

Estudio experimental del fenómeno de remoción de masas empleando el canal de flujo

Collapses del grupo de investigación INME

German Alonso Remolina Reyes

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

Director

Gustavo Chio Cho

Ingeniero Civil M.Sc. Ph.D.

Co-director

Daniel Camilo Román Quintero

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico Mecánica

Escuela de ingeniería civil

Bucaramanga

2018

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1. Objetivo general.....	12
1.2. Objetivos específicos	12
2. Marco teórico	13
2.1. Retrospectiva general de modelos experimentales empleados	13
2.2. Investigación actual y campañas experimentales previas	20
3. Metodología	21
3.1. Montaje experimental	21
3.1.1. Canal Collapses.	22
3.1.2. Material granular a ensayar.....	24
3.1.3. Placa arduino uno.....	25
3.1.4. Código de programación	25
3.2. Ejecución de la campaña experimental S3.....	26
3.2.1. Tamaño de la muestra (fundamento estadístico).....	26
3.2.2. Ejecución del experimento y captura de datos.....	27
4. Resultados	29
4.1. Descripción de datos obtenidos	29
4.2. Estimaciones	30
5. Comentarios	38
Referencias bibliográficas.....	40

Lista de Tablas

Tabla 1. Identificación de materiales usados en la campaña experimental 'S1'. Fuente: (Román, 2015)	25
Tabla 2. Parámetros estadísticos para el cálculo del tamaño de la muestra. Fuente: (Román, 2018)	27
Tabla 3. Tipos de datos almacenados en cada ensayo.	29
Tabla 4. Comparativo de los valores de VFE del material de partículas de cristal en los diferentes tipos de lija. (En la sección inclinada)	32
Tabla 5. Variación porcentual de las velocidades frontales estimadas, correspondientes al material de partículas de cristal.....	33
Tabla 6. Resultados de variaciones en la velocidad frontal alcanzada por los materiales granulares en la sección inclinada.....	34
Tabla 7. Resultados de variaciones en la velocidad frontal alcanzada por los materiales granulares en la sección horizontal	34
Tabla 8. Velocidades promedio de los materiales granulares en la sección inclinada, según el tipo de lija.....	35
Tabla 9. Velocidades promedio de los materiales granules en la sección horizontal, según el tipo de lija.....	36

Lista de Figuras

Figura 1. Fotografía del canal experimental empleado por Hutter en 1995. Fuente: (Kolumban Hutter et al., 1995)	16
Figura 2. Fotografía del montaje finalizado del canal Collapses V1.0.	21
Figura 3. Instrumentación del canal para captura de datos.	22
Figura 4. Fotogramas de la apertura de la compuerta y deslizamiento inicial, captados por la cámara digital en el ensayo S3P40.....	28
Figura 5. Secuencia del movimiento registrada por la cámara CCD, en el ensayo S3P40.....	30
Figura 6. Gráfica de alturas vs tiempo de los sensores de ultrasonido, correspondientes al ensayo S3P1.	31
Figura 7. Gráfica de altura vs tiempo modificada, de lo sensores de ultrasonido en el ensayo S3P1.	32
Figura 8. Gráfica comparativa de la velocidad frontal alcanzada por las partículas de cristal sobre los diferentes tipos de lija, en la sección inclinada. Construida a partir de los datos de la tabla No 4.....	33
Figura 9. Comparativa de las velocidades promedio de los materiales ensayados sobre los diferentes tipos de rugosidad, en la sección inclinada. Datos tomados de la tabla 8.....	36
Figura 10. Comparativa de las velocidades promedio de los materiales ensayados sobre los diferentes tipos de rugosidad en la sección horizontal. Datos tomados de la tabla 9.	36

Lista de Apéndices

(Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)

Apéndice A. Diseño estadístico del muestreo experimental

Apéndice B. Datos de alturas y tiempos captados por los sensores de ultrasonido.

Apéndice C. Secuencias de imágenes captadas por la cámara CCD.

Apéndice D. Muestra de secuencias de los fotogramas captados por la cámara digital.

Apéndice E. Comparación grafica de velocidades estimadas (VFE) sobre los diferentes tipos de lija, según el tipo de material ensayado.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASAS EMPLEANDO EL CANAL DE FLUJO COLLAPTES DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN INME*

AUTOR: GERMAN ALONSO REMOLINA REYES**

PALABRAS CLAVE: REMOCIÓN EN MASA, DESLIZAMIENTO, CANAL, FLUJO, VELOCIDAD, ALCANCE, FRICCIÓN.

DESCRIPCION: En el presente documento se expone el montaje y desarrollo de una campaña experimental para el estudio del comportamiento dinámico de materiales granulares sometidos a deslizamiento sobre un canal artificial. El objetivo principal del experimento se centra en obtener datos de distancias y tiempos de recorrido, mediante el ensayo de tres tipos de material granular, de origen sintético y natural, utilizando primordialmente el canal de flujo Collapses del grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción – INME, cuya base es recubierta con bandas de lija de diferente configuración de rugosidad con el fin de controlar la fricción con las partículas deslizantes. Al canal de flujo se adjuntan una serie de sensores de ultrasonido, ópticos y laser, que son gestionados mediante un código de programación creado durante la campaña experimental y que permite la automatización del proceso de captura de datos de alturas y tiempos del recorrido de la masa deslizante. Adicionalmente se utilizan dos equipos de fotografía para registrar el movimiento del material en la parte superior y a lo largo del canal. Los datos obtenidos del presente estudio experimental servirán como base para el análisis estadístico futuro, por parte del grupo de investigación INME, de la incidencia de la rugosidad de la superficie sobre las variables de velocidad y alcance de los materiales granulares ensayados.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chío Cho, Ingeniero Civil, M.Sc, Ph.D. Co-director: Daniel Camilo Román Quintero, Ingeniero Civil

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL STUDY ABOUT PHENOMENON OF LANDSLIDES USING THE FLOW CANAL COLLAPTES WICH BELONGS TO THE INME RESEARCH GROUP*

AUTHOR: GERMAN ALONSO REMOLINA REYES**

KEYWORDS: MASS MOVEMENT, LANDSLIDE, MUDFLOW, CANAL, FLOW, VELOCITY, DISPLACEMENT, FRICTION.

DESCRIPTION: This paper exposes the assembly and development of an experimental campaign to the study of the dynamic behavior of granular materials subjected to slipping on an artificial canal. The main target of the experiment is based on obtaining data from the distances and travel times, trough the tests of three types of granular material, of synthetic and natural origin, using the flow canal collapted, which belongs to the research group on materials and construction structures-INME. The surface of the flow canal is re-covered with sandpaper of different roughness settings in order to control the friction with the sliding particles. Ultrasound, optical and laser sensors are added to the canal, these sensors are managed by a programming code, created during the experimental campaign and it allows the automation of capturing data process of heights and the path times of the sliding mass. In addition; two photography equipment is used to record the movement of the material at the top and along the channel. The data obtained from the present experimental study will be useful as a basis for future statistical analysis, managed by the research group INME, from the affectation of the surface roughness to the speed variables and the range of the granular materials tasted.

* Bachelor thesis.

** Physic-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Gustavo Chío Cho, Ingeniero Civil, M.Sc, Ph.D. Co-director: Daniel Camilo Román Quintero, Ingeniero Civil

Introducción

El fenómeno de remoción en masa se define como el proceso gravitacional que involucra el movimiento pendiente abajo de los geomateriales como roca o suelo. Estos deslizamientos pueden ser causados por factores geológicos, topográficos, climáticos y antropológicos. (García, 2014)

En Colombia, gran parte de la población se encuentra asentada en la región Andina (Ministerio De Salud y Protección Social, 2013). Región surcada por tres ramales importantes de la cordillera de los andes en el centro del país, donde las características de relieve, geomorfología y los procesos tectónicos son recurrentes e influyentes en procesos naturales que amenazan a la población, tal como el de remoción de masas. Sumado a esto, se encuentra el hecho de que factores como el crecimiento demográfico, el desplazamiento forzado y la desigualdad económica, entre otros, han incidido en que parte de la población se ubique en zonas de ladera, aumentando la vulnerabilidad y el riesgo constante para estas comunidades.

El riesgo de deslizamientos en masa que se presenta en estas zonas del país, se ve potenciado por el clima húmedo – tropical y por el fenómeno de la niña (Mergili, Santiago, y Moreiras, 2015). Tal como sucede en la presente temporada invernal (mayo de 2018), cuyas intensas lluvias han generado la saturación de suelos y su posterior colapso, siendo el departamento de Santander uno de los más afectados, donde hasta el momento se han presentado varios eventos de remoción de masas importantes que han causado pérdidas humanas, así como afectación de viviendas, taponamiento de vías y daño en infraestructura, y donde al menos una docena de municipios se encuentran en alerta roja por probabilidades de deslizamientos (El Tiempo, 2018), (Rodríguez, 2018). Son por estas razones que se destaca la importancia de llevar a cabo estudios e investigaciones que permitan caracterizar el fenómeno y sus variables con el fin de aportar a los

procesos de gestión de riesgos de desastres en la disminución de los niveles de daños o pérdidas probables.

