulica.

Estas metodologías permiten determinar in situ las propiedades de permeabilidad del suelo, ya sea a través de mediciones directas de flujo o de parámetros relacionados, como la infiltración o la entrada de aire. La elección del método dependerá de las características del suelo y del nivel de precisión requerido.

3. Desarrollo experimental.

3.1. Diseño del permeámetro.

El permeámetro ha sido diseñado para evaluar la conductividad hidráulica de materiales granulares bajo carga constante y variable. Este instrumento presenta un diseño automatizado y multifuncional. Además, el diseño acata la normativa vigente (ASTM E2242-21) en cuanto a dimensiones y materiales del dispositivo, para funcionar como columna de ensayos cinéticos en estudios posteriores. Se considera la durabilidad de los materiales que lo constituyen, para que sea de utilidad en futuras investigaciones.

En la sección de anexos (Anexo B), se presentan los planos correspondientes al permeámetro propuesto con bases en su aplicabilidad en laboratorio a pequeña escala. Como muestra el esquema de la Figura 2, se diseña un dispositivo compuesto por dos permeámetros, los cuales pueden configurarse independientemente.

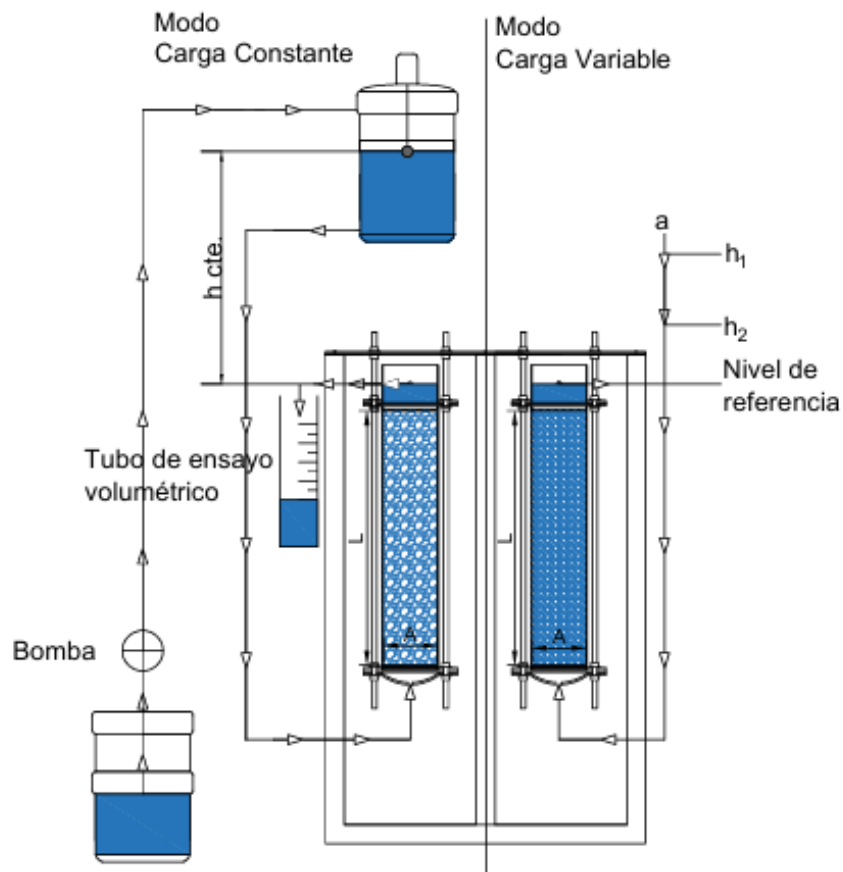


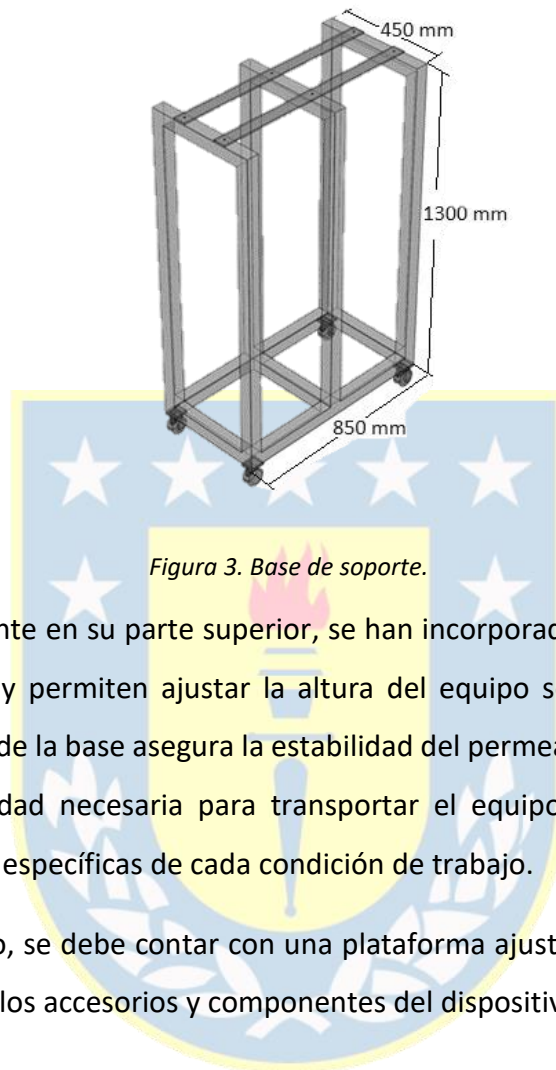
Figura 2. Esquema de ensayo según modalidad de carga constante y variable.

De acuerdo con lo propuesto, se divide el permeámetro en 4 partes principales: el soporte del dispositivo, tapas perforadas, columna principal y sistema de control. A continuación, se procede a describir y justificar el diseño de cada una de ellas.

3.1.1. Soporte del dispositivo.

Como se muestra en la Figura 3, el diseño del permeámetro incluye una base móvil que tiene como objetivo proporcionar un entorno estable y facilitar el traslado del equipo completo

de un lugar a otro según sea necesario. La base consta de cuatro ruedas con seguro, lo que permite mover la estructura con facilidad.



Adicionalmente en su parte superior, se han incorporado dos pletinas de acero, que soportan el permeámetro y permiten ajustar la altura del equipo según los requerimientos del ensayo. Esta configuración de la base asegura la estabilidad del permeámetro durante las pruebas y a la vez brinda la flexibilidad necesaria para transportar el equipo a diferentes ubicaciones y adaptarlo a las condiciones específicas de cada condición de trabajo.

Por otro lado, se debe contar con una plataforma ajustable en altura y que otorgue un espacio para almacenar los accesorios y componentes del dispositivo.

3.1.2. Tapas perforadas.

El diseño tiene como finalidad permitir el paso del agua a través de la muestra en la columna principal hasta su recolección y consiguiente medida. Implica enfrentar una serie de desafíos, entre los cuales se incluyen la necesidad de soportar el peso de la columna de material sometida a ensayo, minimizar la resistencia al flujo del líquido objeto de estudio y realizar un sellado efectivo de la junta con las columnas principales del permeámetro. Cada aspecto requeriría una cuidadosa consideración y soluciones ingeniosas para el buen funcionamiento y la precisión de los resultados obtenidos.

Se consideran dos tapas por cada dispositivo, una tapa inferior y otra superior. Ambas tapas tienen como componente base la tapa perforada compuesta de la Figura 4, la que se compone por 3 capas de acrílico transparente de 3 mm de espesor y una junta tórica.

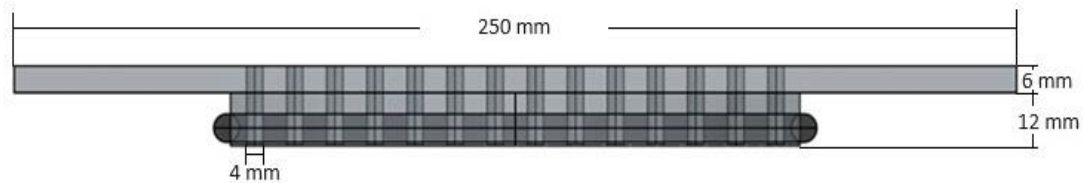


Figura 4. Tapa perforada compuesta.

Adicionalmente, se considera la implementación de filtros geotextiles, los que se ubican bajo la tapa perforada superior y sobre la inferior. Su objetivo es evitar que partículas finas sólidas en el líquido de ensayo de tamaño menos al diámetro de cada perforación de las tapas pasen por la muestra de material granular y obstruyan los conductos y válvulas del equipo.

Tapa perforada superior

La parte superior del permeámetro está diseñada para permitir el rebalse del líquido de ensayo con la finalidad de mantener un nivel medible y estable durante las pruebas.

Esta sección superior se compone de una tapa perforada y una columna de acrílico de 3 mm de espesor con 100 mm de altura como se muestra en la Figura 5.

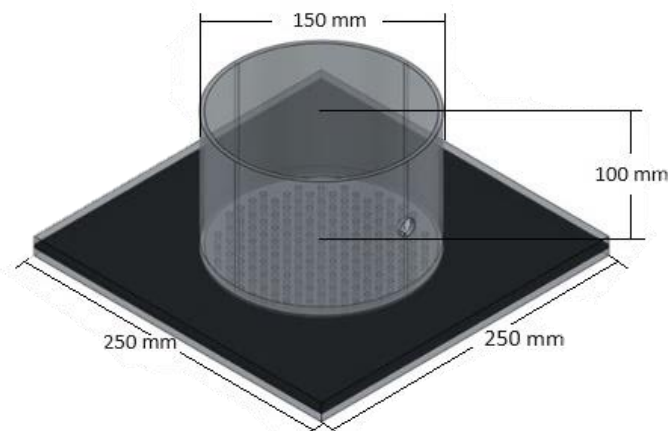


Figura 5. Tapa perforada superior.

La columna de acrílico se adhiere a una pieza cuadrada de acrílico de 250x250 mm, la cual tiene un agujero circular de 150 mm en el centro. Esto permite unir el borde interno del agujero con el borde exterior de un extremo de la columna de acrílico. Adicionalmente, se utiliza una empaquetadura de goma para reforzar el sello entre ambas piezas.

Esta configuración de la parte superior otorga al permeámetro la flexibilidad necesaria para operar en diferentes modos, adaptándose a las necesidades específicas de los ensayos a realizar.

Tapa perforada inferior

La sección inferior del permeámetro (véase Figura 6) ha sido diseñada para recoger el lixiviado en caso de flujo gravitacional o alimentar en caso de flujo inverso. Incorpora una tapa perforada compuesta y un receptáculo cóncavo de acrílico, cuyo propósito es recolectar y dirigir el lixiviado que atraviesa la tapa perforada hacia un agujero de recolección de 5/8" de diámetro.

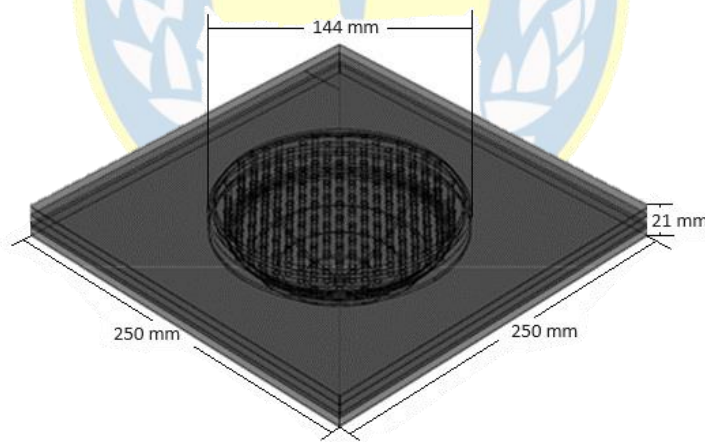


Figura 6. Tapa perforada inferior.

Este agujero de recolección cuenta con rosca interna para acoplar un niple inoxidable del mismo diámetro, reforzado con teflón. Además, se ha incorporado una válvula de bola de 5/8"

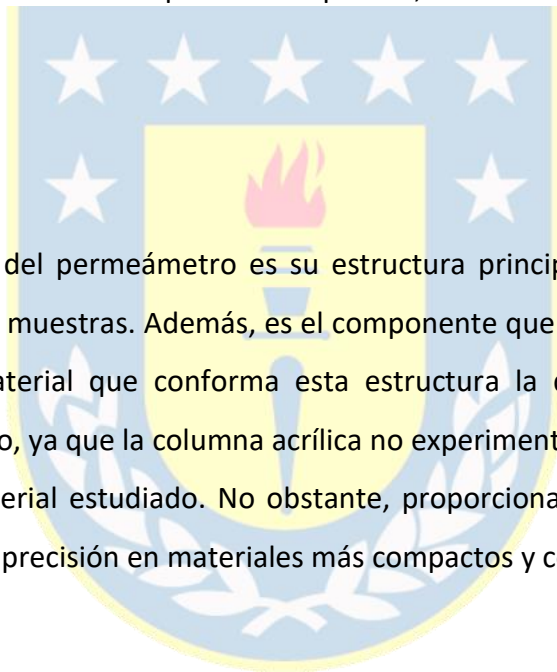
con rosca interna en ambos extremos, la cual termina en una conexión de 5/8" a 3/8", permitiendo el control del flujo.

Para evitar fugas entre las secciones del permeámetro, se ha diseñado un sistema de sellado que incluye una junta tórica de goma entre la columna principal y la tapa perforada. Adicionalmente, se ha colocado una empaquetadura de goma de 3 mm de espesor entre la tapa perforada compuesta y la base de recolección/alimentación, reforzada con silicona multiuso SikaFlex 221.

Esta configuración de la sección inferior asegura la recolección o alimentación adecuada del fluido, según el modo de operación requerido, manteniendo la integridad del sistema y evitando pérdidas.

3.1.3. Columna principal.

Esta sección del permeámetro es su estructura principal, ya que es por donde el líquido fluirá a través de las muestras. Además, es el componente que contiene la muestra mineral sometida a estudio. El material que conforma esta estructura la distingue de otros tipos de permeámetro de laboratorio, ya que la columna acrílica no experimenta deformaciones ni se ajusta a la granulometría del material estudiado. No obstante, proporciona seguridad, ya que limita la posibilidad de filtraciones y precisión en materiales más compactos y cohesivos.



