

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Desarrollo de sistema de extracción de material granular y modelamiento de flujo gravitacional

Glenn Antonio González Alvial

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Samuel Vergara R.

Profesores comisión:
Dra. Silvia Restrepo.
Dr. René Gómez .

Concepción, Mayo de 2024

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Samuel Vergara R.

Glenn Antonio González Alvial

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Mayo 2024

Resumen

La finalidad del proyecto fue el reemplazo de la forma manual de la extracción de materiales a escala de laboratorio en modelos experimentales de minería subterránea, reemplazando esto último por un dispositivo que trabaje de manera automatizada, evitando problemas en el error humano durante la realización de los experimentos de flujo gravitacional. A su vez se buscó mejorar la forma de extracción de datos a través de un sistema de captura de imágenes que trabaje de forma automatizada e independiente.

Se diseñó un sistema de extracción de material granular, que simula el balde de un equipo de carguío subterráneo, basándose en dispositivos de bajo costo para realizar experimentos de flujo gravitacional, para posterior analizar las principales variables que influyen en la migración de material fino. A través de un software se realizó un diseño 3D con todos los dispositivos electrónicos, esto pensado en que el dispositivo es el encargado de realizar extracciones en un punto de operación de un contenedor, este último será la representación a escala de lo que sucede dentro de una operación subterránea. Posteriormente se desarrolló el sistema de extracción de material granular físicamente, su construcción y el montaje de los dispositivos electrónicos a utilizar. Se realizaron las pruebas correspondientes para determinar el correcto funcionamiento del sistema (puesta en marcha) para que posteriormente sea capaz de efectuar la extracción autónoma de material.

Adicionalmente, para la obtención de los datos experimentales y modelación de las variables de interés se implementó un sistema automatizado de captura de imágenes, consistiendo en tomas fotográficas del escenario en intervalos de tiempo, para así poder tener una comparación de lo que va sucediendo con la migración de material fino.

Con respecto a la migración de material fino se realizaron experimentos con 3 tipos de materiales distintos, para tener una comparativa sobre cómo se comporta esta variable en los distintos escenarios.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Quiero agradecer primero que todo a mi núcleo familiar por estar presente en cada momento de mi etapa universitaria. Dándome ánimos para que yo no bajara los brazos en esos instantes en donde veía todo nublado. Agradezco mucho cada apoyo y cariño entregado por cada uno de ellos, son muy importantes para mí y en mi desarrollo personal, por lo tanto, este proyecto se los dedico a ellos, a mi madre Cecilia, mi padre Robert, mis hermanos Ángel, Evans y Sofia, a mi tía Nancy, a mis abuelos y a mi mami Chela Q.E.P.D yo sé que estaría muy orgullosa de verme en esta etapa final, por eso mismo le mando un gran besito al cielo.

Agradecer a Dios, por estar presente siempre en cada proceso y etapa de mi vida y ayudarme a enfrentar todos los desafíos por los que he pasado.

Agradezco a la universidad por aceptarme en su campus, en la facultad de ingeniería, entregándome todas las herramientas educativas para yo poder enfrentar todos los desafíos que se me vendrán. Por la buena calidad de profesores que siempre se encuentran preocupados por el aprendizaje de sus estudiantes. Del mismo modo agradecer a mi profesor guía Samuel Vergara por acompañarme en mi desarrollo de mis proyectos desde la introducción de proyecto de título hasta la actual tesis, por brindarme conocimientos, responder mis dudas y corregir mis errores en esas instancias de las reuniones semanales.

Mis compañeros, mi grupo de amigos universitarios, muchas gracias por estar ahí, en esos días-tardes-noches de estudio, pasar buenos ratos. Sin ellos mis días en la universidad hubiesen sido aburridos, sin importar que tan mal nos haya ido en alguna evaluación con ellos las sonrisas no faltaron y éramos capaces de subirnos el ánimo en cualquier momento.

Para finalizar agradecer a la UDEC por abrirme las puertas, al profesor Rene Gómez por darme acceso a la facultad para que yo pudiera realizar mi proyecto, y a don Edgardo por prestarme apoyo en el desarrollo del sistema de extracción.

Tabla de Contenidos

Lista de Tablas vii

Lista de Figuras viii

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Introducción General	1
1.2. Estado del arte	3
1.2.1 <i>Block Caving</i>	3
1.3. Revisiones bibliográficas	3
1.3.1 <i>Block Caving</i>	3
1.3.2 <i>Discusión</i>	5
1.4. Hipótesis de Trabajo	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	6
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.6. Alcances y Limitaciones.....	6
1.7. Temario y Metodología	7
Capítulo 2. Diseño de sistema de extracción	8
2.1. Introducción	8
2.2. Diseño del modelo físico	8
2.3. Diseño de sistema de extracción de sólidos.....	9
2.4. <i>Componentes electrónicos a utilizar</i>	11
2.4.1 <i>Arduino UNO</i>	11
2.4.2 <i>Servomotor</i>	12
2.4.3 <i>Sensor de proximidad ultrasónico</i>	13
2.4.4 <i>Limit switch</i>	13
2.5. Conexionado del sistema de extracción.....	14
2.6. Diagrama de flujo sistema de extracción	15
Capítulo 3. Desarrollo sistema de extracción.....	17
3.1. Introducción	17
3.2. Desarrollo de sistema de extracción de sólidos.....	17
3.1.1 <i>Montaje sistema electrónico</i>	17
3.1.2 <i>Construcción y montaje de base del sistema</i>	19
3.1.3 <i>Montaje de sistema de extracción de sólidos</i>	20
Capítulo 4. Desarrollo experimental	24
4.1. Introducción	24
4.2. Caracterización del material.....	24
4.3. Plan experimental	25
Capítulo 5. Análisis de resultados	29
5.1. Introducción	29
5.2. Montaje experimental	29
5.3. Primeras pruebas	30
5.4. Pruebas con adocreto	31
5.5. Pruebas con arena.....	42
5.6. Comparación adocreto vs arena	55
5.7. Comparación de tiempos sin sistema de extracción	57
Capítulo 6. Conclusiones	59
6.1. Sumario.....	59
6.2. Conclusiones	61

6.3. Trabajo futuro.....	62
Bibliografía	63
Anexo A. Códigos de programación.....	64
A.1. Programación arduino uno.....	64
A.2. Programación Matlab	66
6.4. Vista lateral experimento adocreto.....	67
6.5. Vista lateral experimento arena.....	69

Lista de Tablas

Tabla 2-1. Dimensiones de modelo físico [4].	9
Tabla 2-2. Características de los servomotores [8][9].	12
Tabla 5-1. Cantidad de extracción adocreto.....	40
Tabla 5-2. Cantidad de extracción arena.....	52
Tabla 5-3. Tiempos de cada actividad.	57

Lista de Figuras

Fig. 1-1. Ejemplo Contenedor/maqueta a escala [5].....	2
Fig. 2-1. Método B.C. [12].....	3
Fig. 2-1. Diseño modelo físico [4].	8
Fig. 2-2. Vista superior delantera sistema de extracción de sólidos.	9
Fig. 2-3. Vista superior trasera sistema de extracción de sólidos.	10
Fig. 2-4. Placa Arduino UNO.	11
Fig. 2-5. Servomotor. a) rotacional MG995 [8]. b) giro continuo MG996R[9].	12
Fig. 2-6. Sensor ultrasónico HC-SR04 [10].	13
Fig. 2-7. limit switch [11].....	13
Fig. 2-8. Diagrama de conexión sistema de extracción de sólidos.	14
Fig. 2-9. Diagrama de flujo sistema de extracción de sólidos.	15
Fig. 3-1. Vista de los componentes electrónicos a utilizar.	18
Fig. 3-2. Conexionado de todos los componentes electrónico hacia al arduino.	18
Fig. 3-3. a) Cortes en acrílico de 10 mm de espesor. b) Junta de moldes a través de prensas.	19
Fig. 3-4. a) Montaje del sistema sobre la zona de desplazamiento. b) Pegado del riel de engranajes a la base del sistema.	20
Fig. 3-5. Vista superior de sistema de extracción de sólidos.	20
Fig. 3-6. Vista frontal de sistema de extracción de sólidos.	21
Fig. 3-7. Pala mejorada del sistema de extracción.	22
Fig. 3-8. Placa metálica montada en la base del sistema de extracción.	22
Fig. 3-9. Vista lateral sistema de extracción final.	23
Fig. 3-10. Vista superior sistema de extracción final.	23
Fig. 4-1. Disposición del material fino sobre el grueso.	25
Fig. 4-2. Esquema plan experimental.	25
Fig. 4-3. Montaje de cámara fotográfica.	26
Fig. 4-4. Montaje de sistema de procesamiento de imágenes en adocreto.	27
Fig. 4-5. Visualización de DIGICAM CONTROL.....	28
Fig. 5-1. Montaje experimental. a) Tamizador. b) Pesa digital.	29
Fig. 5-2. Adocreto y polvo a utilizar.	31
Fig. 5-3. Distribución de polvo sobre el adocreto.	32
Fig. 5-4. Montaje de sistema de captura de imágenes en pruebas de adocreto.	32
Fig. 5-5. Capturas de imágenes. a) Inicial. b) 5 min. c)10 min. d) 15 min. Mostrando el ingreso del material fino (blanco).	33
Fig. 5-6. Capturas de imágenes. a) 20 min. b) 25 min. c) 30 min. d) 35 min.	34
Fig. 5-7. Capturas de imágenes. a) 40 min. b) 45 min. c) 50 min. c) 55 min.	35
Fig. 5-8. Capturas de imágenes. a) 60 min. b) 65 min. c) 70 min. d) 75 min.	36

Fig. 5-9. Captura de imágenes. a) 80 min. b) 85 min. c) 90 min. d) 95 min.	37
Fig. 5-10. Captura de imágenes. a) 100 min. b) 105 min. c) 110 min. d) 115 min.	38
Fig. 5-11. Capturas de imágenes. a) 120 min. b) 125 min. c) 130 min. d) 145 min.	39
Fig. 5-12. Gráfico adocreto - material grueso v/s material fino.	41
Fig. 5-13. Gráfico adocreto - dilución material grueso.	42
Fig. 5-14. Arena	43
Fig. 5-15. Distribución de polvo sobre la arena.	43
Fig. 5-16: Montaje de sistema de captura de imágenes en arena.	43
Fig. 5-17. Capturas de imágenes. a) Inicial. b) 5 min. c) 10 min. d) 15 min.	44
Fig. 5-18. Capturas de imágenes. a) 20 min. b) 25 min. c) 30 min. d) 35 min.	45
Fig. 5-19. Captura de imágenes. a) 40 min. b) 45 min. c) 50 min. d) 55 min.	46
Fig. 5-20. Captura de imágenes. a) 60 min. b) 65 min. c) 70 min. d) 75 min.	47
Fig. 5-21. Captura de imágenes. a) 80 min. b) 85 min. c) 90 min. d) 95 min.	48
Fig. 5-22. Captura de imágenes. a) 100 min. b) 105 min. c) 110 min. d) 115 min.	49
Fig. 5-23. Captura de imágenes. a) 120 min. b) 125 min. c) 130 min. d) 135 min.	50
Fig. 5-24. Captura de imágenes. a) 140 min. b) 145 min.	51
Fig. 5-25. Grafica arena - material grueso v/s material fino.	54
Fig. 5-26. Grafica arena – dilución material grueso.	54
Fig. 5-27. Grafica adocreto v/s arena – material grueso	55
Fig. 5-28. Grafica adocreto v/s arena – material fino.	56
Fig. 5-29. Grafica adocreto v/s arena – dilución.	56
Fig. A-1. vista lateral – (a) 100, (b) 130, (c) 160 y (d) 180 extracciones.	67
Fig. A-2. Vista lateral – (a) 200, (b) 220 y (c) 240 extracciones.	68
Fig. A-3. Vista lateral – (a) 80, (b) 100, (c) 120 y (d) 150 extracciones.	69
Fig. A-4. Vista lateral – (a) 180, (b) 200, (c) 220 y (d) 250 extracciones.	70

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En la industria minera, se utiliza una diversidad de métodos y técnicas para llevar a cabo la extracción de recursos minerales. Algunos métodos involucran excavaciones superficiales o subterráneas a grandes profundidades. Entre los métodos subterráneos se destaca el Block Caving (B.C.), por su eficiencia, escala y rentabilidad.

El B.C. es un método de minería subterránea que se emplea en grandes profundidades que dependen de varios factores (geología, resistencia de la roca, entre otros), para extraer grandes bloques de mineral desde un nivel de producción. Un ejemplo de ello es la mina El teniente en Chile, que ha utilizado el método B.C a profundidades de aproximadamente 1.4 kilómetros. Para llevar a cabo esta técnica, se crean accesos mediante túneles en la base del bloque, denominándose ese sector como nivel de extracción o producción, desde el cual posteriormente se extrae gradualmente el mineral. El material extraído se transporta hacia la superficie mediante camiones, trenes, o correas transportadoras.

Una variable de gran relevancia es la migración de material fino, un fenómeno que se manifiesta en los métodos de extracción. este se refiere al desplazamiento de partículas más pequeñas, muchas veces sin valor comercial, que diluyen el material. Los fragmentos de roca y mineral se fracturan y colapsan, creando un espacio vacío debajo del bloque de mineral en proceso de extracción. En este espacio vacío, el material fino migra hacia la zona de extracción y, posteriormente, se va mezclando con el mineral. Adicionalmente, la migración de material fino puede conllevar impactos adversos en la operación de extracción de los minerales. Puede generar problemas al obstruir los sistemas de transporte y bloquear los equipos de procesamiento. Además, cuando este material fino se combina con la humedad, puede dar lugar a la formación de lodo/barro.

El estudio de la migración del material fino se puede realizar mediante pruebas de flujo gravitacional. Por motivos de costos, implementación y seguridad se propone que estos estudios se lleven a cabo en modelos físicos dentro en laboratorios. Estos modelos consisten en un contenedor/maqueta a escala transparente llenado con distintos tipos de materiales o minerales

granulares, distribuidos entre material fino y grueso, dentro de ellos se pueden incorporar una serie de celdas de cargas para estudiar la tensión vertical que producen los materiales.



Fig. 1-1. Ejemplo Contenedor/maqueta a escala [5].

O lo otro es utilizar técnicas de capturas de imágenes para ver como migra el material fino con los diversos tipos de material grueso.

En particular, en este proyecto se desarrolló un sistema de extracción de material granular y modelación de la migración del material fino a través de captura de imágenes. Este sistema fue creado para respaldar futuros trabajos de extracción automatizada de materiales que se encuentran dentro de un contenedor rectangular transparente. El contenedor es una representación a escala 1:100 y simula lo que sucede alrededor de una batea de extracción en el método de explotación de tipo B.C. El propósito principal es obtener datos diversos sobre la migración de material fino tanto en la zona de extracción como dentro del contenedor. Esta información será fundamental para analizar y comprender en detalle la migración del material fino.

1.2. Estado del arte

1.2.1 Block Caving

El B.C. es un método de minería subterránea que se emplea a grandes profundidades en el que grandes bloques de mineral se extraen en una sola operación. El mineral se desploma bajo su propio peso. Mediante la creación de túneles en la parte inferior del B.C. (zona de extracción de minerales) se retira gradualmente el material, para posteriormente ser llevado hacia la superficie mediante un sistema de transporte (correas transportadoras o camiones).

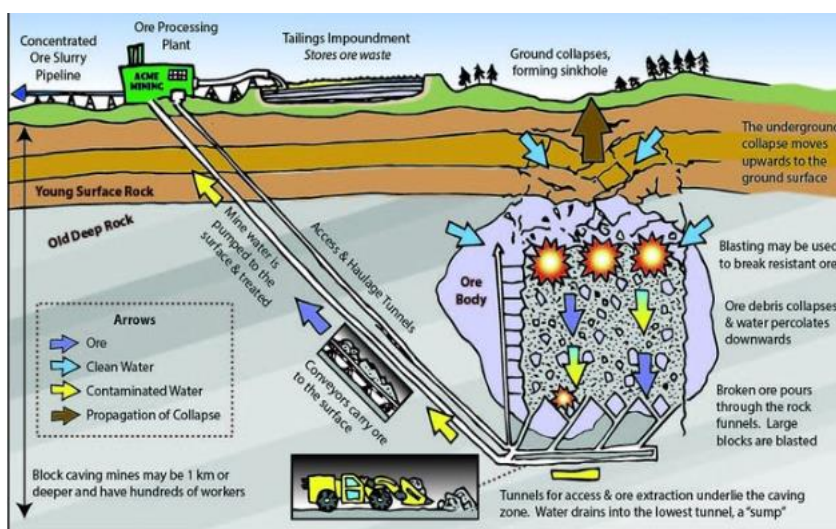


Fig. 2-1. Método B.C. [12]

1.3. Revisiones bibliográficas

Aquí se realiza la revisión bibliográfica con respecto a los métodos de excavación de los yacimientos subterráneos en el rubro minero, las variables de interés que se encuentran presentes en ellos junto con los problemas que pueden conllevar y, el tipo de metodología a utilizar para el correcto desarrollo del proyecto.

1.3.1 Block Caving

A continuación, se realizará una revisión bibliográfica con respecto a los documentos utilizados para la comprensión de las variables y fenómenos que suceden en un B.C.

- ♣ R. Gómez, R. Castro, “Stress modelling using cellular automata for block caving applications”, J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol 154, 2022 [1].

Se presenta un modelo de esfuerzos verticales de material granular, cuyo objetivo es simular condiciones de flujo estático y dinámico. Este modelo se desarrolla dentro de un simulador de flujo por gravedad basado en celdas de carga para simular la escala del problema y las condiciones de flujo. Con ello poder realizar mediciones de esfuerzo vertical en el yacimiento subterráneo de tipo B.C.

- ♣ R. Castro, R. Gómez, M. Pierce, J. Canales “Experimental quantification of vertical stresses during gravity flow in block caving”, J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol 127, 2020 [2].

Se realiza una cuantificación experimental con respecto al esfuerzo vertical que se produce en una excavación de tipo B.C. Para ello se estudian 3 tipos de estrategias de hundimientos, las cuales son el hundimiento aislado, hundimiento en panel y el hundimiento en bloque, con el fin de analizar la variabilidad entre los esfuerzos verticales y concluir con cuál de estas se produce un menor esfuerzo vertical e incluirlo en el sistema de métodos de extracción de minerales de un B.C.

- ♣ R. Castro, R. Gómez, A. Pérez “Physical modelling as a tool to improve our understanding of mechanisms of cave flow”, Univ. de Chile, Univ. de Concepción, Rep. ACG-2205-74, 2022 [3].

Es un estudio de las distintas variables presentes en la extracción del mineral, siendo un problema en la minería subterránea. De los diversos experimentos realizados, se les dará un énfasis a los estudios de las geometrías de estructuras mineras, migración de material fino, tensiones verticales, fragmentación de la roca y la extracción de lodo.

- ♣ D. Saavedra Salamanca, “Modelación física del fenómeno de migración de finos en minería de caving”, memoria de título, Univ. De Concepción, 2022 [4].

Esta memoria de título entrega información relevante con respecto a la metodología o los pasos necesarios para la realización de una modelación física del fenómeno de migración de material fino en un B.C, encontrándose presente el modelo del diseño físico (modelo a escala 1:100 de un B.C.), caracterización del material (las características de los distintos materiales), y el plan experimental (la disposición de los materiales o minerales dentro del contenedor).

1.3.2 Discusión

Los estudios e investigaciones revisados entregan las bases esenciales para el desarrollo del proyecto. Se identifico las diversas variables que influyen en un proceso de extracción de minerales de tipo B.C. y llevando a cabo diversos experimentos para una mejor comprensión [3]. Entre los aspectos más relevantes se encuentra el esfuerzo vertical [1][2] y la migración de material fino [3]. Se realizaron una serie de experimentos con el objetivo de evaluar la variabilidad del esfuerzo vertical y determinar cual de ellos produce el menor esfuerzo al extraer el material [2]. Para medir el esfuerzo vertical, se aplica un método que implica la incorporación de celdas de carga dentro del contenedor [1][2]. Con el fin de establecer una metodología clara y análisis de datos eficientes, se toman en cuenta las indicaciones descritas en [4]. Esto permite la obtención de un plan experimental que orientara el proyecto de manera efectiva.

1.4. Hipótesis de Trabajo

Es posible automatizar con dispositivos de bajo costo un modelo experimental de Block Caving. Este proyecto prestará un gran apoyo en trabajos futuros en la extracción de minerales y estudios de las variables que ocurren en un B.C. facilitando el proceso de extracción, siendo este último automatizado, debido a la cantidad de sensores y motores que tendrá el sistema de extracción.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de extracción autónomo y sistema de captura de imágenes de material granular, para un modelo experimental de flujo gravitacional en minería subterránea.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de extracción de material granular.
- Desarrollar un sistema de extracción de bajo costo.
- Diseñar un sistema de captura de imágenes para experimentos de modelo de migración de material fino.
- Obtener datos experimentales con modelo de flujo gravitacional.

1.6. Alcances y Limitaciones

Los alcances de este proyecto son el desarrollo del sistema de extracción, junto con las pruebas correspondientes dentro de las dependencias del laboratorio de rocas de la Universidad de Concepción (UdeC), recopilación de información a través de trabajos pasados junto con la interacción de los docentes de la UdeC y la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC).

Algunas de las limitaciones son el desarrollo y montaje del sistema de extracción dentro de los laboratorios de la UCSC, por el hecho de no existir un prototipo a escala de un B.C. Otra limitante es la falta de acceso a las dependencias de la Universidad de Chile, encontrándose en este un sistema de extracción funcionando activamente.

1.7. Temario y Metodología

Para el estudio de la migración de material fino se contó con un modelo físico. Este otorgó la posibilidad de observar el comportamiento del flujo del material. Se utilizó un sistema de extracción de sólidos diseñado que está encargado de la extracción del material fino y grueso, para el posterior estudio de la migración de material fino.

El capítulo 2 se enfoca en el diseño del sistema de extracción de sólidos, donde se detalla el modelo físico a utilizar, los componentes electrónicos necesarios para la construcción del sistema de extracción, un diseño 3D que permite observar el cómo sería el sistema, y su funcionamiento lógico.

El capítulo 3 se desarrolla la construcción del sistema de extracción de sólidos. En este capítulo muestran los procedimientos necesarios para el desarrollo físico del sistema, donde se implementa paso a paso el armado y montaje del sistema de extracción.

El capítulo 4 presenta el desarrollo experimental, donde se describen los pasos previos para dar inicio a los experimentos de la migración de material fino. Se detalla la caracterización de cada material y el plan experimental que se llevara a cabo.

El capítulo 5 presenta el análisis de resultados, donde se analizará los resultados obtenidos en los diversos experimentos con los distintos porcentajes de humedad y poder visualizar como migra el material fino en los distintos escenarios.

El capítulo 6 presenta las conclusiones que se pueden extraer desde la creación del sistema de extracción de sólidos hasta la obtención de los resultados a través del modelo de flujo gravitacional.

Capítulo 2. Diseño de sistema de extracción

2.1. Introducción

El sistema de extracción de material granular es el encargado de la extracción de forma segura y eficiente de los materiales que se encuentran dentro del contenedor. El sistema se basa en el diseño de una pala automatizada para prestar apoyo en el proceso de extracción, este consta de una pala y un riel de engranajes que serán accionados a través de servomotores, dando los movimientos necesarios en los distintos escenarios, siendo estos limitados por un sensor de proximidad ultrasónico. El sensor detectará la presencia de algún tipo de objeto al frente del sistema de extracción. Y con un *limit switch* que indicará el fin de la carrera del sistema. A continuación, se verán los diseños iniciales para que el sistema de extracción de sólidos pueda efectuar sus funciones correspondientes con normalidad.

