

# **Maestría en Ingeniería Civil**

**Modelación física en maquina centrífuga para análisis en 2D de estabilidad de taludes de suelos binarios.**

**Pedro Alejandro Restrepo Vásquez**

**Bogotá, D.C., 13 de septiembre de 2023**



**Modelación física en maquina centrífuga para análisis en 2D de estabilidad de taludes de suelos binarios.**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia.**

**Ing. Ph.D Catalina Lozada López**  
**Directora**

**Jurados:**

**Ing. Ph.D Lina Ximena Garzón Ávila**  
**Ing. José Vicente Amórtegui Gil**

**Bogotá, D.C., 13 de septiembre de 2023**



La tesis de maestría titulada “ **Modelación física en maquina centrífuga para análisis en 2D de estabilidad de taludes de suelos binarios.**”, presentada por Pedro Alejandro Restrepo Vasquez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

  
Directora de tesis  
**Catalina Lozada López**

Jurado  
**Lina Ximena Garzón Ávila**

Jurado  
**José Vicente Amórtegui Gil**

Bogotá, DC., día de mes de año (\_\_\_\_\_)

*Dedicatoria*

A mi hermana Laura Ximena Restrepo Vásquez †

## **Agradecimientos**

A Dios por darme fortaleza

A mi querida madre por su amor, apoyo incondicional y sus oraciones.

A mi directora de tesis la ingeniera Catalina Lozada un agradecimiento muy especial porque en todo momento me brindo su buen consejo, conocimiento, apoyo y tiempo para poder culminar con éxito este trabajo de investigación.

A mi gran amigo Brayan González que siempre me impulso a iniciar mis estudios de maestría, por su motivación y ayuda en todo este proceso de estudio.

A mi novia Juliana Lima Guzmán por su amor, incondicionalidad, apoyo y motivación, que me ayudaron a alcanzar este logro.

A la ingeniería Lina Garzón que siempre encontré en ella una solución y respuesta cordial ante los inconvenientes que se presentaron durante la ejecución del trabajo de grado.

Finalmente, a todos los profesores que me brindaron su conocimiento, a mis amigos y familiares que me ofrecieron sus palabras de motivación durante todo el proceso de estudio.

## Resumen

Los suelos binarios son formaciones complejas por estar conformados por bloques de roca de diferentes dimensiones incrustados en una matriz más fina y débil; se encuentran en depósitos residuales, coluviales, de detritos, de flujo de lodos entre otros. los taludes de suelos binarios se presentan en laderas naturales o taludes antrópicos, presentando una difícil comprensión en su comportamiento debido a la interacción que se presenta entre los bloques de rocas y su matriz. Con base en la no existencia de estudios físicos de este tipo de taludes de suelos binarios con matriz cohesiva se determinó un proceso constructivo para modelación física en maquina centrífuga geotécnica en el que se tuvo en cuenta la pendiente del talud, esfuerzo de consolidación y el proceso de inclusión de las barras en la matriz para una viabilidad investigativa. Los taludes se construyeron con una matriz cohesiva de caolín y agua hasta alcanzar 1.5 veces el límite líquido, los bloques de roca se simularon con barras de aluminio de diámetro de 0,8cm; se incrementó gradualmente el ABP (*Areal Block Proportion*) para determinar el comportamiento del talud y la incidencia de los bloques en el modelo. La investigación valido la mejor estabilidad de los taludes con el aumento del ABP y la generación de superficies de falla rotacional.

**Palabras claves:** Suelos binarios, BIM (*Block in matrix*), *Binary granular mixtures*, ABP (*Areal Blocks Proportion*), centrífuga geotécnica