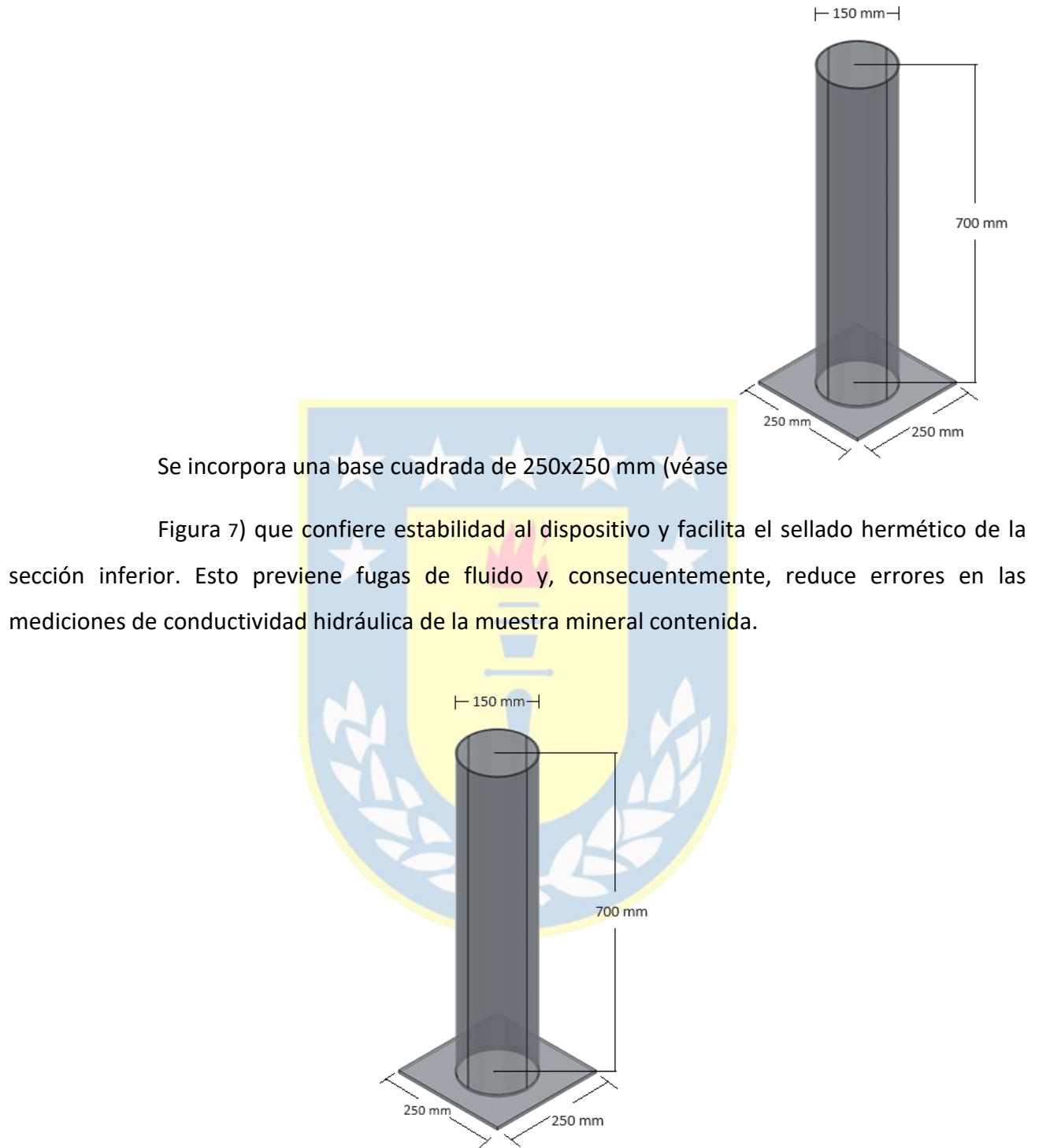


Figura 7. Columna principal del dispositivo.

3.1.4. Sistema de control.

Para controlar el tiempo de funcionamiento de la bomba y mantener la versatilidad del dispositivo, se propone utilizar una placa programable Arduino. Esta herramienta permite

programar diferentes funciones según los requerimientos de cada experimento. En este caso, es necesario saturar la columna de material, así como también alimentar el permeámetro con liquido de ensayo procurando mantener un nivel contante y mantener el control sobre este proceso. Adicionalmente, se considera otorgar una interfaz amigable que permita realizar estas acciones mediante la selección de distintas modalidades. Para llevar a cabo lo anterior, se requieren los siguientes accesorios:

- a. Placa Arduino UNO: Es una placa de microcontrolador de código abierto que se basa en el chip ATmega328P. Es ampliamente reconocido en la comunidad electrónica por su simplicidad y versatilidad. En este proyecto, el Arduino UNO será el corazón del sistema, ejecutando un programa diseñado para gestionar el temporizador y controlar la activación y desactivación de la bomba a través del módulo de relé.
- b. Bomba de agua: Debe tener capacidad para llevar agua a una altura mínima de 3 m y debe ser compatible con los módulos y voltajes permitidos de la placa Arduino.
- c. Fuente de poder: Es la encargada de entregar el voltaje requerido por la bomba.
- d. Botones mecánicos: Dispositivos de entrada que constan de un contacto móvil y un contacto estacionario. Cuando se presiona el botón, el contacto móvil se mueve hacia abajo para hacer contacto con el estacionario, cerrando así el circuito eléctrico. Esto permite que la corriente fluya a través del botón, activando una función programable en el circuito electrónico al cual está conectado. En el proyecto, el botón mecánico se utiliza para programar, activar y desactivar el funcionamiento de la bomba.
- e. Módulo de relé: Es un dispositivo que actúa como un interruptor controlado electrónicamente. Se utiliza para controlar circuitos de alta potencia con señales de baja potencia, como en nuestro caso, donde la bomba requiere 12V para funcionar, mientras que Arduino solo entrega 5V. Entonces el Arduino Uno enviará una señal al módulo de relé para activarlo o desactivarlo. Cuando está activado, el relé cierra el circuito externo, permitiendo que la corriente fluya y encendiendo la bomba de agua
- f. Sensor de nivel de agua: Dispositivo electromagnético compuesto por un flotador el que determina el nivel de agua enviando una señal digital cuando el flotador sube hasta su máximo.

- g. Recipientes y tuberías: La configuración de un permeámetro requiere dos componentes principales: un recipiente contenedor y un recipiente de alimentación conectados mediante tuberías. El recipiente contenedor debe ser capaz de distribuir el líquido de ensayo de manera controlada hacia el recipiente de alimentación. Este último tiene la función de suministrar el líquido hacia el material a analizar bajo condiciones específicas.

El dispositivo está diseñado para ofrecer una interfaz amigable y facilitar su manejo y comprensión. Cuenta con cuatro botones situados sobre la protoboard (véase Figura 8) que cumplen funciones específicas: el botón 4 permite subir un valor o avanzar en una configuración, el botón 3 permite bajar un valor o retroceder en una configuración, el botón 2 confirma una selección o ingreso de datos, y el botón 1 cancela una acción o regresa al menú principal.

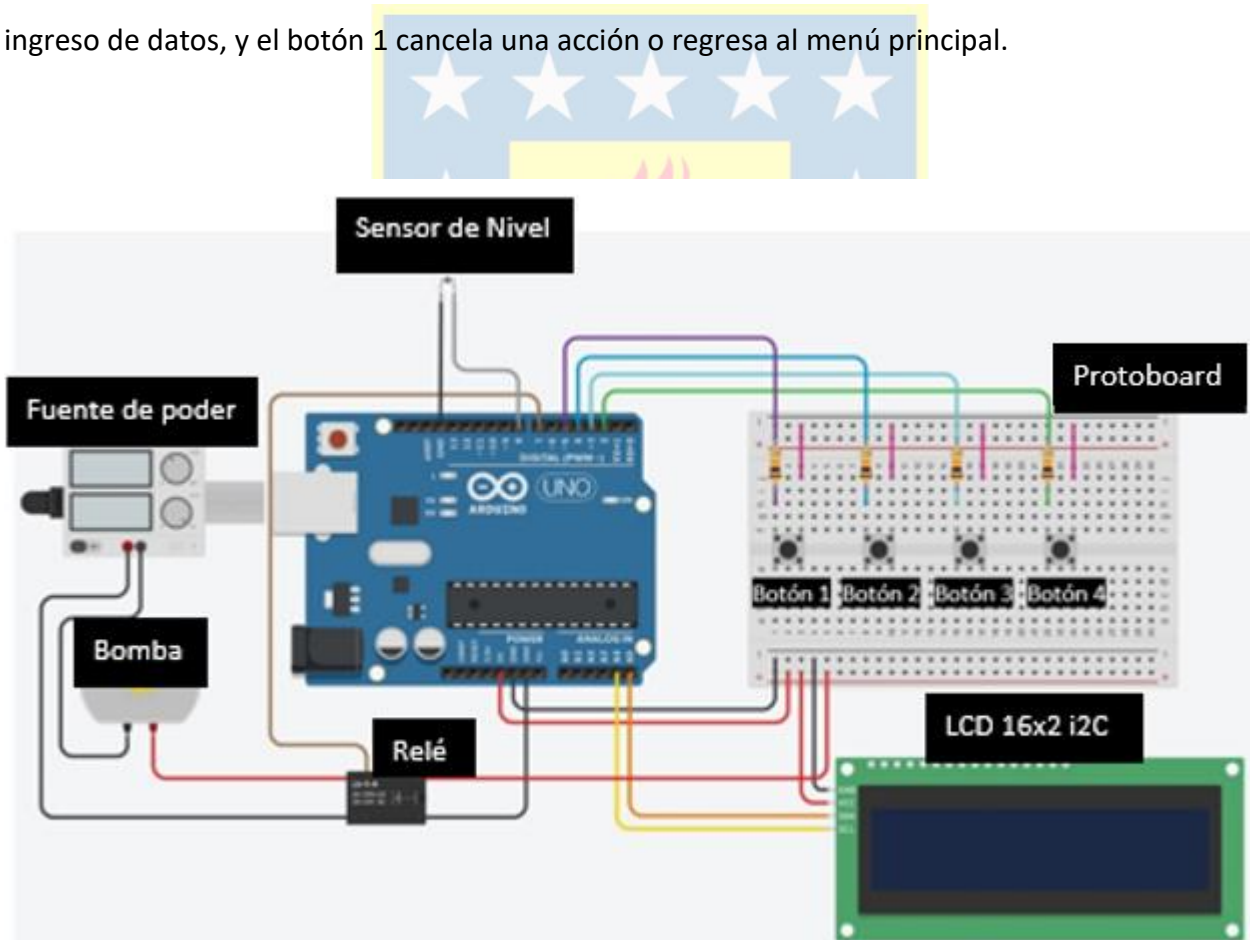


Figura 8. Esquema de conexiones del Arduino UNO y accesorios.

La modalidad de Saturación activa un cronómetro para medir el tiempo que se demora en saturar el sistema con la intervención del usuario. Además, asegura la disponibilidad del

líquido de ensayo para distribuirlo a través de la columna de material, generando así la condición imprescindible de material saturado antes de cada prueba.

Por otro lado, las modalidades de carga variable y carga constante consideran las áreas de la sección transversal de la columna de material y la columna de alimentación, según corresponda. En estas modalidades, el usuario debe ingresar datos como la altura constante, el volumen a medir y el largo de la columna de material en el caso de Carga Constante, o la diferencia de altura y el largo de la columna de material en el caso de Carga Variable.

Una vez ingresados estos parámetros, el programa calcula automáticamente la conductividad hidráulica según la modalidad seleccionada y el tiempo transcurrido en cada ensayo, entregando así los resultados de manera precisa.

3.2. Construcción del permeámetro.

Se procede a la construcción del permeámetro, siguiendo el diseño establecido y utilizando materiales según la normativa correspondiente.

Se dispone con anterioridad de materiales y estructuras metálicas, de las que se aplicaron modificaciones que se detallan a continuación para llegar al diseño final del sistema.

Desde aquí, se cotizaron y adquirieron los materiales y servicios necesarios para la construcción del sistema llegando a \$441.107 pesos. Ver Anexo A para informe detallado de gastos por precio unitario del proyecto.

De acuerdo con el diseño propuesto, se procede a la construcción de cada una de las partes que lo componen y se describe como sigue.

3.2.1. Soporte del dispositivo.

Se modifica la estructura metálica añadiendo dos pletinas de acero en su parte superior para sujetar y ofrecer estabilidad a los permeámetros. Las pletinas se perforaron con 4 orificios de 1/2" de diámetro por los que se pasarán y fijarán los hilos metálicos que componen el sistema diseñado, además de 3 orificios de 5 mm para fijarlos a la estructura metálica previa.

Además, se añaden cuatro ruedas bajo la estructura metálica y en cada esquina de esta para facilitar la movilidad de la estructura completa del dispositivo.

Finalmente, para ajustar la altura de los bidones de alimentación del dispositivo, se adquirió un estante cuyas bandejas permiten ajustar este parámetro. Adicionalmente, este estante otorga un espacio para emplazar el sistema de control y los accesorios del dispositivo como se ve en la Figura 9 .



Figura 9. Disposición de bidones de alimentación y sistema de control en estante del equipo.

3.2.2. Tapas perforadas

Para fabricar las tapas perforadas que permiten el flujo adecuado de líquido en el permeámetro, se emplearon ocho círculos de acrílico transparente con un espesor de 6 mm y un diámetro de 144 mm. Cada uno de ellos fue sometido a un total de 137 perforaciones de 4 mm de diámetro utilizando una máquina láser especialmente diseñada para trabajar con acrílico (véase Figura 10). Posteriormente, se unieron de dos tapas mediante el adhesivo WELD-ON, obteniendo así un total de cuatro tapas perforadas con un diámetro de 144 mm y un espesor de 12 mm. Para la creación de una hendidura alrededor de cada tapa, donde se alojará la junta tórica de goma correspondiente, se contrató el servicio de tornería.



Figura 10. Construcción de tapas perforadas con láser.

Cada tapa perforada se unió al centro de un trozo de acrílico transparente de 250x250 mm y 6 mm de espesor (véase Figura 11). Luego, se realizaron perforaciones a través de esta composición combinada para mejorar el flujo. Esto da como resultado una tapa perforada compuesta por la circunferencia y el trozo cuadrado de acrílico, que ahora presenta un espesor de 18 mm en su centro.



Figura 11. Tapa perforada compuesta.

Tapa perforada inferior.

Para la base del dispositivo se fabrica utilizando una matriz o molde cóncavo de madera. Se aplica calor focalizado en el centro del trozo de acrílico mediante una pistola de calor. Una vez que el acrílico alcanza una temperatura en la que se vuelve maleable, se presiona rápidamente contra la matriz para obtener la forma deseada como se muestra en la Figura 12 y 13.