El objetivo del presente informe se centra en describir el montaje y realización de una campaña experimental para el estudio del comportamiento dinámico de materiales granulares en un canal artificial, implementando métodos de sensibilización de las variables involucradas en el movimiento, como la velocidad y el desplazamiento, por medio de técnicas que involucran el uso de sensores de ultrasonido y captura y manejo de imágenes.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Realizar el montaje de una campaña experimental para el estudio del comportamiento dinámico de materiales granulares en el canal de flujo COLLAPTES construido por el grupo de investigación INME, implementando métodos de sensibilización de las variables involucradas en el movimiento, como la velocidad y el desplazamiento, por medio de técnicas que involucren el uso de sensores de ultrasonido y captura y manejo de imágenes.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar el montaje físico de los sensores de ultrasonido y el dispositivo de adquisición de imágenes en el canal de flujo COLLAPTES.
- Aumentar la precisión de las mediciones por medio de la calibración de los sensores para omitir el ruido propio de las señales captadas.
- Generar un código de programación del proceso de adquisición de datos para cada dispositivo de adquisición de datos para la campaña experimental.

2. Marco teórico

2.1. Retrospectiva general de modelos experimentales empleados

La importancia del estudio experimental radica en la necesidad de conocer el comportamiento dinámico de los deslizamientos de material granular, así como la necesidad de analizar las variables involucradas en el flujo de materiales granulares y multifásicos, de manera que se tenga información para comparar y validar modelos teóricos propuestos en la comunidad científica, los cuales intentan predecir o explicar en aras de simular el comportamiento del flujo del fenómeno de remoción de masas. Este objetivo es, sin embargo, demasiado amplio, ya que existe un vasto conjunto de variables (geología, topografía, tipo de material granular, etc) que obliga a que estos estudios sean dirigidos de manera específica, contemplando parámetros definidos y empleando los equipos que mejor se acoplen a dichos trabajos experimentales. Diferentes investigadores conscientes de este problema, han realizado desde hace varios años, trabajos de laboratorio para estudiar el fenómeno de remoción de masas con diversos propósitos y materiales (Cagnoli y Romano, 2010; Gray, Wieland, y Hutter, 1999; Greve, Koch, y Hutter, 1994; Hungr y Morgenstern, 1984; Kolumban Hutter, Koch, Plüss, y Savage, 1995; Kolumbian Hutter y Koch, 1991; Major y Iverson, 1999; Ng, Choi, y Law, 2013; Rodriguez-Sedano et al., 2016; Salm, 1968).

Salm (1968), por ejemplo, presenta un estudio en el que tiene por objetivo determinar los factores en la caracterización del flujo de avalanchas de nieve (Salm, 1968). Para esto usa un equipo para simular deslizamientos, el cual tiene una sección de aceleración de 20 m de largo y 2,5 m de ancho. La inclinación de la sección puede variar de 30 a 45 grados y en la parte superior posee un colector de nieve, el cual puede ser llenado con hasta $12 m^3$. La superficie de

deslizamiento está compuesta por delgadas capas de aluminio, de tal manera que la nieve a través de la sección de aceleración tenga un movimiento traslacional. Dos barreras ópticas dispuestas al final de la sección de aceleración sirven para detectar la velocidad frontal justo después de que la nieve alcanza la sección de pruebas. Las fuerzas transmitidas por el deslizamiento sobre la sección de pruebas son medidas en 4 paneles dispuestos en fila. En tres de ellos se toman medidas de las fuerzas normales y cortantes. Mientras que en otro se emplea un método mecánico para medir la fuerza, usando un cono de acero penetrando una lámina de aluminio dispuesta sobre el panel. Con este método se obtiene solo el máximo valor entre los dos componentes de la fuerza y es usado para revisar su confiabilidad, comparándolo con las medidas electrónicas de las otras secciones.

Con el propósito de estudiar el comportamiento del flujo de arena seca a altas velocidades (es decir, mayores que 6 m/s) y con el ánimo de establecer posibles limitaciones de la relación de Coulomb, Hungr y Morgenstern (1984) realizaron experimentos en un aparato de pruebas consistente en un canal de medición inclinado, un recipiente de arena y un colector final. El colector fue diseñado para proveerle un máximo de material de 200 kg/s. Se ensayaron materiales como: arena fina, mezclas de arena y polvo de roca y granos de poliestireno (Hungr y Morgenstern, 1984). El material es acelerado por caída libre a través de un vertedero vertical de 4 m de longitud que se defleca suavemente para conectarse al canal de medición. El canal tiene 1,5 m de largo y 20 cm de ancho, su pendiente es ajustable y las paredes laterales están elaboradas con plexiglás. En la parte final del canal se encuentran instaladas dos celdas de carga para permitir el continuo pesaje del material que se desliza. El aparato en total tiene una altura de 7 m. La superficie del flujo a través del canal es filmada por una cámara de alta velocidad (400 imágenes por segundo). Las imágenes fueron usadas para medir la velocidad superficial y aceleración observando el movimiento del material y para registrar los espesores del flujo. Tres celdas de carga fueron usadas,

(en la base y las paredes del canal) para medir la fuerza cortante total aplicada por la arena sobre la sección. La bandeja receptora está suspendida sobre una celda de carga, la cual continuamente monitorea su aumento de peso. En la toma de datos del experimento se obtienen aproximadamente 2000 a 3000 fotografías y los registros obtenidos en las celdas de carga en el canal. Estos datos son combinados en diferentes tipos de cálculos para obtener parámetros como: (i) Velocidad superficial, (ii) Aceleración superficial, (iii) Espesor del flujo. (iv) Densidad media del material granular. (v) Fuerza normal y cortante sobre la base del canal y (vi) velocidad promedio del flujo.

Por otra parte, Hutter y Koch (1991) llevaron a cabo experimentos en un canal que puede moldearse para seguir trazados de funciones exponenciales (Kolumbian Hutter y Koch, 1991). El canal posee una longitud variable de hasta 4 m y un ancho de 10 cm. Las paredes del canal están hechas de plexiglás transparente, a través del cual el material granular en movimiento puede ser fotografiado. El material granular descansa detrás de una placa de confinamiento orientada verticalmente, la cual, al ser accionada gira rápidamente permitiendo que el material se desplace hacia abajo a través del canal. El movimiento del flujo es observado y fotografiado por una cámara capaz de capturar 15 imágenes por segundo. Generalmente la cámara se ubica tan cerca del canal como sea posible, teniendo en cuenta, que se logre observar la longitud total del mismo. Las pruebas fueron realizadas con siete diferentes clases de material: (i) partículas de vidrio cuasi-esféricas de 3 y 5 mm, (ii) partículas de plástico de diámetro de 4 mm y altura 2.5 mm, (iii) dos fracciones de un granulado de cuarzo de forma redondeada y diámetros promedio de 3 y 5 mm y (iv) dos fracciones de un granulado de mármol con los mismos diámetros promedio.

Posteriormente, Hutter, Koch, Plüss y Savage (1995) elaboraron una campaña experimental, en donde se buscaba la verificación de un modelo computacional que pretendía reproducir el fenómeno de remoción de masas (Kolumban Hutter et al., 1995). Los ensayos fueron elaborados

en un canal de 10 cm de ancho, el cual consiste de dos partes, una inclinada (1.4 m) y otra horizontal (1.7 m), conectadas por medio de un segmento curvo. El ángulo de inclinación del canal se puede variar de 40 a 60 grados. Las paredes laterales están elaboradas con plexiglás transparente con un espesor de 10 mm. La pared posterior del canal tiene un espesor de 10 mm de pvc y está cubierta por un plástico gris para dar mejor contraste en las fotografías. La compuerta mecánica en la parte superior de la porción inclinada cumple la función de mantener el material granular en su posición inicial estática antes de su lanzamiento. El máximo volumen de material granular que se puede disponer detrás de la compuerta es de 3,8 litros. Se dispone de cámaras que permiten tomar 6 fotografías por segundo, con el propósito de registrar la evolución de la geometría del movimiento del flujo a lo largo del trayecto. Comparando la posición de la parte frontal y posterior del material granular en fotografías consecutivas es posible determinar las velocidades frontales y posteriores del flujo. Los materiales ensayados fueron partículas de plástico con diámetros típicos de 3 y 5 mm y partículas de vidrio de forma redondeada de 3 mm de diámetro.