## Tabla de contenido

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Introducción .....  | 13 |
| 2.    | Problema de Investigación .....   | 15 |
| 3.    | Objetivos .....   | 17 |
| 3.1   | Objetivo General .....  | 17 |
| 3.2   | Objetivos Específicos.....  | 17 |
| 4.    | Marco Teórico.....  | 18 |
| 4.1   | Suelos Binarios o <i>Bimrocks/Bimsoils</i> .....                                    | 18 |
| 4.1.1 | Investigaciones para el análisis de estabilidad de taludes en suelos binarios ..... | 21 |
| 4.1.2 | Investigaciones en modelación física de taludes en suelos binarios.....             | 26 |
| 4.1.3 | Investigaciones de suelos binarios con matriz cohesiva .....                        | 28 |
| 4.2   | Fundamentos de la Modelación Física en Maquina Centrífuga Geotécnica.....           | 31 |
| 4.2.1 | Limitaciones de la modelación en centrífuga .....                                   | 33 |
| 4.3   | Características de Maquina centrífuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería .....  | 35 |
| 4.4   | Análisis de imágenes mediante PIV .....   | 36 |
| 5.    | Metodología .....   | 37 |
| 5.1   | Determinación y caracterización de los materiales de la mezcla binaria.....         | 37 |
| 5.1.1 | Matriz de suelo cohesivo .....  | 38 |
| 5.1.2 | Bloques de roca.....  | 39 |
| 5.2   | Características generales y variables del modelo.....                               | 39 |
| 5.2.1 | Proceso constructivo del suelo binario .....  | 39 |
| 5.2.2 | Pendiente y altura del talud.....   | 40 |
| 5.2.3 | Esfuerzo de consolidación .....   | 42 |
| 5.2.4 | Proporción de bloques por área.....   | 42 |
| 5.3   | Análisis de capacidad portante de matriz con la inclusión de barras.....            | 43 |
| 5.4   | Modelación física en centrífuga.....  | 45 |
| 5.4.1 | Proceso constructivo de los modelos .....   | 45 |
| 5.4.2 | Vuelo en maquina centrífuga y registro fotográfico.....                             | 51 |
| 5.5   | Análisis de imágenes.....   | 51 |
| 6.    | Resultados y análisis.....  | 52 |
| 6.1   | Caracterización del suelo cohesivo.....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 6.1.1 Ensayo de humedad .....  | 53 |
| 6.1.2 Peso unitario.....   | 54 |
| 6.1.3 Resistencia al corte .....   | 54 |
| 6.2 Consolidación .....  | 56 |
| 6.3 Análisis del registro fotográfico.....                                 | 58 |
| 6.4 Análisis de imágenes mediante el uso GeoPIV_RG.....                    | 66 |
| 6.4.1 Vectores de desplazamiento.....                                      | 67 |
| 6.4.2 Desplazamiento resultante .....                                      | 72 |
| 6.5 Efecto del ABP en el comportamiento de taludes de suelos binarios..... | 77 |
| 6.6 Características de superficie de falla en función del ABP .....        | 81 |
| 7. Conclusiones .....  | 85 |
| 8. Recomendaciones .....   | 87 |
| Bibliografía .....   | 88 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Perfil típico de formación suelo coluvial. Fuente: (Suárez J, 2000) .....  | 19 |
| <b>Figura 2..</b> Un modelo de proporción de bloque del 20% de coluvión de canto rodado. Fuente: (Medley Edmund W & Sanz PF, 2004). .....   | 22 |
| <b>Figura 3.</b> Modelo de ejemplo bimrock con una proporción de bloques del 50 % y bloques distribuidos aleatoriamente. Fuente: (Medley Edmund W & Sanz PF, 2004). .....   | 23 |
| <b>Figura 4.</b> Superposición de las 15 superficies de falla obtenidas para cada VBP considerado de las configuraciones bimrock que tienen bloques $e=0.5$ $i=0^\circ$ y $60^\circ$ . El resultado del modelo solo de matriz también se muestra con la línea de puntos, a modo de comparación. Fuente: (Napoli et al., 2021) ..... | 24 |
| <b>Figura 5.</b> Superficie de falla tortuosa de un Bimslope. Fuente: (Montoya-Araque et al., 2020). 25   | 25 |
| <b>Figura 6.</b> Diagramas de caja que muestran el aumento $f_n^*$ dispersión para mayores proporciones de bloque. La dispersión se representa con el rango intercuartil (longitud de la caja) y la longitud de los bigotes. Los puntos negros representan valores atípicos. Fuente: (Montoya-Araque et al., 2020) .....            | 26 |
| <b>Figura 7.</b> Mesa basculante para modelación física Fuente: (Khorasani et al., 2019) .....  | 27 |
| <b>Figura 8.</b> Construcción de bloques con mezcla de cemento, yeso y agua en molde elipsoidal. Fuente: (Khorasani et al., 2019). .....  | 27 |
| <b>Figura 9.</b> Modelos de Bimslopes a) preparación del modelo b) Resultado del ensayo. Fuente: (Khorasani et al., 2019). .....  | 28 |
| <b>Figura 10.</b> Patrón de deformación para a) 2 inclusiones b) 3 inclusiones c) 4 inclusiones. Fuente: (Caicedo et al., 2003) .....   | 29 |
| <b>Figura 11.</b> Variación del Módulo edométrico con la concentración de inclusiones rígidas Fuente: (Zambrano & Caicedo., 2005) .....   | 30 |
| <b>Figura 12.</b> Campo deformación volumétrica con una inclusión rígida a diferentes densidades a) $\rho=2.5$ g/cm <sup>3</sup> , b) $\rho=3.2$ g/cm <sup>3</sup> c) $\rho=7.6$ g/cm <sup>3</sup> Fuente: (Lozada, 2012) .....   | 30 |
| <b>Figura 13.</b> Muestra de arcilla con 12 varillas antes y después que haya sido sometida a condiciones de esfuerzo en el corte directo. Fuente: (Vallejo, 2017) .....  | 31 |
| <b>Figura 14.</b> Variación de esfuerzos modelo y prototipo. Fuente: (Taylor, 1995) .....   | 34 |
| <b>Figura 15.</b> Centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente: Propia .....   | 36 |
| <b>Figura 16.</b> Metodología investigativa. Fuente: Propia .....   | 37 |
| <b>Figura 17.</b> Esquema de talud a) escala modelo b) escala prototipo. Fuente: Propia .....   | 37 |
| <b>Figura 18.</b> Carta de plasticidad y clasificación del suelo Caolín. Fuente:(Esquivel, 2023) .....  | 38 |
| <b>Figura 19.</b> Factor de seguridad para pendiente de $67^\circ$ . Fuente: Propia .....   | 41 |
| <b>Figura 20.</b> Factor de seguridad para pendiente de $40^\circ$ . Fuente: Propia .....   | 41 |
| <b>Figura 21.</b> a) Numeración de la posible ubicación de las barras b) ubicación definitiva de la instalación de las barras Fuente: Propia .....  | 43 |
| <b>Figura 22.</b> Preparación de la mezcla a) Caolín b) Agua c) Mezcladora mecánica. Fuente: Propia .....   | 46 |
| <b>Figura 23.</b> Preparación del modelo a) primera capa de mezcla b) caja llena con mezcla. Fuente: Propia .....   | 47 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 24.</b> Preparación del modelo a) primera capa de mezcla b) Primera línea de barras vista superior c) segunda línea de barras vista frontal d) caja llena con mezcla y barras al interior. Fuente: Propia .....                                   | 47 |
| <b>Figura 25.</b> a) Instalación de placa acrílica perforada b) Instalación de Pistón c) Instalación de modelo en consolidometro neumático. Fuente: Propia.....   | 49 |