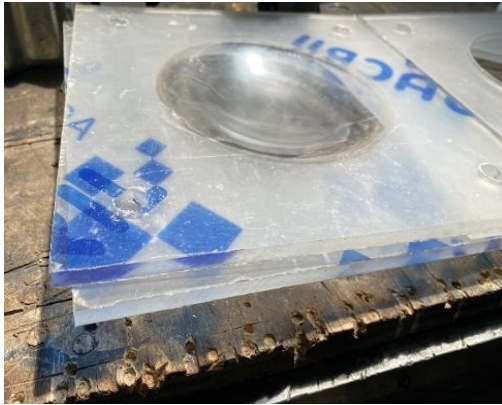


Figura 12. Receptáculo cóncavo moldeado en trozo de acrílico transparente de 6 mm de espesor.

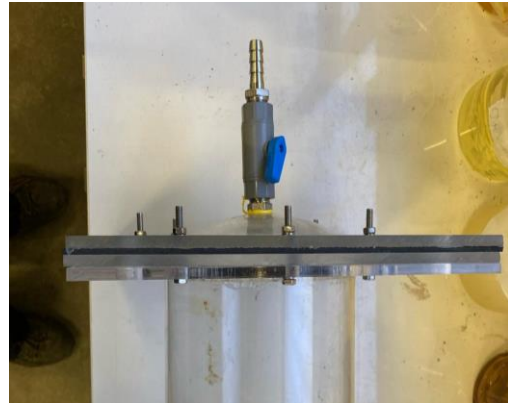


Figura 13. Tapa perforada inferior con válvula de bola y terminal de 3/8" a 5/8".

Luego, se perfora secuencialmente en el centro de la deformación cóncava con una broca de 1/4" y 1/2" para terminar fabricando el hilo interno con un macho de 5/8".

Tapa perforada superior

Por otro lado, la parte superior se compone por tres partes esenciales para cumplir a cabalidad su objetivo. En primer lugar, se encuentra la columna de acrílico de diámetro exterior 150 mm y altura de 100 mm además de una perforación a los 50 mm a la cual se adhirió un tubo de PVC de diámetro 12 mm para canalizar el rebalse. Esta columna se adhiere mediante adhesivo de acrílico extrafuerte WELD-ON® 16 al trozo de acrílico previamente perforado en el centro de su cara en forma circular con diámetro 150 mm, resultando ser la segunda parte (véase Figura 14).



Figura 14. Tapa perforada superior.

Por último, se considera reforzar el sellado del sistema con una empaquetadura de goma con espesor de 3 mm. Esta se sitúa entre la tapa perforada compuesta y el acrílico deformado para la parte inferior y la tapa perforada compuesta y la columna superior.

3.2.3. Columna principal

Según el diseño del permeámetro, se usaron dos columnas de acrílico transparente, cuya altura se igualó a 800 mm usando un esmeril angular y posterior pulido de los bordes con lija de grano 120. El pulido se realiza para evitar dañar la junta tórica encargada de sellar correctamente la unión entre columna principal y tapa perforada.

3.2.4. Sistema de control.

El sistema de control electrónico de la bomba ha sido ensamblado dentro de una caja (Figura 15), permitiendo así la protección y el ordenamiento de los componentes, lo cual facilita su posterior utilización. Consta de dos Arduino alimentados por 9V cada uno, uno para cada permeámetro del dispositivo. Además, se adquieren mangueras, sensores de nivel de agua, bombas de agua y un sistema electrónico programable con Arduino con especificaciones técnicas en Anexo D.



Figura 15. Sistema de control del equipo.

Antes de realizar las conexiones en el sistema de control, se debe descargar la aplicación Arduino IDE® y posteriormente programar la placa y sus accesorios. Para esto, se descarga la aplicación desde el sitio oficial de Arduino (www.arduino.cc). Una vez instalada la aplicación, se programa el código en lenguaje de programación C++ para gestionar la acción de bombeo de líquido de ensayo bajo las condiciones que se requiera (véase el Anexo C).

En cuanto a la construcción de los recipientes contenedores y de alimentación del dispositivo, se utilizan 4 bidones PET de 20 L cada uno. Dos de ellos serán recipientes contenedores de líquido de ensayo que permiten llevar agua al recipiente de alimentación, por lo que se cortan y abren en su parte superior para permitir fijar la bomba de agua en su parte basal como se muestra en Figura 16. Por otro lado, se perforan dos agujeros de 3/8" en la parte superior e inferior de los bidones restantes para añadir una válvula de bola y así permitir almacenar y distribuir con nivel de carga constante si corresponde. Además, se integra un sensor en la tapa, el cual se puede ajustar a distintas alturas mediante un soporte de PVC y acero inoxidable como se aprecia en la Figura 17.

Una vez programada la placa y realizada las conexiones del sistema, se debe corroborar el correcto funcionamiento de la bomba de líquido de ensayo (Figura 16). Para esto se configuran distintos tiempos de funcionamiento, los cuales se verifican mediante dos cronómetros midiendo simultáneamente el tiempo de funcionamiento para luego compararlo con el tiempo programado.

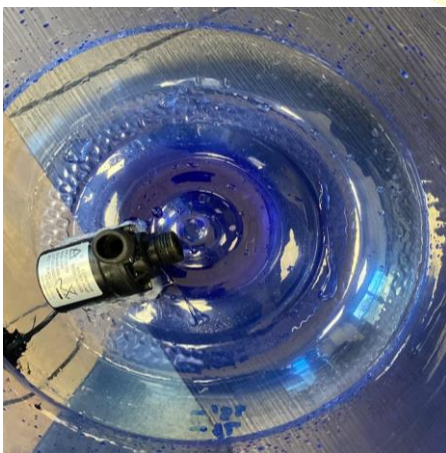


Figura 16. Recipiente contenedor del dispositivo.



Figura 17. Recipiente de alimentación del dispositivo.

3.2.5. Ensamblaje final de los componentes del equipo.

El ensamblaje final del sistema comprende cada material y las acciones descritas para reproducir fielmente el diseño del permeámetro propuesto en este trabajo (véase Figura 18).



Figura 18. Ensamblaje final del dispositivo.

3.3. Preparación de la muestra.

A continuación, se detalla el procedimiento (resumido en la Figura 19) llevado a cabo para preparar las muestras de materiales granulares, aplicando técnicas adecuadas para obtener una muestra representativa y homogénea.

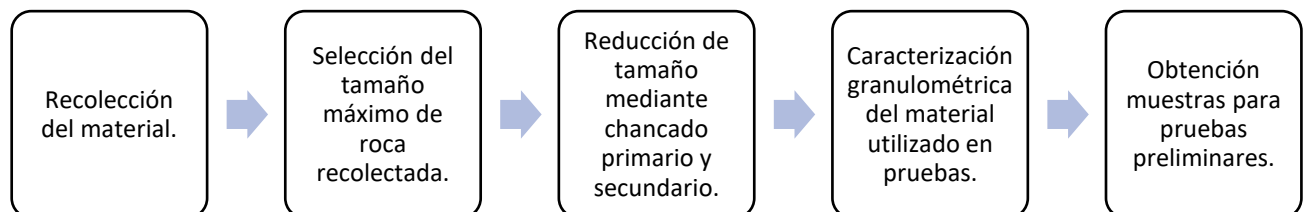


Figura 19. Proceso de preparación de muestra adoptado para la investigación.

3.3.1. Recolección del material.

Primero, la muestra mineral, esencial para el desarrollo de este estudio, se obtuvo con residuos de testigos utilizados en ensayos de compresión uniaxial. Estos residuos están en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET) de la Universidad de Concepción, en concreto en el Laboratorio de Mecánica de Rocas.

El proceso de obtención de la muestra incluyó varias etapas clave para su representatividad y manipulación adecuada. Inicialmente, se procedió a la recolección y almacenamiento de un total de 114,98 kg de material distribuidos en 5 contenedores cilíndricos de plástico con capacidad para 20 L (Figura 20). Después, se trasladan a la planta donde se realizará la siguiente etapa.



Figura 20. Muestra de mineral obtenida de residuos utilizados en ensayos de compresión uniaxial en Laboratorio de Mecánica de Rocas, DIMET.

Con relación a la muestra de bentonita sódica, se adquirieron 20 kg de esta arcilla, la cual tiene su ficha técnica en Anexo D.

3.3.2. Selección del tamaño máximo de roca recolectada.

Después de recolectar el material, se procedió a seleccionar el tamaño máximo de las rocas. El objetivo es reducir el tamaño de las partículas a una escala manejable en el laboratorio y obtener la cantidad necesaria de material para conseguir una muestra representativa de la fracción

de material sulfurado de un botadero con potencial de generación de DA. Es decir, la fracción de material fina cuya área de exposición es mayor.

Considerando la distribución granulométrica de los materiales residuales del estudio de (Linero et al., 2007), y los estudios sobre el efecto de tamaño de partícula en la reactividad de sulfuros, se determina configurar los chancadores para obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 2,00 mm. De este modo, se pretende conseguir las cantidades de material resumidas en la Tabla 3 y así evaluar la conductividad hidráulica de una muestra que distribuye granulométricamente idénticamente como la fracción de menor tamaño de un depósito de estéril en minería.

3.3.3. Reducción de tamaño.

En esta etapa, se llevó a cabo un proceso de reducción de tamaño mediante chancado secuencial con chancador primario (Figura 21) y secundario (Figura 22) en las instalaciones de la Planta Piloto “Dr. Igor Wilkomirsky” de la Universidad de Concepción.



Figura 21. Chancador primario de mandíbula.



Figura 22. Chancador secundario de cono.

Este proceso consta de dos fases: primero, se utiliza un chancador de mandíbula para reducir el tamaño inicial de las partículas, seguido por un chancador de cono para una reducción adicional. El objetivo de este proceso es obtener un tamaño máximo de partícula que permita su manipulación a escala de laboratorio y al mismo tiempo que, sea representativo del material en

términos de granulometría y mineralogía. La Figura 23 y Figura 24, evidencian el resultado de esta etapa de reducción de tamaño compuesta por un chancado en dos etapas.



Figura 23. Resultado de chancado primario mediante chancador de mandíbula.



Figura 24. Resultado de chancado secundario mediante chancador de cono.

3.3.4. Caracterización granulométrica.

Una vez reducido el tamaño del material, se procede a caracterizar mediante tamizaje. Para ello, se homogeniza la muestra de material mediante cuarteo y corte. Posteriormente se tamiza la muestra total utilizando un agitador de tamices MATEST®, presentado en la Figura 25. Se procesan tandas de aproximadamente 5 kg utilizando los tamices de 200, 100, 50, 30, 10, 4 y 3/8". Este proceso resulta en la curva granulométrica representada en la Figura 26. Este paso fue crucial para que la muestra preparada fuese representativa de los materiales granulares que componen los botaderos de residuos mineros.



Figura 25. Agitador de tamices MATEST®.

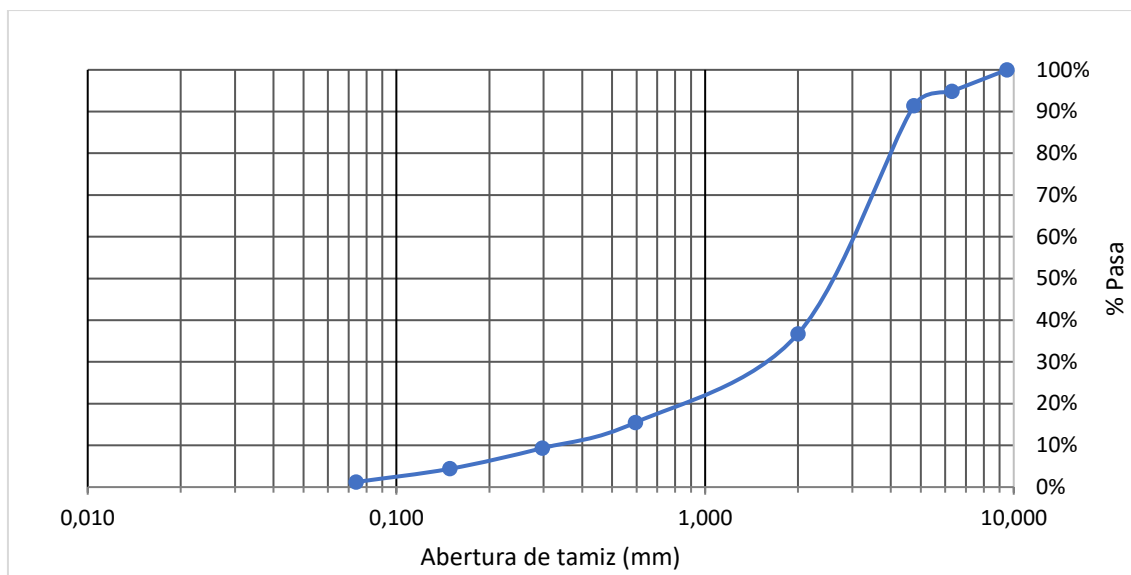


Figura 26. Curva granulométrica del material recolectado y chancado.

Con relación a la muestra de bentonita sódica, se tiene que esta presenta una distribución granulométrica uniforme con tamaño de partícula mayor 2,00 mm y menor que 4,75 mm.

3.3.5. Obtención de muestras para pruebas preliminares.

Se obtiene un total de 5 muestras con diferentes tamaños de partícula y composición, caracterizadas de la siguiente forma:

- Muestra 1: Material de mina con tamaño de partícula menor a 2,0 mm.
- Muestra 2: Material de mina con tamaño de partícula mayor o igual a 2,0 mm.
- Muestra 3: Mezcla de 10 kg de Muestra 2 con bentonita sódica en proporción 90% y 5% respectivamente.
- Muestra 4: Mezcla de 10 kg de Muestra 2 con bentonita sódica en proporción 90% y 10% respectivamente.
- Muestra 5: Muestra construida de manera tal que represente la distribución granulométrica característica de material de residuos mineros.

Para obtener la Muestra 1 y Muestra 2, se procedió a separar el material de mina mediante tamizado en vibrador, utilizando un tamiz con apertura de 2,0 mm. El material retenido en el tamiz (Muestra 1) se almacenó por separado del material que lo atravesó (Muestra 2)

resultando en 40,2 y 69,2 kg respectivamente. Ambas muestras se caracterizaron granulométricamente de acuerdo con la curva descrita en la Figura 27.