2.2. Diseño del modelo físico

Se utiliza un modelo físico a escala 1:100 con batea rectangular simple (contenedor) con dos puntos de extracción. El escalamiento de un modelo tiene por objetivo principal representar un fenómeno para poder estudiarlo. Los métodos de simulación física en laboratorio presentan ventajas notables como bajos costos, facilidad de operación, repetibilidad y capacidad de observar directamente los fenómenos experimentales. Este modelo físico será la base para la toma de las medidas correspondientes del sistema de extracción de sólidos.

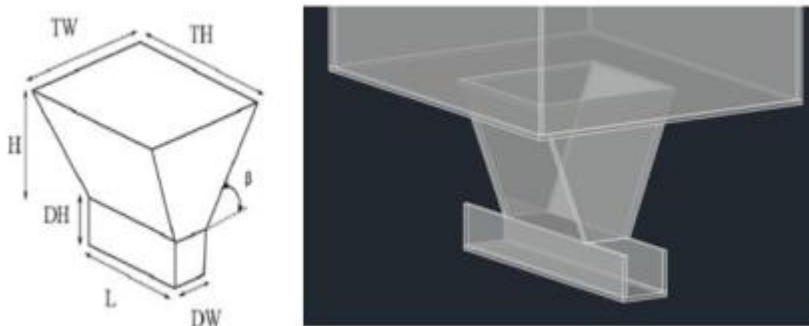


Fig. 2-1. Diseño modelo físico [4].

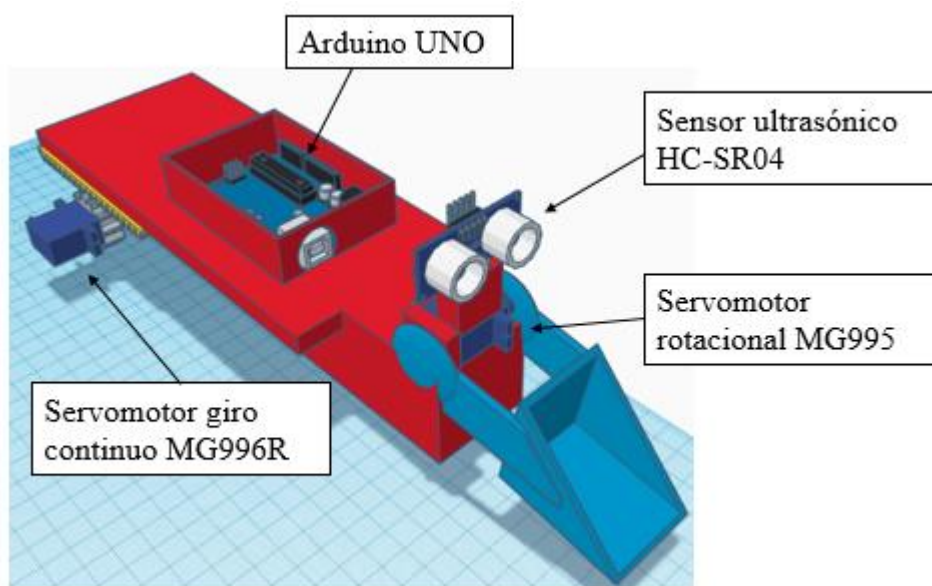
Tabla 2-1. Dimensiones de modelo físico [4].

Componente	Dimensiones
TH	15 cm
TW	16 cm
DW	4.5 cm
DH	4.5 cm
H	15.5 cm
L	15 cm
β	70°

Las dimensiones de las componentes DW, DH y L (Fig. 2-2) indican las dimensiones correspondientes de la zona de extracción, por lo tanto, con estos datos se podrá estimar el tamaño del sistema de extracción de sólidos.

2.3. Diseño de sistema de extracción de sólidos

A través del mismo servidor web de Tinkercard se logró diseñar el sistema de extracción de sólidos en un formato 3D. Este tipo de diseño prestará un gran apoyo con respecto a la visualización y el futuro montaje físico del sistema.

**Fig. 2-2. Vista superior delantera sistema de extracción de sólidos.**

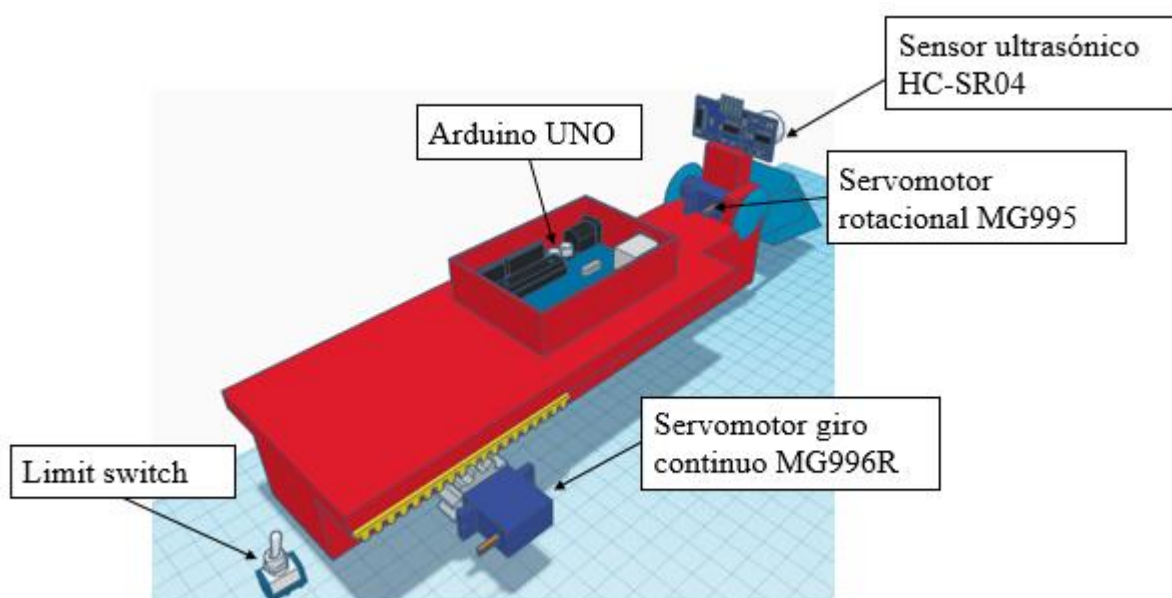


Fig. 2-3. Vista superior trasera sistema de extracción de sólidos.

En las (Fig. 2-2) y (Fig. 2-3) se pueden visualizar el diseño 3D del sistema de extracción de sólidos en sus distintos ángulos. Se pueden observar todos los componentes electrónicos mencionados anteriormente integrados en el montaje del sistema, donde el servomotor rotacional (servomotor pala) será el encargado de entregar los movimientos de la pala, el servomotor giro continuo (servomotor engranaje) será el encargado de accionar el sistema de engranajes para entregar los movimientos de adelanto y retroceso del sistema. Sobre el servomotor rotacional se encuentra el sensor ultrasónico, su papel crucial será detectar algún objeto cercano, y, para finalizar, se puede observar un limit switch (final de carrera) que se encuentra en la parte trasera del sistema, para que, al momento de ser accionado, envíe una señal hacia el Arduino, este último es el cerebro del sistema de extracción de sólidos y estará ubicado sobre la base del sistema.

2.4. Componentes electrónicos a utilizar

A continuación, se visualizan y definen los componentes electrónicos necesarios para el buen funcionamiento del sistema de extracción de sólidos.

2.4.1 Arduino UNO

El Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra. Estos últimos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores o actuadores de manera sencilla. Este tipo de placa brindará un gran apoyo en este proyecto, siendo el cerebro del sistema de extracción de sólidos.

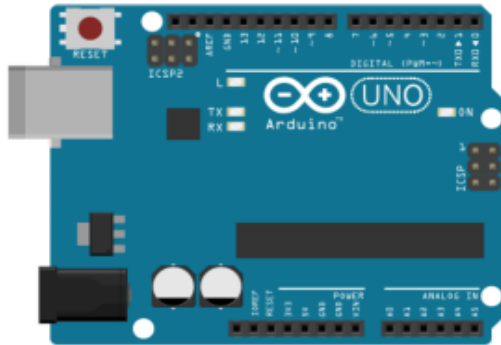


Fig. 2-4. Placa Arduino UNO.

2.4.2 Servomotor

El servomotor es un motor eléctrico capaz de generar distintos tipos de movimientos y que puede controlar tanto la velocidad como la posición de giro de su eje. Se utilizarán 2 servomotores, uno de giro posicional (Servo 1) que estará encargado de accionar la pala en los distintos ángulos que sean necesarios y otro de giro continuo (Servo 2) que será el encargado de accionar el sistema de engranajes, dando los movimientos de adelanto o retraso del sistema extracción de sólidos.

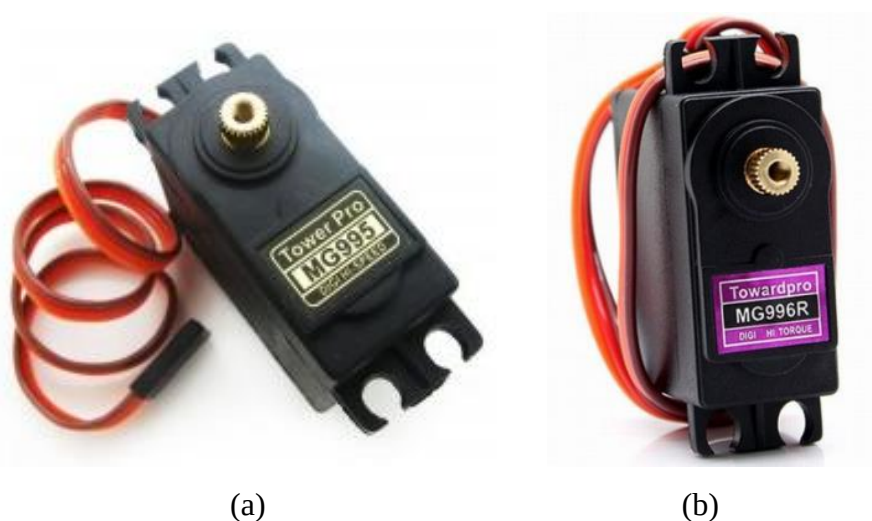


Fig. 2-5. Servomotor. a) rotacional MG995 [8]. b) giro continuo MG996R[9].

Tabla 2-2. Características de los servomotores [8][9].

Características	MG995	MG996R
Voltaje operación	4.8 – 7.2 [V]	4.8 – 7.2 [V]
Velocidad operación	0.16 [seg/60°]	0.17 [seg/60°]
Torque	8.5 - 10 [kg/cm]	9.4 - 11 [kg/cm]
Rango de giro	180°	360°
Dimensiones	40.7x19.7x42.9 [mm]	40.7x19.7x42.9 [mm]
Peso	55 [g]	55 [g]

2.4.3 Sensor de proximidad ultrasónico

El sensor de proximidad ultrasónico es un dispositivo electrónico capaz de detectar la presencia de objetos a través de la medición de tiempo de vuelo de una señal de sonido emitido por el mismo sensor. Para este proyecto se utilizará el sensor de proximidad ultrasónico de modelo HC-SR04, su rango de detección de objetos es entre 2 a 400 cm de distancia, su ángulo de medición es de 15° y el voltaje de alimentación es de 5v DC.



Fig. 2-6. Sensor ultrasónico HC-SR04 [10].

2.4.4 Limit switch

También conocidos como interruptores de final de carrera, son pertenecientes a la familia de los interruptores, son sensores de contacto que detectan movimientos mecánicos y generan una señal eléctrica en respuesta a su presencia. Son utilizados para sensar la presencia de objetos en una posición específica. Este tipo de dispositivo se instala en la superficie cercana al lugar en donde se desecha o bota el material, por lo tanto, al ser accionado el switch, dará la instrucción de que la pala gire una cierta cantidad de grados para que deseche el material que lleva dentro.



Fig. 2-7. Limit switch [11].

2.5. Conexión del sistema de extracción

A continuación, se presentará el diagrama de conexión del sistema de extracción de material granular. Se observará el sistema de conexionado de los componentes mencionados con anterioridad, donde se visualizará cómo cada dispositivo irá conectado al microcontrolador Arduino para que este pueda ejecutar las distintas funciones definidas en su programación. Para ello se utilizó la plataforma web de Tinkercard, la cual es una herramienta útil al momento de programar en Arduino o la realización de objetos en 3D.

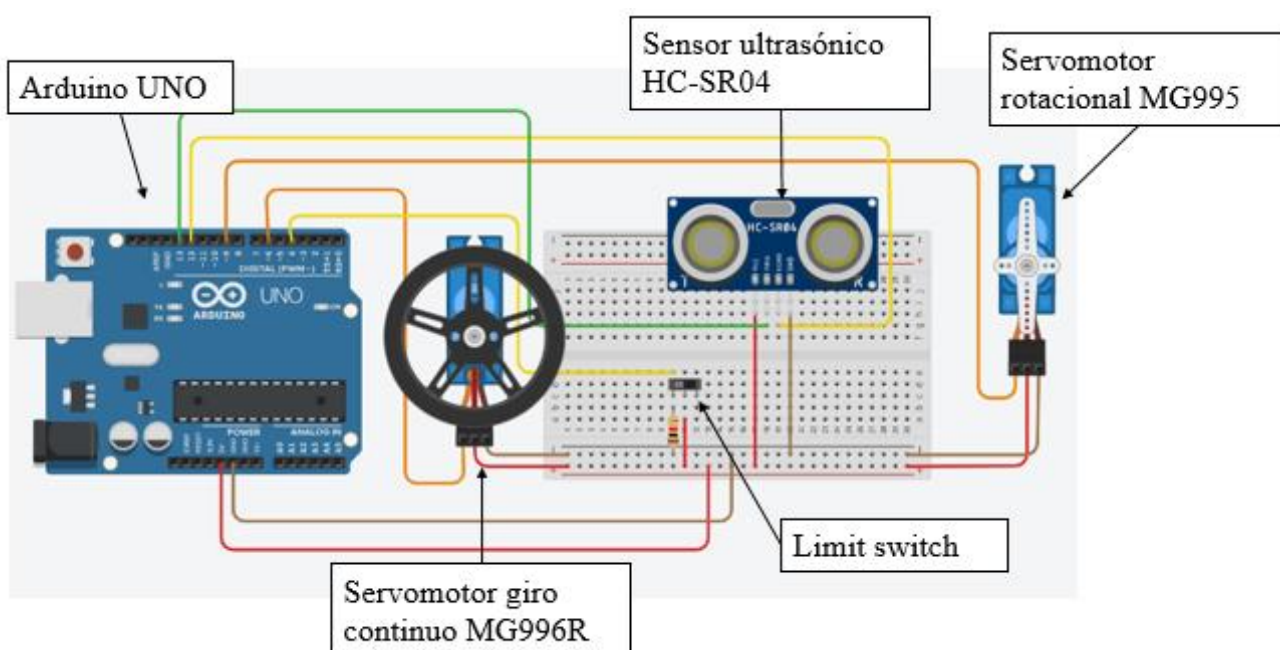


Fig. 2-8. Diagrama de conexión sistema de extracción de sólidos.

Se puede observar la conexión de todos los componentes electrónicos hacia los pines de salida digital del arduino. El Servomotor rotacional y el Servomotor giro continuo irán conectados en los pines 9 y 6 respectivamente, siendo estos de salida PWM (modulación por ancho de pulso), las salidas PWM tienen la particularidad que varían el ancho de los pulsos de una señal periódica manteniendo una frecuencia constante, es decir es el encargado de controlar las velocidades y los ángulos de los servomotores. En los pines 12 y 13 estará conectado el sensor de proximidad ultrasónico. Y en el pin 4 estará conectado el limit switch. En este caso la protoboard será un facilitante para el suministro de energía de cada uno de los dispositivos.

2.6. Diagrama de flujo sistema de extracción

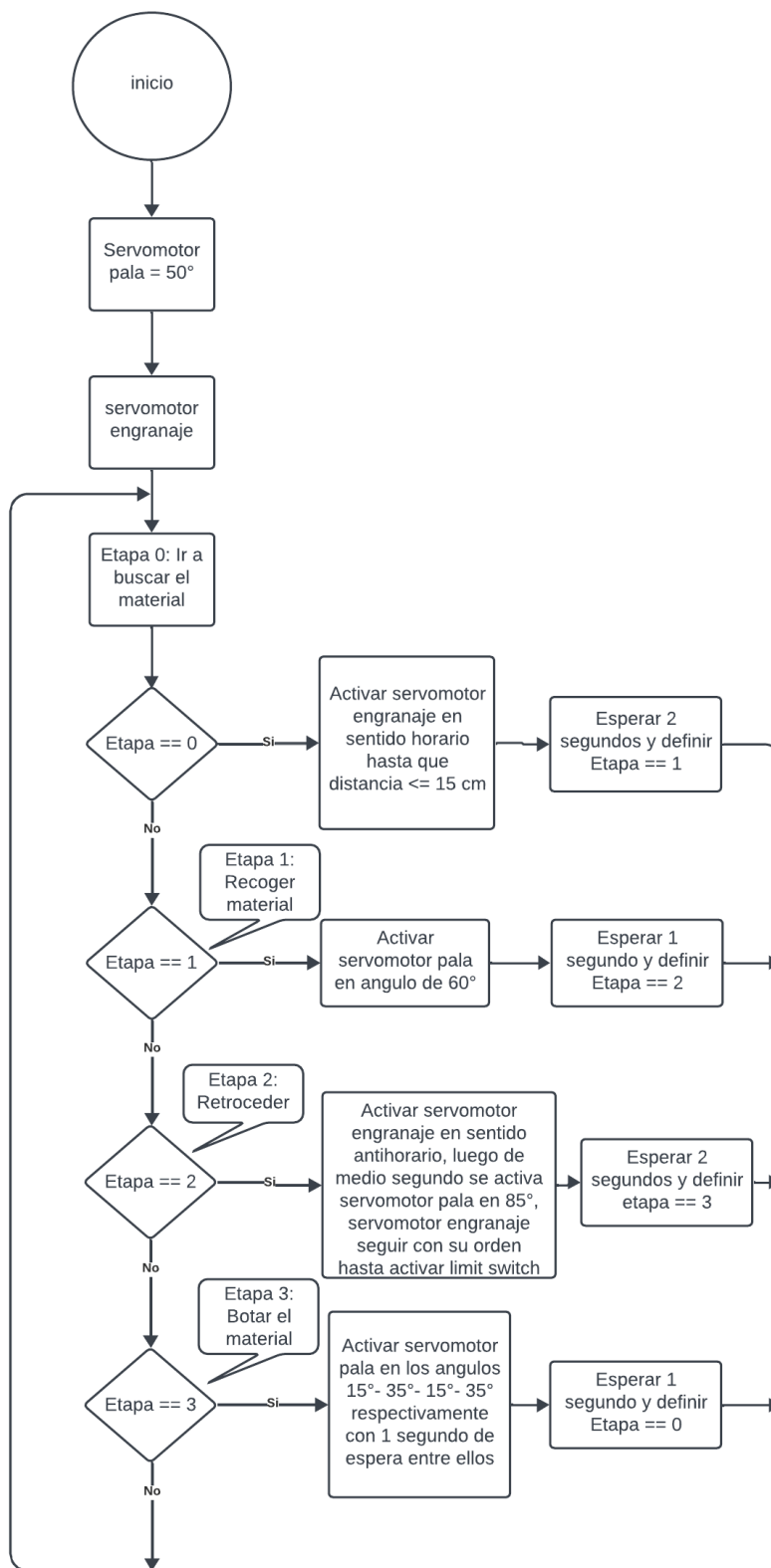


Fig. 2-9. Diagrama de flujo sistema de extracción.

Se puede apreciar el diagrama de flujo mostrado en Fig. 2-9, siendo este una representación gráfica que describe el proceso del sistema de extracción de sólidos, los pasos iniciales y finales de lo que realiza el sistema visto anteriormente en la representación 3D.

Se comienza asignando las variables internas de los servomotores de pala y engranaje. La Etapa 0 corresponde a la búsqueda del material, por lo tanto, se activa el servomotor engranaje en sentido horario para que el sistema avance hasta que detecte un objeto a una distancia menor o igual a 15 centímetros, indicando la llegada a la zona de extracción, se realiza un tiempo de espera y se avanza a la siguiente etapa.

Etapa 1, corresponde a la de recoger el material, se activa el servomotor pala dejándolo en un ángulo de 60° , lo que provoca el levante de la pala para que ingrese el material en él, se realiza un tiempo de espera y se avanza a la siguiente etapa.

Etapa 2, indica que se debe de retroceder, por ende, se activa el servomotor engranaje en sentido antihorario para que el sistema retroceda, luego de medio segundo se activa el servomotor pala en 85° , el servomotor engranaje sigue su recorrido hasta que se accione o active el limit switch, indicando que el sistema se encuentra en la zona de bote del material, se realiza un tiempo de espera y se avanza a la siguiente etapa.

Etapa 3, indica el bote del material, ya que, como el sistema se encuentra en la zona donde se desecha el material, se activa el servomotor pala en el siguiente orden de ángulos: $15^\circ - 35^\circ - 15^\circ - 35^\circ$, con un tiempo de espera de 1 segundo entre cada cambio de posición, se puede observar que se repiten 2 veces los ángulos 15° y 35° , lo que provoca que exista un segundo bote de material, en caso de que en la primera descarga haya quedado algún residuo dentro de la pala.

Al finalizar el proceso de la Etapa 3 se toma la decisión de realizar un tiempo de espera y se avanza a la siguiente etapa, siendo este último en el retorno de la etapa 0, cerrando el ciclo y provocando la repetición de todas las etapas.

Capítulo 3. Desarrollo sistema de extracción

3.1. Introducción

El presente capítulo presentará el desarrollo del sistema de extracción de sólidos, donde se podrá observar la construcción y el montaje del sistema de extracción de material granular.

3.2 Desarrollo de sistema de extracción de solidos

El desarrollo del sistema de extracción consiste en la construcción del sistema mismo utilizando los dispositivos de bajo costo mencionados en el capítulo anterior. Se realiza el conexonado de los componentes electrónicos para que se comuniquen entre sí a través del microcontrolador arduino, para posteriormente montarlos en la base del sistema obteniendo de esta manera un sistema de extracción de solidos similar al visto en el diseño 3D.

3.1.1 Montaje sistema electrónico

En las figuras 3-1 y 3-2 se pueden observar los componentes electrónicos a utilizar junto con sus debidas conexiones hacia el microcontrolador arduino UNO, para que este ultimo comunique a cada uno de los componentes sus respectivas funciones, tal como lo descrito en el diagrama de flujo del capítulo anterior (Fig. 2-9). Luego se comienza con la construcción estructural de la base del sistema de extracción, para posterior montar el sistema electrónico.