| <b>Figura 26.</b> a) Placa guía b) Tubo pasando por el modelo c) Modelo con barras instaladas. Fuente: Propia .....   | 49 |
| <b>Figura 27.</b> Corte del talud y marcación de cuadrícula en cara frontal del modelo. Fuente: Propia .....  | 50 |
| <b>Figura 28.</b> a) Modelo posterior a la consolidación b) Corte del talud y marcación de cuadrícula en cara frontal del modelo. Fuente: Propia.....   | 50 |
| <b>Figura 29.</b> Modelo instalado dentro de maquina centrífuga previo al inicio del vuelo. Fuente: Propia .....  | 51 |
| <b>Figura 30.</b> Ensayo de resistencia al corte no drenada con mini veleta. Fuente: Propia.....  | 55 |
| <b>Figura 31.</b> Resistencia al corte no drenada (Su) Vs Esfuerzo de consolidación. Fuente: Propia   | 56 |
| <b>Figura 32.</b> Curva de consolidación para esfuerzo de 40 kPa. Fuente: Propia.....   | 56 |
| <b>Figura 33.</b> Asentamiento de modelos sin barras en consolidación – Esfuerzo de consolidación 30 kPa. Fuente: Propia .....  | 57 |
| <b>Figura 34.</b> Asentamiento de modelos con diferente cantidad de barras y esfuerzos de consolidación. Fuente: Propia.....  | 58 |
| <b>Figura 35.</b> Resultados de los modelos con pendiente 67° y esfuerzo de consolidación 30kPa *D.C: Barras instaladas después de consolidación. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia.....                 | 59 |
| <b>Figura 36.</b> Resultados de los modelos con pendiente 40° y esfuerzo de consolidación 30kPa *D.C: Barras instaladas después consolidación. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia.....                    | 60 |
| <b>Figura 37.</b> Resultados del modelo 8 con pendiente 40° y esfuerzo de consolidación 30kPa *D.C: Barras instaladas después consolidación. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia.....                      | 61 |
| <b>Figura 38.</b> Resultados de los modelos con inclusión de tubos antes de la consolidación, pendiente 40° esfuerzo de consolidación 30kPa y 50kPa. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia.....              | 62 |
| <b>Figura 39.</b> Resultados de los modelos con inclusión de barras antes de la consolidación, pendiente 40° con 0% ABP y 16,72% ABP. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia .....                            | 63 |
| <b>Figura 40.</b> Resultados de modelos con inclusión de barras antes de la consolidación, pendiente 40° con 16,72% ABP y 15,82% ABP. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia .....                            | 64 |
| <b>Figura 41.</b> Resultados de modelos con variables definitivas, inclusión de barras antes de la consolidación, pendiente 40°, esfuerzo de consolidación 40kPa. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia..... | 66 |
| <b>Figura 42.</b> Vectores de desplazamiento para MD1 con 0% ABP. Fuente: Propia .....  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 43.</b> Vectores de desplazamiento para MD1 con 0% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia .....     | 67 |
| <b>Figura 44.</b> Vectores de desplazamiento para MD2 con 11.42% ABP. Fuente: Propia .....  | 68 |
| <b>Figura 45.</b> Vectores de desplazamiento para MD2 con 11.42% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia ..... | 68 |
| <b>Figura 46.</b> Vectores de desplazamiento para MD3 con 14.61% ABP. Fuente: Propia .....  | 69 |
| <b>Figura 47.</b> Vectores de desplazamiento para MD3 con 14.61% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia ..... | 69 |
| <b>Figura 48.</b> Vectores de desplazamiento para MD4 con 16.72% ABP. Fuente: Propia .....  | 70 |
| <b>Figura 49.</b> Vectores de desplazamiento para MD4 con 16.72% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia ..... | 70 |
| <b>Figura 50.</b> Vectores de desplazamiento para MD5 con 19.26% ABP. Fuente: Propia .....  | 71 |
| <b>Figura 51.</b> Vectores de desplazamiento para MD5 con 19.26% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia ..... | 71 |
| <b>Figura 52.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD1 con 0% ABP. Fuente: Propia .....   | 72 |
| <b>Figura 53.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD1 con 0% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia .....                 | 72 |
| <b>Figura 54.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD2 con 11.42% ABP. Fuente: Propia .....                                     | 73 |
| <b>Figura 55.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD2 con 11.42% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia .....             | 73 |
| <b>Figura 56.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD3 con 14.61% ABP. Fuente: Propia .....                                     | 74 |
| <b>Figura 57.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD3 con 14.61% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia .....             | 74 |
| <b>Figura 58.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD4 con 16.72% ABP. Fuente: Propia .....                                     | 75 |
| <b>Figura 59.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD4 con 16.72% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia .....             | 75 |
| <b>Figura 60.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD5 con 19.26% ABP. Fuente: Propia .....                                     | 76 |
| <b>Figura 61.</b> Desplazamientos resultantes obtenidos para MD5 con 19.26% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia .....             | 76 |
| <b>Figura 62.</b> Imagen de referencia del análisis de los modelos a profundidad medidos desde la cresta del talud. Fuente: Propia .....  | 77 |
| <b>Figura 63.</b> Desplazamiento resultante vs Profundidad. Fuente: Propia .....  | 78 |
| <b>Figura 64.</b> Desplazamiento resultante por profundidad. Fuente: Propia .....   | 79 |
| <b>Figura 65.</b> Campos de deformación para partícula de $\rho = 2.5 \text{ gr/cm}^3$ Fuente: (Lozada, 2012). Fuente: Propia .....       | 80 |
| <b>Figura 66.</b> Proyección de zonas de superposición de deformaciones. Adaptado de (Lozada, 2012) .....                                 | 80 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 67.</b> Comportamiento de la matriz del suelo binario a) Partículas sin interacción b) Transición de interacción de partículas c)Partículas con interacción y generación de sobre consolidación a la matriz. Fuente: Propia..... | 81 |
| <b>Figura 68.</b> Modelos definitivos con dimensiones. Fuente: Propia.....   | 82 |
| <b>Figura 69.</b> Profundidad de falla vs ABP (%). Fuente: Propia.....   | 83 |
| <b>Figura 70.</b> Relación área deslizada/ área total vs ABP (%). Fuente: Propia.....  | 83 |
| <b>Figura 71.</b> Distancia corona talud vs ABP (%). Fuente: Propia .....  | 84 |

### Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Principales factores de escala para ensayos de centrífuga. Fuente: (Lozada et al., 2021) .....  | 33 |
| Tabla 2. Valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del Caolín. Fuente:(Esquivel, 2023).....                             | 38 |
| Tabla 3. Relación porcentual entre el diámetro de la barra y la longitud característica . Fuente: Propia .....                                   | 39 |
| Tabla 4. Ejemplo de proceso de aleatoriedad para instalación de las barras. Fuente: Propia.....  | 42 |
| Tabla 5. Resultados de Resistencia al corte no drenada (Cu) y Pesos unitarios ( $\gamma$ ) de ensayos Triaxial CU. Fuente: (Esquivel, 2023)..... | 45 |
| Tabla 6. Resultados de resistencia última del suelo. Fuente: Propia .....  | 45 |
| Tabla 7. Incrementos de carga para diferentes esfuerzos de consolidación. Fuente: Propia .....   | 48 |
| Tabla 8. Características de los modelos de talud de suelos binarios. Fuente: Propia .....  | 52 |
| Tabla 9. Contenido de humedad matriz de suelo cohesivo. Fuente: Propia .....   | 53 |
| Tabla 10. Contenido de humedad matriz de suelo cohesivo. Fuente: Propia .....  | 54 |
| Tabla 11. Resistencia al corte no drenada de suelo cohesivo con el ensayo de mini veleta. Fuente: Propia .....                                   | 55 |
| Tabla 12. Asentamientos finales por modelo. Fuente: Propia .....   | 57 |
| Tabla 13. Características de los cinco modelos definitivos. Fuente: Propia.....  | 66 |
| Tabla 14. Características de la superficie de falla de cada modelo definitivo. Fuente: Propia ....   | 82 |

## 1. Introducción

En la naturaleza se encuentran gran cantidad de depósitos que están compuestos por fragmentos de rocas de diferentes tamaños, embebidos en una matriz débil. Medley (1994) introdujo la palabra *Bimrocks* “*Block-in-matrix rock*” que la define como “Una mezcla de rocas compuesta de bloques geotécnicamente significativos unida dentro de una matriz de textura más fina”. El término “geotécnicamente significativos” se refiere al contraste mecánico entre los bloques y la matriz; a la vez la proporción de bloques deben ser suficientes para que exista una contribución en la resistencia general del macizo rocoso. El término “*Block in matrix soil*”, se emplea para mezclas en una matriz similar al suelo con incrustaciones de bloques de roca (Medley EW & Goodman RE, 1994). Adicionalmente Vallejo (2017) define los depósitos de flujo de lodo como una mezcla de arcilla y grandes partículas dispersas similares a rocas.