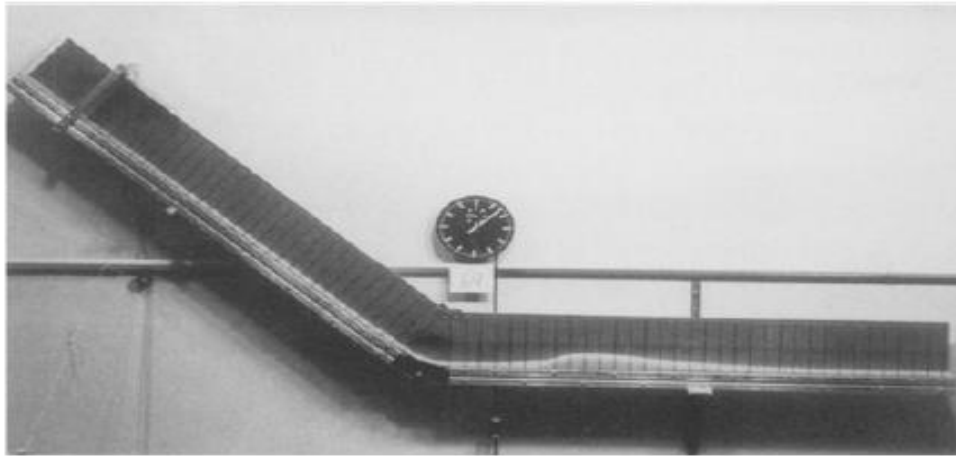


Figura 1. Fotografía del canal experimental empleado por Hutter en 1995.

Fuente: (Kolumban Hutter et al., 1995)

Otro tipo de experimento es aquel en el que se deja fluir el material sin confinamiento lateral. En estos casos se han llevado a cabo experimentos con el objetivo de corroborar modelos tri-

dimensionales que pretenden describir la dinámica del flujo granular tanto en dirección lateral como longitudinal. Estos modelos matemáticos han sido propuestos por autores como Greve (1991), Hutter (1991), Lang (1992) y sus fases experimentales han sido desarrolladas por Koch et al (1994), Greve et al (1994), Gray et al (1999), entre otros. Los ensayos realizados son similares, y de forma general, consisten en liberar una masa compacta de material granular desde su reposo en la parte superior de una superficie inclinada, que se une a otra horizontal por medio de un segmento curvo (Greve et al., 1994), (Gray et al., 1999). En algunos casos se recubre la superficie con diversos materiales, con el fin de variar la fricción entre el material y el equipo de ensayos y determinar la incidencia de este factor en la deposición final del flujo.

En trabajos relativamente recientes, autores que estudian actualmente el fenómeno de remoción de masas han realizado ensayos similares a los ya mencionados, usando nuevas herramientas tecnológicas. Por ejemplo, Cagnoli y Romano (2010), realizan un estudio experimental que busca entender los mecanismos del fenómeno de flujo rápido de fragmentos de roca (Cagnoli y Romano, 2010). El aparato experimental consiste en una rampa de aceleración metálica y un canal de mármol curvo. El material granular descansa detrás de una puerta corredera dentro del acelerador. Tanto la rampa como el canal tienen la misma sección trapezoidal. Esta sección transversal contiene el flujo lateralmente, reduciendo los efectos de las paredes laterales, en comparación con un canal rectangular. El canal curvo tiene 5.4 cm de ancho y 1.4 m de largo.

Se usaron mezclas de fragmentos de roca volcánica con 3 rangos de tamaños de grano relativamente pequeños: 0.5 – 1, 1 – 2 y 2 – 3 mm. Los experimentos se llevaron a cabo cargando el acelerador con muestras de 30 g para cada tamaño de grano. En estos experimentos se varió únicamente el tamaño de los granos, manteniendo constante todas las otras variables, como; la rugosidad de la superficie, el volumen del flujo, el ángulo de rozamiento interno, coeficiente de

restitución y densidad de los fragmentos de roca. El comportamiento del flujo es estudiado por una cámara de alta velocidad de 2000 imágenes por segundo. Lo novedoso de este estudio se encuentra en el análisis de las grabaciones, el cual se realiza usando una técnica llamada (PIV – particle image velocimetry), con la cual se obtienen la velocidad longitudinal y transversal de las partículas sobre la superficie del flujo.

Ng, Choi y Law (2013), emplean un canal trapezoidal con paredes laterales de ángulos ajustables, con el objetivo de estudiar la incidencia de la inclinación lateral del terreno en la velocidad y deposición final del flujo de arena granular (Ng et al., 2013). El canal posee 5 metros de largo, 0,2 metros de ancho y su inclinación es de 30 grados. Las paredes laterales son paneles acrílicos de 0,5 m de largo y son ajustables con ángulos desde 30 a 90 grados. El material es dispuesto en un contenedor localizado en la parte superior del canal y es retenido por una compuerta asegurada con un cerrojo magnético. A lo largo del canal se disponen sensores para capturar la velocidad frontal del flujo. En total son 10 fotoconductores instalados en intervalos de 0.5 m. Cuando el material granular pasa por el sensor, una señal eléctrica es generada y enviada al colector de datos. Con el espaciamiento conocido entre sensores y el tiempo en que las señales son generadas es posible calcular la velocidad promedio del flujo. La masa total usada en cada experimento es de 50 kg y el material ensayado está compuesto por granos uniformes de arena de diámetro de 0.6 mm.

Con el fin de conocer el comportamiento de las mismas variables (velocidad del flujo y distancia de recorrido), pero esta vez empleando material piroclástico (líticos y pómez), Rodríguez-Sedano (2016), realiza experimentos usando el GRANFLOW-SIM, un canal modular experimental diseñado y desarrollado por el instituto de Geología de la Universidad autónoma de San Luis Potosí, México (Rodríguez-Sedano et al., 2016). El equipo consiste en 3 módulos principales: el

depósito de carga del material, el canal y la caja de expansión. El depósito de carga tiene una capacidad de 0.036 m^3 , que corresponde al volumen usado en cada ensayo. Está hecho de pvc y tiene una puerta electromagnética que puede ser abierta remotamente. El depósito de carga tiene una ventana lateral de vidrio templado que permite retener el material dentro y puede colocarse con diferentes alturas (desde 0,4 m hasta 2,7 m), según las necesidades del experimento. El canal está hecho de pvc plástico con un recubrimiento textil a lo largo de la base para incrementar la fricción. Tiene 4,9 m de largo y 0,3 m de ancho, con 0,25 m de altura en los vidrios laterales, además puede ser inclinado en cualquier ángulo desde 0 hasta 45 grados y está equipado con una serie de sensores laser para la medida de la velocidad frontal del flujo. En total son 9 estaciones a lo largo del canal, cada una de ellas consiste en un láser y un fotodiodo receptor ubicados en la parte externa de las paredes de vidrio. Cuando el flujo pasa a través de cada una de estas estaciones, se obstruye la señal laser y los tiempos son automáticamente registrados. Esto permite calcular la velocidad frontal del flujo a lo largo del canal. Tres cámaras de alta velocidad de 400 imágenes por segundo completan el equipo de grabación. Las cámaras son ubicadas en cualquier posición a lo largo del canal y de la caja de expansión.

Por otro lado, experimentos de gran escala se han realizado en el bosque experimental H.J. Andrews, usando un canal de 95 metros de longitud y 2 metros de ancho, construido por el servicio geológico de los Estados Unidos. Major y Iverson (1999) ensayaron mezclas de hasta 10 m^3 de materiales granulares saturados, con el objetivo de medir la presión de poros, la fricción concentrada en los márgenes del flujo y su incidencia en la deposición final del material (Major y Iverson, 1999). El canal es de concreto y tiene una pendiente de 31° ligeramente suavizada que permite conectar la parte inclinada con la sección recta. Está equipado con una serie de sensores que permiten medir la profundidad del flujo y celdas de carga dispuestas para la lectura de los

esfuerzos producidos por el movimiento del material sobre las paredes del canal. Adicionalmente los experimentos fueron filmados y fotografiados desde diferentes ángulos usando sincronizadores de alta precisión. Estas imágenes permiten relacionar la apariencia o geometría del flujo con los datos de presión de poros y fricción captados anteriormente.

2.2. Investigación actual y campañas experimentales previas

Con el ánimo de observar, estudiar y analizar el desplazamiento en masa en un entorno controlado e inspirándose en investigaciones de laboratorio anteriormente mencionadas, profesionales del grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME), adscrito a la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS) fabricaron un canal artificial que sirve de base para la realización de una serie de campañas experimentales destinadas, cada una, a conocer la influencia de ciertas variables en la velocidad y desplazamiento de flujos de material granular. La primera de estas campañas ('S1') se trató de un muestreo exploratorio para observar el funcionamiento general del canal y para determinar cuáles tipos de materiales granulares son ideales para la investigación. En la segunda campaña ('S2') se buscaba conocer la influencia del volumen en las variables de velocidad y alcance. En cuanto a la tercera fase experimental ('S3'), en su correspondiente análisis de datos, se busca conocer la influencia del cambio de rugosidad de la base del canal sobre las mismas variables que la campaña anterior. (Román, 2015)

3. Metodología

El modelo experimental usado, el cual se basa en los trabajos de investigación presentados en el capítulo anterior, consta de una serie de ensayos con diferentes tipos de material granular que se deslizan sobre un canal artificial y cuya base es recubierta con lijas de diferente rugosidad, con la finalidad, a futuro, de estudiar la incidencia de esta variable sobre la velocidad y alcance del flujo.

El proyecto de investigación presentado en este documento se desarrolla bajo el marco de la recolección de datos de la campaña experimental denotada como ‘S3’ para lo cual se usó principalmente el canal de flujo Collapses V1.0, adjuntando una serie de mecanismos y sensores al mismo, así como herramientas tecnológicas para facilitar y automatizar el proceso de captura de datos.