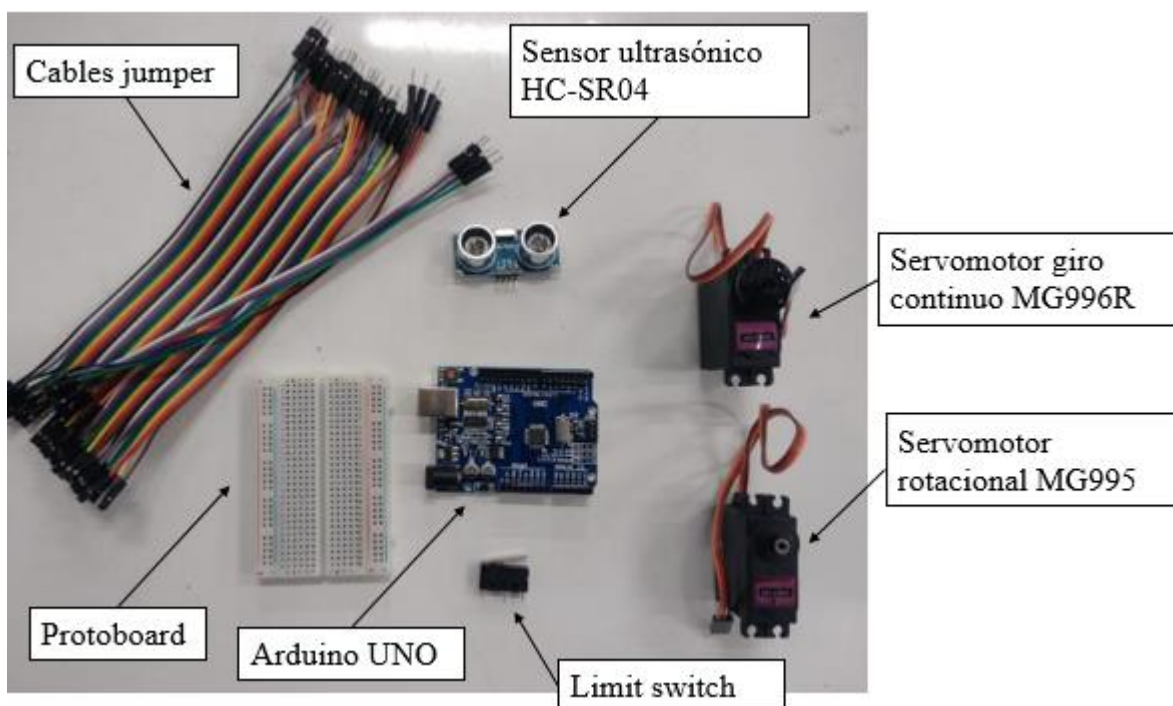


Fig. 3-1. Vista de los componentes electrónicos a utilizar.

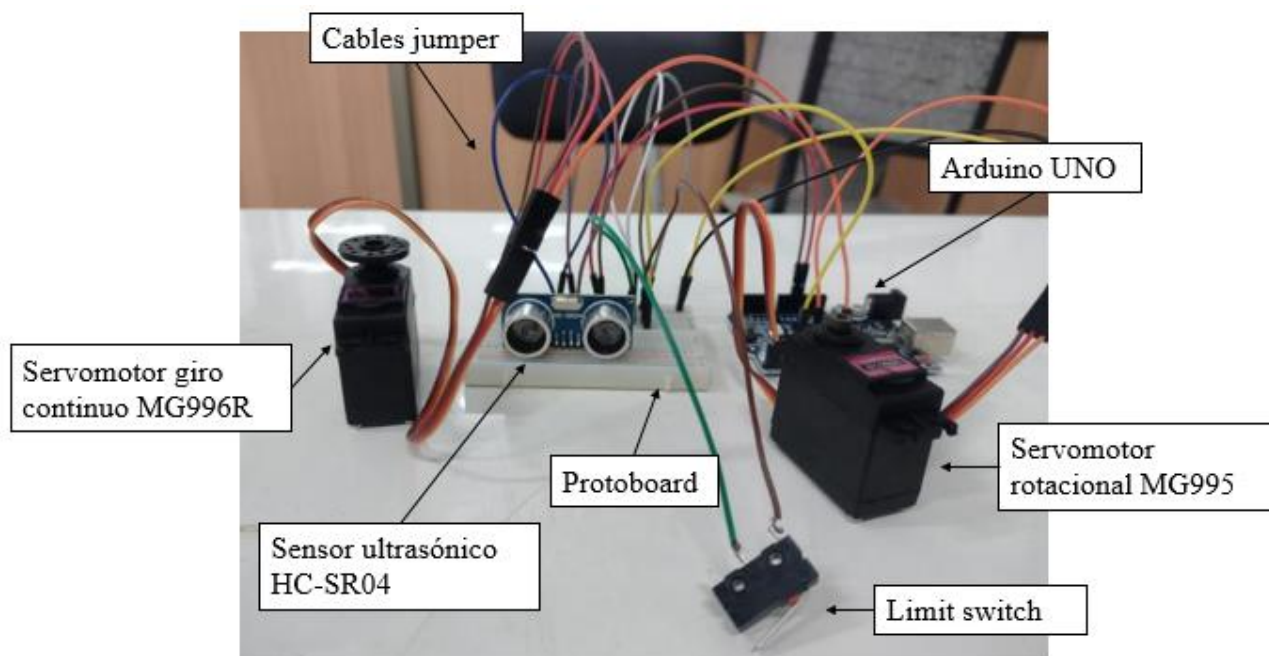


Fig. 3-2. Conexión de todos los componentes electrónico hacia al arduino.

3.1.2 Construcción y montaje de base del sistema

Desde las figuras 3-3 y 3-4 se pueden observar las etapas para la creación de la base del sistema de extracción de sólidos. En primer lugar, se realizaron cortes en un acrílico con un espesor de 10 mm para la creación de unos moldes, para luego unirlos y obtener la base del sistema. Y para finalizar, se une un riel de engranajes de plástico en una de las aletas de la base. Y se montan los componentes electrónicos sobre la base, logrando obtener un modelo lo más parecido del diseño 3D.

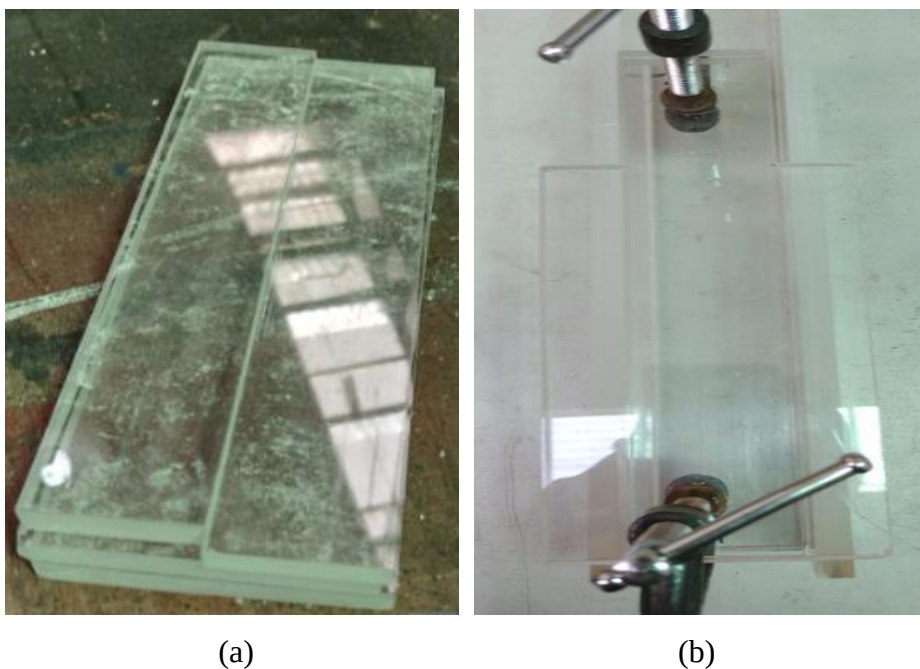


Fig. 3-3. a) Cortes en acrílico de 10 mm de espesor. b) Junta de moldes a través de prensas.

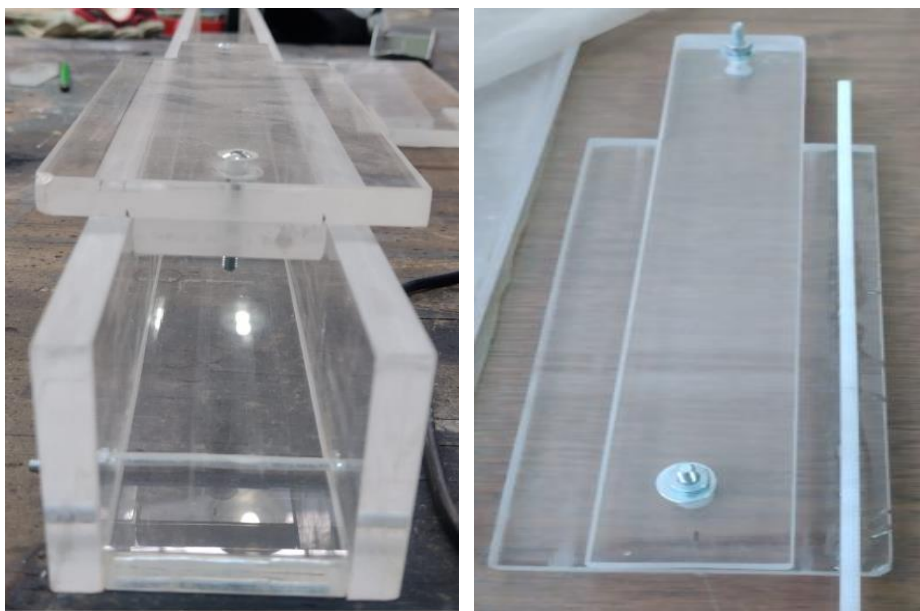


Fig. 3-4. a) Montaje del sistema sobre la zona de desplazamiento. b) Pegado del riel de engranajes a la base del sistema.

3.1.3 Montaje de sistema de extracción de sólidos

En las figuras 3-5 y 3-6 se pueden observar los montajes del sistema de extracción de sólidos en los distintos ángulos o puntos de vista. Obteniendo el montaje de los componentes electrónicos sobre la base del sistema, para que posteriormente cada uno pueda realizar sus debidas funciones siguiendo los sets de etapas descritas en el diagrama de flujo.

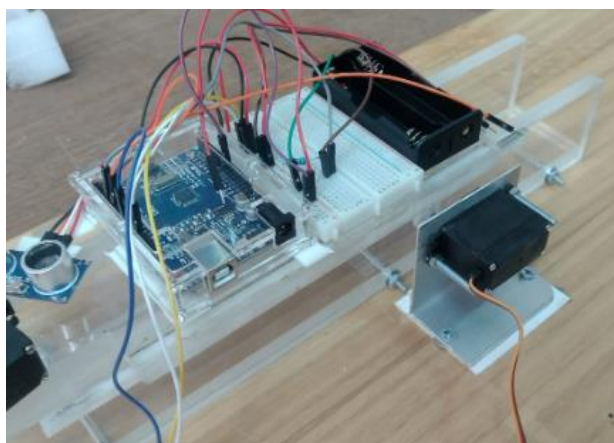


Fig. 3-5. Vista superior de sistema de extracción de sólidos.

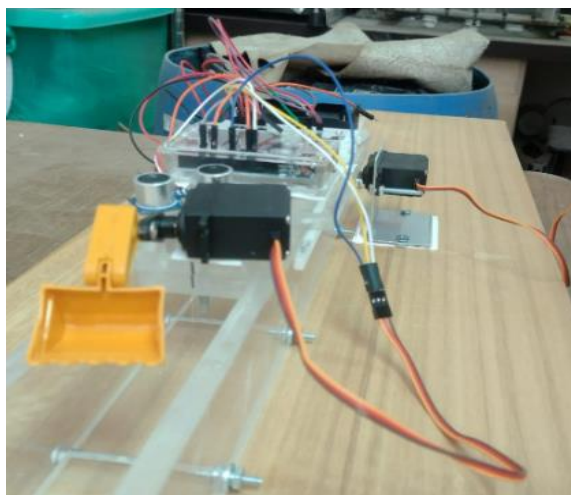


Fig. 3-6. Vista frontal de sistema de extracción de sólidos.

Se realizaron las primeras pruebas para observar los principales movimientos que ejecuta el sistema de extracción de material granular. Se hallaron unas dificultades o problemas en el sistema, donde uno de ellos fue la pala que se estaba utilizando, ya que este era débil y pequeña para la correcta extracción de material granular, la solución fue cambiar la pala por una de un plástico más duro y con un brazo más largo, permitiendo un mejor agarre y penetración en la zona de extracción del contenedor (Fig. 3-7). Otra dificultad encontrada fue en la base del sistema, donde este requería de un peso extra para así evitar que se levante al momento de que la pala penetre en la zona de extracción, la solución al problema fue incorporar una placa metálica a la base del sistema, provocando un mayor peso y equilibrio al momento de la extracción de materiales (Fig. 3-8). Los cambios realizados se pueden observar en más detalle a continuación.

- Cambio de pala:

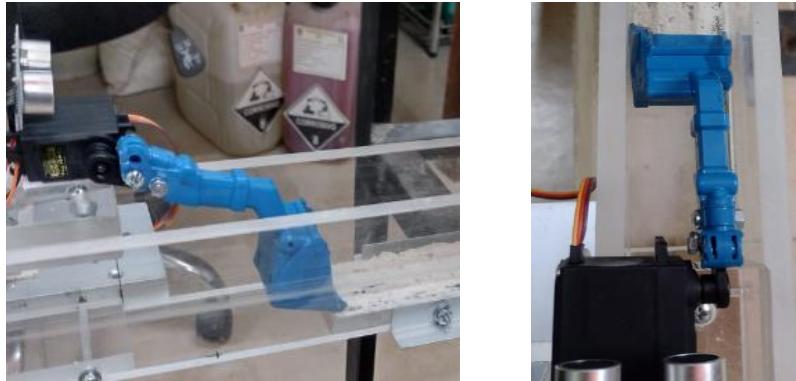


Fig. 3-7. Pala mejorada del sistema de extracción.

- Agregar peso a la base del sistema:

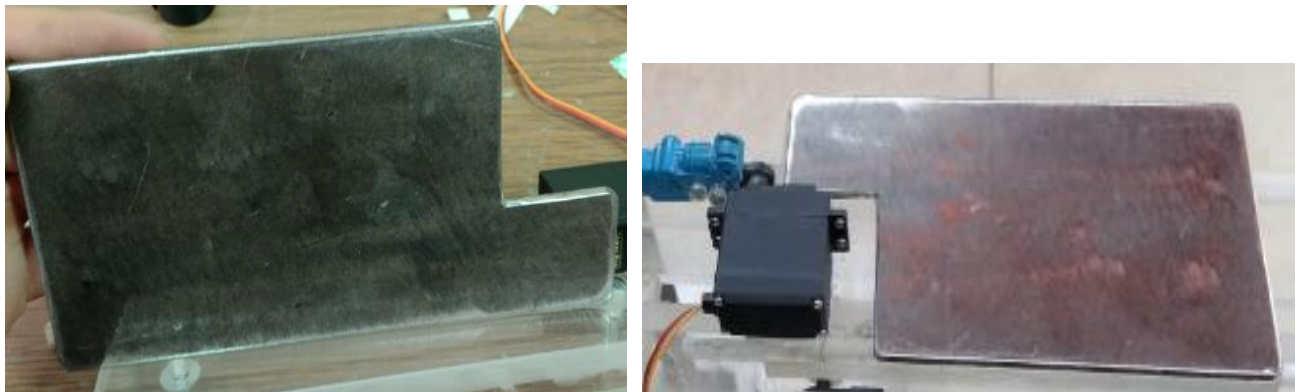


Fig. 3-8. Placa metálica montada en la base del sistema de extracción.

En las figuras 3-7 y 3-8 se pueden observar cómo luce el sistema de extracción de sólidos en los distintos ángulos y con los cambios indicados anteriormente.

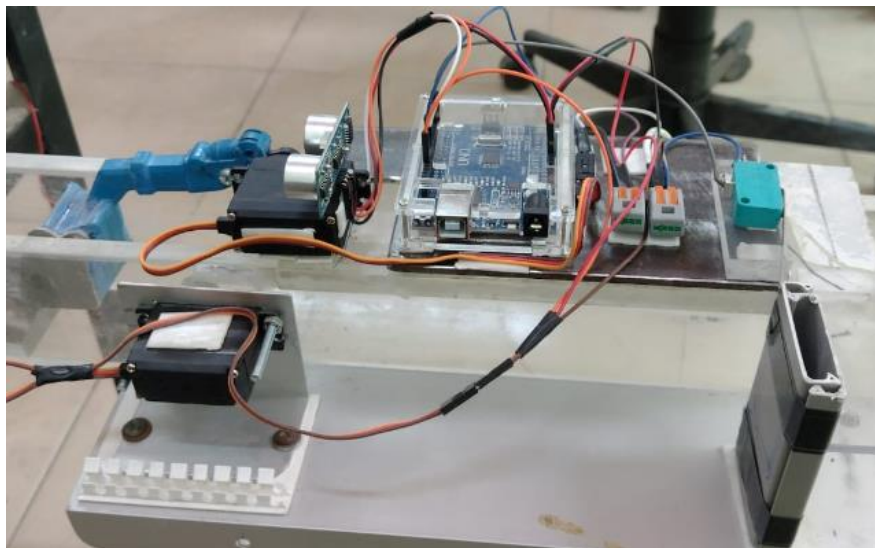


Fig. 3-9. Vista lateral sistema de extracción final.



Fig. 3-10. Vista superior sistema de extracción final.

Capítulo 4. Desarrollo experimental

4.1. Introducción

Para el estudio y comprensión del fenómeno de migración de material fino, se contó con un modelo físico (Fig. 2-1) y configuraciones experimentales que posibiliten la observación del flujo tanto del material fino como grueso. Además de contar con el sistema de extracción de sólidos, siendo el encargado de extraer el material que se encuentra dentro del contenedor. Esto permitió evaluar el impacto ocasionado por el material fino, en las distintas variaciones de los tamaños del material grueso que se esté utilizando. A continuación, se detallará el desarrollo experimental llevado a cabo para emplear modelos físicos en el estudio del fenómeno de migración de material fino para un caso donde exista una diferencia de tamaños del material grueso.

4.2. Caracterización del material

Para los distintos setup experimentales se utilizaron los siguientes tipos de materiales. Los materiales granulares gruesos corresponden a grava de un tamaño mínimo de 2 mm y un tamaño máximo de 4.75 mm, adocreto de un tamaño mínimo de 0.85 mm y un tamaño máximo de 2 mm, y arena de un tamaño mínimo de 0.297 mm y un tamaño máximo de 1.18. Para el material granular fino, se emplea polvo con un tamaño máximo de 0.0737 mm, el cual es permitido obtener a través de un tamizador.

4.3. Plan experimental

Los sets experimentales consideran la disposición del material fino sobre el material grueso, donde se llenó con material grueso toda la zona inferior del contenedor, para posteriormente incorporar el material fino sobre este último.



Fig. 4-1. Disposición del material fino sobre el grueso.

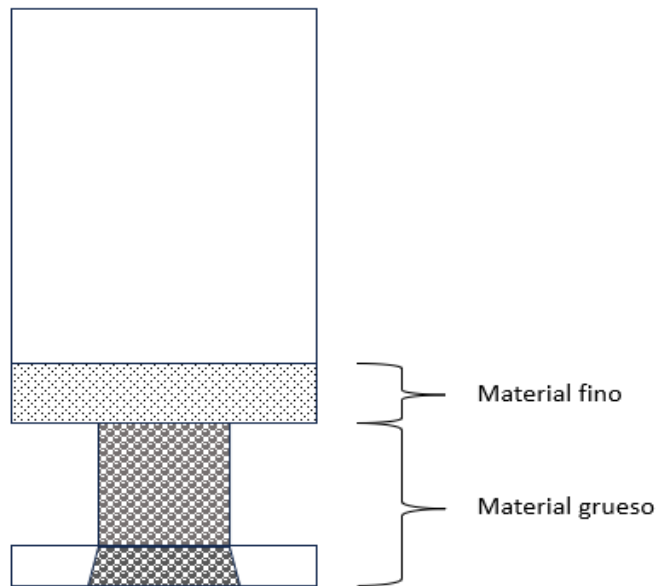


Fig. 4-2. Esquema plan experimental.

La extracción del material se realiza con un tiraje uniforme por medio del punto de extracción, a través del sistema de extracción automatizado. Los experimentos se realizaron variando el tamaño del material grueso y observar cómo varió la migración del material fino en cada uno de ellos.

Tabla 4-1. Setup experimental

Experimento	Variables	
	Material grueso	Material fino
1	Grava	Polvo
2	Adocreto	Polvo
3	Arena	Polvo

Para el análisis del flujo gravitacional del material se utilizó el método de captura de imágenes, este consistió en la captura de imágenes fotográficas hacia el contenedor en un lapso de tiempo de cada 5 minutos para así obtener una variedad de imágenes desde el inicio hasta el final del proceso. Para ello se utilizó una cámara fotográfica profesional de marca y modelo NIKON D3200, obteniendo imágenes que tienen una resolución de 24.2 megapíxeles.



Fig. 4-3. Montaje de cámara fotográfica.

Para la obtención de imágenes de forma automatizada y eficiente se utilizó el software DIGICAM CONTROL, siendo capaz de comunicar la cámara fotográfica y el computador. Además, se contó con otro software llamado MATLAB, con su debida programación entrega una orden a DIGICAM CONTROL que tome capturas fotográficas en un intervalo de captura configurable de cada 5 minutos y que las imágenes queden guardadas en las debidas carpetas que se mencionan en el código de programación.



Fig. 4-4. Montaje de sistema de procesamiento de imágenes en adocreto.

En la figura 4-5 se puede visualizar la pantalla del software de DIGICAM CONTROL, donde se pueden observar algunas funciones, por ejemplo, al vincular la cámara con el computador el software es capaz de detectar el tipo de cámara entregando los datos de este, lográndose visualizar en una pequeña zona de la izquierda de la pantalla.

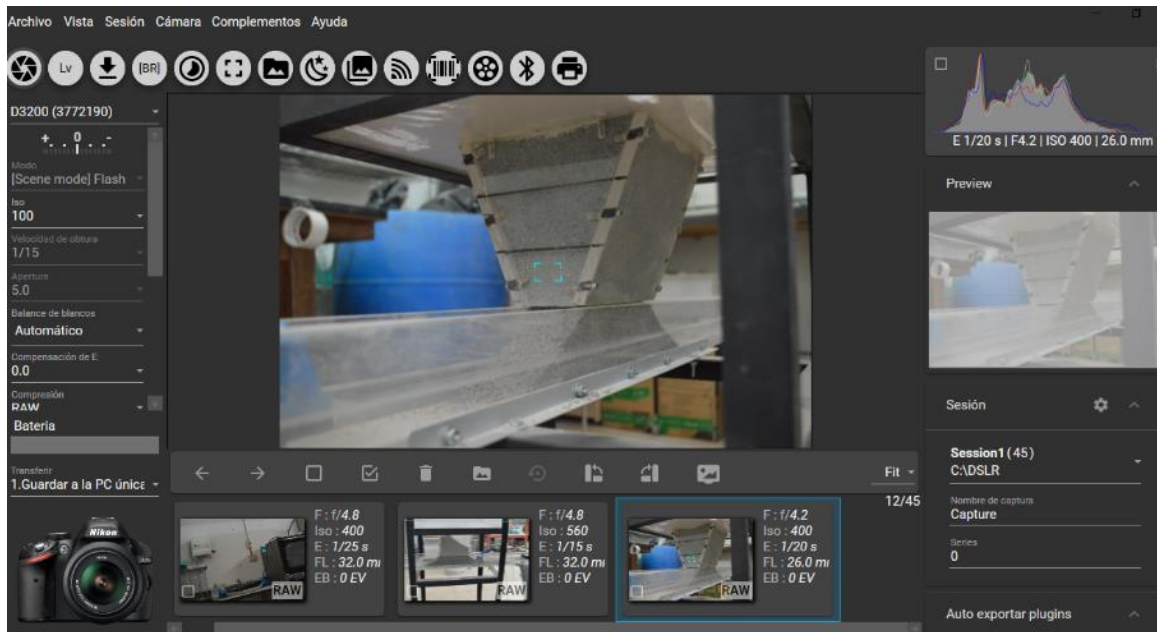


Fig. 4-5. Visualización de DIGICAM CONTROL.