Existen diferentes tipos de formaciones que se encuentran ampliamente en la naturaleza con las características previamente descritas como lo son depósitos de detritos, depósitos de deslizamientos, depósitos coluviales y depósitos aluviales. Así mismo como lo menciona Montoya-Araque et al. (2020) los ejemplos de *Bimrocks* son los melanges, olistostromes, rocas de zona de falla, rocas erosionadas, brechas volcánicas y los coluviones; los *Bimsoils* son saprolitos que incluyen roca central, depósitos de taludes no consolidados (coluviación) y otros materiales similares al suelo con bloques que tienen tamaños que varían.

En todo el mundo se localizan formaciones montañosas conformadas de *Bimrocks/bimsoils* que presentan alta inestabilidad. El análisis de este tipo de taludes es mucho más complejo debido a la variabilidad de los porcentajes de rocas y al tipo de matriz presente en cada uno de ellos, por lo que es necesario realizar análisis especiales para obtener resultados confiables.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada para esta investigación, se pudo establecer que no se han realizado estudios físicos enfocados en taludes de matriz arcillosa con incrustaciones de rocas, por lo que es de bastante valor científico poder validar mediante modelación física el comportamiento de este tipo de formaciones y poder determinar si tienen relación con los análisis numéricos.

Para el presente trabajo de investigación se realizó modelación física mediante el uso de la maquina centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que tiene como propósito representar el comportamiento que tendría una condición real, bajo un modelo construido en laboratorio utilizando leyes de escala y aumentado la gravedad para lograr que las condiciones de esfuerzo en el prototipo y en el modelo sean las mismas. Se realizaron 18 modelos en donde se logró establecer cuál era la mejor técnica en el proceso constructivo para representar el suelo binario. Finalmente se realizó análisis de imágenes de 5 modelos con diferente ABP (*Areal Block Proportion*) bajo la técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*) para así establecer el desplazamiento vectorial y los desplazamientos resultantes, logrando de esta manera determinar el comportamiento del talud.

Es importante mencionar que en la revisión bibliográfica se encontró diferente terminología que hace referencia a los depósitos y/o taludes formados por rocas inmersas en matrices más débiles, entre ellos están *Bimrocks/bimsoils*, mezclas granulares binarias, *soil – rock mixtures* y suelos binarios.

## 2. Problema de Investigación

Los movimientos en masa son eventos producidos de manera natural o antrópica, los cuales tienen un alto poder destructivo por la magnitud de los eventos sobre la infraestructura física, produciendo grandes pérdidas monetarias y aún más importante causando miles de muertes y heridos; siendo estos más propicios en zonas de alta pendiente e inestables por las propiedades del suelo o roca (Highland & Bobrowsky, 2008). Es importante la realización de estudios de análisis de estabilidad de taludes para diferentes tipos de suelo y/o depósito, permitiendo de esta manera ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de zonas potencialmente inestables, logrando finalmente la reducción del riesgo.

Colombia se encuentra en una región tropical, en donde los procesos de meteorización química, física y biológica son más agresivos por las altas temperaturas, intensas lluvias y procesos geológicos fuertes como la alta sismicidad. Todos estos procesos afectan directamente una gran cantidad de estructuras geológicas, lo que conlleva a que se encuentren depósitos de suelos de matriz fina con incrustaciones de rocas gruesas de total heterogeneidad. Los depósitos que presentan estas características son denominados *Bimrocks* (*Block in matriz rocks*) en sus siglas en inglés, los cuales presentan altos problemas de inestabilidad.

El origen del depósito puede variar teniendo en cuenta si son suelos transportados, suelos residuales, depósitos coluviales o aluviales; sin embargo, presentan características similares en su composición encontrando fracciones de roca gruesa en matrices de partículas más finas. A mayor nivel de meteorización varía el porcentaje de fracción gruesa dentro de la matriz, por lo tanto, no existe homogeneidad en todos los depósitos, presentando así alta inestabilidad y produciendo elevado número de deslizamientos, afectando infraestructura de transporte, de vivienda y comunidad en general.

En la ingeniería civil se presenta comúnmente el estudio y análisis de estabilidad de taludes por la ejecución de obras civiles como carreteras, canteras de materiales pétreos, puentes entre otros. Representando un reto para la comunidad científica geotécnica generar análisis y modelos que simulen un comportamiento cercano a la realidad dependiendo del tipo de depósito.