3.1. Montaje experimental

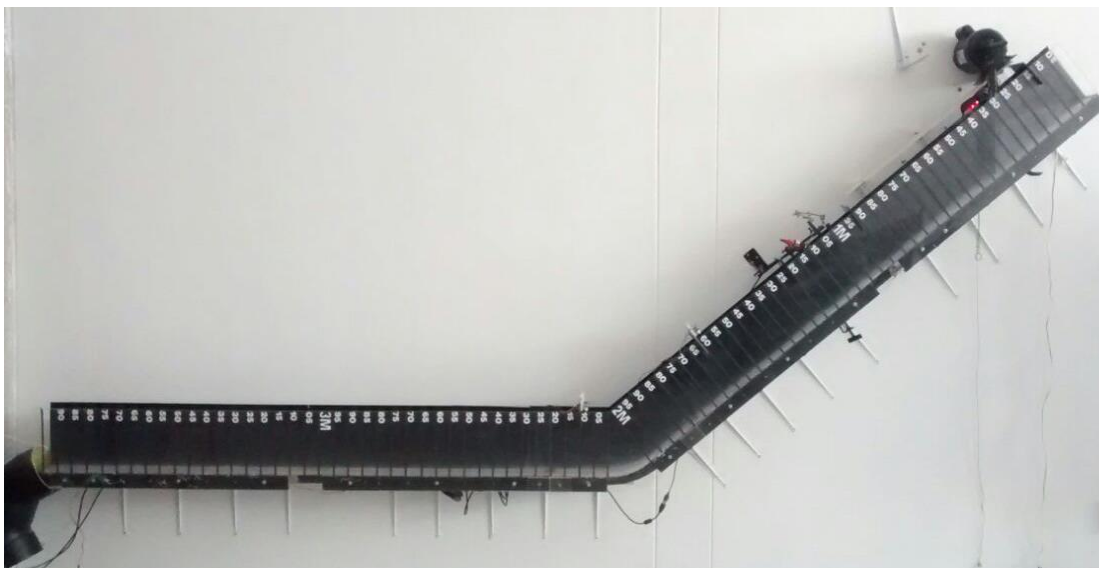


Figura 2. Fotografía del montaje finalizado del canal Collapses V1.0.



Figura 3. Instrumentación del canal para captura de datos.

Nota: 1. Sensor ultrasonido en la sección horizontal. 2. Sensor ultrasonido en la sección inclinada. 3. Cámara CCD y estación laser. 4. Motor, sensor óptico y compuerta de retención

3.1.1. Canal Collaptes. El canal consta de dos segmentos rectos, uno horizontal y otro con ángulo de inclinación de 40° . La longitud de cada uno es de 1.8 m y están conectados por medio de una pieza curva de 40 cm de longitud. De esta forma la extensión total del aparato es de 4 m, su ancho es de 10 cm y su altura de 22.5 cm. Todas las piezas del canal son de acrílico transparente de 5 mm de espesor. La pared posterior del canal fue cubierta con papel vinilo adhesivo de color negro con el fin de generar contraste suficiente con el material granular a ensayar para facilitar la adquisición y tratamiento de imágenes, mientras que en la pared frontal se realizaron marcas de gradación cada 5 cm para la medición del movimiento mediante el uso de fotogramas (Román, 2015). El canal esta soportado en un muro de mampostería en el laboratorio mediante perfiles en ‘L’, ubicados de forma equiespaciada cada 20 cm. La zona de carga del material tiene capacidad de hasta 5 litros y en el extremo abierto del segmento horizontal se encuentra un codo de pvc que sirve para guiar el material granular hacia el colector final.

La base del canal es recubierta con bandas de lija de rugosidad SIA tipo 180, 150 y 120, con el fin de variar la fricción con el material que se desliza. La denominación del tipo de lija obedece al tamaño del grano abrasivo adherido a la tela soporte, siendo 180 el material granular de menor diámetro y 120 el mayor. Para realizar el lanzamiento de cada unidad de análisis, se instaló

inicialmente un motor de 120 V, que fue luego sustituido por otro de 240 V, y el cual es usado para aplicar un torque a la compuerta que retiene el material a ensayar.

El motor es puesto en marcha y mediante el uso de un vástago retráctil accionado manualmente se sostiene la compuerta hasta que se desee liberar el material que se encuentra en estado de reposo en la parte superior del canal. Un sensor óptico se adhiere al canal en su pared posterior, contiguo a la compuerta de retención y permite iniciar la contabilización del tiempo del movimiento del material granular, una vez se perturba su señal por la acción del mecanismo de apertura. En el segmento inclinado del conducto se ubica un módulo de laser lineal y una cámara Guppy CCD (60 img/s). Dichos dispositivos se fijan a un vástago metálico, que a su vez se encuentra anclado al muro y a uno de los perfiles 'L' soportes del canal. Ambos mecanismos se proyectan hacia la base del conducto y son usados para estimar la altura del flujo mediante la perturbación de la línea láser emitida por el modulo e inmediata captura de imágenes por parte de la cámara CCD. De igual forma se instalan dos sensores de ultrasonido HC SR-04, uno en la zona inclinada y otro en el segmento horizontal. Se adhieren a una placa que conecta las paredes laterales del canal e igualmente son proyectados hacia la base del mismo. Este tipo de sensor posee dos dispositivos cilíndricos, uno de ellos emite la señal ultrasónica y el otro la recibe, estimando así el tiempo transcurrido en dicho proceso, lo cual permite deducir la distancia hasta el obstáculo presente. Esto permite estimar el tiempo que tarda el material en pasar por el sensor y calcular la altura del flujo deslizante.

Además de los dispositivos incluidos al canal, se emplea una cámara Panasonic Lumix con velocidad de 25 fotogramas por segundo, con el fin de capturar la totalidad del movimiento del material granular a través de la pared acrílica frontal. Esto permite observar la geometría del flujo en cada instante, así como estimar el tiempo y alcance del deslizamiento. La cámara se ubica a una

altura de 1.65 m y a una distancia perpendicular de 3.8 m del canal, desde la cual se logra captar el equipo de ensayos en toda su longitud.

3.1.2. Material granular a ensayar. La elección de los materiales a ensayar en la presente campaña experimental ('S3), resulta de las campañas experimentales precedentes, 'S1' y 'S2' respectivamente. La primera de estas, como ya se había nombrado, fue un muestreo exploratorio en donde se realizaron ensayos con 8 tipos de materiales, tratando de abarcar una amplia gama de formas, texturas, tamaños, pesos y ángulos de fricción teniendo en cuenta el origen del material (natural/pétreo o sintético). Estos materiales se definen en la Tabla 1. Para la revisión del comportamiento de cada uno y posterior descarte de aquellos que no sean de interés, se realizaron 32 pruebas en total, 4 con cada material. (Román, 2015). A partir de la serie de ensayos mencionada se evidenció que los materiales 7 y 8 (sintéticos) presentan un deslizamiento crítico, tanto en su variable de velocidad como de recorrido, mientras que los materiales 1 al 6 (pétreos) se deslizan de manera similar entre sí, caracterizándose por un movimiento suave y alcance total relativamente corto, en comparación con los materiales sintéticos. De esta manera los materiales elegidos para llevar a cabo las campañas experimentales 'S2' y 'S3' fueron tres. Los materiales 7 y 8 (sintéticos), los cuales presentan condiciones críticas de deslizamiento y el material 6 (pétreo), ya que funciona como muestra característica de la vasta gama disponible de partículas de origen pétreo. El material 7 se compone de partículas de cristal con forma de elipsoide de revolución con aristas. Su densidad es similar a la de los materiales pétreos ensayados. Por su parte el material 8, se compone de partículas plásticas de baja densidad y completamente esféricas. Mientras que el material 6 (pétreo) consta de granito triturado y se destaca por su tonalidad blanca (Román, 2015),

lo cual facilita la captura y procesamiento de datos debido al contraste que se genera con el fondo oscuro del canal.

Tabla 1. Identificación de materiales usados en la campaña experimental 'S1'. Fuente: (Román, 2015)

ID Material	Descripción
Material 1	Grava de arrastre de río
Material 2	Grava de arrastre de río altamente meteorizada
Material 3	Gravilla de arrastre de río
Material 4	Granito triturado gris
Material 5	Granito triturado gris
Material 6	Granito triturado blanco
Material 7	Partículas de cristal
Material 8	Partículas plásticas

3.1.3. Placa arduino uno. La recolección de datos de los sensores ultrasonido se realiza a través de una placa Arduino Uno, a la que a su vez se conecta un sensor de temperatura. Esta placa posee un microcontrolador conectado a un módulo adaptador USB-serie que permite programar el microcontrolador desde el equipo de cómputo.

3.1.4. Código de programación. El proceso de captura de datos de los ensayos se realiza de modo automático, gracias a la elaboración de un código de programación en el software Matlab, desde el cual se gestiona la placa Arduino Uno y la cámara Guppy CCD. Al iniciar la interfaz se solicita el número de la prueba, posteriormente, en el momento que se da la apertura de la compuerta, el programa inicia la contabilización del tiempo del ensayo, luego almacena la

secuencia de imágenes capturadas por la cámara y después almacena los tiempos y distancias de los sensores de ultrasonido conectados a la placa programable.