En la esquina superior izquierda se logra observar las funciones que se puede utilizar, siendo una llamada Lv (live) encargado de visualizar en tiempo real lo que logra ver la cámara y así poder calibrar y dejar la cámara fotográfica en la mejor posición y ángulo, para que posterior tome las capturas fotográficas necesarias para el experimento. En la parte inferior se logran visualizar las fotografías tomadas con anterioridad y en la parte del centro se logra ver la imagen seleccionada de forma más ampliada. Y en la esquina inferior derecha se logra obtener información sobre la carpeta en donde irán guardadas todas las imágenes tomadas por la cámara fotográfica.

Capítulo 5. Análisis de resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos sobre el funcionamiento del sistema de extracción junto con el análisis de la migración del material fino con los distintos tamaños del material grueso, aplicando los métodos descritos con anterioridad en el desarrollo experimental.

5.2. Montaje experimental

Además del sistema de extracción y el montaje del sistema de captura de imágenes, se requirió del montaje de un sistema encargado de la separación de los materiales gruesos y finos, para posteriormente pesarlos e ingresar los resultados en la base de datos. Se utilizó un tamizador para la separación entre los materiales gruesos y finos (Fig. (a)), que separan el material durante el experimento, y de una pesa digital para la obtención de los datos sobre el pesaje de cada uno de los materiales (Fig. (b)).



(a)



(b)

Fig. 5-1. Montaje experimental. a) Tamizador. b) Pesa digital.

5.3. Primeras pruebas

Para las primeras pruebas se realizaron las extracciones de los materiales gruesos con sus distintos niveles de tamaños, para así poder obtener información sobre cómo se comporta el sistema de extracción en los distintos casos.

Se desarrolló un proceso de extracción de materiales en los distintos casos existentes (grava, adocreto y arena). El sistema de extracción se comportó de manera normal para los casos que se extrajo minerales de tipo adocreto y arena, siendo estos los de tamaño medio y pequeño respectivamente. Para el caso de la grava, siendo este de un tamaño de 2 – 4.75 mm, el sistema de extracción tuvo una serie de inconvenientes, debido a que el sistema de extracción se desarrolló con componentes de bajo costo, la pala al ser construida con plástico no le permitió penetrar o deslizarse a través de la grava con facilidad, tal como lo podría realizar una pala metálica. Otro factor que influyó fue en el peso de la base, a pesar de haber agregado una cierta cantidad de peso en la base del sistema, este no logró con el objetivo de que la pala pudiese penetrar en la zona de extracción con mayor fuerza, y el agregar más peso a la base del sistema se descartó por el hecho de no dañar el servomotor que se encargaba del movimiento del sistema de engranajes. Por estos motivos, los experimentos con la grava se descartaron de este proyecto, quedando así los materiales de adocreto y arena para poder desarrollar los estudios de la migración de finos y tener una comparación de cómo se comporta el material fino en cada uno de ellos.

5.4. Pruebas con adocreto

A continuación, se describirán y visualizarán los debidos procedimientos para la obtención de datos experimentales sobre la migración de material fino en el adocreto.

Se utiliza material fino el cual se dispondrá sobre el material grueso de adocreto. También comentar que este material fino obtenido de igual manera se utilizará para el caso de la migración de material fino en la arena.

En la figura 5-2 se logra apreciar los distintos tipos de materiales que se utilizaron en el caso de la migración de material fino en el adocreto. Tener en consideración que la cantidad de material utilizado fue distribuido en 2.9 kg de adocreto (cantidad necesaria para llenar la zona inferior del contenedor) y 2.9 kg de polvo. En la figura 5-3 se visualiza la distribución de los dos materiales en el contenedor. Y en la figura 5-4 se observa el montaje del sistema de procesamiento de imágenes.



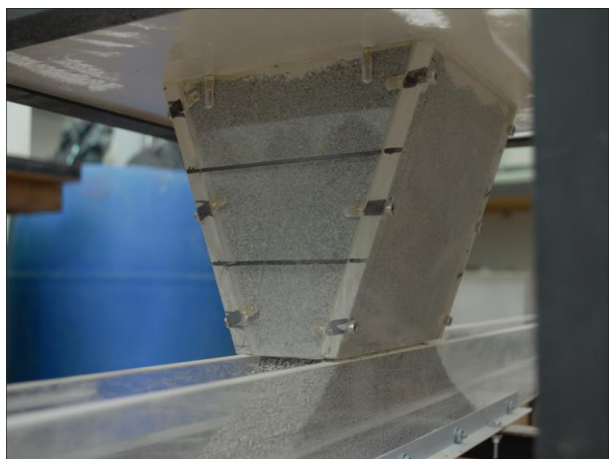
Fig. 5-2. Adocreto y polvo a utilizar.



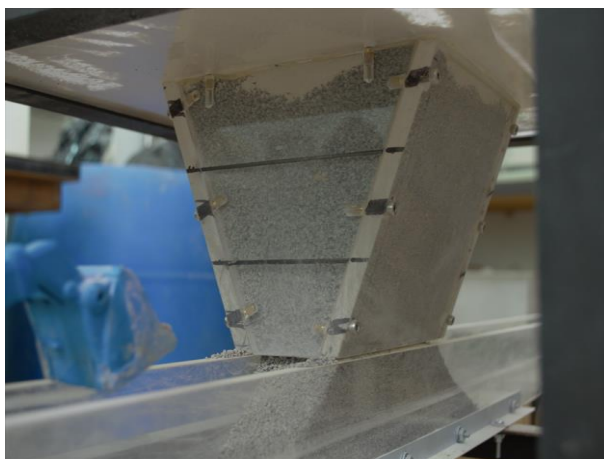
Fig. 5-3. Distribución de polvo sobre el adocreto.



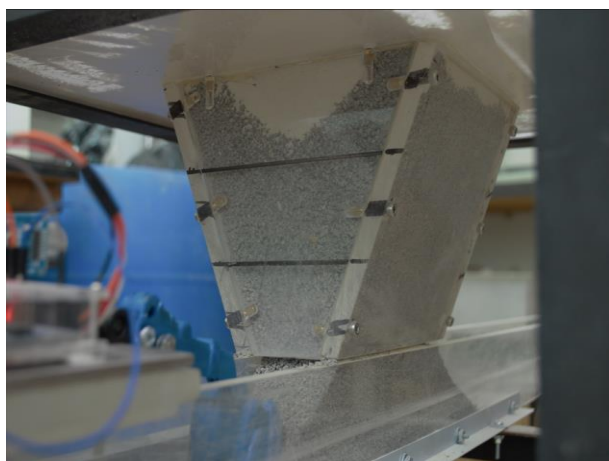
Fig. 5-4. Montaje de sistema de captura de imágenes en pruebas de adocreto.



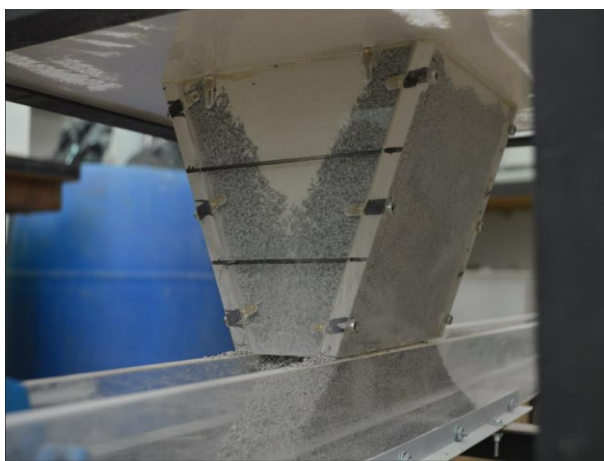
(a)



(b)

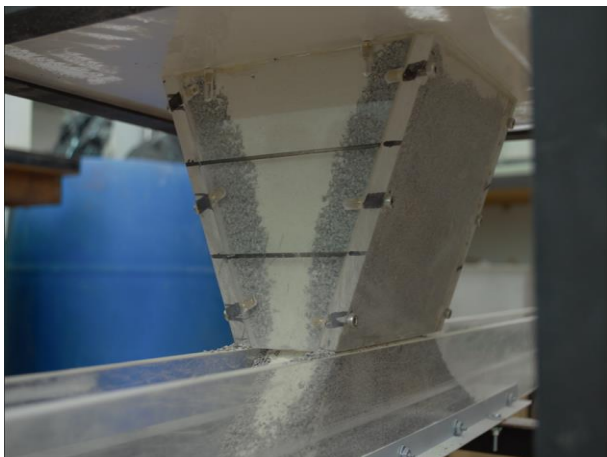


(c)

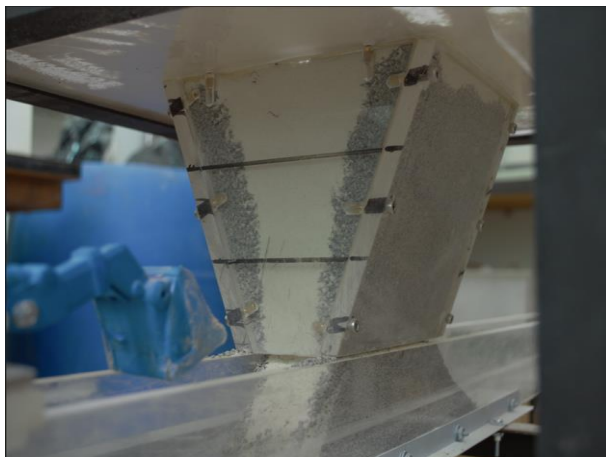


(d)

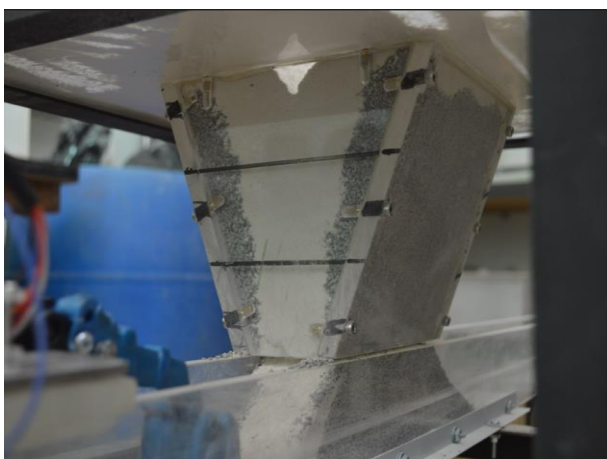
Fig. 5-5. Capturas de imágenes. a) Inicial. b) 5 min. c) 10 min. d) 15 min. Mostrando el ingreso del material fino (blanco).



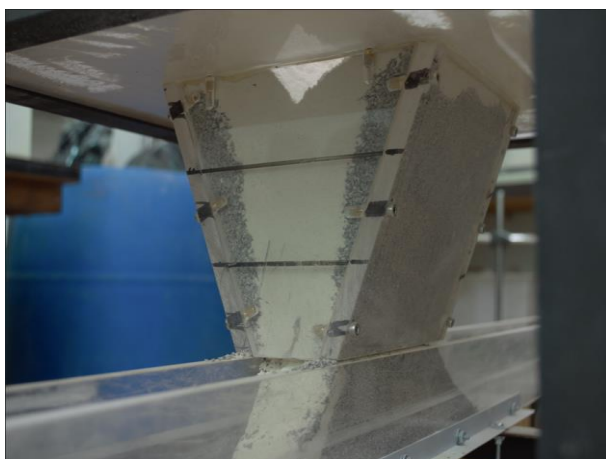
(a)



(b)

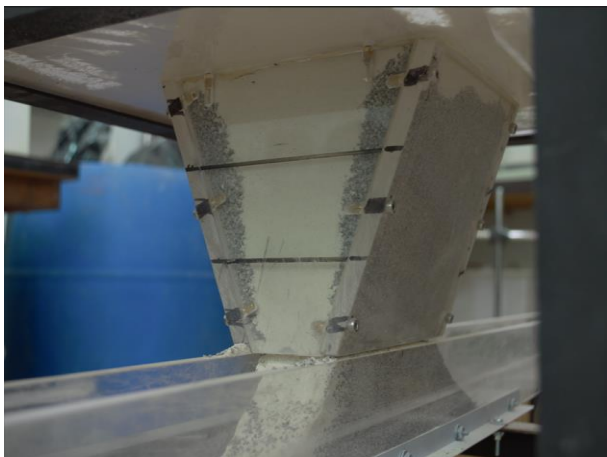


(c)

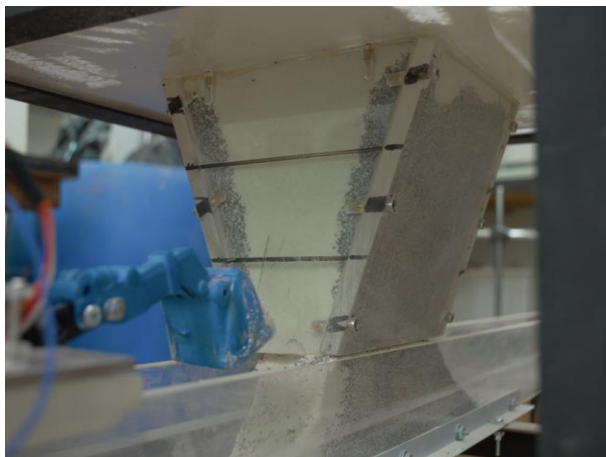


(d)

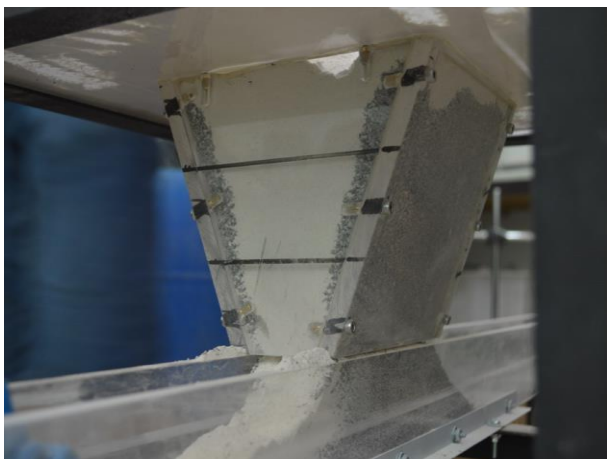
Fig. 5-6. Capturas de imágenes. a) 20 min. b) 25 min. c) 30 min. d) 35 min.



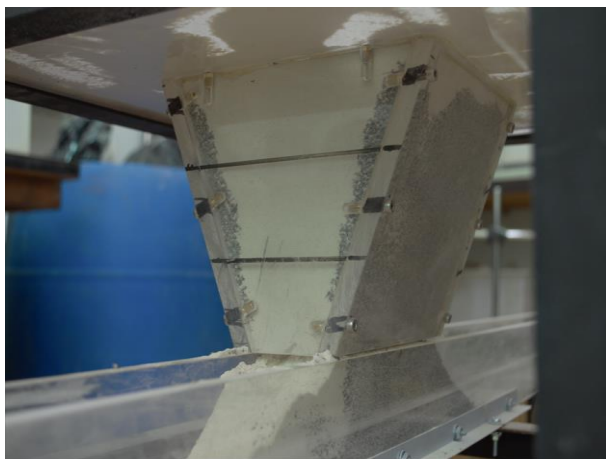
(a)



(b)

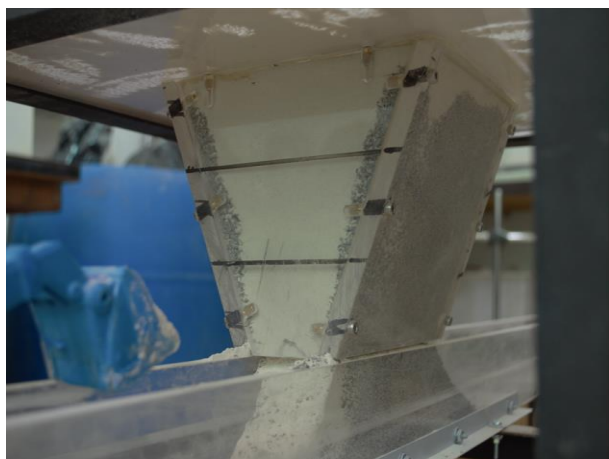


(c)

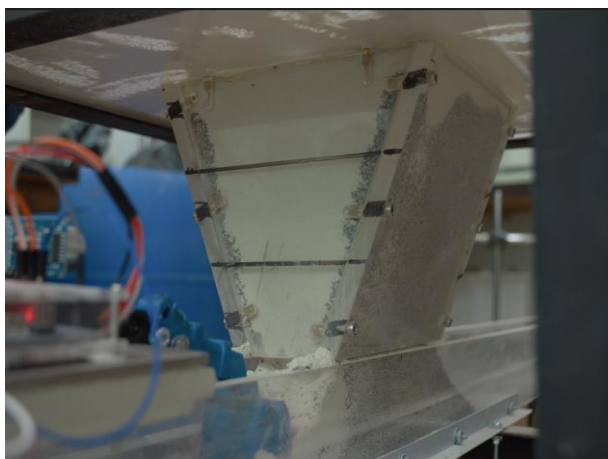


(d)

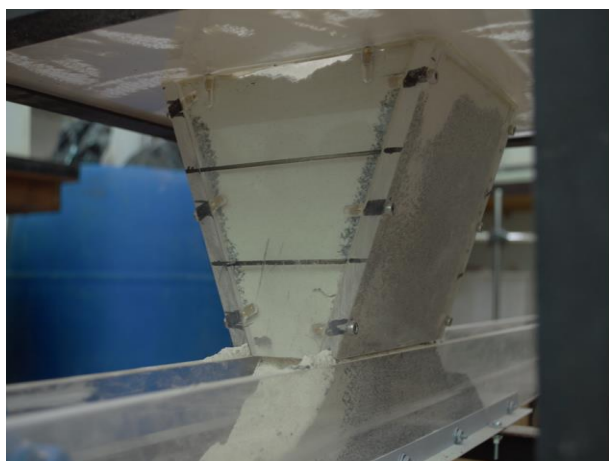
Fig. 5-7. Capturas de imágenes. a) 40 min. b) 45 min. c) 50 min. c) 55 min.



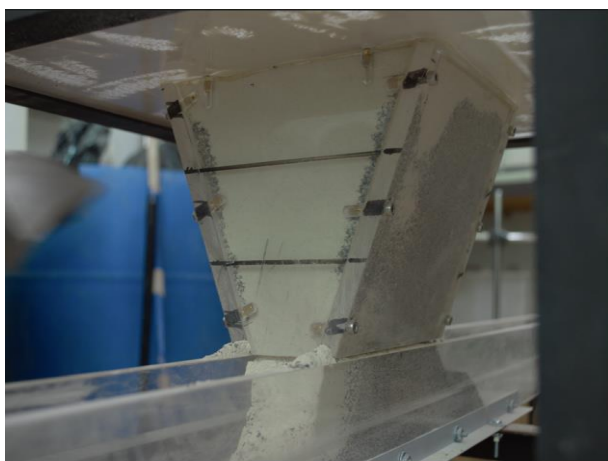
(a)



(b)

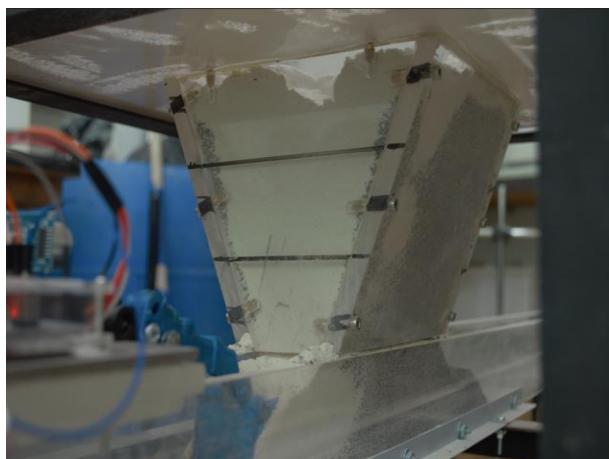


(c)

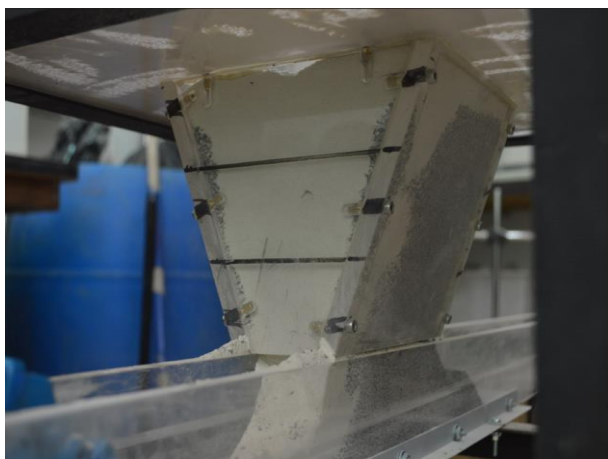


(d)

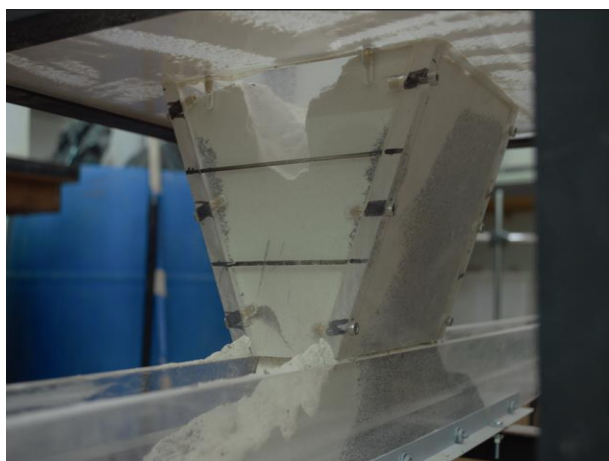
Fig. 5-8. Capturas de imágenes. a) 60 min. b) 65 min. c) 70 min. d) 75 min.