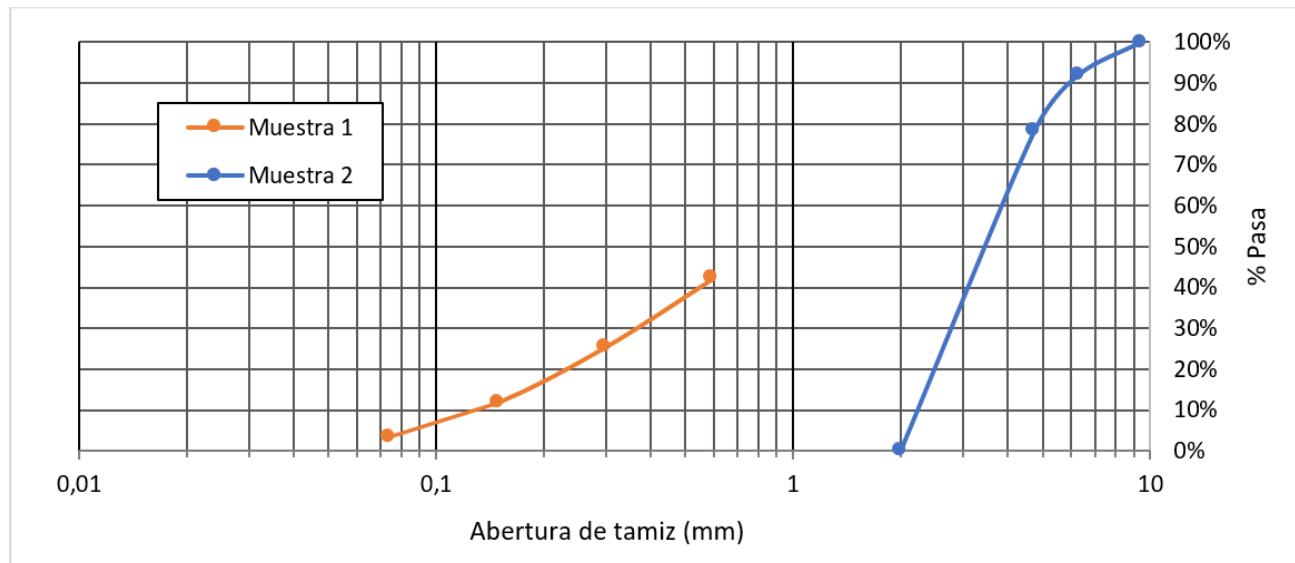


Figura 27. Curvas granulométricas de Muestras 1 y 2.

En cuanto a la obtención de la Muestra 3 y Muestra 4, se pesaron 9,5 kg y 9 kg de Muestra 2, respectivamente, y se les añadió 0,5 kg y 1 kg de bentonita sódica. El proceso de mezcla se realizó mediante agitación y revuelta para otorgar homogeneidad a las muestras compuestas.

Con respecto a la Muestra 5, se inicia con la recolección de información detallada sobre la distribución granulométrica de una muestra representativa de material residual minero procedente de Chile. Este proceso implicó un análisis para comprender la composición y las propiedades del material. Posteriormente, se reprodujo la misma curva granulométrica que caracteriza a la fracción de menor tamaño de la muestra total, utilizando material recolectado durante la investigación, permitiendo así la similitud entre la muestra de laboratorio y la muestra real.

Después de un análisis de la composición y propiedades del material residual minero, se procedió a fraccionar la muestra total recolectada. Se seleccionó el material pasante por la malla 3/8" (9,5 mm), excluyendo el tamaño de la malla #200 (0,075 mm), lo que resultó en 750 kg de un total de 50 toneladas. Esta decisión se justifica por la dificultad práctica de reproducir fielmente la

fracción más fina en condiciones de laboratorio, ya que las partículas de menor tamaño tienden a aglomerarse y exhibir un comportamiento diferente al observado en campo.

Posteriormente, se recalculan los porcentajes de la distribución granulométrica para la fracción seleccionada, obteniendo una muestra de laboratorio de 18,75 kg que posee la misma distribución de tamaños de partícula que los 750 kg reales. De esta manera, se logró construir una muestra representativa a escala reducida, pero con características granulométricas idénticas a la fracción de interés, lo que permite obtener valores precisos de conductividad hidráulica en laboratorio, aplicables y confiables para las condiciones reales del depósito de residuos mineros.

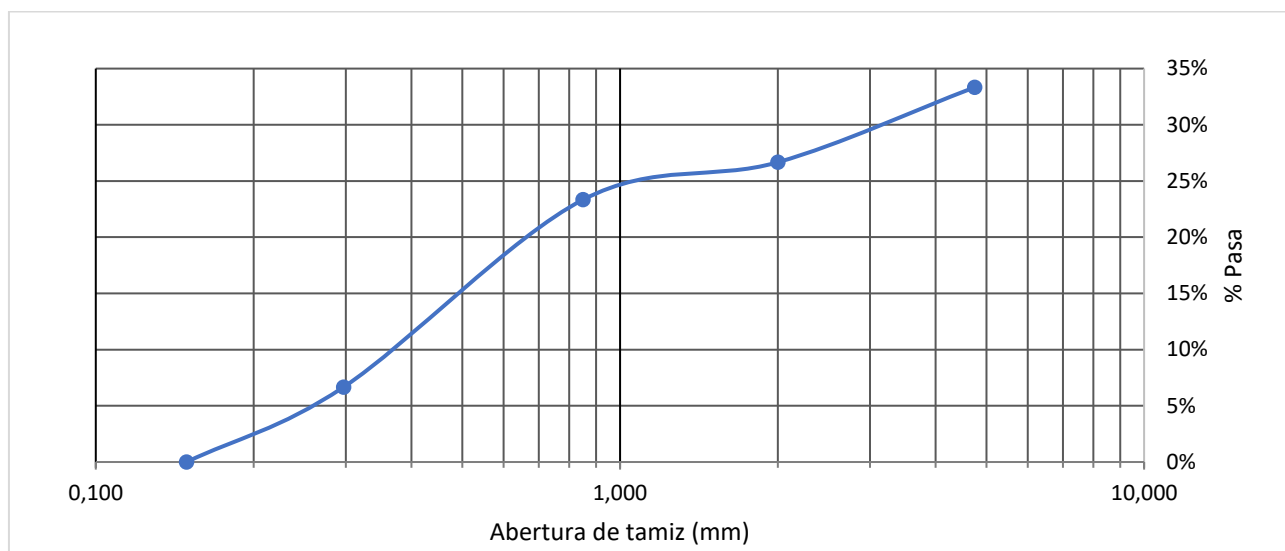


Figura 28. Curva granulométrica representativa del material residual menor a 3/8" y mayor que #200.

Fuente: (Linero et al., 2007).

Esta decisión se justifica por la dificultad práctica de reproducir fielmente la fracción más fina en condiciones de laboratorio, ya que las partículas de menor tamaño tienden a aglomerarse y exhibir un comportamiento diferente al observado en campo. Al enfocarse en la fracción de 4,75 mm hacia abajo, se logra capturar la parte relevante, sin incurrir en problemas asociados al tratamiento y manipulación de los finos.

Finalmente, con el material seleccionado de acuerdo con la Tabla 3, se construye la muestra con distribuye granulométricamente idéntico al material residual de interés de mina. De esta manera, se obtiene un valor de conductividad hidráulica en laboratorio para una muestra con

un peso total menor, pero con una distribución de tamaños de partícula representativa de la fracción de interés.

Tabla 3. Distribución granulométrica de la fracción de interés reducida en tamaño.

Tamiz		Peso Retenido (kg)	% Retenido		% Pasa
No.	mm		Total (%)	Acumulado (%)	
2	4,750	12,5	66,7	66,67	33,33
10	2,000	1,25	6,7	73,33	26,67
20	0,850	0,625	3,3	76,67	23,33
50	0,297	3,125	16,7	93,33	6,67
100	0,149	1,25	6,7	100,00	0,00

3.4. Pruebas preliminares de funcionamiento del permeámetro.

Se realizan pruebas preliminares de funcionamiento del permeámetro, ajustando y calibrando los parámetros necesarios para obtener resultados confiables y reproducibles.

Para esta investigación, la eficiencia de la aplicación de bentonita se evalúa y compara, considerando su capacidad para limitar la disponibilidad de agua y con ello, limitar la generación de drenaje ácido en botaderos. Esta capacidad se determinará mediante la medición de la conductividad hidráulica, en conformidad con la Ley de Darcy.

El procedimiento comienza con el llenado del permeámetro utilizando la muestra del material a ser evaluado (ver Figura 29). Después, se compacta el material con la finalidad de eliminar vacíos y asegura la distribución uniforme de partículas dentro de la muestra para posteriormente saturar el sistema con el fluido que pasará por la columna haciendo uso de la modalidad automatizada de “Saturación”. Finalizada la saturación del sistema, se coloca una gasa como filtro de tela sobre la superficie de la columna de material y luego, se cierra y empaca el permeámetro cuidando sellar todas las juntas.



Figura 29. Proceso de llenado y compactación del material dentro del permeámetro.

El procedimiento de medición de conductividad hidráulica se ajustó en función de la granulometría del material (Norma ASTM D-2487) y criterio de selección según la Tabla 2.

En el caso de la Muestra 1, con tamaño de partícula menor a 2,0 mm, se optó por realizar las mediciones bajo carga variable. Esto se debe a que, para este material más fino, la medición bajo carga constante resultaría inviable debido al excesivo tiempo que tomaría completar cada prueba.

De manera similar, para la Muestra 2, 3, 4 y 5 con tamaño de partícula mayor o igual a 2,0 mm y 0%, 5% y 10% de bentonita respectivamente, además de la muestra de características granulométricas idénticas, se midió la conductividad hidráulica de manera directa bajo carga constante.

De esta manera, se seleccionó el método de ensayo más apropiado para cada tipo de muestra, considerando las diferencias en las características granulométricas y la practicidad de los procedimientos de medición.

A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo de acuerdo con el régimen de ensayo, y la granulometría del material de prueba. En consecuencia, se establecen y programan las siguientes modalidades de funcionamiento.

3.4.1. Modalidad de saturación

A continuación, se describe el proceso de saturación previa al ensayo en el permeámetro, el cual es fundamental para obtener mediciones precisas de la conductividad hidráulica:

En primer lugar, es necesario saturar la muestra mineral. Para ello, se configura el sistema de control en modo "Saturación", el cual automatiza el llenado del reservorio de alimentación hasta alcanzar un nivel constante. Durante este proceso, la transparencia de los componentes permite la observación directa de la infiltración del agua en los espacios intersticiales de la muestra (véase Figura 30). El protocolo requiere la intervención del operador para cerrar manualmente la válvula de la tapa perforada inferior antes de que ocurra el rebose en la sección superior del permeámetro. Esta acción establece las condiciones hidráulicas necesarias para la medición precisa de la conductividad hidráulica en cada ensayo.

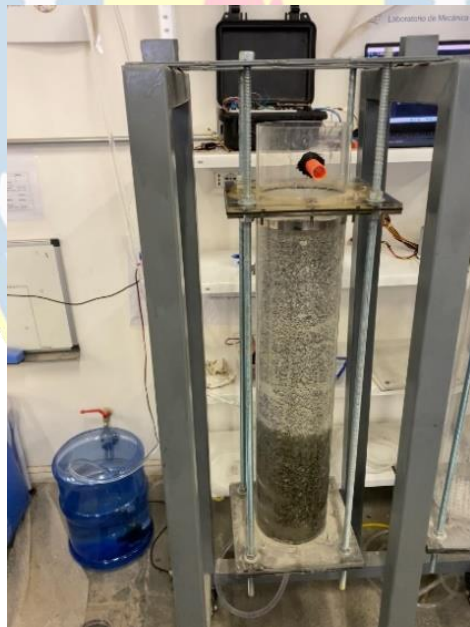


Figura 30. Muestra 5 en proceso de saturación.

La saturación previa es un paso crucial, ya que implica que todos los poros y espacios intersticiales del material se encuentren completamente llenos de agua, eliminando la presencia de aire atrapado que podría afectar las mediciones. Además, permite que el flujo de agua a través del material alcance un estado estable, lo que es fundamental para obtener resultados confiables y representativos de la conductividad hidráulica del material ensayado.

3.4.2. Modalidad con carga constante

En el caso de la medición de conductividad hidráulica bajo flujo inverso con carga constante, el procedimiento es el siguiente:

El agua fluye en sentido contrario a la gravedad, impulsada por una bomba hacia el recipiente superior del permeámetro (véase Figura 17). Se mantiene una carga hidráulica constante mediante el uso del sistema de control automatizado y rebalse en la columna de la tapa perforada superior.

El programa está diseñado para facilitar la medición precisa de la conductividad hidráulica en materiales porosos. En primer lugar, considera un área de sección transversal predefinida para la columna de $162,86 \text{ cm}^2$. A continuación, solicita al usuario ingresar tres parámetros clave: el volumen de agua a medir, la altura constante del nivel de agua y el largo de la columna de material.

Una vez ingresados estos datos, el programa inicia automáticamente el cronómetro y mantiene un nivel de carga constante durante cada prueba. Esta última característica es fundamental, ya que asegura condiciones uniformes y estables durante la medición, minimizando posibles fluctuaciones que podrían afectar la precisión de los resultados.

Al generar y mantener estas condiciones ideales, el programa permite que los datos obtenidos sean confiables y representativos del comportamiento real del flujo de agua a través del material ensayado. De esta manera, se obtienen mediciones precisas de la conductividad hidráulica, una propiedad crucial para comprender y caracterizar adecuadamente el movimiento de fluidos en sistemas porosos como los residuos mineros.

Durante la prueba, se miden el caudal de salida y el tiempo transcurrido para los volúmenes de 300, 600 y 900 cm^3 . Se realizan 3 mediciones por cada ensayo y se promedian los resultados. Se realiza un total de 5 ensayos.

A partir de los datos de caudal y tiempo obtenidos, se calcula la conductividad hidráulica del material bajo las condiciones de flujo inverso y carga constante.

Este enfoque de medición permite caracterizar la conductividad hidráulica de la muestra cuando el flujo se produce en sentido contrario a la gravedad, bajo un régimen de carga constante.

3.4.3. Modalidad con carga variable

El programa solicita al usuario ingresar dos parámetros clave: la diferencia de altura de la columna de agua en la manguera, representada por h_1 y h_2 , y el largo de la columna de material a ensayar. Una vez ingresados estos datos, se procede a activar el cronómetro, el cual cuantificará el tiempo que tarda el agua en recorrer la diferencia de altura previamente especificada.

Posteriormente, tomando en cuenta el área de la sección transversal de la columna de material y la manguera, valores que se encuentran registrados en el programa, se realiza el cálculo de la conductividad hidráulica correspondiente a ese ensayo específico. Finalmente, el resultado obtenido se muestra en la pantalla, proporcionando así el valor de conductividad hidráulica del material ensayado bajo las condiciones establecidas.

Esta metodología automatizada permite obtener mediciones precisas y reproducibles de la conductividad hidráulica, una propiedad fundamental para comprender el comportamiento del flujo de agua a través de materiales porosos como los residuos mineros.