3.2. Ejecución de la campaña experimental S3

Una vez construido e instrumentado el canal se procede con la ejecución de los ensayos y su correspondiente captura de datos. Vale la pena aclarar que previamente se debe establecer, mediante técnicas estadísticas; el número de ensayos a realizar para garantizar la suficiente confiabilidad de los datos y los posteriores resultados. De esta manera se enuncia el tamaño de la muestra y su respectivo fundamento estadístico, para luego describir el proceso de captura de datos de la unidad experimental.

3.2.1. Tamaño de la muestra (fundamento estadístico). En este caso, el experimento tiene como propósito el análisis de dos factores; la influencia del tipo de material y la influencia de la fricción desarrollada en la interface entre el flujo granular y la base del canal sobre el desarrollo de velocidades en el canal de flujo Collaptes.

Por tal razón, para una estimación confiable del tamaño de la muestra se decide realizar un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y de efectos fijos, para lo cual se estima el tamaño del efecto para la variable VMF (Velocidad Máxima instantánea Frontal) a partir de los ensayos del muestreo “S2” (Román, 2015) y se asumen los datos estadísticos de la Tabla 2. En el Apéndice A se presenta en detalle el análisis mencionado y los datos utilizados.

Tabla 2. *Parámetros estadísticos para el cálculo del tamaño de la muestra. Fuente: (Román, 2018)*

Parámetro	Valor
Probabilidad. Error tipo I (α)	0.05
Probabilidad. Error tipo II (β)	0.05
Potencia requerida ($1 - \beta$)	0.95
Número de grupos	3.00

Al calcular el tamaño del efecto según Cohen (1988), para todos los casos se puede clasificar como “grande” por lo que de manera conservadora se asume este valor como 0.4. Del cálculo estadístico se deriva un F crítico de 3.09, un tamaño de la muestra de 102 unidades experimentales con una potencia verdadera de 0.955. Para efectos prácticos, con base en los resultados obtenidos, se decide llevar a cabo 135 unidades experimentales, es decir, 15 réplicas por bloque, en 9 bloques en donde en cada uno de ellos se controle el mismo material y la misma fricción entre el lecho del material y la base del canal. (Román, 2018).

3.2.2. Ejecución del experimento y captura de datos. Para este tercer muestreo se realizaron 135 pruebas en total. El experimento se divide en 3 sesiones o ciclos, caracterizados por el uso de lijas de denominación 180, 150 y 120 SIA. Esta herramienta se usa, como se dijo anteriormente, con motivo de controlar la fricción entre el material granular y la base del canal. Cada tipo de lija es usada para completar 1 sesión de 45 ensayos; 15 por cada tipo de material. El volumen de material para cada uno de los ensayos es de 3 litros.

Para la realización de cada prueba se sigue el mismo procedimiento:

1. Ajuste de la compuerta: Se asegura la compuerta metálica detrás del pasador retráctil.

2. Carga de material: Se deposita el material en el canal, detrás de la compuerta metálica.
3. Inicio de software: Se da inicio al código de programación, en el cual se ingresa el número correspondiente de la prueba a realizar.
4. Encendido del motor: Se acciona el motor eléctrico que permite el giro de la compuerta (obstruida por el pasador retráctil en ese momento).
5. Captura de fotografías: Se acciona el obturador de la cámara digital, ubicada a 3.8 m del canal, que permite capturar la secuencia del movimiento a lo largo del conducto.
6. Apertura de la compuerta: Se remueve el vástago retráctil manualmente, con lo cual la compuerta se abre de inmediato debido a la acción del motor. Este paso se realiza en simultaneo con el paso '5'.
7. Captura y almacenamiento de datos: Una vez se abre la compuerta, el sensor óptico contiguo detecta el movimiento, lo cual es interpretado en el código de programación, iniciando la captura de datos de los sensores ultrasonido y de la cámara Guppy CCD.
8. Limpieza del canal: Se realiza la recolección del material represado en el canal.

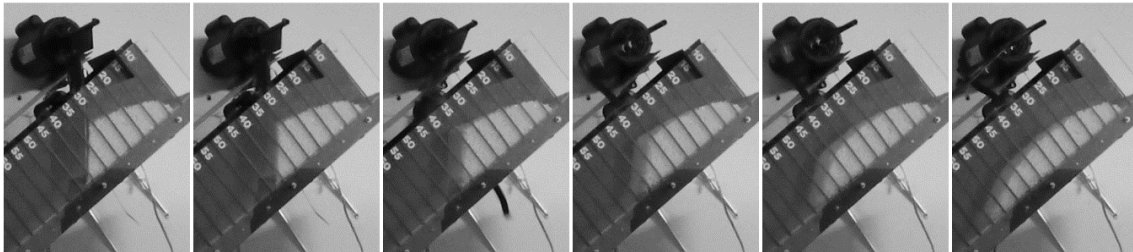


Figura 4. Fotogramas de la apertura de la compuerta y deslizamiento inicial, captados por la cámara digital en el ensayo S3P40.

4. Resultados

4.1. Descripción de datos obtenidos

Al finalizar cada ensayo y mediante la gestión del código de programación, se almacenan automáticamente en el equipo de cómputo los datos recogidos por los sensores de ultrasonido y de la cámara CCD. Igualmente se transfieren al equipo los fotogramas capturados mediante la cámara digital.

En cada unidad experimental se obtienen seis (6) series de datos, los cuales son nombrados según el tipo de dato, seguido del código de la campaña experimental y luego, del número de la prueba. Así, por ejemplo, para las distancias capturadas por el *sensor de ultrasonido No 1*, en el ensayo *No 1*; el archivo correspondiente se denomina: “*dist1_S3P1*”. En la Tabla 3 se describen en detalle los tipos de archivos.

Tabla 3. Tipos de datos almacenados en cada ensayo.

Nombre	Descripción
<i>Dist1_S3PX</i>	Distancias captadas desde el sensor de ultrasonido No 1 (en el segmento inclinado), hasta la parte superior del flujo, o hasta la base del canal.
<i>Dist2_S3PX</i>	Distancias captadas desde el sensor de ultrasonido No 2 (en el segmento horizontal), hasta la parte superior del flujo, o hasta la base del canal.
<i>Image_cam_S3PX</i>	Secuencia de imágenes de la parte superior del flujo captada por la cámara CCD.
<i>Time_cam_S3PX</i>	Tiempos de cada una de las fotografías captadas por la cámara CCD
<i>Time_gen_S3PX</i>	Tiempo general de cada ensayo y tiempos referenciados de cada una de las distancias de los sensores de ultrasonido.
<i>Fot_S3PX</i>	Carpeta que contiene los fotogramas del movimiento del flujo a lo largo del canal, capturados por la cámara digital.

Nota: En el CD se encuentran los datos obtenidos correspondientes a la totalidad de los ensayos, organizados así: En el Apéndice B se encuentran organizados por número de ensayo y tipo de material, las distancias captadas por los sensores de ultrasonido y el tiempo de captura correspondiente, así como el tiempo de captura de cada una de las imágenes de la cámara CCD. En el apéndice C y D se encuentra una muestra de las secuencias fotográficas captadas por la cámara CCD y la cámara digital respectivamente.

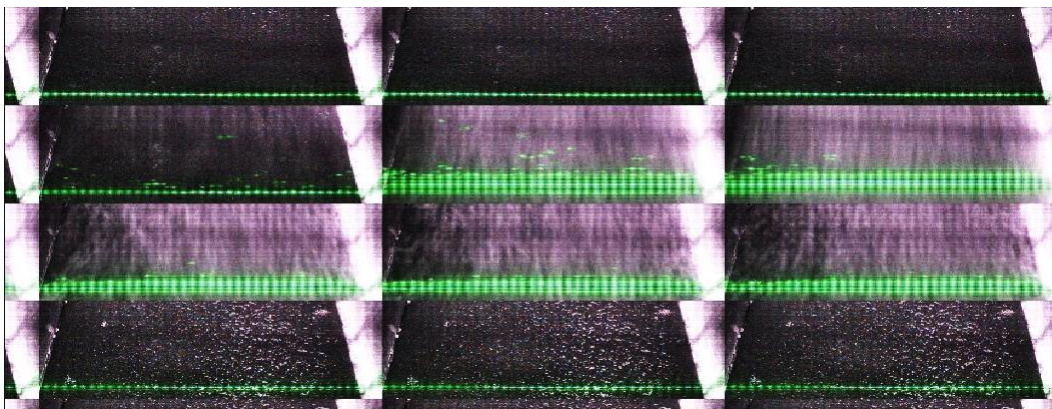


Figura 5. Secuencia del movimiento registrada por la cámara CCD, en el ensayo S3P40.

4.2. Estimaciones

Con el fin de apreciar de manera preliminar la incidencia del tipo de base rugosa sobre la velocidad del material que se desliza, se decide estimar la velocidad frontal en cada uno de los ensayos, a partir de las gráficas altura – tiempo de los sensores de ultrasonido. Cabe aclarar que este análisis preliminar no permite observaciones concluyentes y solo servirá de base para estudios estadísticos avanzados posteriores, que permitan afirmaciones confiables.