(a)



(b)

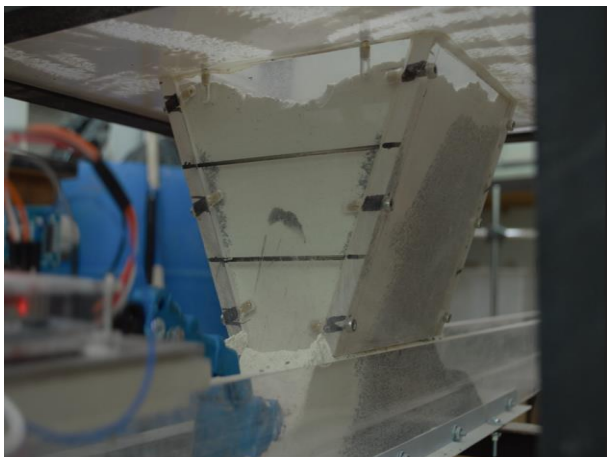


(c)

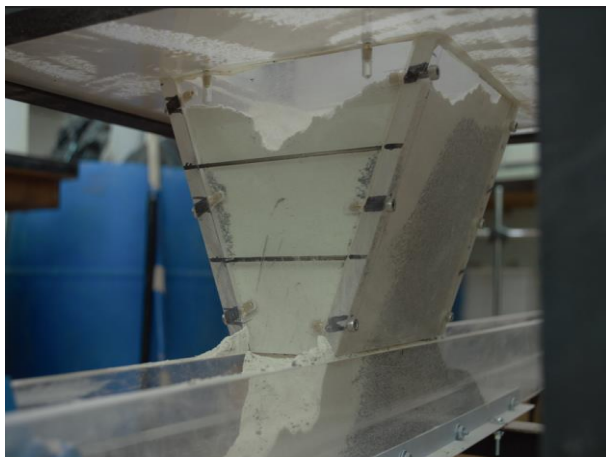


(d)

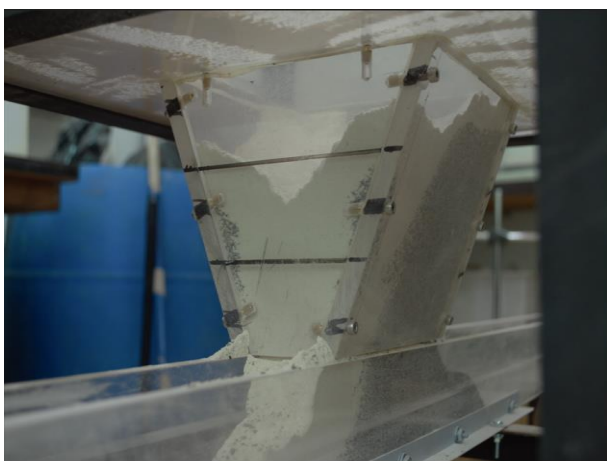
Fig. 5-9. Captura de imágenes. a) 80 min. b) 85 min. c) 90 min. d) 95 min.



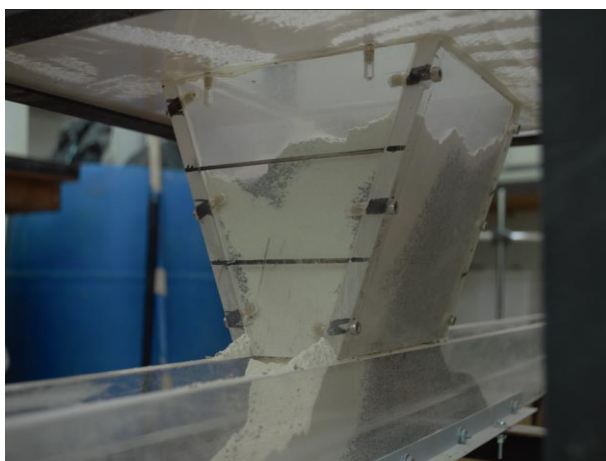
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5-10. Captura de imágenes. a) 100 min. b) 105 min. c) 110 min. d) 115 min.

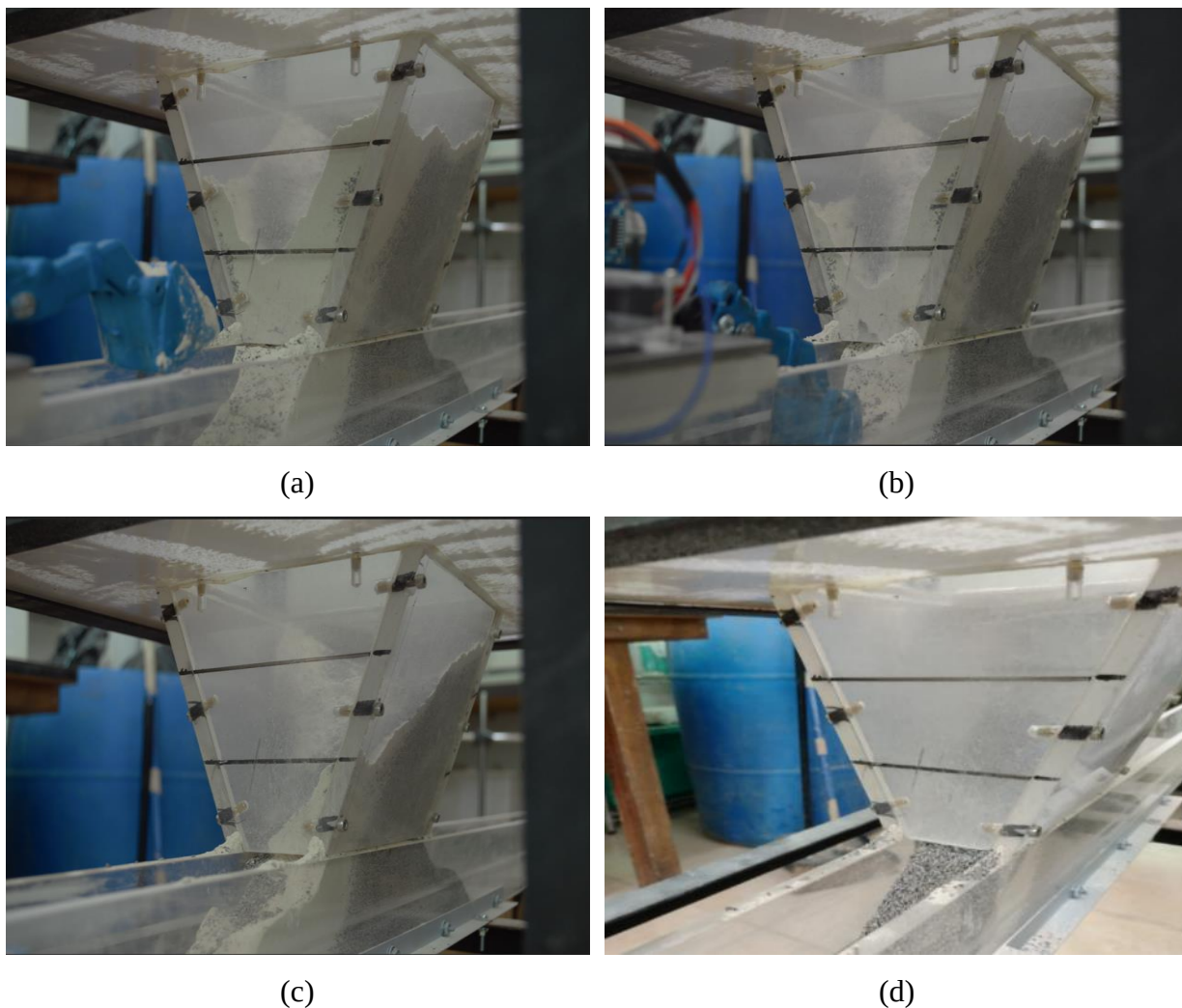


Fig. 5-11. Capturas de imágenes. a) 120 min. b) 125 min. c) 130 min. d) 145 min.

En las capturas de imágenes se puede observar la migración del material fino en el caso del adocreto. En los primeros 15 minutos se logra apreciar como el material fino migra rápidamente a través del adocreto mientras se realiza el proceso de extracción a través del sistema de extracción de sólidos. Tener en cuenta que aproximadamente se demora entre 35 – 40 segundos en efectuarse una extracción de material. Ya al pasar los 20 minutos el material fino migra por completo llegando a la zona de extracción, provocando que desde ese momento la mayor cantidad de material extraído será de material fino que de material grueso. Desde ese momento comenzó a tener porcentajes de dilución del material grueso (retrasar la llegada del material grueso hacia la zona de extracción). En las vistas laterales se puede observar otro perfil sobre como migra este tipo de material, indicando la cantidad de extracciones que se han llevado a cabo. Para estos experimentos se realizaron en total 250 extracciones, provocando el sacado de casi por completo de materiales en un tiempo aproximado de

145 minutos (2 horas y 25 minutos). En la tabla 5-1 se pueden observar en mayor detalle los valores obtenidos de la cantidad de extracciones, la masa extraída entre material grueso y fino, la masa total extraída en al finalizar el experimento en las 250 extracciones, el porcentaje de dilución, entre otros.

Tabla 5-1. Cantidad de extracción adocreto.

Extracción	Masa grueso (g)	Masa acumulada grueso (g)	Masa fino (g)	Masa fino acumulada (g)	Masa total (g)	Masa total acumulada (g)	Dilución
10	141,53	141,53	0	0	141,53	141,53	0%
20	118,55	260,08	0	0	118,55	283,06	0%
30	127,6	387,68	1,87	1,87	129,47	401,61	1%
40	96,15	483,83	28,71	30,58	124,86	531,08	23%
50	60,27	544,1	51,24	81,82	111,51	655,94	46%
60	40,09	584,19	60,05	141,87	100,14	767,45	60%
70	48,37	632,56	62,22	204,09	110,59	867,59	56%
80	69,12	701,68	109,24	313,33	178,36	978,18	61%
90	55,57	757,25	143,99	457,32	199,56	1156,54	72%
100	51,8	809,05	128,74	586,06	180,54	1356,1	71%
110	42,55	851,6	122,61	708,67	165,16	1536,64	74%
120	42,4	894	137,22	845,89	179,62	1701,8	76%
130	43,73	937,73	117,28	963,17	161,01	1881,42	73%
140	51,98	989,71	154,02	1117,19	206	2042,43	75%
150	39,23	1028,94	158,74	1275,93	197,97	2248,43	80%
160	33,91	1062,85	181,02	1456,95	214,93	2446,4	84%
170	18,75	1081,6	209,15	1666,1	227,9	2661,33	92%
180	27,75	1109,35	159,39	1825,49	187,14	2889,23	85%
190	44,99	1154,34	156,66	1982,15	201,65	3076,37	78%
200	43,92	1198,26	150,07	2132,22	193,99	3278,02	77%
210	114,8	1313,06	168,1	2300,32	282,9	3472,01	59%
220	103,05	1416,11	104,46	2404,78	207,51	3754,91	50%
230	187,13	1603,24	76,47	2481,25	263,6	3962,42	29%
240	174,77	1778,01	47,96	2529,21	222,73	4226,02	22%
250	177,76	1955,77	23,2	2552,41	200,96	4448,75	12%
Promedio	78,2308		102,0964		180,3272		

Con respecto a la tabla anterior (Tabla 5-1) se obtuvo información relevante del experimento de la migración de material fino en el caso del adocreto. A continuación, se lograrán visualizar los gráficos con la información que tienen mayor relevancia para la interpretación de los datos. Para el caso de la gráfica de material grueso v/s material fino (Fig. 5-12) se pueden observar las cantidades de material extraído por parte del adocreto y del polvo. En el eje Y se encuentra la masa total acumulada y en el eje X se encuentra las cantidades de extracciones realizadas. Se logra apreciar que ya en las 30 extracciones comienza aparecer datos del material fino, lo que se deduce que en esos instantes el polvo migró a través del adocreto hasta llegar a la zona de extracción de materiales (después de los 20 min del experimento). Luego de ello el material fino aumenta siendo directamente proporcional a la cantidad de extracciones realizadas, ya desde las 130 extracciones se observa que la masa acumulada del material fino supera a la del material grueso, siendo así hasta el final del experimento provocando un mayor porcentaje de dilución. En la gráfica de la dilución del material grueso (Fig. 5-13) se observa los porcentajes de dilución provocados por la migración del material fino. Lógicamente se obtiene los primeros porcentajes de dilución cuando se arrojan los primeros datos de la masa del polvo, logrando obtener un porcentaje máximo de 92% de dilución cuando se realizaba las 170 extracciones, este dato también es observable en la tabla donde en ese punto se obtuvo una masa de 18,75 gramos de material grueso y 209,15 gramos de material fino extraídos.

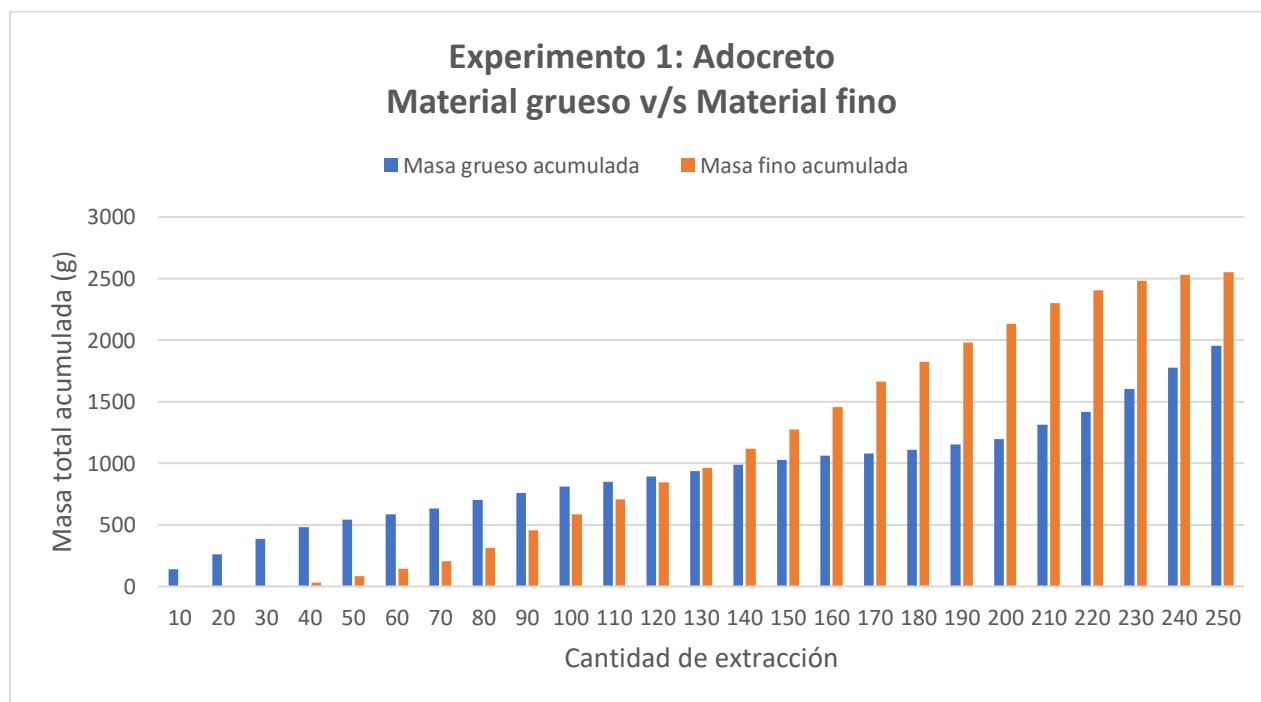


Fig. 5-12. Gráfico adocreto - material grueso v/s material fino.

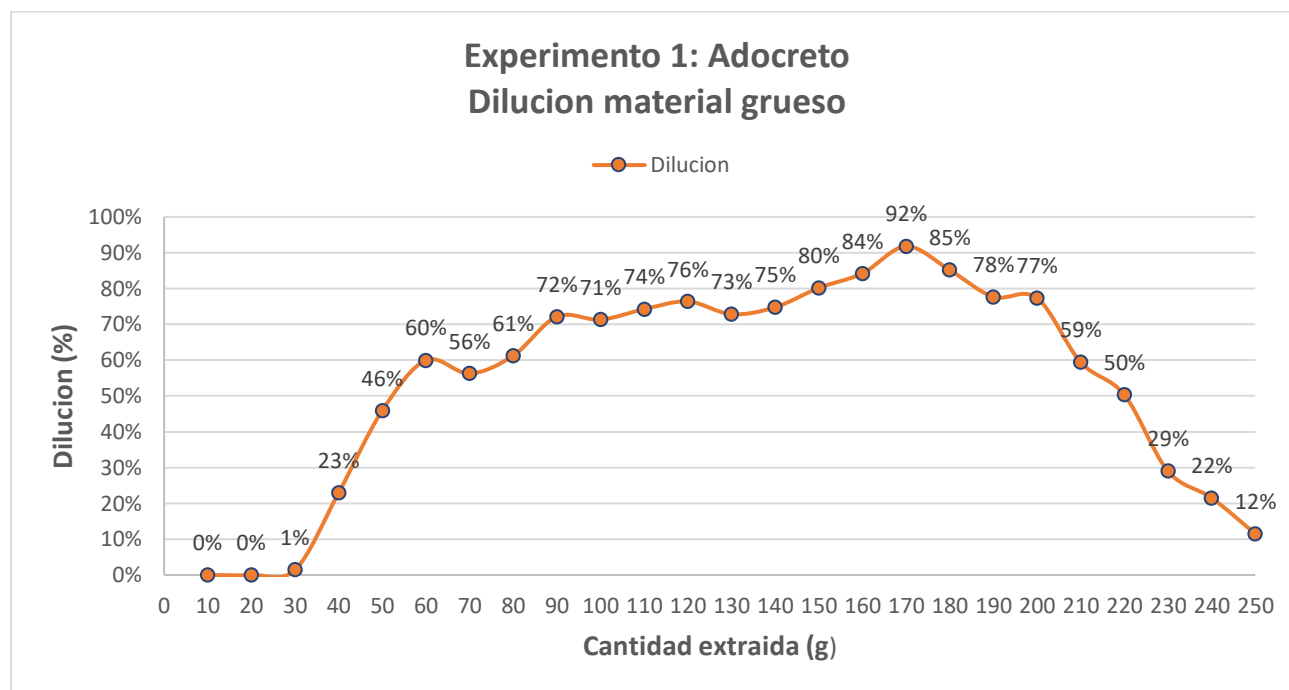


Fig. 5-13. Gráfico adocreto - dilución material grueso.

5.5. Pruebas con arena

A continuación, se describirán y visualizarán los debidos procedimientos para la obtención de datos experimentales sobre la migración de material fino en la arena.

En la figura. 5-14 se logra apreciar el tipo de material que se utilizó en el caso de la migración de material fino en la arena. Tener en consideración que la cantidad de material utilizado fue distribuido en 3.9 kg de arena (cantidad necesaria para llenar la zona inferior del contenedor) y los mismos 2.9 kg de polvo. Y en la Figura 5-20 se visualiza la distribución de los dos materiales en el contenedor.



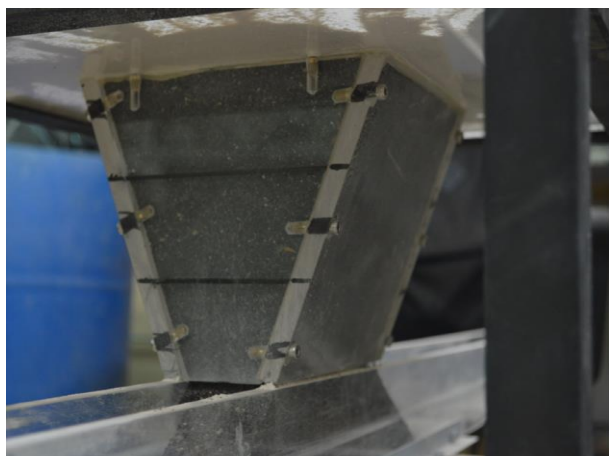
Fig. 5-14. Arena



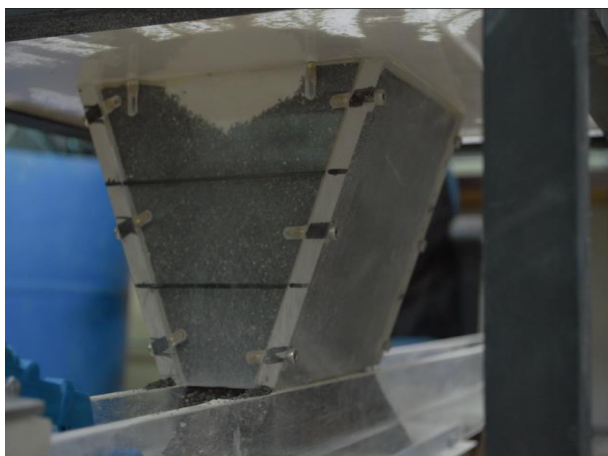
Fig. 5-15. Distribución de polvo sobre la arena.



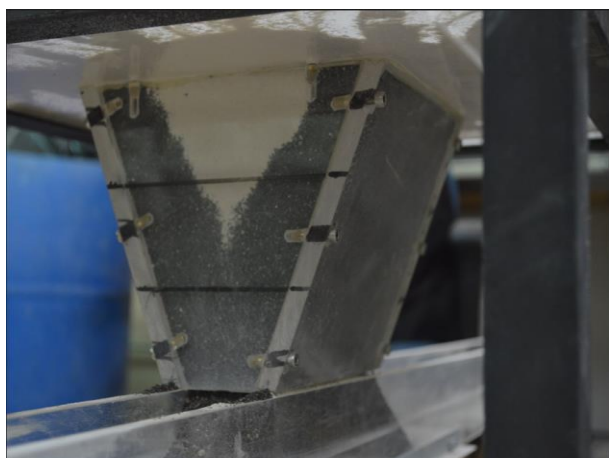
Fig. 5-16: Montaje de sistema de captura de imágenes en arena.



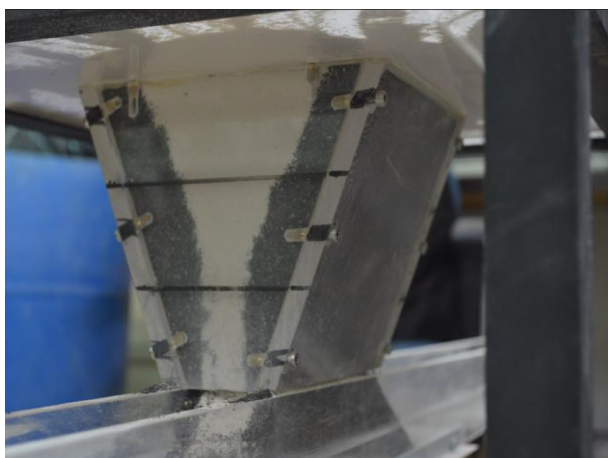
(a)



(b)

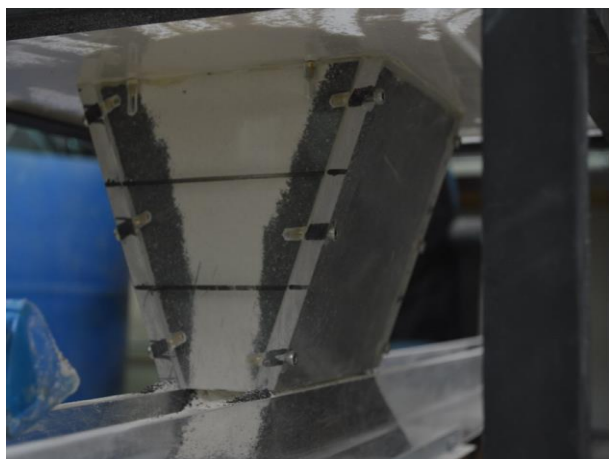


(c)

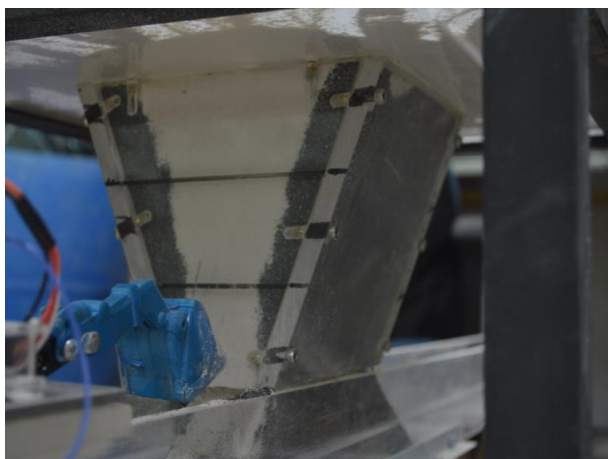


(d)

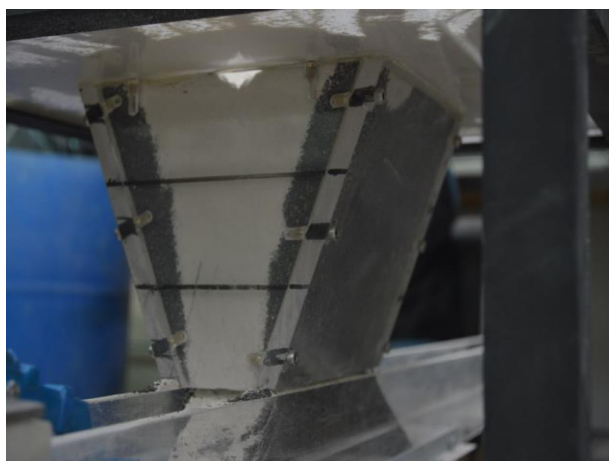
Fig. 5-17. Capturas de imágenes. a) Inicial. b) 5 min. c) 10 min. d) 15 min.