En esta modalidad, el agua es bombeada desde el recipiente superior, pero sin mantener un nivel constante, lo que provoca una carga variable. Se registran los niveles de agua de la manguera inicial y final (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y el tiempo en llegar determinada altura. Realiza cinco mediciones de las cuales tres fueron con altura de la columna de material igual a 68 cm y dos de ellas con 60 cm, luego se promedia los resultados para obtener la conductividad hidráulica en flujo inverso con carga variable.



Figura 31. Cañería con diámetro “a” para régimen variable ubicada a un costado del estante.

Los resultados de cada modalidad de ensayo se registran en el Anexo E, destinada al registro de datos de laboratorio, de la cual se extraen los valores necesarios para calcular la conductividad hidráulica (k) en las condiciones de cada ensayo. Estos valores se determinan utilizando la Ley de Darcy correspondiente a cada modalidad.

Después de realizar los ensayos de conductividad hidráulica para las 5 muestras de material con carga constante y variable, se obtuvieron los resultados detallados en la Tabla 4. En cada modalidad de ensayo, se realizaron mediciones independientes y se calculó el promedio de la conductividad hidráulica utilizando las ecuaciones 1 y 2 correspondientes de la Ley de Darcy en carga constante y variable respectivamente. Los valores promedio obtenidos permiten no solo caracterizar las propiedades hidráulicas de la muestra ensayada bajo distintas condiciones de carga, sino también validar el correcto funcionamiento y diseño del dispositivo. La capacidad de este equipo para realizar mediciones reproducibles y consistentes con la teoría en los diferentes modos de operación demuestra que su concepción y fabricación fueron adecuadas para llevar a cabo una determinación confiable de la conductividad hidráulica de materiales granulares. Esta validación experimental del permeámetro constituye un paso crucial antes de su potencial implementación en aplicaciones prácticas de ingeniería.

Tabla 4. Tabla de resultados.

Ensayo	Medición 1 (m/día)	Medición 2 (m/día)	Medición 3 (m/día)	Medición 4 (m/día)	Medición 5 (m/día)	Conductividad hidráulica promedio (m/día)
Carga Variable (Muestra 1)	4,36	4,97	4,78	5,14	5,33	4,91
Carga Constante (Muestra 2)	329,62	334,89	354,49	376,22	341,92	347,431
Carga Constante (Muestra 3)	213,93	226,68	229,79	208,47	229,73	221,72
Carga Constante (Muestra 4)	197,88	199,55	196,68	209,60	206,29	202,00
Carga Constante (Muestra 5)	226,55	210,39	230,86	234,54	224,20	225,31

La Figura 32 presenta los resultados de la variación de la conductividad hidráulica en función del contenido de bentonita en las muestras analizadas. Se observa una clara tendencia decreciente de la conductividad hidráulica a medida que aumenta el porcentaje de bentonita, desde 347,43 m/d sin bentonita, hasta 202 m/d con un 10% de bentonita, demostrando su efectividad en la reducción de la permeabilidad.

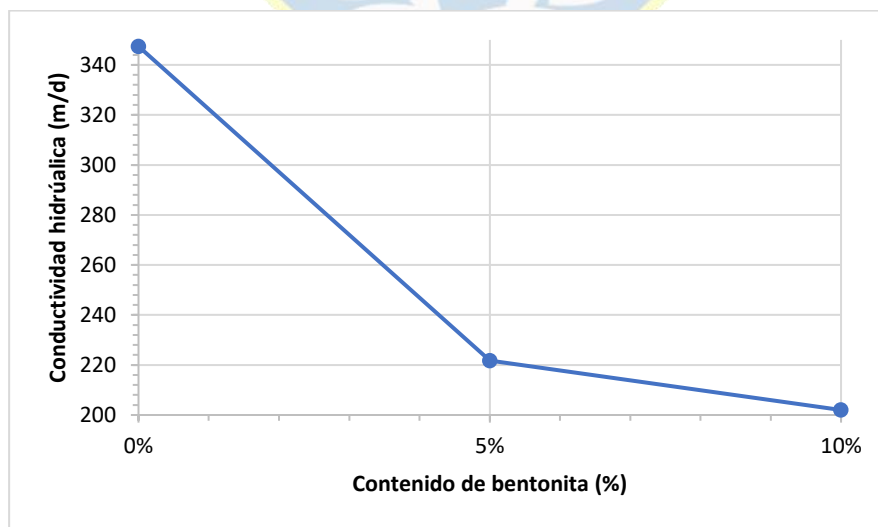


Figura 32. Variación de la conductividad hidráulica según el contenido de bentonita de Muestra 2, 3 y 4.

4. Conclusiones y recomendaciones.

4.1. Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada reveló que las tecnologías de cubierta seca ofrecen una solución efectiva para mitigar el severo impacto ambiental del drenaje ácido en la gran minería de Chile. Considerando la aridez, la mineralogía de los depósitos y aspectos técnicos, estas cubiertas limitan la disponibilidad de agua y oxígeno.

El diseño del permeámetro consideró los requerimientos técnicos y especificaciones necesarias para evaluar conductividad hidráulica. Se optó por un equipo capaz de operar en diversas modalidades de flujo y carga.

La construcción del permeámetro, siguiendo el diseño establecido, permite disponer de un equipo durable para investigaciones futuras. La selección de materiales de calidad se traduce en confiabilidad de los resultados.

Los resultados mostraron que la adición de bentonita reduce la conductividad hidráulica de la muestra de material granular. La muestra sin bentonita presentó una conductividad hidráulica de 347,43 m/día. Al agregar un 5% de bentonita, la conductividad hidráulica se redujo a 221,72 m/día, lo que representa una disminución del 36,1%. Con un 10% de bentonita, la conductividad hidráulica se redujo a 202 m/día, una disminución total del 41,8% respecto a la muestra sin bentonita. Estos resultados indican que la incorporación de bentonita es efectiva para disminuir la conductividad hidráulica de una muestra, siendo más pronunciado el efecto con el aumento de la concentración de bentonita. Por otro lado, la Muestra 5 presenta una conductividad de 225,31 m/día explicada principalmente por la ausencia de la fracción fina menor que la malla #200.

Las pruebas de funcionamiento del permeámetro, bajo distintos escenarios, evidenciaron la capacidad del equipo para proveer datos reproducibles sobre conductividad hidráulica en muestras granulares.

Las técnicas de reducción de tamaño y tamizaje fueron decisivas para lograr una granulometría manejable y característica a fin de evidenciar el efecto de la granulometría en pruebas de conductividad hidráulica.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar mejoras en el sistema de compactación de la muestra en el permeámetro, para lograr una densidad uniforme y controlada.

Es aconsejable monitorear y reforzar constantemente los sellos que componen el dispositivo, para evitar fugas y así disminuir el error en los futuros estudios realizados con el equipo.

Para investigaciones futuras, aprovechando la disponibilidad de la placa programable de Arduino, se sugiere implementar un sistema automatizado de medición y registro de datos sobre pH y conductividad eléctrica, que permita un monitoreo en tiempo real durante los ensayos.

Es aconsejable incluir un mayor número de pruebas, considerando diversos materiales, configuraciones, granulometrías y proporciones de los materiales. Además, se recomienda realizar pruebas con una mayor presencia de finos en la granulometría.

Se propone complementar los estudios en el permeámetro con análisis mineralógicos, que aporten información sobre los procesos geoquímicos desencadenados durante las pruebas, fortaleciendo la comprensión del fenómeno.

Para mejorar la confiabilidad de los resultados, es preciso realizar los ensayos por triplicado, determinando en cada caso la desviación estándar y el coeficiente de variación.

En conclusión, este proyecto permitió diseñar y construir un instrumento versátil, aplicable al estudio de diversos tipos materiales y granulometrías. Los resultados iniciales son alentadores y sientan las bases para continuar profundizando en este ámbito mediante ensayos con el dispositivo.

Las recomendaciones expuestas buscan potenciar estudios futuros en esta línea, apuntando a obtener resultados que se puedan implementar en la realidad minera del país. Los resultados aportarían información valiosa para orientar el diseño e ingeniería de nuevos proyectos.

Referencias.

- Abfertiawan, M. S., Palinggi, Y., Handajani, M., Pranoto, K., & Atmaja, A. (2020). Evaluation of Non-Acid-Forming material layering for the prevention of acid mine drainage of pyrite and jarosite. *Heliyon*, 6(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05590>
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13 SPEC. ISS.), 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Amar, H., Elghali, A., & Benzaazoua, M. (2021). Geochemical behaviour of benign desulphurised waste rocks for mine drainage control and sustainable management. *Journal of Geochemical Exploration*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106767>
- Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Sego, D. C., Smith, L., & Ritchie, A. I. M. (2015). Waste-Rock Hydrogeology and Geochemistry. *Applied Geochemistry*, 140–156.
- Chen, G., Ye, Y., Yao, N., Hu, N., Zhang, J., & Huang, Y. (2021). A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 329). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129666>
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Elghali, A., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Bouzahzah, H. (2019). Determination of the available acid-generating potential of waste rock, part II: Waste management involvement. *Applied Geochemistry*, 100, 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.12.010>
- Ighalo, J. O., Kurniawan, S. B., Iwuozor, K. O., Aniagor, C. O., Ajala, O. J., Oba, S. N., Iwuchukwu, F. U., Ahmadi, S., & Igwegbe, C. A. (2022). A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD). En *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 157, pp. 37–58). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.008>
- International Network for Acid Prevention. (2009). *The Global Acid Rock Drainage Guide*.

- Jiao, Y., Zhang, C., Su, P., Tang, Y., Huang, Z., & Ma, T. (2023). A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. En *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 170, pp. 1240–1260). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>
- Juarez Badillo. (2000). *Mecánica de Suelos* (Vol. 1).
- Kotsiopoulos, A., & Harrison, S. T. L. (2015). *Enhancing ARD Mitigation by Application of Benign Tailings to Reduce the Permeability of Waste Rock Dumps*.
- Kutzner, C. (2018). *Earth and Rockfill Dams*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203758991>
- Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J., & Gelinis, P. (2001). Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage 1: Conceptual model and system characterization. En *Journal of Contaminant Hydrology* (Vol. 52). www.elsevier.com/locate/jconhyd
- Linero, S., Palma, C., & Apablaza, R. (2007). *Geotechnical Characterisation of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial Testing*. Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia.
- Petruk, W. (2000). *Applied mineralogy in mining industry*.
- Proia, R., Croce, P., & Modoni, G. (2016). Experimental Investigation of Compacted Sand-bentonite Mixtures. *Procedia Engineering*, 158, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.404>
- Pusch, R. (2015). *Bentonite Clay*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18543>
- Sakinah, F. (2020). Peningkatan Kualitas Biopolimer (PLA) Nanokomposit Modifikasi Filler Bentonit dan Kitosan Anti-Bakteri. En *Journal of Science and Technology) Jurusan Teknik Kimia Politeknik NegeriLhokseumawe* (Vol. 18, Número 01).

- Sapsford, D. J., & Williams, K. P. (2009). Sizing criteria for a low footprint passive mine water treatment system. *Water Research*, 43(2), 423–432. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.043>
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2022). *Anuario de la Minería de Chile 2022*.
- Sharma, H. D., & Lewis, S. P. (1994). *Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: design and evaluation*.
- Siregar, S., & Irma, W. (2016). *Sintesis dan Perbandingan Struketur, Tekstur Bentonit Alam dan Bentonit Teraktivasi Asam*.
- Skousen, J. G., Ziemkiewicz, P. F., & McDonald, L. M. (2019). Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. En *Extractive Industries and Society* (Vol. 6, Número 1, pp. 241–249). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.09.008>
- Tripathi, K. K., & Viswanadham, B. V. S. (2012). Evaluation of the Permeability Behaviour of Sand-Bentonite Mixtures Through Laboratory Tests. *Indian Geotechnical Journal*, 42(4), 267–277. <https://doi.org/10.1007/s40098-012-0020-8>
- Vaziri, V., Sayadi, A. R., Parbhakar-Fox, A., Mousavi, A., & Monjezi, M. (2022). Improved mine waste dump planning through integration of geochemical and mineralogical data and mixed integer programming: Reducing acid rock generation from mine waste. *Journal of Environmental Management*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114712>
- Yuliana, A., Mohadi, R., Arsyad, F. S., & Safaruddin, S. (2023). Comparison of Bentonite Characteristics Before and After be Used as Coagulan of Liquid Tofu Waste. *International Journal of Social Service and Research*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:258666438>
- Zhang, T., Zhang, C., Du, S., Zhang, Z., Lu, W., Su, P., Jiao, Y., & Zhao, Y. (2023). A review: The formation, prevention, and remediation of acid mine drainage. En *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30220-5>

Anexos.

Anexo A.

Presupuestos del experimento:

Tabla 5. Materiales y servicios comprados para cumplir con el diseño propuesto.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MEDIDA	PRECIO UNITARIO (CLP)	PRECIO TOTAL (CLP)
1	Estante altura regulable	1	u	68,290	68,290
2	O-Ring	4	u	14,300	57,200
3	Trozo acrílico 25x25 cm en 6 mm	12	u	4,471	53,650
4	Válvula de bola 5/8"	8	u	6,500	52,000
5	Niple 5/8" a 3/8"	10	u	3,000	30,000
6	Bomba de agua sumergible DC 12V 800l/h	2	u	14,560	29,120
7	Trabajo en laser	4	u	5,000	20,000
8	Bentonita sódica	20	kg	999.5	19,990
9	Cola de milano inox. hilo 3/8"	2	u	7,945	15,890
10	Hilo cincado 1/2"	8	m	1,874	14,990
11	Empaquetadura de goma 3 mm	1	m ²	1,4500	14,500
12	Manguera transparente 3/8"	15	m	700	10,500
13	Trabajo en torno	4	u	2,500	10,000
14	Acople inox. con hilo en ambos extremos 3/8"	2	u	3,645	7,290
15	Abrazadera inoxidable 150 mm	2	u	2,900	5,800
16	Perno zincado 5/32" cabeza hexagonal	24	u	208	5,000
17	Tapa perforada de acrílico ø144 mm en 6 mm	4	u	1,164	4,657
18	Golilla plana cincada 1/2"	24	u	151	3,620
19	Golilla de presión 1/2"	24	u	137	3,290
20	batería 9V	1	u	2,990	2,990
21	Tuerca cincada 1/2"	24	u	107	2,570
22	Golilla plana cincada 9/16"	48	u	48	2,320
23	Golilla de presión 5/16"	48	u	47	2,180
24	Adhesivo WELD-ON 16 146 ml	1	u	1,660	1,660
25	Cable	10	m	150	1,500
26	Broche batería 9V a DC	2	u	750	1,500
27	Teflón de agua TORO	2	u	300	600
TOTAL					441,107

Anexo B.