La variable denominada Velocidad Frontal Estimada (**VFE**), es calculada en cada unidad experimental, por medio de la inspección de las gráficas altura – tiempo de los sensores. En estas graficas se evidencian algunos errores o interferencias en la captación de datos por parte de los dispositivos de ultrasonido, lo cual dificulta la estimación del tiempo en que el flujo pasa por los sensores, tal como se aprecia en la Figura 6. Por lo tanto, para facilitar la lectura del valor de tiempo en que el deslizamiento es registrado por los sensores, se realiza un ligero tratamiento a los datos de altura captados por estos dispositivos, en el cual se mide el valor estadístico “moda” de las alturas en los primeros 0.5 segundos (antes de que el flujo pase por debajo del primer sensor); lo cual determina la altura existente entre el dispositivo ultrasonido y la base del canal.

Posteriormente cada valor mayor a esta medida (moda Y), es convertido al valor menor captado inmediatamente anterior, ya que no es natural que se registren alturas mayores entre el sensor y la base del canal durante el deslizamiento. Con la nueva grafica de alturas modificadas (Figura 7) se facilita la observación de la ocurrencia del deslizamiento y como se mencionó anteriormente se estima, visualmente, el valor del tiempo en que la parte frontal del flujo atraviesa la zona de cada sensor. Con este valor de tiempo y la distancia recorrida del material en el canal se calcula la Velocidad Frontal Estimada (**VFE**).

Este cálculo se realiza para todos los ensayos y las tablas correspondientes son presentadas en el CD adjunto, en la sección “*Datos_S3P*”, agrupados por tipo de material y tipo de lija. Luego, Para evidenciar el comportamiento de la variable VFE de cada uno de los tipos de material granular sobre los tres tipos de rugosidad diferente (180, 150 y 120 SIA), se comparan los ensayos, ordenados de menor a mayor según la variable VFE y agrupados según el tipo de lija usado, como se ejemplifica con el ensayo S3P40 en la Tabla 4.

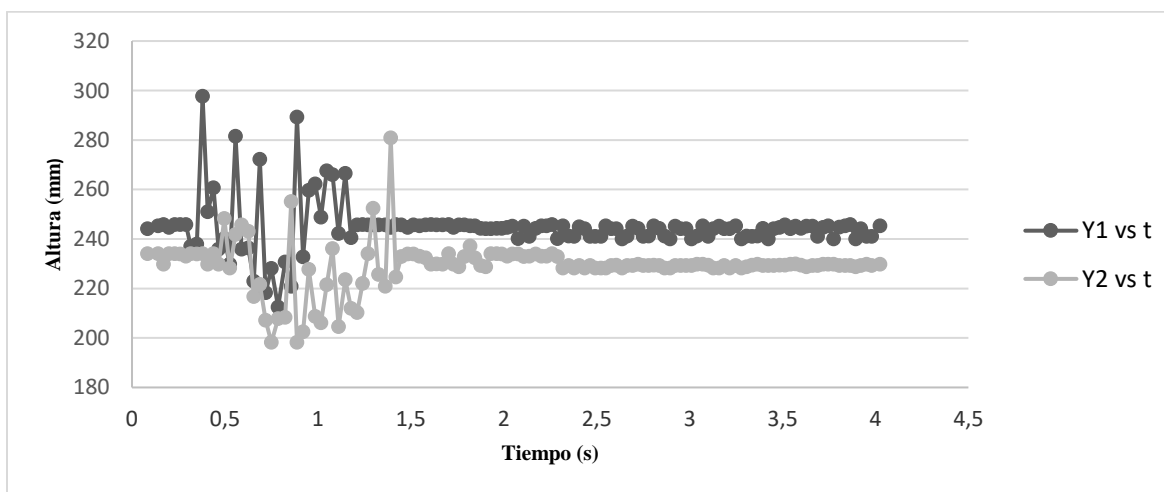


Figura 6. Gráfica de alturas vs tiempo de los sensores de ultrasonido, correspondientes al ensayo S3P1.

Nota: La serie “Y1” muestra las alturas registradas en la sección inclinada, mientras que Y2 hace referencia a las alturas en la sección horizontal.

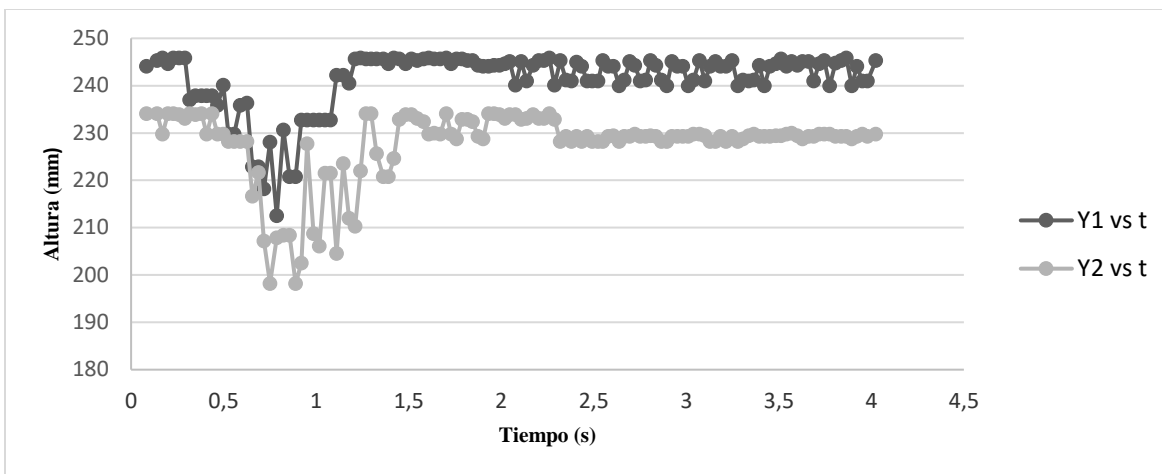


Figura 7. Gráfica de altura vs tiempo modificada, de los sensores de ultrasonido en el ensayo S3P1.

Nota: La serie "Y1" muestra las alturas registradas en la sección inclinada, mientras que Y2 hace referencia a las alturas en la sección horizontal.

Tabla 4. Comparativo de los valores de VFE del material de partículas de cristal en los diferentes tipos de lija. (En la sección inclinada)

Comparación No	Ensayos L.180	VFE L.180 (cm/s)	Ensayos L.150	VFE L.150 (cm/s)	Ensayos L.120	VFE L.120 (cm/s)
1	S3P19	116.967	S3P84	173.544	S3P96	178.712
2	S3P20	205.754	S3P78	179.725	S3P99	189.361
3	S3P23	228.456	S3P87	197.051	S3P92	192.508
4	S3P25	233.587	S3P76	200.852	S3P97	193.074
5	S3P24	234.445	S3P82	202.498	S3P94	193.177
6	S3P28	242.567	S3P80	206.035	S3P98	193.241
7	S3P21	243.221	S3P79	207.972	S3P91	195.384
8	S3P30	244.372	S3P88	208.998	S3P100	199.957
9	S3P27	246.919	S3P90	209.358	S3P95	200.979
10	S3P18	252.017	S3P81	209.670	S3P104	202.193
11	S3P17	253.014	S3P86	212.272	S3P103	206.026
12	S3P29	267.449	S3P77	215.348	S3P105	206.460
13	S3P26	272.310	S3P85	218.067	S3P101	209.442
14	S3P22	274.052	S3P83	223.317	S3P102	223.299
15	S3P16	289.661	S3P89	403.219	S3P93	229.322

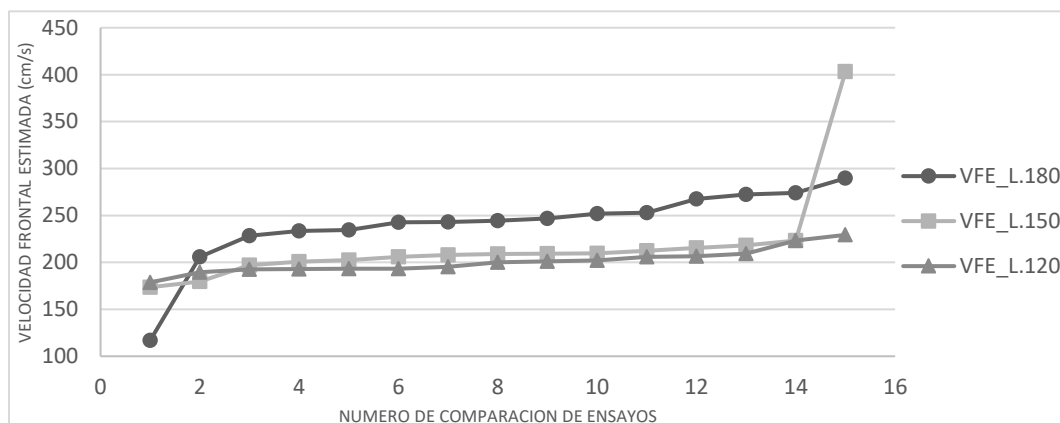


Figura 8. Gráfica comparativa de la velocidad frontal alcanzada por las partículas de cristal sobre los diferentes tipos de lija, en la sección inclinada. Construida a partir de los datos de la tabla No 4.