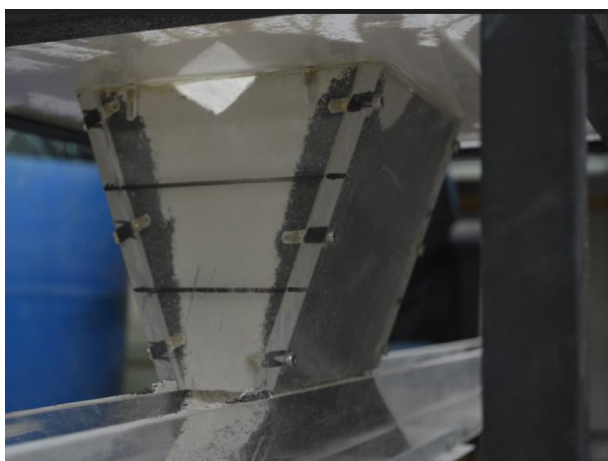
(a)



(b)

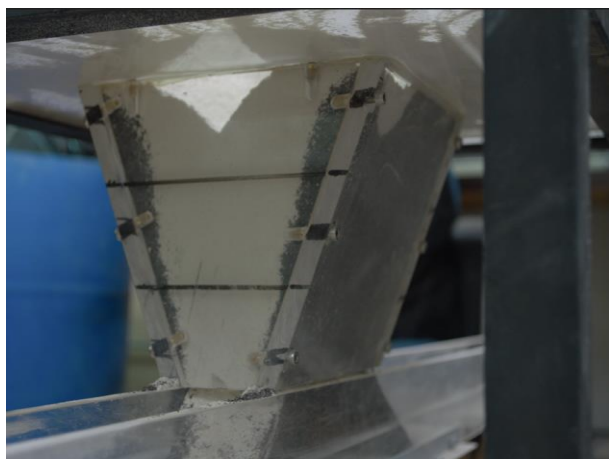


(c)

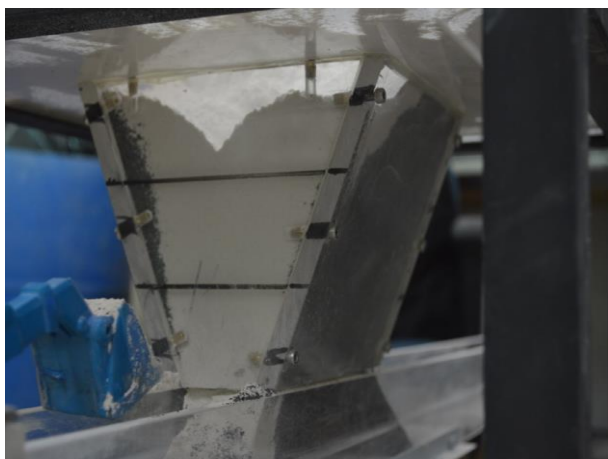


(d)

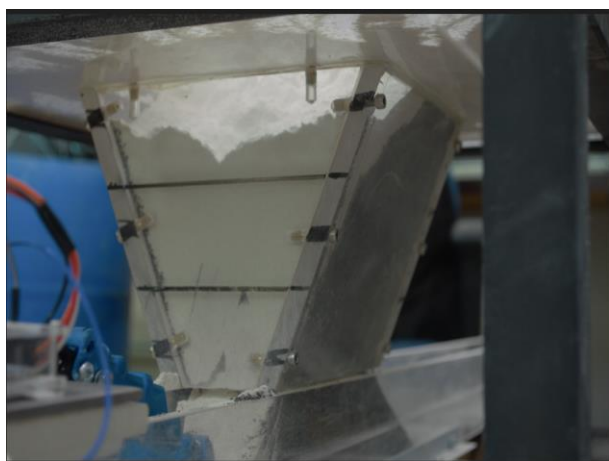
Fig. 5-18. Capturas de imágenes. a) 20 min. b) 25 min. c) 30 min. d) 35 min.



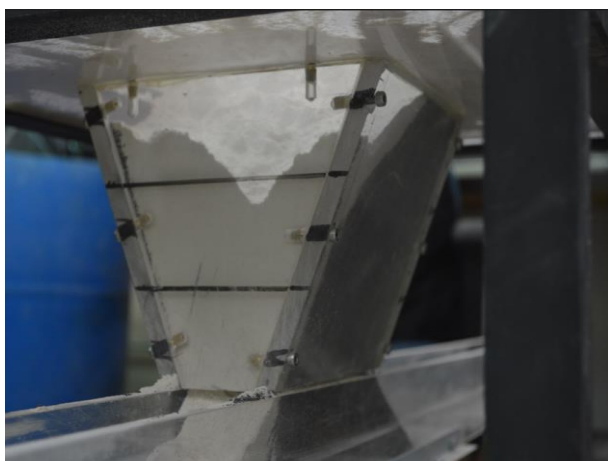
(a)



(b)

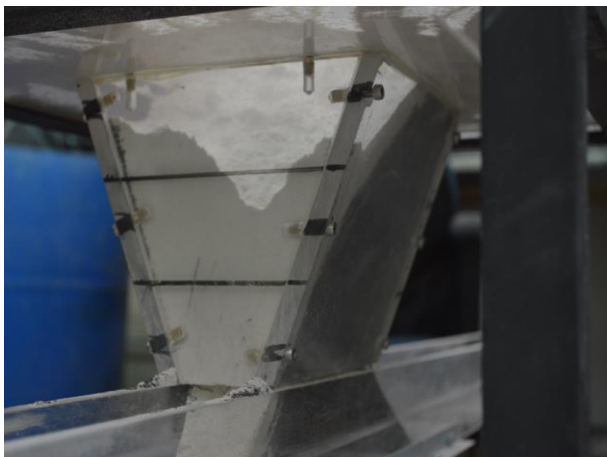


(c)

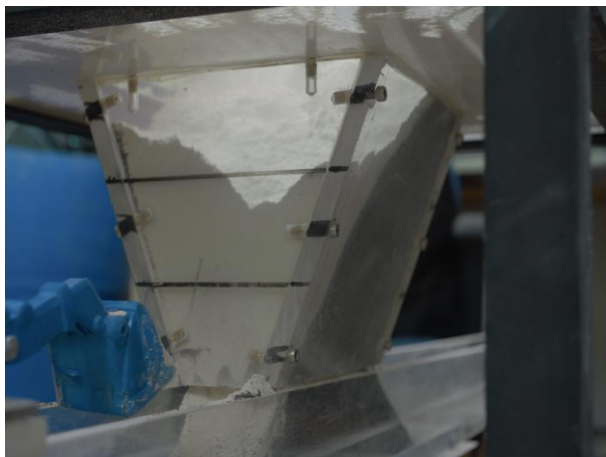


(d)

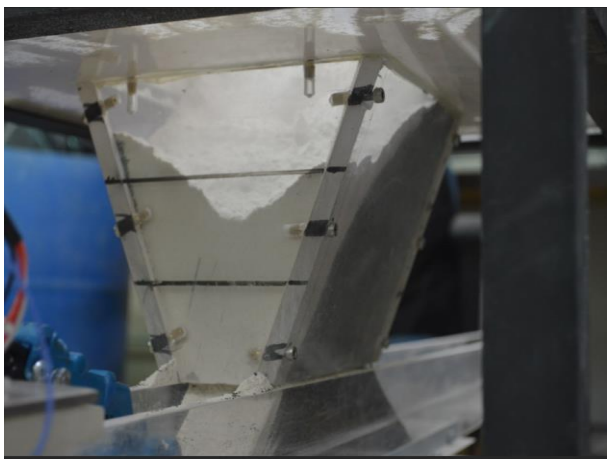
Fig. 5-19. Captura de imágenes. a) 40 min. b) 45 min. c) 50 min. d) 55 min.



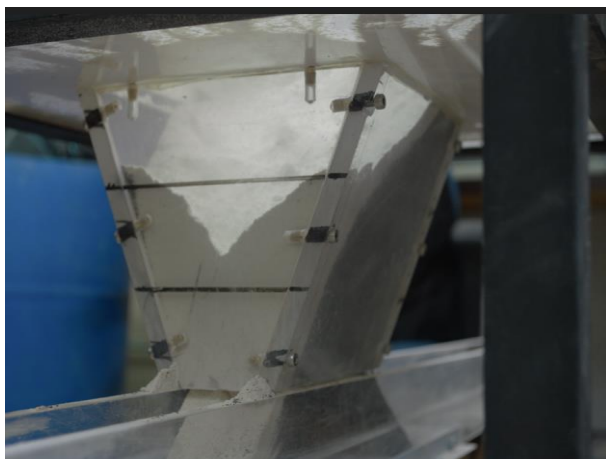
(a)



(b)

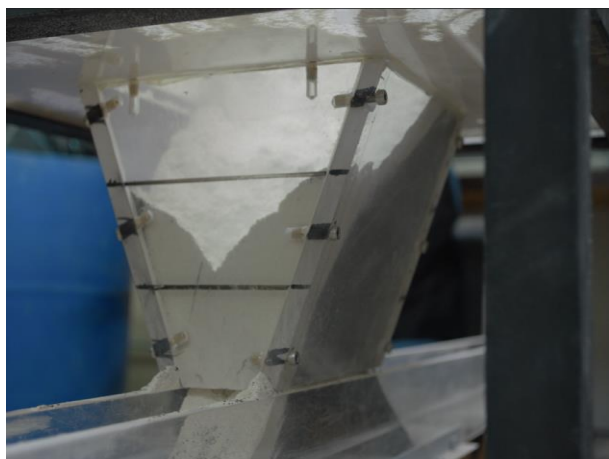


(c)

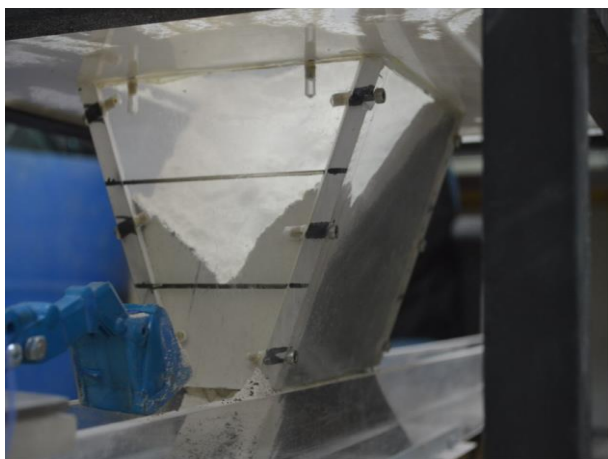


(d)

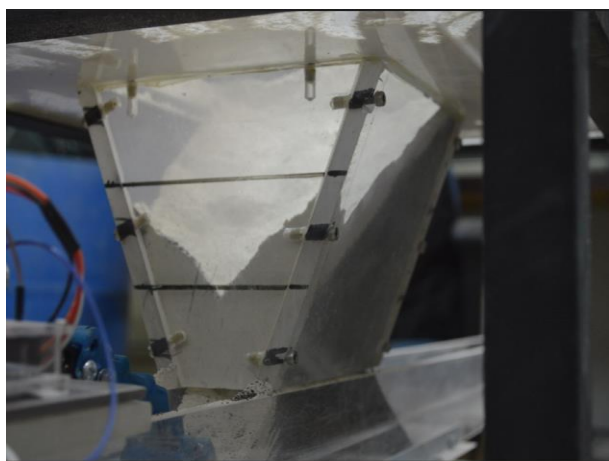
Fig. 5-20. Captura de imágenes. a) 60 min. b) 65 min. c) 70 min. d) 75 min.



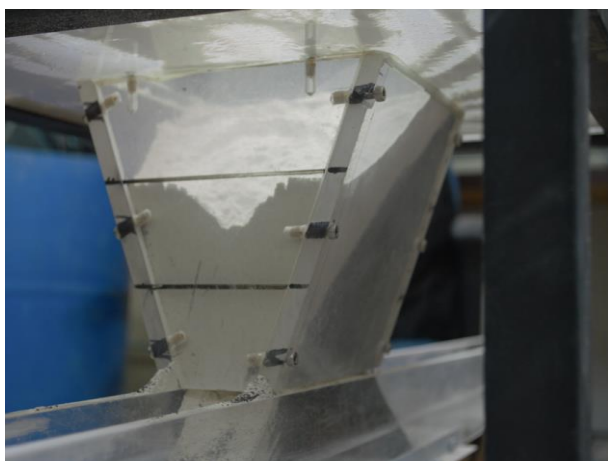
(a)



(b)

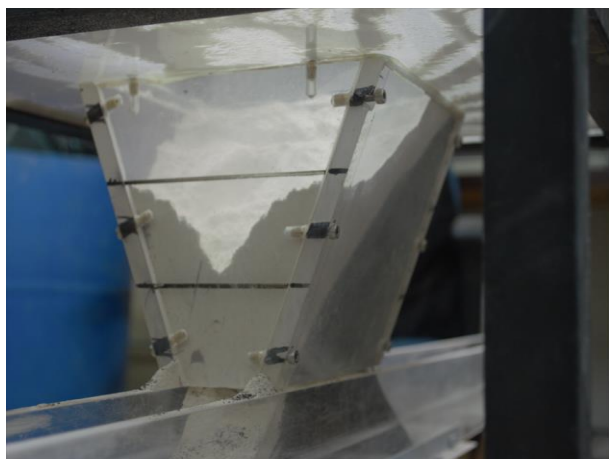


(c)

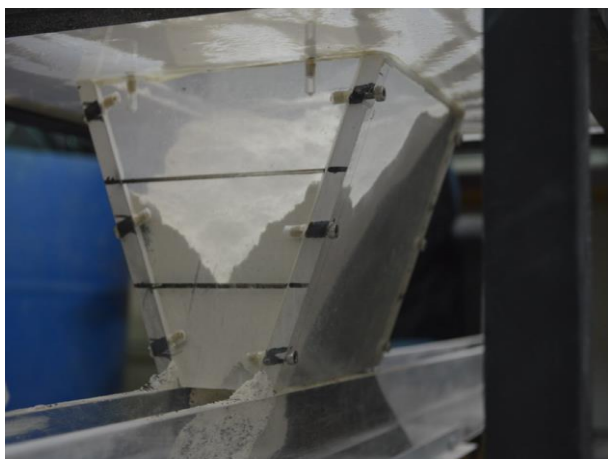


(d)

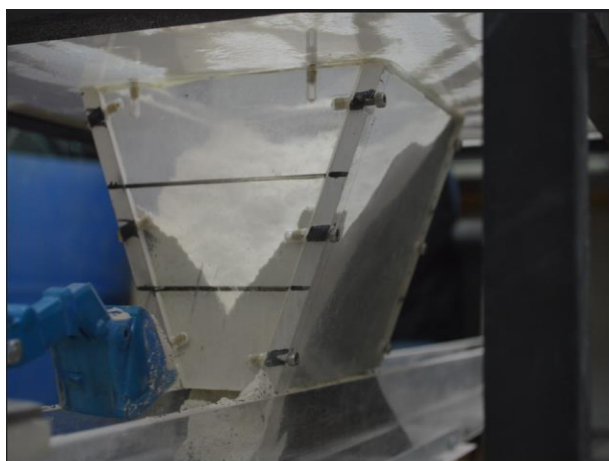
Fig. 5-21. Captura de imágenes. a) 80 min. b) 85 min. c) 90 min. d) 95 min.



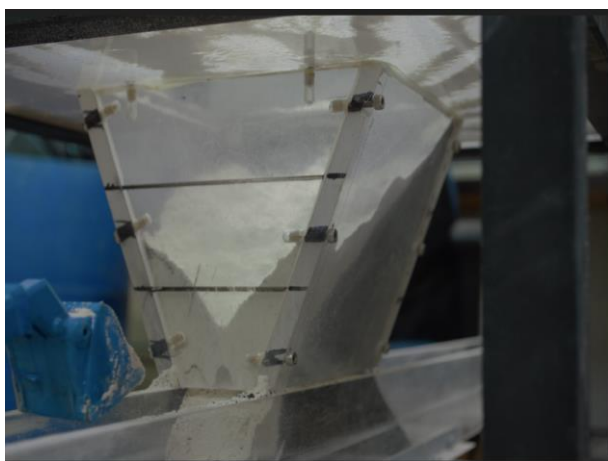
(a)



(b)

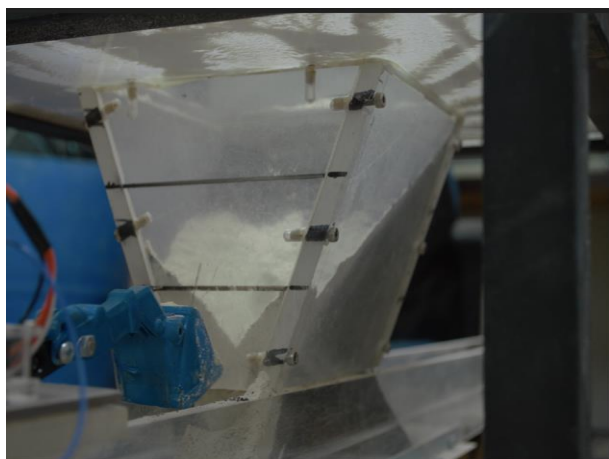


(c)

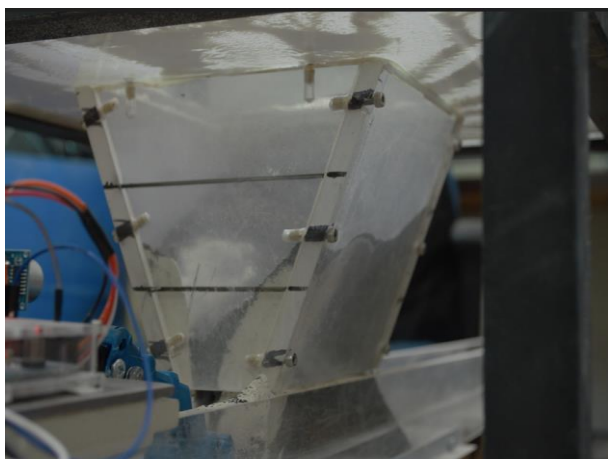


(d)

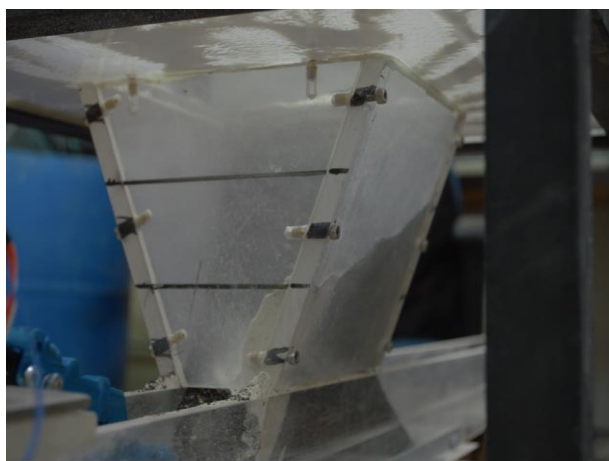
Fig. 5-22. Captura de imágenes. a) 100 min. b) 105 min. c) 110 min. d) 115 min.



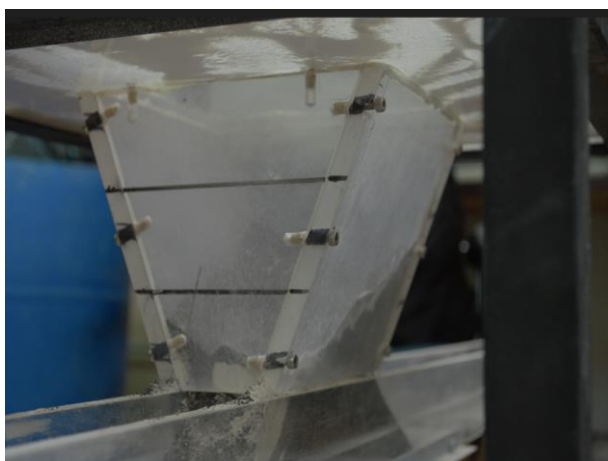
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5-23. Captura de imágenes. a) 120 min. b) 125 min. c) 130 min. d) 135 min.

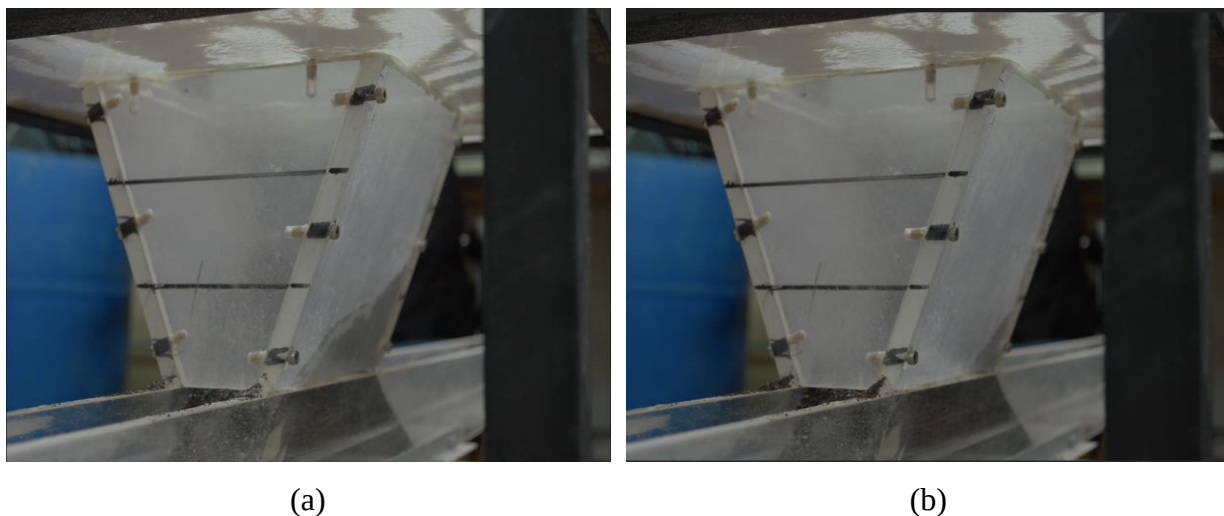


Fig. 5-24. Captura de imágenes. a) 140 min. b) 145 min.