Planos del dispositivo de laboratorio:

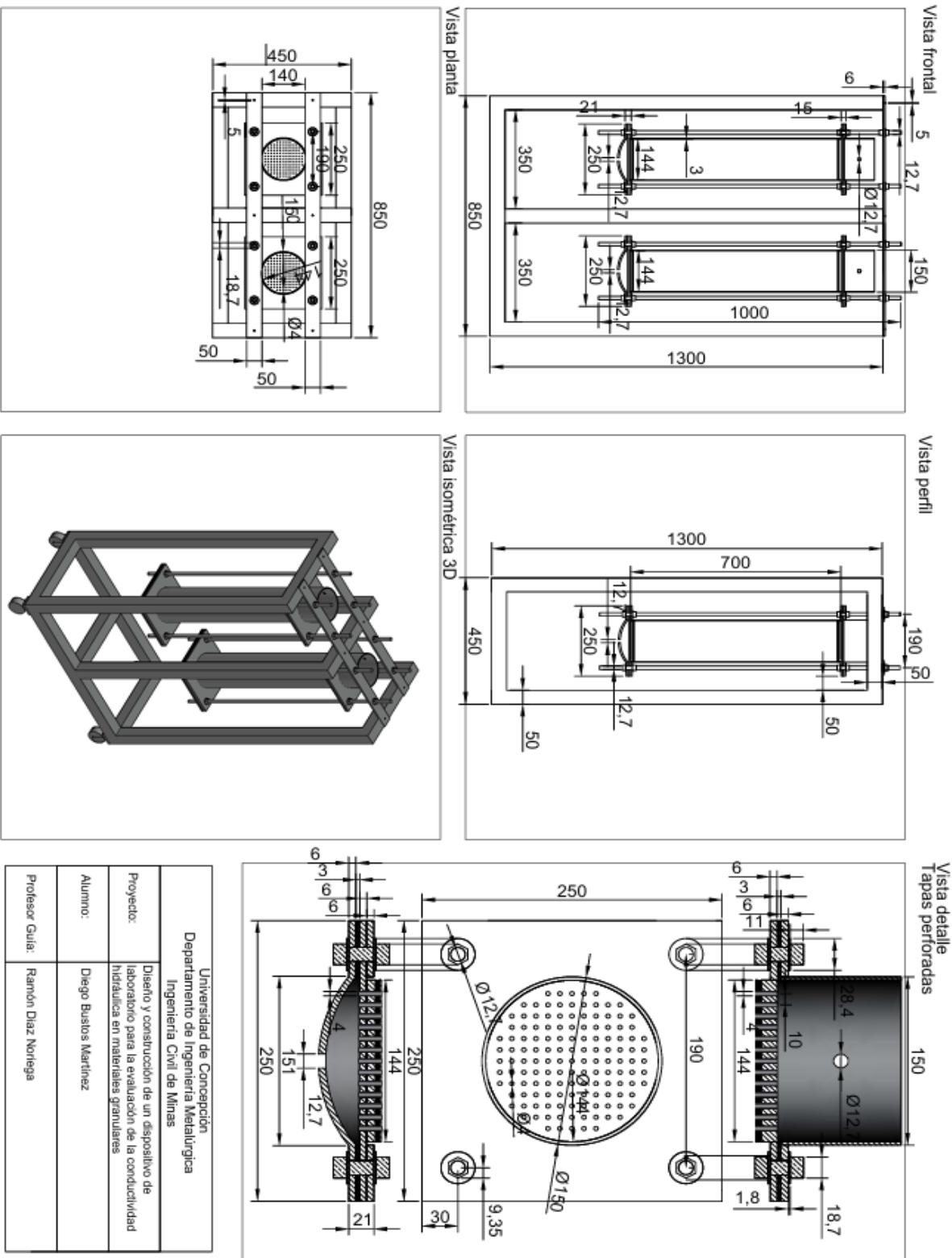


Figura 33. Planos del dispositivo de laboratorio.

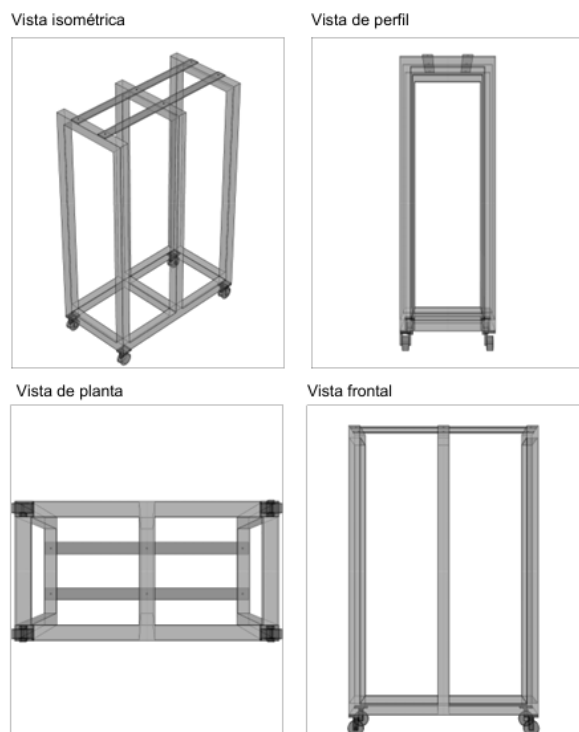


Figura 34. Soporte del dispositivo.

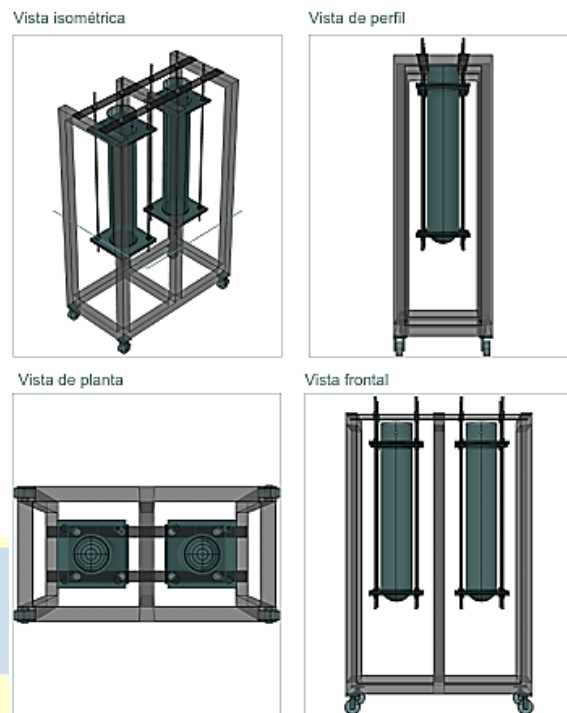


Figura 35. Dispositivo ensamblado.



Figura 36. Tapa perforada inferior.

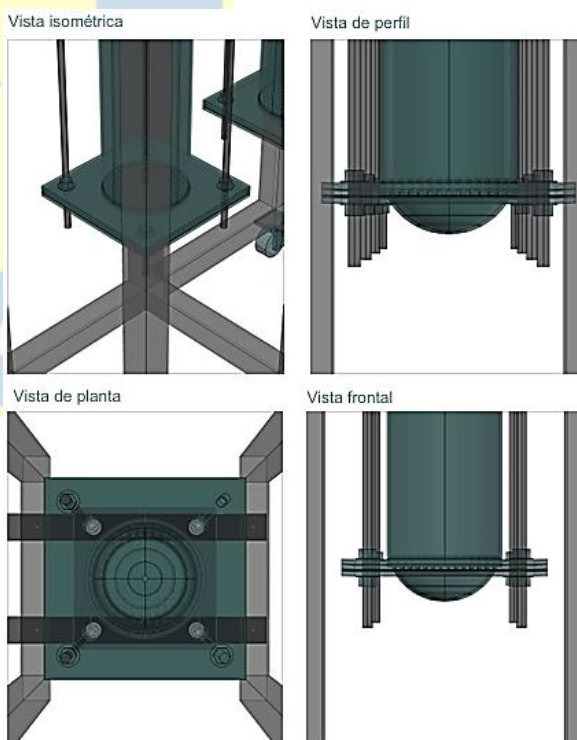


Figura 37. Tapa perforada ensamblada.

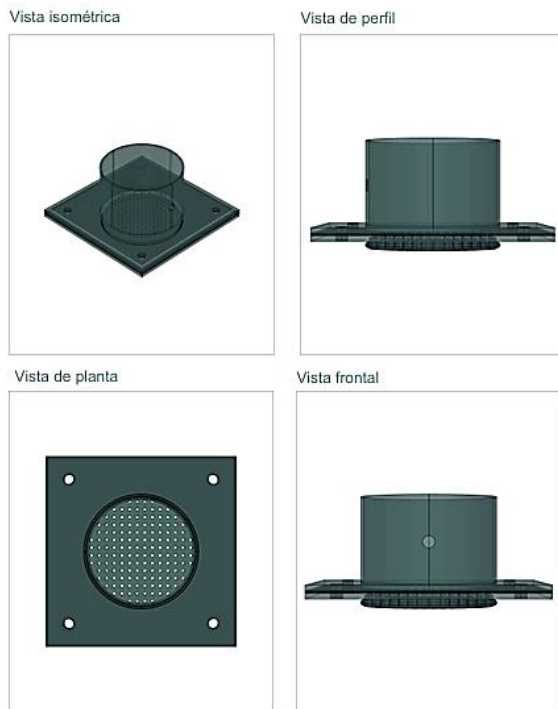


Figura 38. Tapa perforada superior.

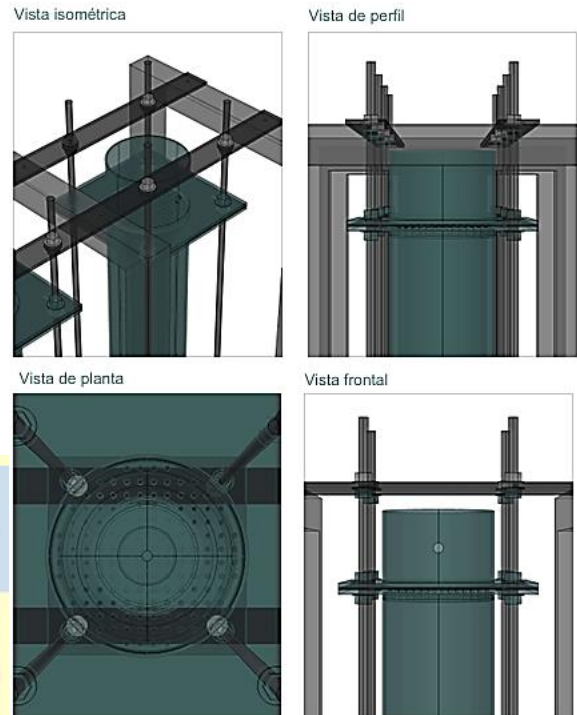


Figura 39. Tapa perforada superior ensamblado.

Anexo C

Código Arduino:

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define BOTON_SUBIR 2
#define BOTON_BAJAR 3
#define BOTON_CONFIRMAR 4
#define BOTON_CANCELAR 5
#define RELE_PIN 7 // Pin al que está conectado el módulo de relé
#define SENSOR_PIN 8

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Dirección I2C de la pantalla LCD y tamaño
int opcionSeleccionada = 0; // Variable para almacenar la opción seleccionada (modo de carga)
unsigned long tiempoInicio = 0; // Variable para almacenar el tiempo de inicio del cronómetro
unsigned long tiempoEnsayo = 0; // Variable para almacenar el tiempo transcurrido del ensayo
unsigned long tiempoActual;
float coefConstante = 0.00;
```

```

float coeVariable = 0.00;
bool cronometroActivo = false; // Estado del cronómetro
bool cronometroActivoVariable = false;
float h1 = 100.00; // Altura inicial para facilitar ingreso
float h2 = 100.00; // Altura final para facilitar ingreso
float A = 162.86; // área transversal de columna principal
float a = 0.79; // área transversal de la tubería para carga variable
float L = 50.00;
float V = 0.00;
float cargacte = 100.00; // Definimos altura predeterminada para agilizar ingreso de dato

```

```

void setup() {
  pinMode(BOTON_SUBIR, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BOTON_BAJAR, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BOTON_CONFIRMAR, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BOTON_CANCELAR, INPUT_PULLUP);
  pinMode(RELE_PIN, OUTPUT); // Configurar el pin del relé como salida
  pinMode(SENSOR_PIN, INPUT);

  digitalWrite(RELE_PIN, LOW);
  lcd.init(); // Inicializar la pantalla LCD
  lcd.backlight(); // Encender el backlight de la pantalla LCD
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Bienvenido/a");
  delay(3000);
  lcd.clear();
  lcd.print("Seleccione modo:");
}

void loop() {
  int estadoSubir = digitalRead(BOTON_SUBIR);
  int estadoBajar = digitalRead(BOTON_BAJAR);
  int estadoConfirmar = digitalRead(BOTON_CONFIRMAR);
  int estadoCancelar = digitalRead(BOTON_CANCELAR);

  // Selección de modalidad
  if (estadoSubir == LOW && opcionSeleccionada < 2) {
    opcionSeleccionada++; // Incrementar la opción seleccionada
    lcd.clear();
    lcd.print("Seleccione modo:");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
  }
  if (estadoBajar == LOW && opcionSeleccionada > 0) {
    opcionSeleccionada--; // Decrementar la opción seleccionada
  }
}

```

```

lcd.clear();
lcd.print("Seleccione modo:");
delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
}

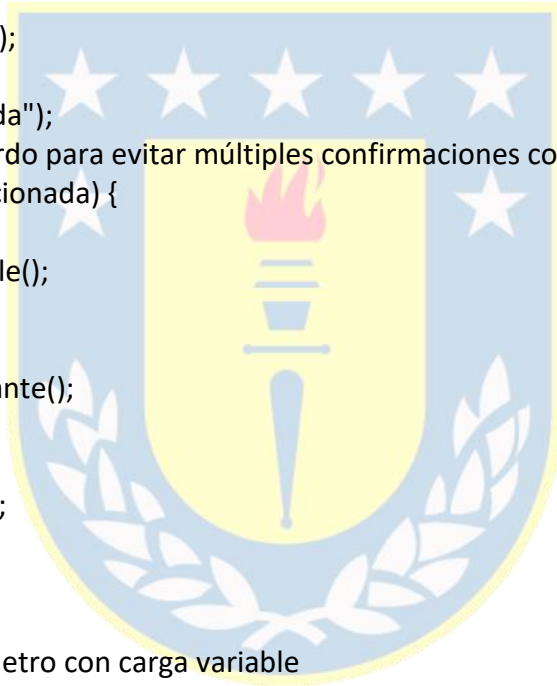
// Mostrar las opciones en la pantalla LCD
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(opcionSeleccionada == 0 ? "Carga variable" : (opcionSeleccionada == 1 ? "Carga
constante" : "Saturacion"));