Se observa en la Figura 8 una tendencia de disminución de la velocidad frontal estimada a medida que aumenta la rugosidad de la lija usada. En el Apéndice E se presentan las gráficas correspondientes de los otros materiales, en donde se evidencia una tendencia similar.

Para cuantificar esta relación se desarrolla la siguiente tabla, donde se calcula el número de comparaciones en que se presenta disminución de la VFE a medida que aumenta la rugosidad en la base del canal.

Tabla 5. Variación porcentual de las velocidades frontales estimadas, correspondientes al material de partículas de cristal.

Comp. No	Var. 1 (%)	Var. 2 (%)	Decremento en Var. 1 Y 2
1	48,370	2,892	NO
2	-12,651	5,089	NO
3	-13,746	-2,360	SI
4	-14,014	-4,028	SI
5	-13,627	-4,825	SI
6	-15,061	-6,621	SI
7	-14,493	-6,443	SI
8	-14,475	-4,521	SI
9	-15,212	-4,169	SI
10	-16,803	-3,698	SI
11	-16,103	-3,032	SI
12	-19,480	-4,305	SI

13	-19,920	-4,118	SI
14	-18,513	-0,008	SI
15	39,204	-75,831	NO
No de comparaciones con decremento en Var. 1 y 2			12
No de comparaciones totales			15
Porcentaje de comparaciones con decremento en Var. 1 y 2			80,00%

Nota: El ítem denominado “Var. 1”, hace referencia al cambio porcentual de la velocidad usando la lija número 150 respecto a los valores conseguidos con la lija tipo 180. Igualmente, el ítem “Var. 2” hace referencia a los cambios de velocidad usando la lija 120 y comparados con los obtenidos en los ensayos en los que se usó lija tipo 150.

En la Tabla 5 se tiene en cuenta la cantidad de cotejos donde se presenta decremento en las dos variaciones, con lo cual se calcula el porcentaje de participación de los comparativos que insinúan una relación inversamente proporcional entre la rugosidad de la lija y la velocidad frontal del flujo. Este análisis se repite para las pruebas de los otros materiales y se compilan sus resultados, divididos según la sección del canal donde se captaron los datos.

Tabla 6. Resultados de variaciones en la velocidad frontal alcanzada por los materiales granulares en la sección inclinada

Sección Inclinada (Sensor No 1)			
Tipo de Material	No de comp. con decremento en Var. 1 y 2	No de comp. totales	Porcentaje de comp. con decremento en Var. 1 y 2
Partículas Plásticas	7	11	63.64%
Partículas de Cristal	12	15	80.00%
Material Pétreo	9	11	81.82%
TOTAL	28	37	75.68%

Tabla 7. Resultados de variaciones en la velocidad frontal alcanzada por los materiales granulares en la sección horizontal

Sección Horizontal (Sensor No 2)			
Tipo de Material	No de comp. con decremento en Var. 1 y 2	No de comp. totales	Porcentaje de comp. con decremento en Var. 1 y 2
Partículas Plásticas	7	11	63.64%
Partículas de Cristal	11	15	73.33%
Material Pétreo	5	11	45.45%
TOTAL	23	37	62.16%

Los resultados obtenidos sugieren que entre el 62 y el 75 por ciento de los casos se presenta incidencia de la rugosidad de la base del canal sobre la velocidad frontal estimada (VFE). Se destacan los altos porcentajes obtenidos con los datos captados por el sensor en la sección inclinada y su disminución según los datos del sensor en la sección horizontal, especialmente en el material pétreo.

Adicionalmente se analiza el comportamiento de las velocidades promedio para cada tipo de material y según el tipo de lija, con la finalidad de confirmar o desestimar los resultados obtenidos en las Tablas 6 y 7. Se tienen en cuenta los valores estadísticos de desviación estándar y varianza.

Tabla 8. Velocidades promedio de los materiales granulares en la sección inclinada, según el tipo de lija

Lija No	Tipo de Material	Promedio VFE (cm/s)	Desv. Est. (cm/s)	Varianza
180	Partículas plásticas	258.438	64.6003	4173.199
	Partículas de cristal	240.319	39.9414	1595.317
	Material pétreo	182.323	26.0783	680.079
150	Partículas plásticas	205.989	12.0524	145.260
	Partículas de cristal	217.862	52.9537	2804.099
	Material pétreo	174.674	6.5753	43.234
120	Partículas plásticas	192.796	22.6200	511.666
	Partículas de cristal	200.876	12.9506	167.718
	Material pétreo	177.779	23.6974	561.565

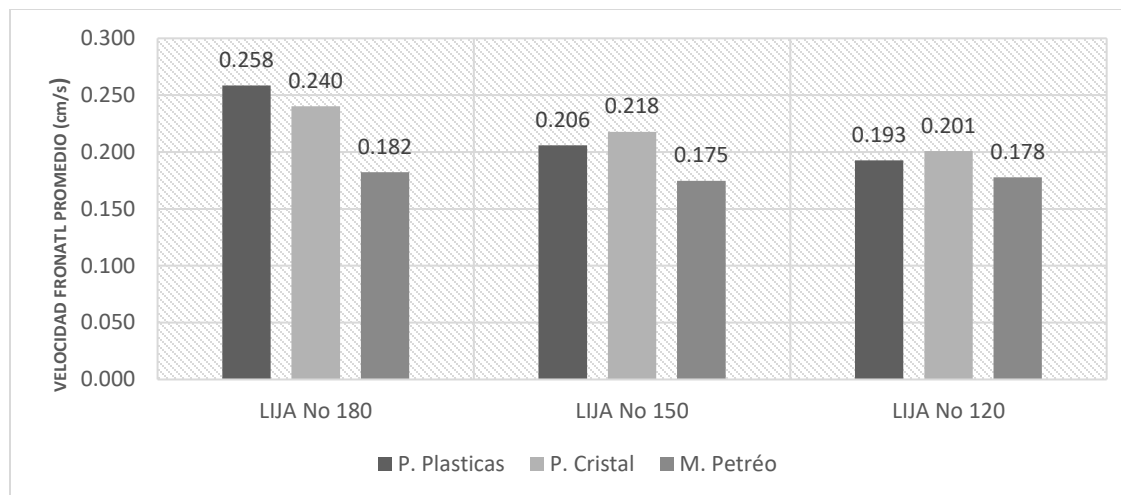


Figura 9. Comparativa de las velocidades promedio de los materiales ensayados sobre los diferentes tipos de rugosidad, en la sección inclinada. Datos tomados de la tabla 8.

Tabla 9. Velocidades promedio de los materiales granules en la sección horizontal, según el tipo de lija

Lija No	Tipo de Material	Promedio VFE (cm/s)	Desv. Est. (cm/s)	Varianza
180	Partículas plásticas	280.257	40.7368	1659.485
	Partículas de cristal	287.280	31.7463	1007.828
	Material pétreo	224.318	33.3530	1112.420
150	Partículas plásticas	272.567	12.4148	154.128
	Partículas de cristal	289.912	49.9913	2499.132
	Material pétreo	222.228	11.6143	134.891
120	Partículas plásticas	233.826	20.9204	437.665
	Partículas de cristal	257.457	10.9148	119.133
	Material pétreo	208.751	20.5815	423.598

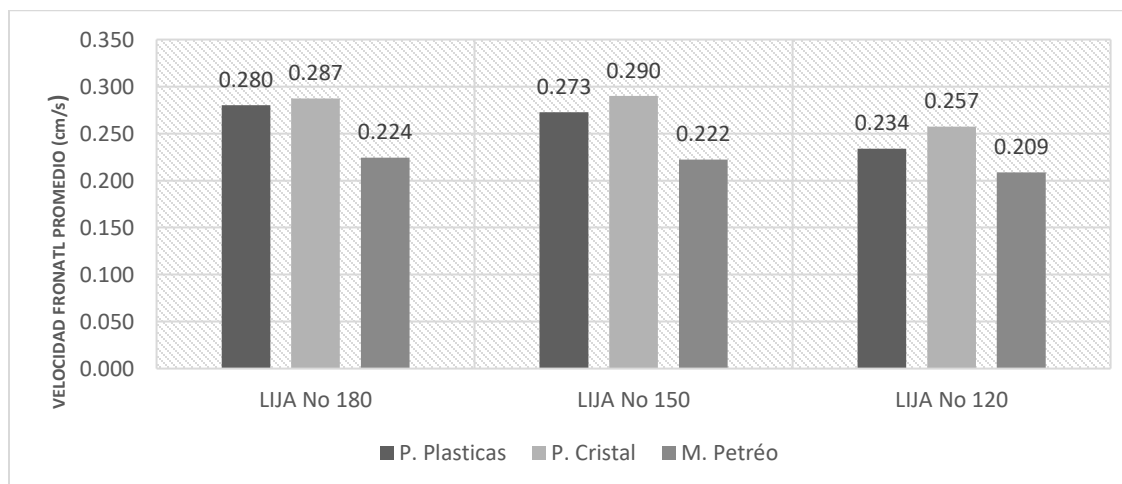


Figura 10. Comparativa de las velocidades promedio de los materiales ensayados sobre los diferentes tipos de rugosidad en la sección horizontal. Datos tomados de la tabla 9.