En las capturas de imágenes se puede observar la migración del material fino en el caso de la arena. En los primeros 10 minutos se logra apreciar como el material fino migra rápidamente a través de la arena mientras se realiza el proceso de extracción a través del sistema de extracción de material granular. Ya al pasar los 15 minutos el material fino migra por completo llegando a la zona de extracción, provocando que desde ese momento la cantidad de material extraído será entre material fino que de material grueso. Desde ese momento se comenzó a tener porcentajes de dilución del material grueso. En las vistas laterales se puede observar otro perfil sobre como migra este tipo de material, indicando la cantidad de extracciones que se han llevado a cabo. Para estos experimentos se realizaron en total 250 extracciones al igual que en caso anterior, provocando el sacado de casi por completo de materiales en un tiempo aproximado de 145 minutos (2 horas y 25 minutos) trabajando de corrido. En la tabla 5-2 se pueden observar en mayor detalle los valores obtenidos de la cantidad de extracciones, la masa extraída entre material grueso y fino, la masa total extraída en al finalizar el experimento en las 250 extracciones, el porcentaje de dilución, entre otros.

Tabla 5-2. Cantidad de extracción arena.

Extracción	Masa grueso (g)	Masa acumulada grueso (g)	Masa fino (g)	Masa fino acumulada (g)	Masa total (g)	Masa total acumulada (g)	Dilución
10	297,34	297,34	0	0	297,34	297,34	0%
20	230,9	528,24	2,18	2,18	233,08	594,68	1%
30	211,43	739,67	29,26	31,44	240,69	827,76	12%
40	127,36	867,03	52,42	83,86	179,78	1068,45	29%
50	106,43	973,46	81,52	165,38	187,95	1248,23	43%
60	85,2	1058,66	86,88	252,26	172,08	1436,18	50%
70	75,86	1134,52	79,71	331,97	155,57	1608,26	51%
80	136,71	1271,23	119,48	451,45	256,19	1763,83	47%
90	58,45	1329,68	132,65	584,1	191,1	2020,02	69%
100	69,71	1399,39	128,22	712,32	197,93	2211,12	65%
110	79,81	1479,2	104,28	816,6	184,09	2409,05	57%
120	53,83	1533,03	149,27	965,87	203,1	2593,14	73%
130	81,35	1614,38	158,27	1124,14	239,62	2796,24	66%
140	104,93	1719,31	162,74	1286,88	267,67	3035,86	61%
150	134,35	1853,66	137,15	1424,03	271,5	3303,53	51%
160	121,16	1974,82	119,6	1543,63	240,76	3575,03	50%
170	73,66	2048,48	163,95	1707,58	237,61	3815,79	69%
180	61,01	2109,49	129,07	1836,65	190,08	4053,4	68%
190	74,74	2184,23	151,42	1988,07	226,16	4243,48	67%
200	92,01	2276,24	140,38	2128,45	232,39	4469,64	60%
210	168,15	2444,39	84,52	2212,97	252,67	4702,03	33%
220	153,88	2598,27	49,83	2262,8	203,71	4954,7	24%
230	263,4	2861,67	35,41	2298,21	298,81	5158,41	12%
240	302,95	3164,62	29,5	2327,71	332,45	5457,22	9%
250	236,12	3400,74	5,02	2332,73	241,14	5789,67	2%
Promedio	136,0296		93,3092		229,3388		

Con respecto a la tabla anterior (Tabla 5-2) se obtuvo información relevante del experimento de la migración de material fino en el caso de la arena. A continuación, se lograrán visualizar los gráficos con la información que tienen mayor relevancia para la interpretación de los datos. Para el caso de la gráfica de material grueso v/s material fino (Fig. 5-25) se pueden observar las cantidades de material extraído por parte de la arena y del polvo. En el eje Y se encuentra la masa total acumulada y en el eje X se encuentra las cantidades de extracciones realizadas. Se logra apreciar que ya en las 20 extracciones comienza aparecer datos del material fino, lo que se deduce que en esos instantes el polvo migró a través de la arena hasta llegar a la zona de extracción de materiales (después de los 15 min del experimento). Luego de ello el material fino aumenta siendo directamente proporcional a la cantidad de extracciones realizadas siendo así hasta el final del experimento provocando porcentajes de dilución, en este caso no hubo instantes en que la masa acumulada del material fino superara a la masa acumulada del material grueso. En la gráfica de la dilución del material grueso (Fig. 5-26) se observa los porcentajes de dilución provocados por la migración del material fino. Lógicamente se obtiene los primeros porcentajes de dilución cuando se arrojan los primeros datos de la masa del polvo, hubo variabilidad de dilución en este caso, logrando obtener un porcentaje máximo de 73% de dilución cuando se realizaba las 120 extracciones, este dato también es observable en la tabla donde en ese punto se obtuvo una masa de 53,83 gramos de material grueso y 149,27 gramos de material fino extraídos. Y disminuyendo el porcentaje hasta un 2% al finalizar el experimento.

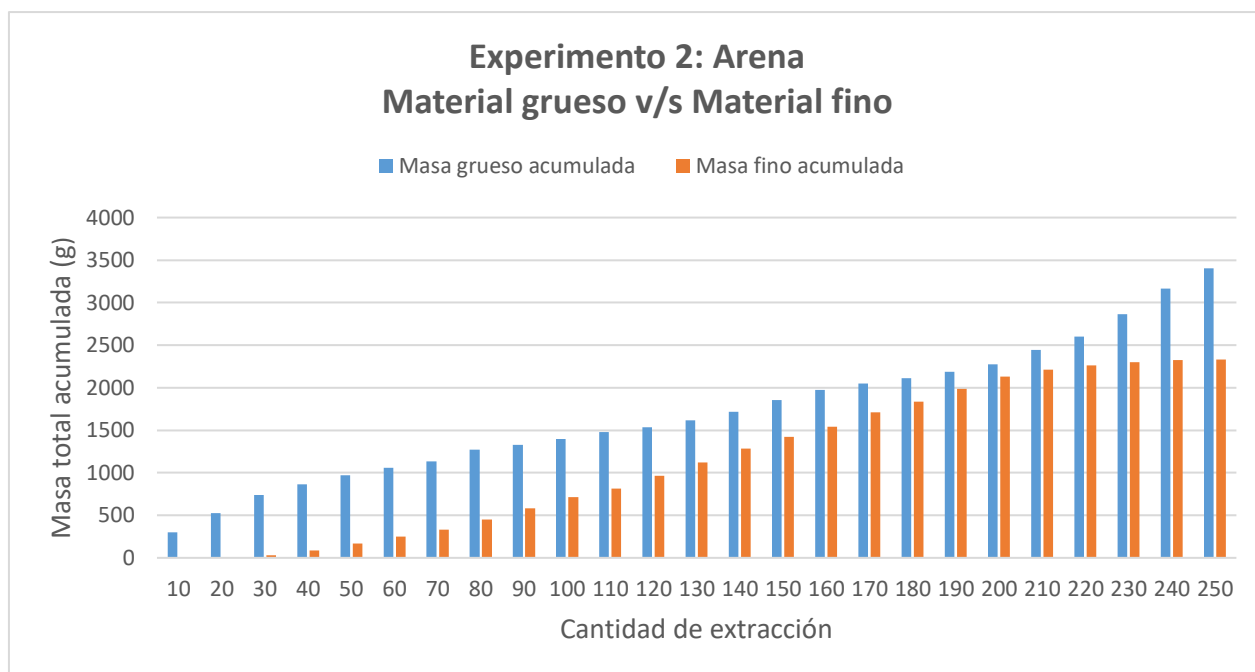


Fig. 5-25. Grafica arena - material grueso v/s material fino.

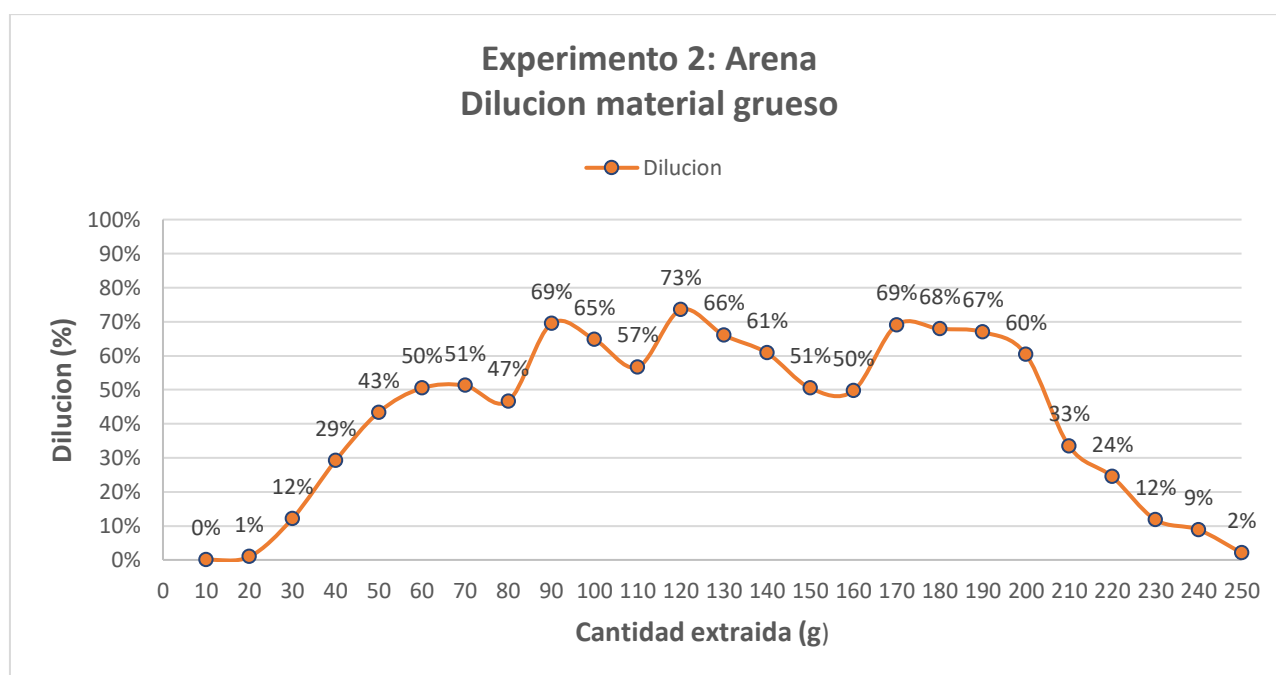


Fig. 5-26. Grafica arena – dilución material grueso.

5.6. Comparación adocreto vs arena

A continuación, en las figuras 5-27 al 5-29 se lograrán visualizar las gráficas comparativas entre los experimentos del adocreto y la arena, mostrando como varían los resultados obtenidos con las cantidades extraídas del material fino, grueso y, sobre cómo se comportó la dilución en cada uno de ellos.

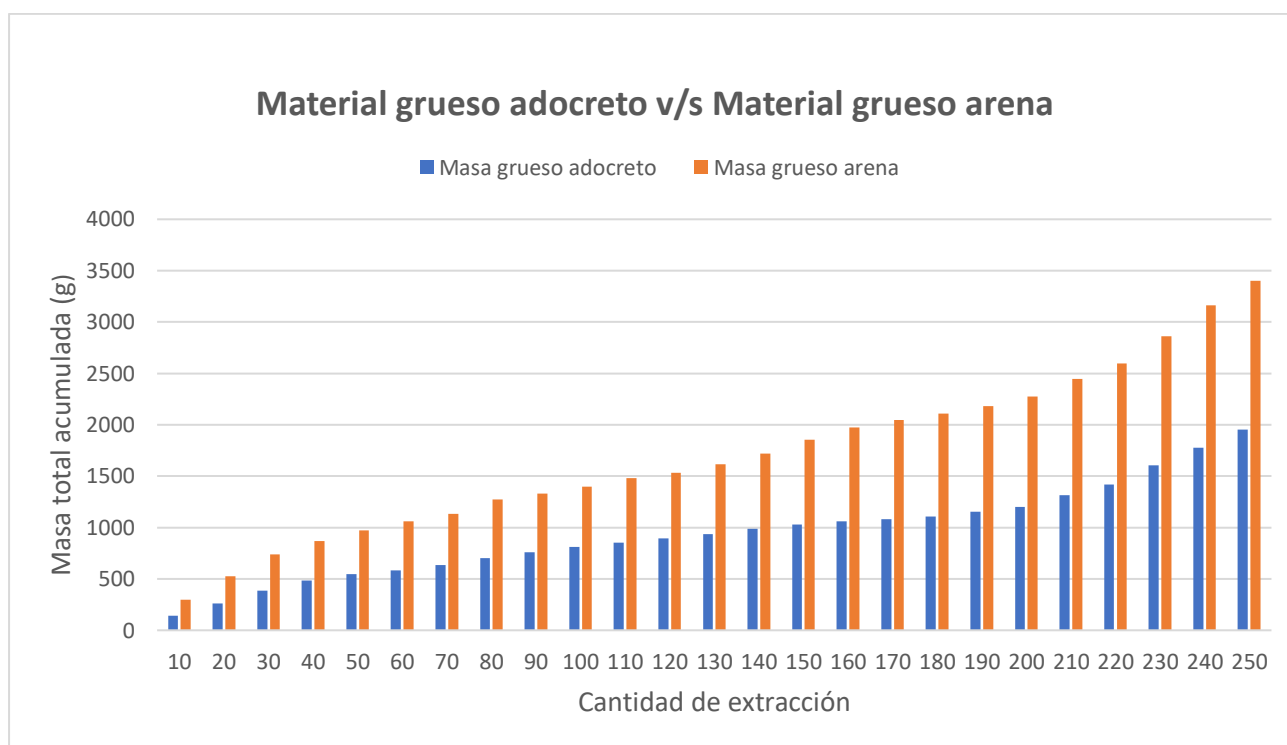


Fig. 5-27. Grafica adocreto v/s arena – material grueso

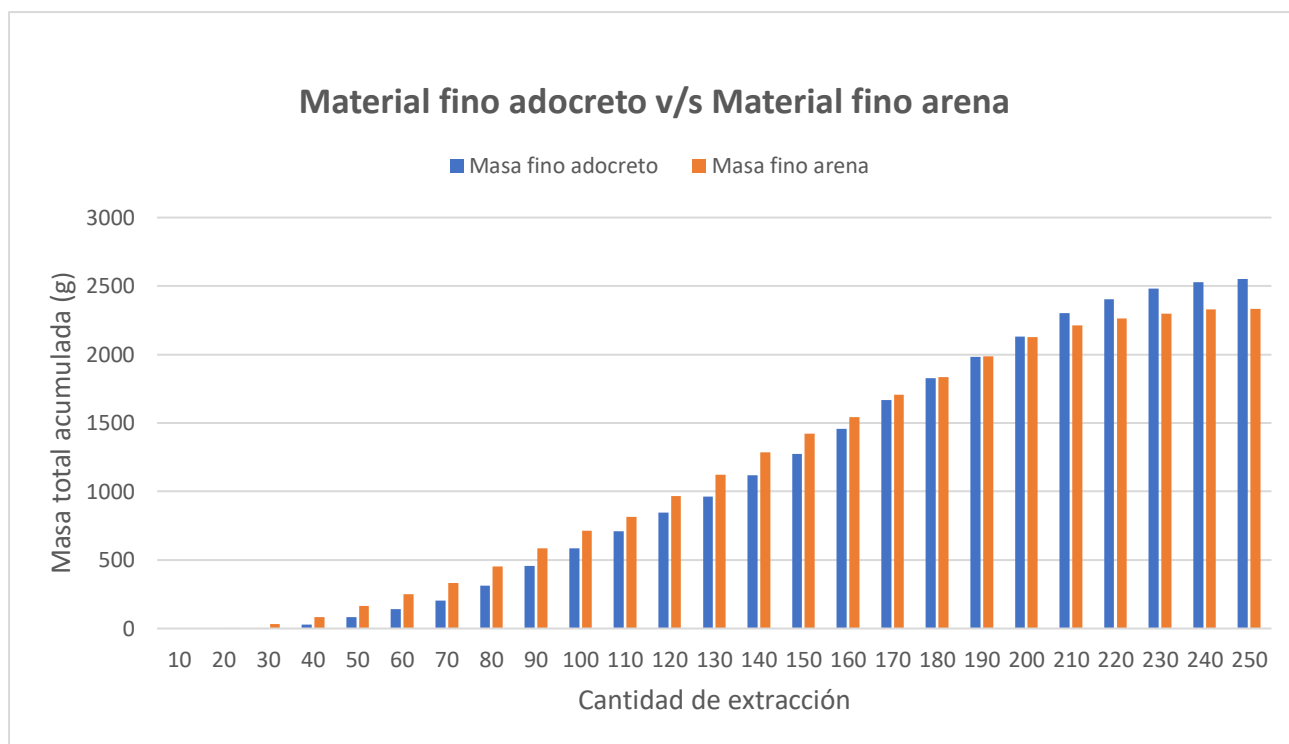


Fig. 5-28. Grafica adocreto v/s arena – material fino.

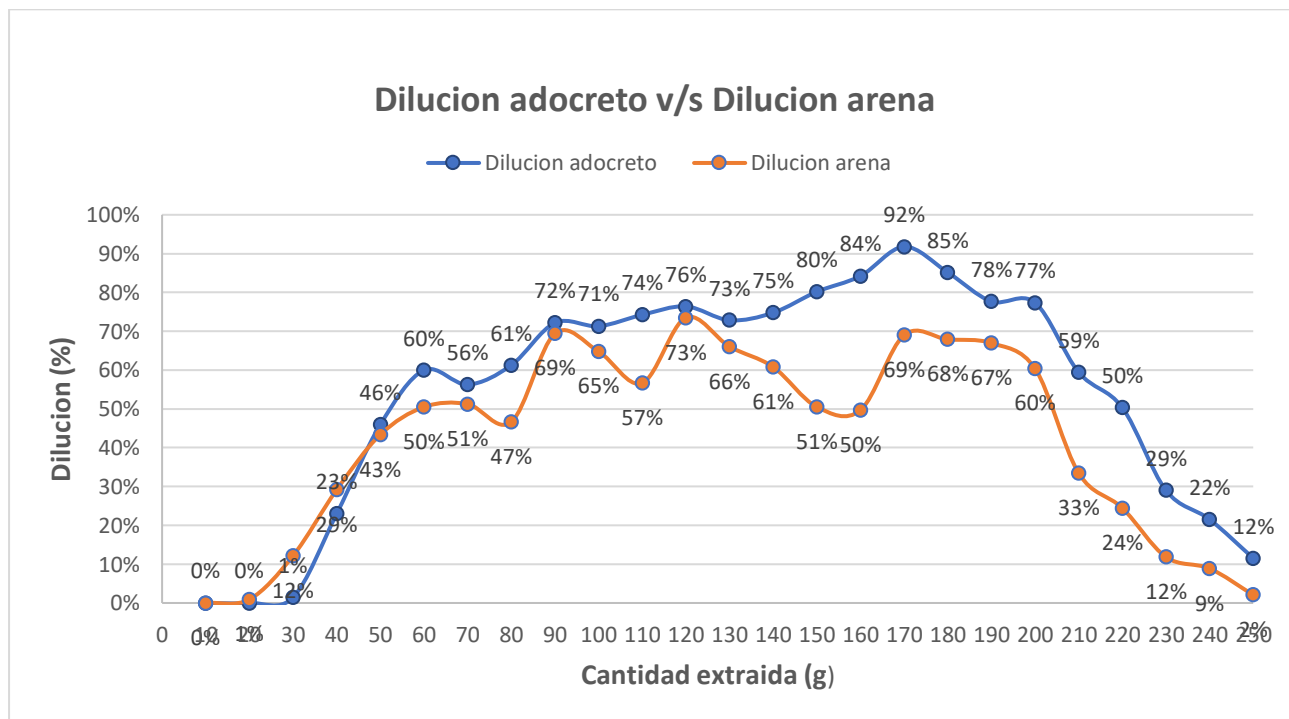


Fig. 5-29. Grafica adocreto v/s arena – dilución.

Se logra observar que hubo una mayor cantidad de extracción de material grueso en el caso de la arena, ya que en el sistema de extracción la pala tuvo una mejor penetración provocando un mayor retiro de material, en cambio en el caso del adocreto al ser un material con mayor tamaño la pala necesitaba de un mayor esfuerzo para la extracción de material grueso. Por esos motivos en el caso de la arena hubo una mayor migración de material fino, logrando llegar a la zona de extracción después de las primeras 20 extracciones, a diferencia del caso del adocreto el material fino logro llegar a la zona de extracción luego de las primeras 30 extracciones. En ambos casos la acumulación del retiro del material fino fue creciendo gradualmente, hasta que ya después de las 190 extracciones hubo una mayor cantidad de extracción de material fino por parte del adocreto que de la arena, esto producto de una mayor acumulación de material fino que de grueso en la zona de extracción (visualizadas en las figuras 5-10 y 5-11). Con respecto a la dilución, teniendo en cuenta que esto se refiere al porcentaje de retraso del material grueso hacia la zona de extracción, observando la gráfica 5-29 se logra apreciar que hubo un mayor porcentaje de dilución en el caso del adocreto, producto de que hubo una mayor cantidad de extracción de material fino que de material grueso en el transcurso del experimento. La obtención de este porcentaje se realizó comparando las cantidades extraídas de material grueso y fino.

5.7. Comparación de tiempos sin sistema de extracción

En esta parte del proyecto se verán los tiempos que hubiesen tomado para realizar cada experimento realizado de forma manual. A continuación, en la tabla 5-3 se logra analizar en mayor detalle sobre los tiempos que toman cada actividad.

Tabla 5-3. Tiempos de cada actividad.

Actividad	Tiempo (s)	Tiempo total (s)
Extracción de material	12	3000
Tamización de material	120	3000
Pesajes de materiales	60	1500
Ingreso de datos	20	500
Captura de fotografías	20	320
Transición entre actividades	30	750
Total		9070

En la tabla anterior se mostró en detalle los tiempos que toma cada actividad en efectuarse de forma manual, los tiempos totales de cada actividad se calcularon de la siguiente forma, la extracción de material se multiplico por 250 (cantidad total de extracciones), la tamización, pesaje de materiales, ingreso de datos y transición entre actividades se multiplicaron por 25, ya que cada 10 extracciones se realiza estos tipos de actividades, y las capturas fotográficas se multiplicaron por 16, por la cantidad de capturas realizadas en los experimentos. Se llego a un total de tiempo de 9070 segundos, y si lo llevamos a minutos se tiene que cada experimento de forma manual toma aproximadamente 151 minutos, equivalente a 2 horas y 31 minutos. Por lo tanto, si este último se compara con el tiempo que toma en realizar un experimento con el sistema de extracción (145 minutos), este provoca un retraso de 6 minutos.

Se debe considerar que se realizó 1 experimento completo para cada caso, y para la cuantificación de los datos en los distintos casos, se realizó mediante la cantidad de extracciones. Cada 10 extracciones que se efectuaron, se tomó todo el material para luego llevarlo al proceso de tamizado, separando de esa manera los materiales gruesos de los finos. Posterior a ello se pesó de manera independiente los materiales, para luego ingresar los resultados en la base de datos (tablas 5-1 y 5-2).