Teniendo a consideración que los depósitos de mezcla de suelo y roca no tienen un comportamiento determinado por las características geomecánicas individuales de cada uno de los materiales que los compone. Existen estudios realizados sobre suelos binarios, enfocados principalmente en análisis numéricos. Aunque, en la literatura son escasas las investigaciones enfocadas en los análisis por métodos físicos de estabilidad de taludes de suelos binarios. Por lo anterior es relevante realizar investigaciones a través de modelos físicos que determinen el comportamiento en la estabilidad de taludes de suelos binarios con el objetivo de identificar superficies de falla, resistencia al corte y la interacción de la fracción gruesa dentro de la matriz fina.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento y el mecanismo de falla de un talud en 2D de suelo binario, variando el ABP (*Areal Block Proportion*) mediante la modelación física en maquina centrífuga geotécnica.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Establecer una técnica del proceso constructivo de modelos físicos de taludes en suelos binarios para la modelación física en maquina centrífuga.
- Establecer el efecto del porcentaje ABP (*Areal Blocks Proportion*) en la estabilidad de taludes a través de la determinación de los campos de desplazamiento y deformación obtenidos mediante análisis de imágenes usando la técnica de velocimetría de análisis de partículas (PIV).
- Analizar el efecto de la variación del ABP (*Areal Blocks Proportion*) en un talud en la superficie de falla y la tortuosidad, mediante análisis de imágenes usando la técnica de velocimetría de análisis de partículas (PIV).

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Suelos Binarios o *Bimrocks/Bimsoils*

*Bimrocks* “*Block-in-matrix rock*” fue un término introducido por Medley (1994) que la define como “una mezcla de rocas compuesta de bloques geotécnicamente significativos unida dentro de una matriz de textura más fina” el término “geotécnicamente significativos” se refiere al contraste mecánico entre los bloques y la matriz; a la vez la proporción de bloques deben ser suficientes para que exista una contribución en la resistencia general del macizo rocoso. Posteriormente se introdujo el termino de *Bimsoil* “*Block-in-matrix soil*” el cual relaciona la mezcla de bloques incrustados en una matriz parecida a un suelo. La principal diferencia entre los dos términos se encuentra en que los contactos de los bloques de los *Bimrocks* con la matriz tienen la misma resistencia al corte que la matriz; en los *bimsoils*, los contactos entre la matriz y los bloques son sin soldar (Napoli et al., 2021). El termino sin soldar se refiere a que el contacto entre matriz y bloque es más débil que la resistencia de la matriz.

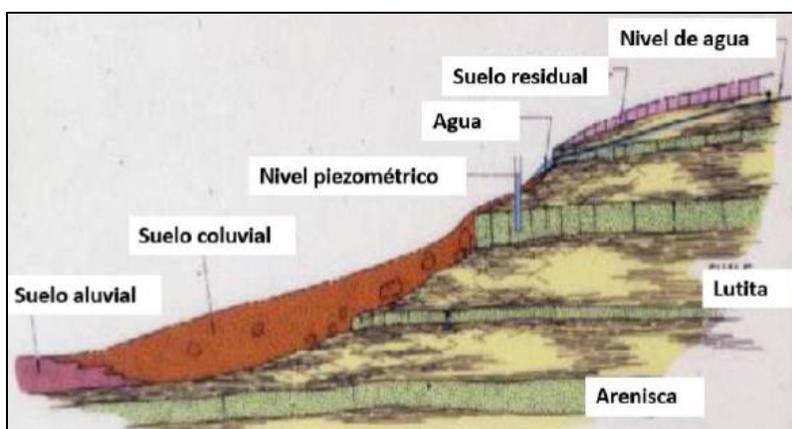
Teniendo en cuenta la definición de los *Bimrocks*, según Raymond LA (1984) es "Una mezcla de rocas, compuesta de bloques geotécnicamente incrustados dentro de una matriz de textura más fina” se puede establecer que gran cantidad de depósitos cumplen estas características, independiente del tipo de origen, como lo son los suelos transportados, suelos residuales, coluviones entre otros.

Los suelos residuales se originan por procesos de meteorización química, física y mecánica. Se presentan en gran concentración en los trópicos donde los procesos de altas temperaturas, intensas lluvias y procesos geológicos son más agresivos que en otras partes del mundo (Suárez J, 1998).

Vallejo (2017) describe a los depósitos de flujo de lodo como una estructura distintiva que consiste en una mezcla de arcilla y grandes partículas dispersas similares a roca. Para este tipo de depósitos prima una matriz de suelo cohesivo con una gran variabilidad de tamaños de rocas, por lo que se puede considerar como un suelo binario. Caicedo et al. (2003) define los flujos de lodo, flujos de detritos, depósitos de soliflucción, depósitos de suelos residual y coluvial como formaciones de

mezcla de partículas grandes (grava o fragmentos de arcilla dura) y una matriz blanda de suelo (arcilla, arcilla limosa, arena o mezcla de arena, limo y arcilla).