En las Figuras 9 y 10 se aprecia la comparativa grafica de los promedios de velocidad alcanzados por cada material en la sección inclinada y horizontal respectivamente. Se evidencian dos tendencias importantes; la primera, que la velocidad alcanzada por las partículas de cristal es mayor a la de los otros dos materiales. Seguida de las velocidades promedio de las partículas plásticas, y por ultimo del material pétreo. La segunda tendencia recalca la disminución de las velocidades al usar un tipo de lija de mayor rugosidad, tal como se observa en los resultados de las Tablas 6 y 7 del anterior análisis comparativo. Es de notar algunos resultados atípicos o que no siguen las tendencias enunciadas, tales son los casos en donde la velocidad promedio de las partículas plásticas es la mayor registrada (primera comparativa de la Figura 9), o donde la velocidad promedio de un mismo material aumenta sobre un tipo de lija de mayor rugosidad que la anterior (tercera comparativa de la Figura 9 en el material pétreo y segunda comparativa en la Figura 10 en el material de cristal). Estos resultados atípicos podrían tener su explicación debido a errores en la captura de datos o en la estimación de resultados iniciales, ya que los valores de desviación estándar correspondiente a estos casos anómalos son relativamente altos, como se indica en la Tabla 8 y 9, lo que se traduce en datos muy dispersos y su consecuente error en el cálculo de la media estadística.

Por otra parte, en cuanto al alcance del deslizamiento del flujo granular, se determina que no es posible estimar esta variable, debido a que el recorrido de las partículas plásticas y de cristal excede la longitud del canal, como se evidencia en los fotogramas de los ensayos correspondientes. Mientras que en los ensayos del material pétreo se observa que este posee menor capacidad de fluir en comparación con los materiales sintéticos, sin embargo, el cálculo exacto de su alcance será analizado con herramientas de binarización de imagen, en el debido tratamiento y análisis de datos posterior a la presente campaña experimental.

5. Comentarios

La instrumentación del canal de flujo Collaptes V1.0 permite la obtención de datos relacionados al fenómeno de remoción de masas para materiales friccionantes, mediante la ejecución de una serie de ensayos de material desagregado, controlando algunas variables como la rugosidad de la base del canal, el volumen desencadenado y el confinamiento lateral del flujo. Los dispositivos equipados al conducto captan alturas de la masa deslizante, tiempos y fotogramas de la geometría y deformación del flujo en su recorrido a lo largo del canal.

A partir de los datos obtenidos en el montaje experimental se pretende analizar, por medio de estudios estadísticos futuros, la incidencia de la rugosidad en la base del canal sobre la velocidad y alcance de los materiales desagregados ensayados. En estos estudios se emplean técnicas de análisis de varianza para determinar si existen o no relaciones en las variables analizadas.

Aun cuando el propósito principal de este documento se limita a describir el proceso de recolección de datos, se realiza un ligero análisis con el fin de evidenciar el comportamiento de los materiales ensayados y sus correspondientes velocidades, así como con el ánimo de aportar resultados que sirvan de complemento para estudios venideros. En el análisis de datos realizado en este documento se observa que las velocidades alcanzadas por los materiales sintéticos son mayores a las del material pétreo. La tendencia sugiere que son las partículas de cristal las que alcanzan las mayores velocidades, seguidas por las partículas plásticas y por último se encuentran las registradas por el agregado pétreo, en cuyos ensayos también se observa su baja capacidad para fluir en comparación con los otros dos materiales. Este resultado confirma que la velocidad de la masa deslizante no depende del peso específico de sus partículas, ya que este parámetro es mayor en el agregado pétreo comparado con los materiales sintéticos (Román, 2015).

Por otra parte, se evidencia la tendencia de disminución de velocidades de los materiales a medida en que aumenta la configuración de rugosidad de la lija, lo cual sugiere una relación inversamente proporcional entre estas variables. Aunque el material pétreo sigue esta tendencia, es de notar que la variación de sus velocidades promedio es un tanto incipiente, lo que da razón para sospechar que la rugosidad de la base del canal afecta en menor medida la velocidad de aquellos materiales con poca capacidad de fluir.

Se identifican varias fuentes de error en diferentes fases de la ejecución de la campaña experimental. La primera de ellas hace referencia a la exactitud de los sensores de ultrasonido, los cuales en algunos ensayos capturan valores de distancia desacertados que exceden las distancias límites del canal de pruebas. Estos tipos de datos erróneos también son influenciados por factores como la vibración del canal debido a la activación del motor o la apertura de la compuerta. La estación laser también puede verse levemente involucrada por estas vibraciones. La luminosidad del laboratorio en que se realizaron las pruebas es otra fuente importante de error, puesto que incide sobre el contraste que se requiere dar entre el material que se desliza y las paredes laterales del canal, dificultando en algunos ensayos la inspección de la deformación del flujo y el pos-proceso de imágenes.

Finalmente, cabe resaltar que profesionales del grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción INME, proyectan nuevas campañas experimentales para el estudio del fenómeno de remoción de masas, usando dispositivos de mayor precisión para la captación de datos y tratando de involucrar la mayor cantidad de variables, con la intención de crear modelos que permitan simular deslizamientos de material granular a mediana y pequeña escala.

Referencias bibliográficas

- Cagnoli, B., & Romano, G. P. (2010). Effect of grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: An experimental determination. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193(1–2), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.03.003>
- El Tiempo. (2018). Buscan víctimas fatales en derrumbes en vía Bucaramanga- Cúcuta. *Periodico El Tiempo*. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/buscan-victimas-fatales-en-derrumbes-en-via-bucaramanga-cucuta-215060>
- García, J. (2014). Amenaza por remoción en masa en Colombia. Retrieved from <http://ceelat.org/mapas/amenaza-por-remocion-en-masa-en-colombia/>
- Gray, J. M. N. T., Wieland, M., & Hutter, K. (1999). Gravity-driven free surface flow of granular avalanches over complex basal topography. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455(1985), 1841–1874. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0383>
- Greve, R., Koch, T., & Hutter, K. (1994). Unconfined flow of granular avalanches along a partly curved surface. {I. Experiments and numerical computations}. *Proc. Royal Soc. London A*, 445(1924), 415–435. <https://doi.org/10.1098/rspa.1994.0068>
- Hungr, O., & Morgenstern, N. R. (1984). Experiments on the flow behaviour of granular materials at high velocity in an open channel. *Géotechnique*. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.3.383>
- Hutter, K., & Koch, T. (1991). Motion of a granular avalanche in an exponentially curved chute: Experiments and theoretical predictions. *Phil. T. R. Soc. A*, 334(1633), 93–138. <https://doi.org/10.1098/rsta.1993.0033>

- Hutter, K., Koch, T., Plüss, C., & Savage, S. B. (1995). The Dynamics of Avalanches of Granular-Materials from Initiation to Runout .2. Experiments. *Acta Mechanica*, *109*, 127–165. <https://doi.org/10.1007/BF01176820>
- Major, J. J., & Iverson, R. M. (1999). Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *Bulletin of the Geological Society of America*, *111*(10), 1424–1434. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<1424:DFDEOP>2.3.CO](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<1424:DFDEOP>2.3.CO)
- Mergili, M., Santiago, C., & Moreiras, S. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Revista Colombiana De Geografía*, *24*, 113–131. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211>
- Ministerio De Salud Y Protección Social. (2013). *Análisis de Situación de Salud según regiones Colombia*. Dane. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., & Law, R. P. H. (2013). Longitudinal spreading of granular flow in trapezoidal channels. *Geomorphology*, *194*, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.016>
- Rodriguez-Sedano, L. A., Sarocchi, D., Sulpizio, R., Borselli, L., Campos, G., & Moreno Chavez, G. (2016). Influence of particle density on flow behavior and deposit architecture of concentrated pyroclastic density currents over a break in slope: Insights from laboratory experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *328*, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.10.017>
- Rodriguez, Y. (2018). ¿Piensa viajar? Este es el reporte de vías afectadas por las lluvias en Santander. *Vanguardia Liberal*. Retrieved from <http://www.vanguardia.com/economia/local/432402-piensa-viajar-este-es-el-reporte-de-vias-afectadas-por-las-lluvias-en-santander>

Román, D. (2015). *Análisis experimental del movimiento del fenómeno de remoción de masas en materiales granulares*. Universidad Industrial de Santander. Informe técnico inédito.

Bucaramanga.

Román, D. (2018). *Tamaño del efecto y de la muestra para la campaña experimental S3*.

Universidad Industrial de Santander. Informe técnico inédito. Bucaramanga.

Salm, B. (1968). On nonuniform, steady flow of avalanching snow. *IUGG/IAHS General*

Assembly, 79, 19–29.