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

En este proyecto se desarrolló un sistema de extracción de granular, consistiendo en una pala automatizada creada con dispositivos de bajo costo para la realización de experimentos de flujo gravitacional. Para esto se comenzó con el diseño del sistema de extracción de granular, se analizó el modelo físico para obtener la información necesaria con respecto al tamaño apropiado del sistema de extracción. Luego de ello se obtuvo un diseño 3D a través del software TINKERCAD, donde este facilitó la visualización del sistema junto con los componentes electrónicos a utilizar, ya teniendo esa información se obtuvo una idea sobre los movimientos que podía realizar el sistema según las características de cada dispositivo electrónico, donde esto último se ve reflejado en el diagrama de flujo del capítulo 2. Se logró diseñar la programación correspondiente a través de arduino, dando como resultado final los movimientos requeridos por el sistema de extracción. A través de TINKERCAD nuevamente se visualizaron los movimientos del sistema de forma digital.

Para el desarrollo del sistema de extracción de granular, se realizó de forma física todo lo propuesto en el diseño previo. Se comenzó con la compra de todos los componentes electrónicos, para posteriormente conectarlos con el arduino en los debidos pines según la programación previa. Posterior se desarrolló la base del sistema a través de material de acrílico, debido a que es resistente y ligero a la vez. Luego de tener la base construida se montaron sobre él los dispositivos electrónicos, para posteriormente poder observar los movimientos de cada componente. Se lograron los movimientos acordes al diagrama de flujo. Luego de ello se realizaron unos pequeños cambios en la pala y en la base, para posterior obtener el sistema de extracción de material granular de forma funcional, superando las pruebas necesarias para la extracción de materiales.

Para las capturas de imágenes se diseñó un sistema que fuera funcional para la realización de las pruebas experimentales que enfrentará el sistema de extracción. Para ello se utilizó el software DIGICAM CONTROL y MATLAB. Con la debida programación se logró obtener un sistema de captura de imágenes que lograra tomar capturas fotográficas del escenario en un lapso de tiempo de cada 5 minutos. Ya teniendo esto se comenzó el proceso de pruebas con distintos tipos de materiales gruesos.

En el proceso de pruebas experimentales inicialmente se quería ver como migraba el material fino en 3 tipos de materiales distintos (grava, adocreto y arena). Por consecuencia de los materiales del sistema de extracción de granular al ser construida con materiales de bajo costo, fue complicado trabajar con la grava, siendo este un material de tamaño mayor que los demás. Por lo tanto, se concluyó realizar pruebas solamente con el adocreto y la arena y así poder tener una comparación sobre como migra el material fino en cada uno de ellos. Comenzando el experimento con el caso del adocreto se lograron obtener los primeros resultados, cantidad de extracciones, peso de los materiales, capturas de imágenes, entre otros. Lo mismo sucedió con el experimento en el caso de la arena, se realizó la misma secuencia y pasos que en el caso anterior, para así poder tener una comparación de cada uno sobre cómo se comportó el material fino. Los resultados finales de cada caso se logran determinar a través de las tablas 5-1 y 5-2, y se visualizaron en las gráficas vistas en las figuras 5-27, 5-28 y 5-29.

6.2. Conclusiones

Se logró obtener con éxito un sistema de extracción de material granular funcional, capaz de efectuar los movimientos para la debida extracción de materiales de manera automatizada junto con el sistema de captura de imágenes. El equipo desarrollado permitió al operador realizar pruebas de flujo gravitacional, donde cada extracción de material se efectúa de manera independiente, tardando aproximadamente entre 35 a 40 segundos por extracción. También el sistema de captura de imágenes permite la toma de capturas fotográficas del escenario en cada 5 minutos de forma automatizada. Los sistemas de extracción de granular y captura de imágenes funcionan de manera independiente, sin la intervención del operador provocando que todo el proceso de cada experimento se efectuase en 145 minutos.

El sistema de extracción y captura de imágenes presentan ventajas ante la realización de los experimentos de forma manual, comenzando con la precisión, ya que siempre se extraerá materiales en el mismo lugar debido a su sensor de proximidad. Trabajo constante sin interrupciones, no presenta pausas en la realización del trabajo, en cambio al realizarlo de forma manual existe el agotamiento físico dando la necesidad de tomar unos pequeños descansos. Y lo principal, al ser unos sistemas automatizados, se pueden realizar las demás actividades descritas en la tabla 5-3 en forma paralela, mejorando los tiempos y el orden en el procesamiento de los datos, ya que se comprobó que, si se realiza de forma manual, este último tiene un tiempo de realización de experimento de 151 minutos, provocando un retraso de 6 minutos si se compara con los 145 minutos al efectuarse con el sistema de extracción. Gracias a estas ventajas se puede dejar atrás la forma manual para realizar futuras pruebas de flujo gravitacional y así poder analizar cada variable de interés de forma más concentrada y ordenada al procesar los datos obtenidos. Una de las desventajas que tiene el sistema y es un aspecto a mejorar es la construcción del mismo con materiales de mayor resistencia y fuerza para así no tener el inconveniente sucedido con la grava y pueda realizar experimentos con más tipos de materiales con mayor tamaño.

Se puso a prueba el sistema de extracción de material granular al realizar distintos tipos de experimentos con materiales de tipo adocreto y arena (caso 1 y 2 respectivamente). En primer lugar, se obtuvo como resultado que hubo una mayor migración de material fino en el caso de la arena a diferencia con el caso del adocreto, pero esto ocurrió ya que la arena al ser un material de tamaño inferior existió una mayor concentración de extracción a través de la pala, generando un mayor movimiento de material fino y grueso en el contenedor. En segundo lugar, se obtuvo un mayor porcentaje de dilución para el caso del adocreto, provocado por la mayor cantidad de extracción de material fino que de material grueso, como respaldo de esto en la gráfica de la figura 5-13 muestra como la dilución aumenta gradualmente desde su primera aparición desde los primeros 20 minutos de haber comenzado el experimento. Además, con el apoyo del sistema de captura de imágenes se puede visualizar en cada caso como migra el material fino, donde los resultados se pueden respaldar en la base de datos representadas en las tablas 5-1 y 5-2.

6.3. Trabajo futuro

Para trabajos futuros se debe desarrollar un sistema de extracción de material granular con dispositivos de mayor costo, permitiendo que el sistema tenga mayor fuerza, durabilidad, entre otros. Que sea capaz de efectuar pruebas de flujo gravitacional con cualquier tipo de material que ingrese al contenedor y no tener esa limitante como lo sucedido en este proyecto con el caso de la grava. Y también se debe de implementar un sistema basado en machine learning para que el sistema de extracción de material trabaje de forma autónoma permitiendo que realice mejoras siempre y cuando sean necesarias.

Bibliografía

- [1] R. Gómez, R. Castro, “Stress modelling using cellular automata for block caving applications”, J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol 154, 2022.
- [2] R. Castro, R. Gómez, M. Pierce, J. Canales “Experimental quantification of vertical stresses during gravity flow in block caving”, J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol 127, 2020.
- [3] R. Castro, R. Gómez, A. Pérez “Physical modelling as a tool to improve our understanding of mechanisms of cave flow”, Univ. de Chile, Univ. de Concepción, Rep. ACG-2205-74, 2022.
- [4] D. Saavedra Salamanca, “Modelación física del fenómeno de migración de finos en minería de caving”, memoria de título, Univ. De Concepción, 2022.
- [5] C. Antilao Neira, “Modelación física migración de finos en minería de caving”, memoria de título, Univ. De Concepción, 2021.
- [6] G. Gonzalez Alvial, “Diseño de sistema de extracción de sólidos”, Introducción a la habilitación profesional, Univ. Católica de la Santísima Concepción.
- [7] “Arduino Uno”, Disponible en: <https://arduino.cl/arduino-uno/>.
- [8] “MG995”, Electronic Components Datasheet, Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132435/ETC2/MG995.html>.
- [9] “MG996R” Electronic Components Datasheet, Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131873/ETC2/MG996R.html>.
- [10] “HC-SR04”, Electronic Components Datasheet, Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132204/ETC2/HCSR04.html>.
- [11] “Limit switch”, Altronics, Disponible en: <https://altronics.cl/limit-switch-me-8108#:~:text=Un%20Limit%20switch%20o%20interruptor,muy%20utilizado%20en%20ambientes%20industriales..>
- [12] “Block Caving”, groundtruthalaska, Disponible en: <https://groundtruthalaska.org/articles/block-caving-underground-mining-method/>.

Anexo A. Códigos de programación

A.1. Programación arduino uno

```
#include <Servo.h>

Servo servo1;
Servo servo2;
const int triggerPin = 13; // Pin del sensor ultrasónico (TRIGGER)
const int echoPin = 12;   // Pin del sensor ultrasónico (ECHO)
const int limitSwitchPin = 2; // Pin del interruptor de límite

int etapa = 0; // Variable para llevar el control de la etapa actual

void setup() {
  servo1.attach(9); // Conecta el servo1 al pin 9
  servo2.attach(10); // Conecta el servo2 al pin 10
  // iniciar el servo de giro continuo
  servo2.writeMicroseconds(1500); // detiene el servo
  pinMode(triggerPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  pinMode(limitSwitchPin, INPUT_PULLUP); // Configura el pin del interruptor de límite como
  entrada con resistencia pull-up interna
  Serial.begin(9600); // Inicializa la comunicación serial
}

void loop() {

  switch (etapa) {
    case 0:
      Serial.println("Etapa 0: Ir a buscar el material");
      servo1.write(50); // Mueve el servo1 a 50 grados
      delay(1000);
      servo2.writeMicroseconds(1000); // Mueve el servo2 en sentido horario

      // Espera hasta que el sensor ultrasónico detecte un objeto a menos de 15 cm
      if (medirDistancia() < 15) {
        // Espera hasta que el objeto esté a menos 15 cm

        servo2.writeMicroseconds(1500);
        delay(2000); // Espera 2 segundos
        etapa = 1; // Avanza a la siguiente etapa
      }
    }
```

```

    break;

case 1:
    Serial.println("Etapa 1: Recoger el material");
    servo1.write(60); // Mueve el servo1 a 60 grados
    delay(1000); // Espera 1 segundo
    etapa = 2; // Avanza a la siguiente etapa
    break;

case 2:
    Serial.println("Etapa 2: retroceder");
    servo2.writeMicroseconds(2000); // Mueve el servo2 en sentido antihorario
    delay(500);
    servo1.write(85);

    // Espera hasta que se accione el interruptor de límite
    while (digitalRead(limitSwitchPin) == HIGH) {
        // Espera hasta que el interruptor de límite se active
    }

    servo2.writeMicroseconds(1500); // Detiene el servo2
    delay(2000); // Espera 2 segundos
    etapa = 3; // Avanza a la siguiente etapa
    break;

case 3:
    Serial.println("Etapa 3: Botar el material");
    servo1.write(15); // Mueve el servo1 a 15 grados
    delay(2000); // Espera 2 segundos
    servo1.write(35);
    delay(1000);
    servo1.write(15);
    delay(1000);
    servo1.write(35);
    delay(1000);
    etapa = 0; // Vuelve a la etapa 0 para cerrar el ciclo
    break;
}
}

float medirDistancia() {
    digitalWrite(triggerPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(triggerPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(triggerPin, LOW);
    float duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
    // Calcula la distancia en centímetros utilizando la velocidad del sonido (343 m/s)

```

```

return (duration / 2) * 0.0343;
Serial.print("Distancia: ");
Serial.print("distancia");
Serial.println(" cm ");
}

```

A.2. Programación Matlab

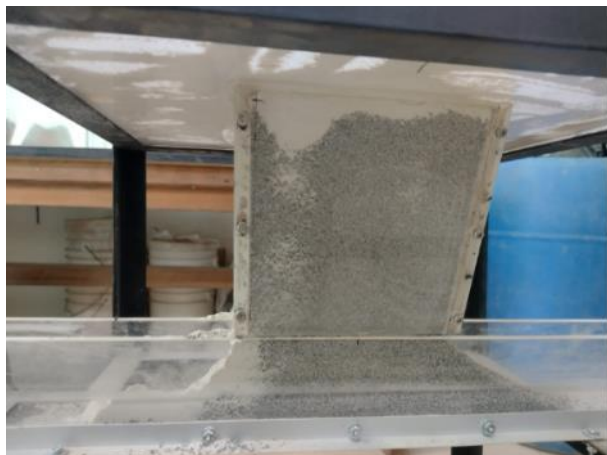
```

C = CameraController; %initialise
C.session.folder = 'C:\DSLR'; %download settings
C.session.filename_template = '[Camera Name]\[Date yyyy-MM-dd-hh-mm-ss]';
C.camera.isonumber = 3200; %camera settings
C.camera.fnumber = 5.6;
C.camera.shutterspeed = 1/200;
C.Capture %capture
C.lastfile %last filename

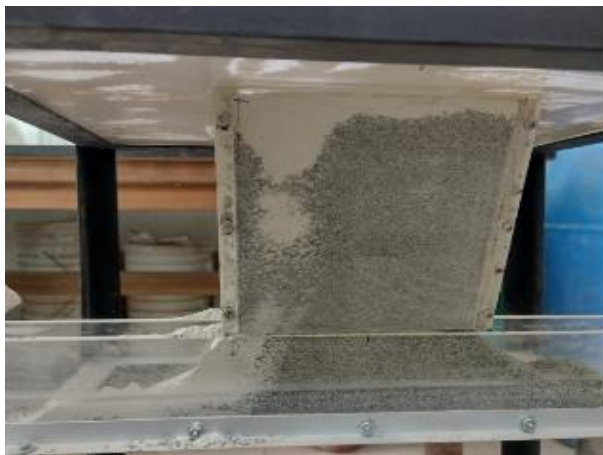
%% Example: timed capture, with timelapse option
C = CameraController;
C.lag = 0.25; %adjust camera lag (sec)
duation = 300; %capture every n seconds
for k = 1:20000 %timelapse (optional)
    time = ceil(now*86400/duation)*duation/86400; %upcoming whole 10 seconds
    file = datestr(time,'yyyymmdd_HHMMSS.FFF'); %timestamp
    C.Capture(file,time); %capture
end

```

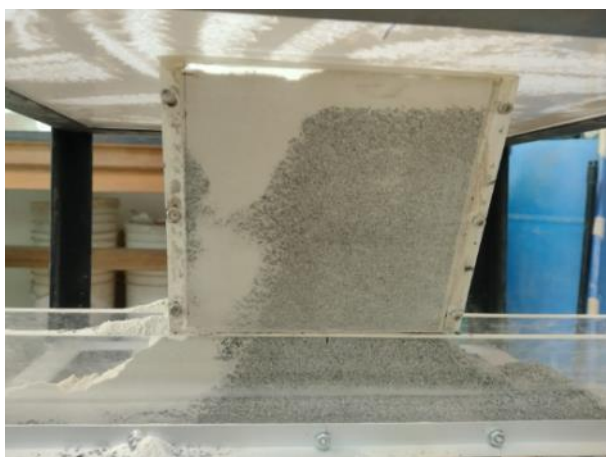
6.4. Vista lateral experimento adocreto



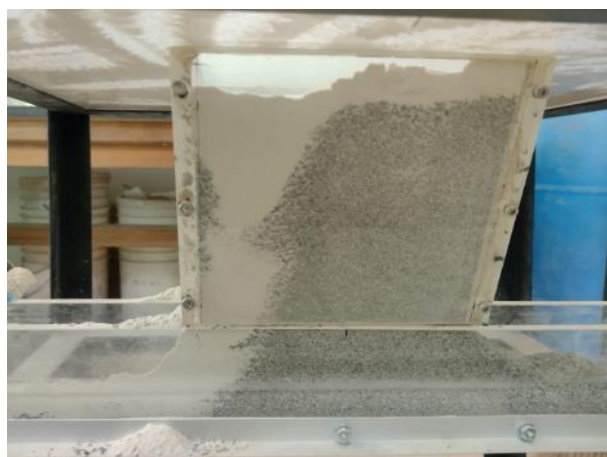
(a)



(b)



(c)



(d)

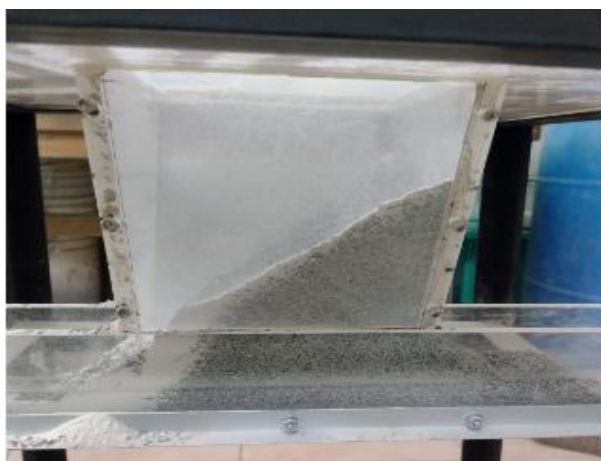
Fig. A-1. vista lateral – (a) 100, (b) 130, (c) 160 y (d) 180 extracciones.



(a)



(b)



(c)

Fig. A-2. Vista lateral – (a) 200, (b) 220 y (c) 240 extracciones.

6.5. Vista lateral experimento arena

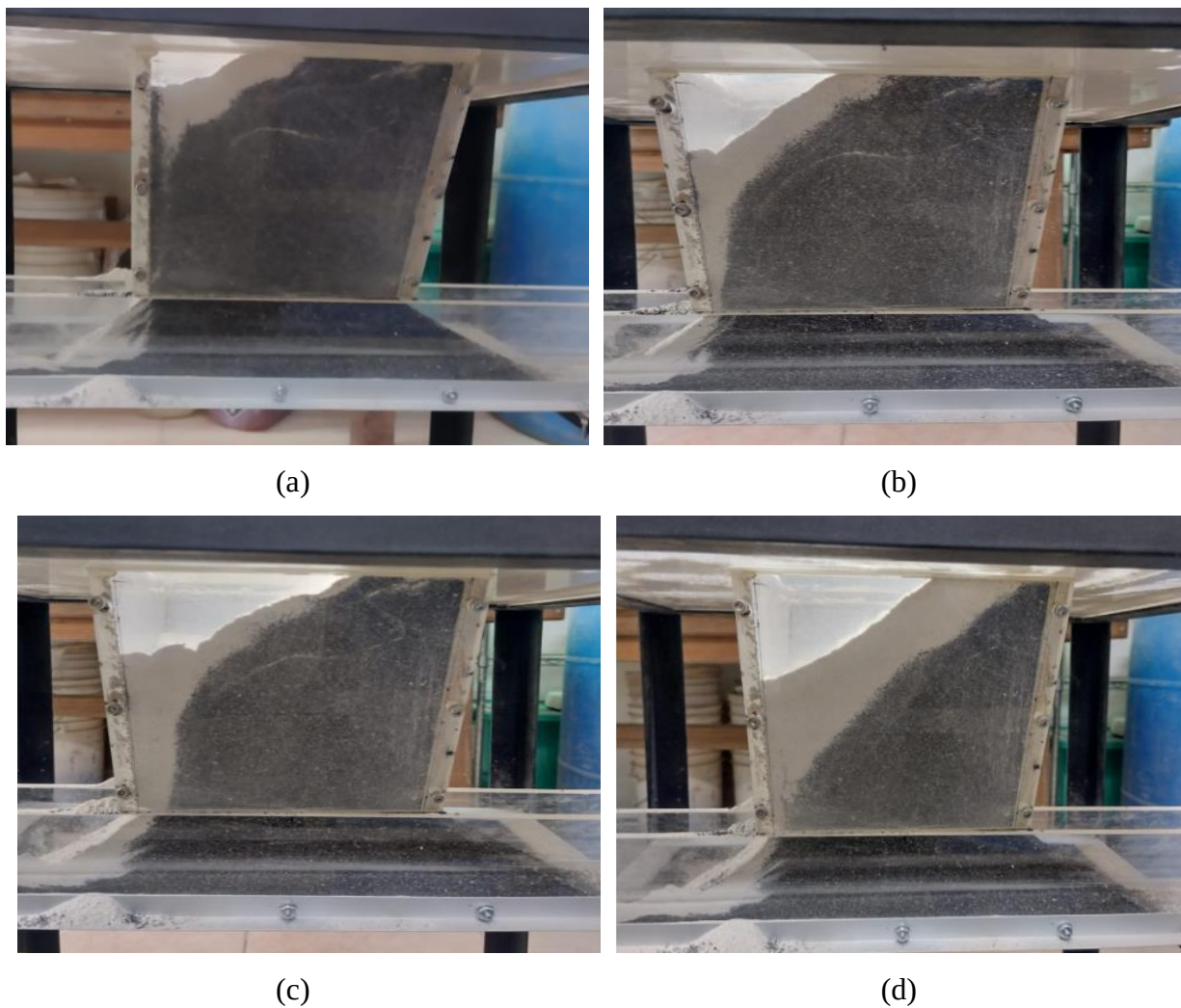
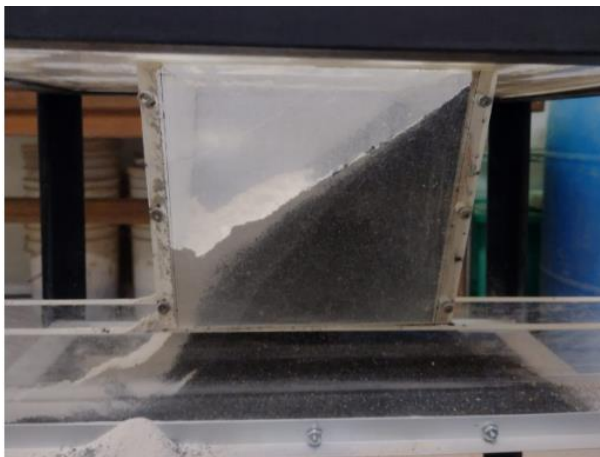


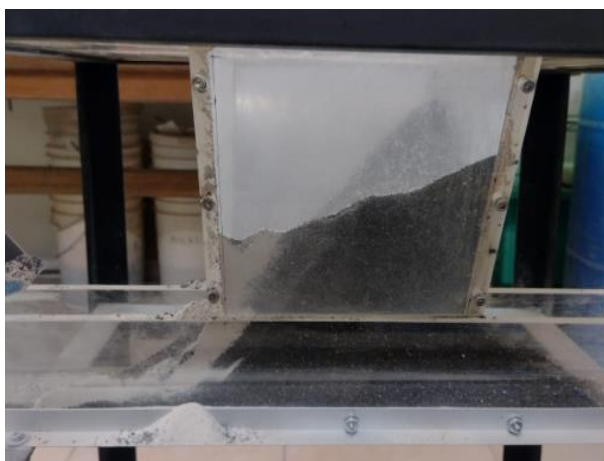
Fig. A-3. Vista lateral – (a) 80, (b) 100, (c) 120 y (d) 150 extracciones.



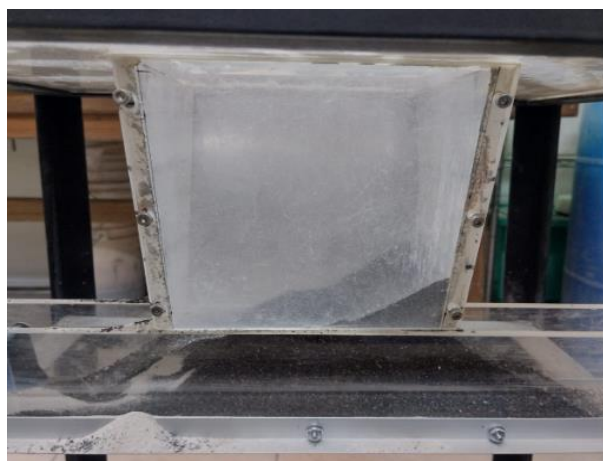
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. A-4. Vista lateral – (a) 180, (b) 200, (c) 220 y (d) 250 extracciones.