Los coluviones son masas de suelos depositados en la base de las laderas por procesos de movimientos en masa, siendo una mezcla de materiales derivados de la descomposición de las rocas que incluye fragmentos de roca con limos y arenas. En estos depósitos, las partículas gruesas generalmente angulosas, también se encuentran partículas redondeadas, los cuales se consideran de alta susceptibilidad a deslizamientos (Suárez J, 2000). En la Figura 1 se puede apreciar un esquema típico de coluviones.



**Figura 1.** Perfil típico de formación suelo coluvial. Fuente: (Suárez J, 2000)

Se puede interpretar que existen diferentes tipos de geomateriales con diferente tipo de origen, no obstante, las características se asemejan a depósitos de matriz fina con incrustaciones de rocas gruesas con total heterogeneidad y se consideran suelos binarios.

En la naturaleza se encuentra gran cantidad de depósitos que se consideran como *Bimrocks/bimsoils* como lo menciona Montoya-Araque et al. (2020) los ejemplos de *Bimrocks* son los malanges, olistostromes, rocas de zona de falla, rocas erosionadas y brechas volcánicas. Por otro lado, los *Bimsoils* se encuentran saprolitos, depósitos de taludes no consolidados (coluvión) y otros materiales similares al suelo con bloques y que tengan contacto bloque/matriz sin soldar. Así mismo de acuerdo con Poesen & Lavee (1994) en el mundo se encuentran múltiples depósitos de suelos cohesivos que contienen fragmentos de rocas adheridas.

Teniendo claro que existe gran variedad de geodepósitos que se enmarcan en los suelos binarios y con la variedad de materiales en su composición es importante conocer su comportamiento. Por lo anterior han existido diferentes investigaciones para determinar su resistencia, modos de falla y compresibilidad. Napoli et al. (2021) explica que el comportamiento de los suelos binarios va directamente relacionado con el incremento del VBP (*Volumetrical Block Proportion*) en sus siglas en inglés, especialmente cuando se encuentra en el rango de 25% y 70%.

Vallejo (2001) determinó que, en mezclas de fragmentos de roca y partículas de arena, la resistencia al corte está controlada por las partículas gruesas para una concentración en peso superior al 70 %, por las partículas más finas para una concentración en peso inferior al 40 % y en el rango entre 40 y 70% de concentración de partículas grandes, está parcialmente controlada por la resistencia de las partículas gruesas.

Para los análisis de estabilidad en suelos binarios es importante distinguir qué partículas se consideran de la matriz y cuales son bloques. Dependerá directamente de la estructura geotécnica de análisis, por lo que se hace uso de la dimensión de ingeniería característica ( $L_c$ ), esta longitud permite escalar la masa *bimrocks* al problema de análisis; para el análisis de estabilidad de taludes  $L_c$  es igual a la altura del talud (Medley, 1994).

Según Medley (1994), las partículas deben ser mayores a 5%  $L_c$  para considerarse como bloques, si es inferior a este valor se consideran parte de la matriz; adicional, si existen partículas con dimensiones mayores a 75%  $L_c$  se debe realizar un análisis con métodos de mecánica de rocas, dado que se consideran macizos rocosos fracturados.

Investigaciones de análisis de estabilidad de taludes se han realizado con métodos determinísticos, métodos de equilibrio límite y recientemente con el uso de métodos de elementos finitos (Napoli et al., 2021). Napoli et al. (2021) adicionalmente, determinaron que las superficies de falla circulares generadas por métodos de equilibrio límite que atraviesan las partículas de roca generan factores de seguridad más altos y no representan la realidad. Así mismo Montoya-Araque et al. (2020) definieron que el uso del método de equilibrio limite por falla circular no es confiable para

los suelos binarios, ya que las superficies de falla en este tipo de taludes son a través de la matriz que se encuentra entre los bloques más fuertes.

Debido a la composición de los *Bimrocks/bimsoils* se ha determinado que las superficies de falla pasan a través de los bloques, generando fallas tortuosas y no circulares; la irregularidad de la falla depende directamente del VBP (Khorasani et al., 2019). En el estudio realizado por Montoya-Araque et al. (2020) se comparan las fallas tortuosas como caminos de laberinto en el cual existe un inicio con una variedad de posibilidades de rutas hacia su punto final. Irfan TY & Tang KY (1993) concluyen que la trayectoria de la superficie tortuosa no solo depende del VBP, sino también de su distribución, geometría y tamaño de los bloques; así mismo se desarrollan cuando existe una diferencia entre la resistencia de los bloques y la matriz.