// Confirmar la selección del modo
if (estadoConfirmar == LOW) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("Seleccion");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" Confirmada");
  delay(1000); // Retardo para evitar múltiples confirmaciones con un solo botón
  switch (opcionSeleccionada) {
    case 0:
      iniciarCargaVariable();
      break;
    case 1:
      iniciarCargaConstante();
      break;
    default:
      iniciarSaturacion();
      break;
  }
}

// Configurar cronometro con carga variable
if (cronometroActivoVariable){
  unsigned long tiempoActual = millis();
  // Actualizar cronómetro y mostrar el tiempo transcurrido en pantalla
  unsigned long tiempoTranscurrido = millis() - tiempoInicio;
  unsigned long segundos = tiempoTranscurrido / 1000;
  unsigned long minutos = segundos / 60;
  segundos = segundos % 60;

  // Mostrar el tiempo transcurrido en la pantalla LCD
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Tiempo:");
  lcd.print(minutos);
  lcd.print(":");

```



```

if (segundos < 10) {
    lcd.print("0");
}
lcd.print(segundos);

delay(100); // Pequeña pausa para evitar actualizaciones muy rápidas

// Actualizar el tiempo transcurrido del ensayo
tiempoEnsayo = tiempoTranscurrido;
}

// Configuración cronómetro activo
if (cronometroActivo) {
    unsigned long tiempoActual = millis();
    int suma = 0; // Variable para sumar las lecturas
    int contador = 0; // Contador de lecturas

    // Leer el sensor durante
    while ((millis() - tiempoActual) < 100) {
        suma += digitalRead(SENSOR_PIN); // Sumar la lectura actual
        contador++; // Incrementar el contador
        delay(1); // Pequeña pausa para evitar lecturas muy rápidas
    }

    // Calcular el promedio
    float promedio = suma / float(contador);

    // Activar o desactivar el relé según el promedio
    if (promedio > 0) {
        digitalWrite(RELE_PIN, HIGH); // Encender el relé (activar la bomba)
    } else {
        digitalWrite(RELE_PIN, LOW); // Apagar el relé (desactivar la bomba)
    }

    // Actualizar cronómetro y mostrar el tiempo transcurrido en pantalla
    unsigned long tiempoTranscurrido = millis() - tiempoInicio;
    unsigned long segundos = tiempoTranscurrido / 1000;
    unsigned long minutos = segundos / 60;
    segundos = segundos % 60;

    // Mostrar el tiempo transcurrido en la pantalla LCD
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tiempo:");
    lcd.print(minutos);

```

```

lcd.print(":");
if (segundos < 10) {
    lcd.print("0");
}
lcd.print(segundos);

delay(100); // Pequeña pausa para evitar actualizaciones muy rápidas

// Actualizar el tiempo transcurrido del ensayo
tiempoEnsayo = tiempoTranscurrido;
}

// Cancelar la selección del modo
if (estadoCancelar == LOW) {
    lcd.clear();
    digitalWrite(RELE_PIN, LOW); // Apagar la bomba
    lcd.print("Cancelar");
    delay(1500);
    lcd.clear();
    if (cronometroActivo == false);
        detenerCronometro(); // Detener el cronómetro si está activo
    opcionSeleccionada = 0; // Reiniciar la selección

    lcd.print("Seleccione modo: ");
    delay(100); // Retardo para evitar múltiples cancelaciones con un solo botón
}
}

void iniciarCronometro() {
    tiempoInicio = millis();
    cronometroActivo = true;
}

void iniciarCronometroVariable(){
    tiempoInicio = millis();
    cronometroActivoVariable = true;
}

void detenerCronometro() {
    cronometroActivo = false;
    cronometroActivoVariable = false;

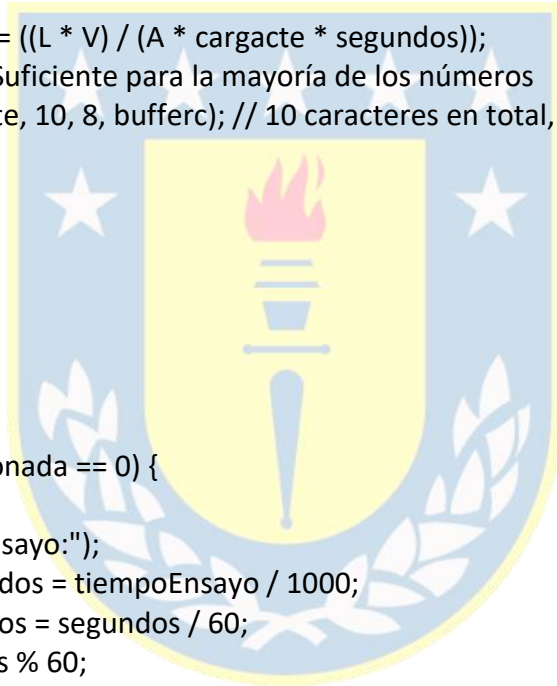
// Calcular conductividad hidráulica
if (opcionSeleccionada == 1) {
    lcd.clear();
    lcd.print("Tiempo ensayo:");
    unsigned long segundos = tiempoEnsayo / 1000;

```

```

unsigned long minutos = segundos / 60;
segundos = segundos % 60;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Tiempo: ");
lcd.print(minutos);
lcd.print(":");
if (segundos < 10) {
  lcd.print("0");
}
// Mostrar el tiempo transcurrido
lcd.print(segundos);
delay(5000);
// Calcular y mostrar conductividad hidráulica
lcd.clear();
float coefConstante = ((L * V) / (A * cargacte * segundos));
char bufferc[10]; // Suficiente para la mayoría de los números
dtostrf(coefConstante, 10, 8, bufferc); // 10 caracteres en total, 8 decimales
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("k: ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(bufferc);
lcd.print("(cm/s)");
delay(5000);
lcd.clear();
}
else if (opcionSeleccionada == 0) {
  lcd.clear();
  lcd.print("Tiempo ensayo:");
  unsigned long segundos = tiempoEnsayo / 1000;
  unsigned long minutos = segundos / 60;
  segundos = segundos % 60;
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Tiempo: ");
  lcd.print(minutos);
  lcd.print(":");
  if (segundos < 10) {
    lcd.print("0");
  }
  // Mostrar el tiempo transcurrido
  lcd.print(segundos);
  delay(5000);
  // Calcular y mostrar conductividad hidráulica
  lcd.clear();
  float coefVariable = ( a * L ) / ( A * segundos ) * log(h1 / h2);

```



```

char bufferv[10]; // Suficiente para la mayoría de los números
dtostrf(coefVariable, 10, 8, bufferv); // 10 caracteres en total, 8 decimales
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("k: ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(bufferv);
lcd.print("(cm/s)");
delay(5000);
lcd.clear();
}
else {
    // Mostrar tiempo
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Tiempo de sat.:");
    unsigned long segundos = tiempoEnsayo / 1000;
    unsigned long minutos = segundos / 60;
    unsigned long horas = minutos / 60;
    segundos = segundos % 60;
    minutos = minutos % 60;
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Tiempo: ");
    lcd.print(horas);
    lcd.print(":");
    if (minutos < 10) {
        lcd.print("0");
    }
    lcd.print(minutos);
    lcd.print(":");
    if (segundos < 10) {
        lcd.print("0");
    }
    // Mostrar leyenda de estado
    lcd.print(segundos);
    delay(5000);
    lcd.clear();
    lcd.print("Sist. Saturado");
    delay(5000);
    lcd.clear();
}
}

void iniciarCargaVariable() {
    lcd.clear();

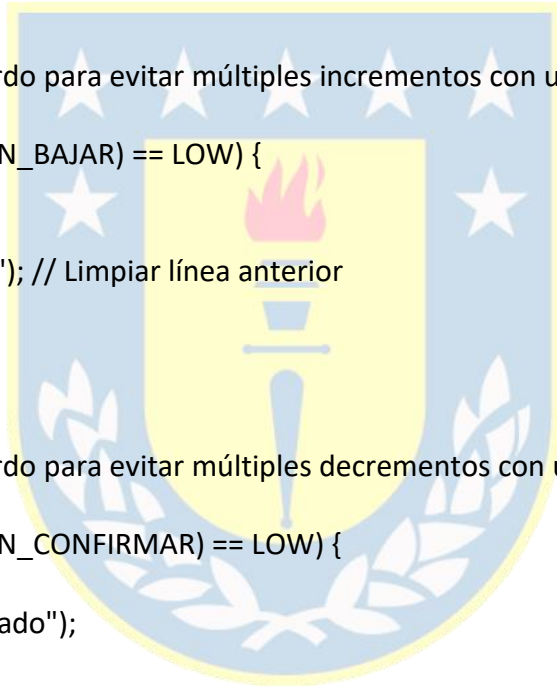
```



```

lcd.print("Modo");
lcd.setCursor(1, 0);
lcd.print(" Carga Variable");
lcd.clear();
// Solicitar al usuario la altura inicial
lcd.print("Ingrese h1 (cm):");
while (true) {
  if (digitalRead(BOTON_SUBIR) == LOW) {
    h1 += 1.0;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("h1:");
    lcd.print(h1);
    lcd.print("(cm)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
  }
  if (digitalRead(BOTON_BAJAR) == LOW) {
    h1 -= 1.0;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("h1:");
    lcd.print(h1);
    lcd.print("(cm)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
  }
  if (digitalRead(BOTON_CONFIRMAR) == LOW) {
    lcd.clear();
    lcd.print("h1 ingresado");
    delay(1000);
    break;
  }
}
// Solicitar al usuario la altura final
lcd.clear();
lcd.print("Ingrese h2 (cm):");
while (true) {
  if (digitalRead(BOTON_SUBIR) == LOW) {
    h2 += 1.0;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("h2:");

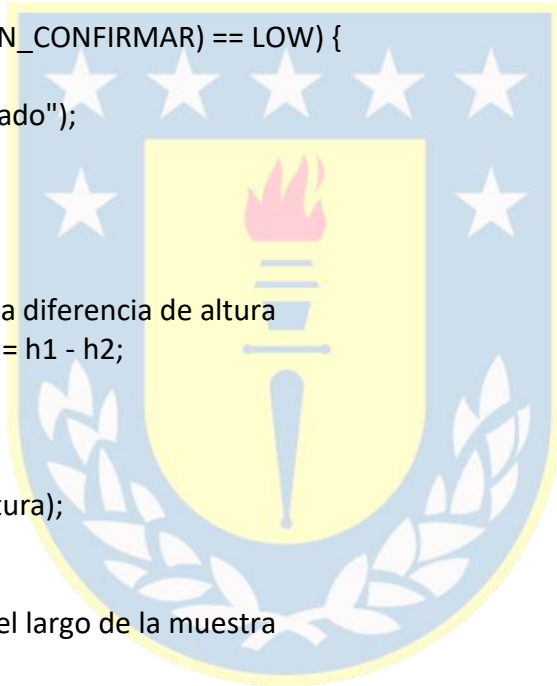
```



```

    lcd.print(h2);
    lcd.print("(cm)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
}
if (digitalRead(BOTON_BAJAR) == LOW) {
    h2 -= 1.0;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("h2:");
    lcd.print(h2);
    lcd.print("(cm)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
}
if (digitalRead(BOTON_CONFIRMAR) == LOW) {
    lcd.clear();
    lcd.print("h2 ingresado");
    delay(1000);
    break;
}
}
// Calcular y mostrar la diferencia de altura
float diferenciaAltura = h1 - h2;
lcd.clear();
lcd.print("h1-h2:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(diferenciaAltura);
lcd.print("(cm)");
delay(2000);
// Solicitar al usuario el largo de la muestra
lcd.clear();
lcd.print("Largo columna: ");
while (true) {
    if (digitalRead(BOTON_SUBIR) == LOW) {
        L += 1.0;
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("L:");
        lcd.print(L);
        lcd.print("(cm)");
        delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
    }
    if (digitalRead(BOTON_BAJAR) == LOW) {

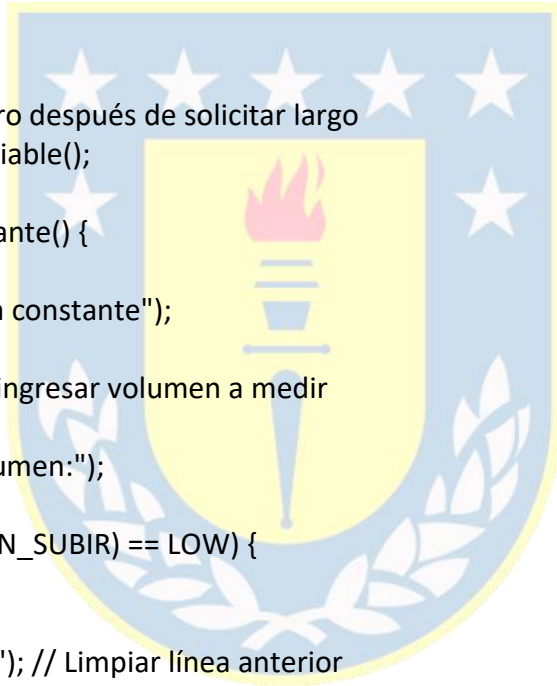
```



```

L -= 1.0;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("L:");
lcd.print(L);
lcd.print("(cm)");
delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
}
if (digitalRead(BOTON_CONFIRMAR) == LOW) {
  lcd.clear();
  lcd.print("L ingresado");
  delay(1000);
  break;
}
}
// Iniciar el cronómetro después de solicitar largo
iniciarCronometroVariable();
}
void iniciarCargaConstante() {
  lcd.clear();
  lcd.print("Modo carga constante");
  lcd.clear();
  // Solicitar al usuario ingresar volumen a medir
  lcd.clear();
  lcd.print("Ingrese volumen:");
  while (true) {
    if (digitalRead(BOTON_SUBIR) == LOW) {
      V += 100.0;
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("V:");
      lcd.print(V);
      lcd.print("(cm3)");
      delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
    }
    if (digitalRead(BOTON_BAJAR) == LOW) {
      V -= 100.0;
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(" "); // Limpiar línea anterior
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("V:");
      lcd.print(V);
    }
  }
}

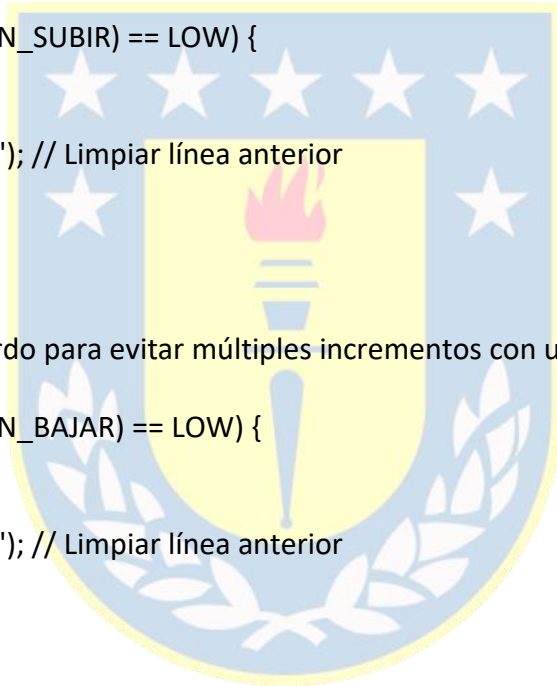
```



```

    lcd.print("(cm3)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
}
if (digitalRead(BOTON_CONFIRMAR) == LOW) {
    lcd.clear();
    lcd.print("Vol. ingresado");
    delay(1000);
    break;
}
}
// Solicitar al usuario ingresar carga constante
lcd.clear();
lcd.print("Altura constante: ");
while (true) {
    if (digitalRead(BOTON_SUBIR) == LOW) {
        cargacte += 1.0;
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("      "); // Limpiar línea anterior
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("h:");
        lcd.print(cargacte);
        lcd.print("(cm)");
        delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
    }
    if (digitalRead(BOTON_BAJAR) == LOW) {
        cargacte -= 1.0;
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("      "); // Limpiar línea anterior
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("h:");
        lcd.print(cargacte);
        lcd.print("(cm)");
        delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
    }
    if (digitalRead(BOTON_CONFIRMAR) == LOW) {
        lcd.clear();
        lcd.print("h cte ingresado");
        delay(1000);
        break;
    }
}
// Solicitar al usuario ingresar largo de muestra
lcd.clear();
lcd.print("Largo columna: ");

```

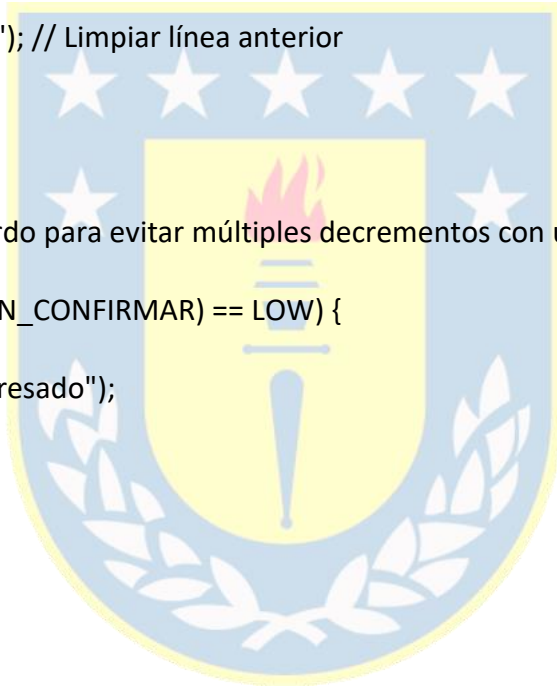


```

while (true) {
  if (digitalRead(BOTON_SUBIR) == LOW) {
    L += 1.0;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("      "); // Limpiar línea anterior
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("L:");
    lcd.print(L);
    lcd.print("(cm)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples incrementos con un solo botón
  }
  if (digitalRead(BOTON_BAJAR) == LOW) {
    cargacte -= 1.0;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("      "); // Limpiar línea anterior
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("L:");
    lcd.print(L);
    lcd.print("(cm)");
    delay(200); // Retardo para evitar múltiples decrementos con un solo botón
  }
  if (digitalRead(BOTON_CONFIRMAR) == LOW) {
    lcd.clear();
    lcd.print("Largo ingresado");
    delay(1000);
    break;
  }
}
lcd.clear();
iniciarCronometro();
}

void iniciarSaturacion() {
  lcd.clear();
  lcd.print("Saturando");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Sistema");
  iniciarCronometro();
}

```



Anexo D

Especificaciones técnicas de los materiales utilizados:

Tabla 6. Especificaciones técnicas de la bomba de agua.

Parámetro	Descripción
Tipo de bomba:	Periférica
Dimensiones:	50x75x45 mm
Voltaje:	12 V
Potencia:	19 watts
Altura máxima:	5 m
Caudal máximo:	0.22 L/s
Diámetro de salida:	14 mm
Diámetro de entrada:	13 mm
Peso:	0.24 kg
Material principal:	ABS

Tabla 7. Especificaciones técnicas Arduino R3 SMD.

Nombre	Arduino UNO 3R SMD
Conector USB	USB-B
Pines LED incorporados	13
Pines digitales I/O	14
Pines análogos de entrada	6
Pines PWM	6
Comunicación	UART/I2C/SPI
Voltaje I/O	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Procesador principal	ATmega328P 16 MHz
Memoria	2KB SRAM, 32KB FLASH, 1 KB EEPROM
Peso	25 g
Ancho	53.4 mm
Largo	68.6 mm

Tabla 8. Especificaciones técnicas material de acrílico.

Nombre	Polímero de metilmetacrilato
Espesor	3 mm
Diámetro exterior	15 cm
Gravedad específica	1.19
Resistencia al impacto	2.4 kg*cm/cm ²
Elongación a la ruptura	4%
Fuerza de flexión	1100 kg/cm ²
Fuerza de compresión	1150 kg/cm ²
Elasticidad	3 x 10 ⁴ kg/cm ²

Tracción	3 x 104 kg/cm ²
Resistencia UV	Ambas caras
Transmisión de luz	92.5%
Índice de refracción	1.49
Temperatura de distorsión	98 – 102 °C

Tabla 9. Especificaciones técnicas saco de bentonita sódica.

Nombre	Bentonita sódica
Peso	20 kg
Distribución granulométrica	Uniforme
Tamaño de partícula	>2.00 mm y < 4.75 mm
pH	8.5 – 10.5
Densidad aparente	0.9 – 1.1 g/cm ³
Contenido de humedad	<10%

Tabla 10. Especificaciones técnicas sensor de nivel de agua.

Nombre	Sensor flotador de nivel de agua
Potencia máxima	50 watts
Corriente máxima	100 V
Temperatura de funcionamiento:	-10°C a +60°C
Tamaño	70x24 m. Rosca M10
Longitud del cable	40 cm

Anexo E

Registro de datos obtenidos en cada modalidad de prueba de permeabilidad.

Tabla 11. Registro de datos de laboratorio para Muestra 1.

DATOS	L (cm)	t (s)	h1 (cm)	h2 (cm)	a (cm²)	A (cm²)	k (cm/s)
CV #1	68	45	20	10	0,79	162,86	5,05,E-03
CV #2	68	39,5	20	10	0,79	162,86	5,75,E-03
CV #3	68	41	20	10	0,79	162,86	5,54,E-03
CV #4	60	33,7	20	10	0,79	162,86	5,94,E-03
CV #5	60	32,5	20	10	0,79	162,86	6,16,E-03

Tabla 12. Registro de datos de laboratorio para Muestra 2.

DATOS	A (cm2)	L (cm)	h (cm)	V (cm3)	t (s)	k (cm/s)	k promedio (cm/s)
CC #1	162,86	61,0	78,0	300	3,880	0,371	0,382
	162,86	61,0	78,0	600	7,540	0,382	
	162,86	61,0	78,0	900	11,050	0,391	
CC #2	162,86	61,0	78,0	300	3,900	0,369	0,388
	162,86	61,0	78,0	600	7,340	0,393	
	162,86	61,0	78,0	900	10,780	0,401	
CC #3	162,86	61,0	78,0	300	3,590	0,401	0,410
	162,86	61,0	78,0	600	6,880	0,419	
	162,86	61,0	78,0	900	10,520	0,411	
CC #4	162,86	61,0	78,0	300	3,230	0,446	0,435
	162,86	61,0	78,0	600	6,360	0,453	
	162,86	61,0	78,0	900	10,610	0,407	
CC #5	162,86	61,0	78,0	300	3,540	0,407	0,396
	162,86	61,0	78,0	600	7,580	0,380	
	162,86	61,0	78,0	900	10,800	0,400	

Tabla 13. Registro de datos de laboratorio para Muestra 3.

DATOS	A (cm2)	L (cm)	h (cm)	V (cm3)	t (s)	k (cm/s)	k promedio (cm/s)
CC #1	162,86	44,0	86,0	300	3,860	0,244	0,248
	162,86	44,0	86,0	600	7,450	0,253	
	162,86	44,0	86,0	900	11,510	0,246	
CC #2	162,86	44,0	86,0	300	3,750	0,251	0,262
	162,86	44,0	86,0	600	6,880	0,274	
	162,86	44,0	86,0	900	10,800	0,262	
CC #3	162,86	44,0	86,0	300	3,600	0,262	0,266
	162,86	44,0	86,0	600	6,940	0,272	
	162,86	44,0	86,0	900	10,690	0,264	
CC #4	162,86	44,0	86,0	300	3,930	0,240	0,241
	162,86	44,0	86,0	600	7,750	0,243	
	162,86	44,0	86,0	900	11,740	0,241	
CC #5	162,86	44,0	86,0	300	3,710	0,254	0,266
	162,86	44,0	86,0	600	7,010	0,269	
	162,86	44,0	86,0	900	10,290	0,275	

Tabla 14. Registro de datos de laboratorio para Muestra 4.

DATOS	A (cm2)	L (cm)	h (cm)	V (cm3)	t (s)	k (cm/s)	k promedio (cm/s)
CC #1	162,86	46,6	86,0	300	4,500	0,222	0,229
	162,86	46,6	86,0	600	8,800	0,227	
	162,86	46,6	86,0	900	12,560	0,238	
CC #2	162,86	46,6	86,0	300	4,390	0,227	0,231
	162,86	46,6	86,0	600	8,850	0,226	
	162,86	46,6	86,0	900	12,480	0,240	
CC #3	162,86	46,6	86,0	300	4,570	0,218	0,228
	162,86	46,6	86,0	600	8,700	0,229	
	162,86	46,6	86,0	900	12,740	0,235	
CC #4	162,86	46,6	86,0	300	4,310	0,232	0,243
	162,86	46,6	86,0	600	8,020	0,249	
	162,86	46,6	86,0	900	12,110	0,247	

Tabla 15. Registro de datos de laboratorio para Muestra 5.

DATOS	A (cm2)	L (cm)	h (cm)	V (cm3)	t (s)	k (cm/s)	k promedio (cm/s)
CC #1	162,86	63,0	76,0	300	6,000	0,254	0,262
	162,86	63,0	76,0	600	11,000	0,278	
	162,86	63,0	76,0	900	18,000	0,254	
CC #2	162,86	63,0	76,0	300	6,000	0,254	0,244
	162,86	63,0	76,0	600	13,000	0,235	
	162,86	63,0	76,0	900	19,000	0,241	
CC #3	162,86	63,0	76,0	300	6,000	0,254	0,267
	162,86	63,0	76,0	600	11,000	0,278	
	162,86	63,0	76,0	900	17,000	0,269	
CC #4	162,86	63,0	76,0	300	5,000	0,305	0,271
	162,86	63,0	76,0	600	12,000	0,254	
	162,86	63,0	76,0	900	18,000	0,254	
CC #5	162,86	63,0	76,0	300	6,000	0,254	0,259
	162,86	63,0	76,0	600	12,000	0,254	
	162,86	63,0	76,0	900	17,000	0,269	

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA

RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
Carrera : Ingeniería Civil de Minas.
Nombre del memorista : Diego Exequiel Bustos Martinez.
Título de la memoria : Diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para la evaluación de la conductividad hidráulica en materiales granulares.
Fecha de la presentación oral : 21 de agosto de 2024

Profesor(es) Guía : Dr. Ramón Díaz Noriega.
Profesor(es) Revisor(es) : Dr. Roberto Gómez Espina
Dra. Asieh Hekmat

Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

Este informe presenta el diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para evaluar la conductividad hidráulica en materiales granulares, con el objetivo de controlar el drenaje ácido (DA) en botaderos de residuos mineros en Chile. Los botaderos son estructuras que contienen grandes volúmenes de materiales granulares, como los residuos sulfurados, que, al interactuar con agua, oxígeno y bacterias, generan contaminantes nocivos para el medio ambiente.

El estudio se centra en la evaluación de la conductividad hidráulica de estos materiales, un factor crucial en la generación y propagación del DA. Para ello, se diseña un permeámetro de laboratorio y se realizan pruebas con cinco muestras que combinan residuos sulfurados y bentonita, un material granular que actúa como sello. Los resultados obtenidos demuestran que el permeámetro es capaz de medir con precisión la conductividad hidráulica de materiales granulares y que la adición de bentonita reduce significativamente esta conductividad en los materiales presentes en los botaderos, lo que afirma su potencial como solución efectiva para controlar el DA en la industria minera.

Este trabajo establece una base para futuras investigaciones y aplicaciones en la gestión de residuos mineros, afirmando el uso de bentonita como un material clave en la composición de tecnologías de control y mitigación de DA.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para la evaluación de la conductividad hidráulica en materiales granulares.			
NOMBRE MEMORISTA: DIEGO BUSTOS MARTÍNEZ			
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)	
Concepto	MUY BUENO	 Prof. Ramón Díaz Noriega Patrocinante  Prof. Roberto Gómez Espina Patrocinante	
Calificación	6.2		
Fecha	14.08.2024		
 Prof. Ramon Díaz N.		Ingeniero Supervisor:	
		Institución:	
Comisión (Nombre y Firma)			
 Profª. Asieh Hekmat			
Resumen			
Este informe presenta el diseño y construcción de un dispositivo de laboratorio para evaluar la conductividad hidráulica en materiales granulares, con el objetivo de controlar el drenaje ácido (DA) en botaderos de residuos mineros en Chile. Los botaderos son estructuras que contienen grandes volúmenes de materiales granulares, como los residuos sulfurados, que, al interactuar con agua, oxígeno y bacterias, generan contaminantes nocivos para el medio ambiente. El estudio se centra en la evaluación de la conductividad hidráulica de estos materiales, un factor crucial en la generación y propagación del DA. Para ello, se diseña un permeámetro de laboratorio y se realizan pruebas con cinco muestras que combinan residuos sulfurados y bentonita, un material granular que actúa como sello. Los resultados obtenidos demuestran que el permeámetro es capaz de medir con precisión la conductividad hidráulica de materiales granulares y que la adición de bentonita reduce significativamente esta conductividad en los materiales presentes en los botaderos, lo que afirma su potencial como solución efectiva para controlar el DA en la industria minera. Este trabajo establece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en la gestión de residuos mineros, afirmando el uso de bentonita como un material clave en la composición de tecnologías de control y mitigación de DA.			