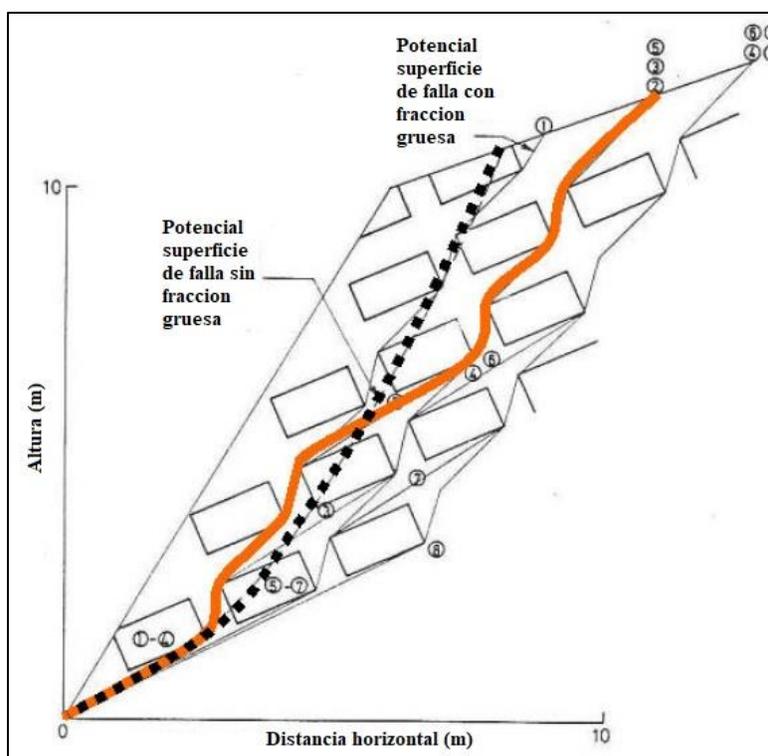
En los primeros estudios de análisis de estabilidad de taludes realizados sobre suelos binarios o *bimrocks*, los investigadores proyectaban de manera visual y manual el posible camino de las superficies de falla tortuosas entre los bloques. De acuerdo con Montoya-Araque et al. (2020) otra metodología para analizar estabilidad de taludes en suelos binarios es homogenizar las propiedades geomecánicas de los bloques y la matriz, como un material compuesto simple, en donde no se consideren superficies de falla tortuosas.

#### ***4.1.1 Investigaciones para el análisis de estabilidad de taludes en suelos binarios***

Irfan TY & Tang KY (1993) realizaron una investigación sobre la resistencia al corte de suelos heterogéneos con bloques rectangulares uniformes de dimensión máxima de 1,6 m. Los bloques se distribuían en cuadrículas con orientación similar a la superficie de falla que se generó en el modelo sin los bloques. El análisis de estabilidad del modelo fue a través de un software llamado INCLUYE BAS, desarrollado en lenguaje BASIC el cual proyectó automáticamente TFS en las esquinas de los bloques rectangulares, resultando trayectorias en zigzag.

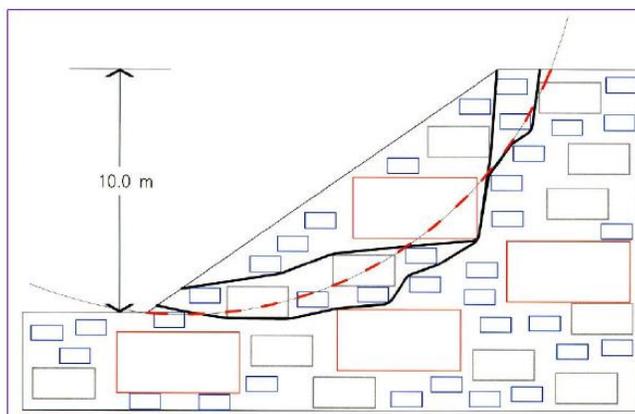
En el estudio realizado por Irfan TY & Tang KY (1993) se pudo concluir que la estabilidad de los *bimslopes*, que se analizan por factor de seguridad dependen de la proporción, geometría y tamaño de los bloques. Igualmente, de la resistencia al corte de la matriz, el distanciamiento y densidad de los bloques.

Los investigadores Medley Edmund W & Sanz PF (2004), realizaron análisis para un talud de altura de 10 metros, inclinación de  $60^\circ$ , con bloques rectangulares y con diferentes ABP (*Areal Block Proportion*) en sus siglas en inglés, de 13%, 25% y 50% como se evidencia en la Figura 2. Los análisis se desarrollaron con el modelo de Mohr Coulomb para la matriz y la distribución del tamaño del bloque se relacionan con las leyes de potencia negativa o exponencial negativa. Durante el estudio no se tuvo en cuenta el nivel freático ni el peso unitario de los bloques. Adicionalmente los investigadores desarrollaron un modelo de solo matriz para determinar la superficie de falla crítica que sirvió como guía para poder simular las posibles TFS (Tortuous Failure Surfaces) incluyendo los bloques.



**Figura 2..** Un modelo de proporción de bloque del 20% de coluvión de canto rodado. Fuente: (Medley Edmund W & Sanz PF, 2004).

En la Figura 3 se evidencia el análisis del talud con una altura de 10 metros, inclinación de  $35^\circ$ , con proporción de bloques del 50% y la superficie de falla tortuosa contra la superficie de falla de solo la matriz.



**Figura 3.** Modelo de ejemplo bimrock con una proporción de bloques del 50 % y bloques distribuidos aleatoriamente. Fuente: (Medley Edmund W & Sanz PF, 2004)

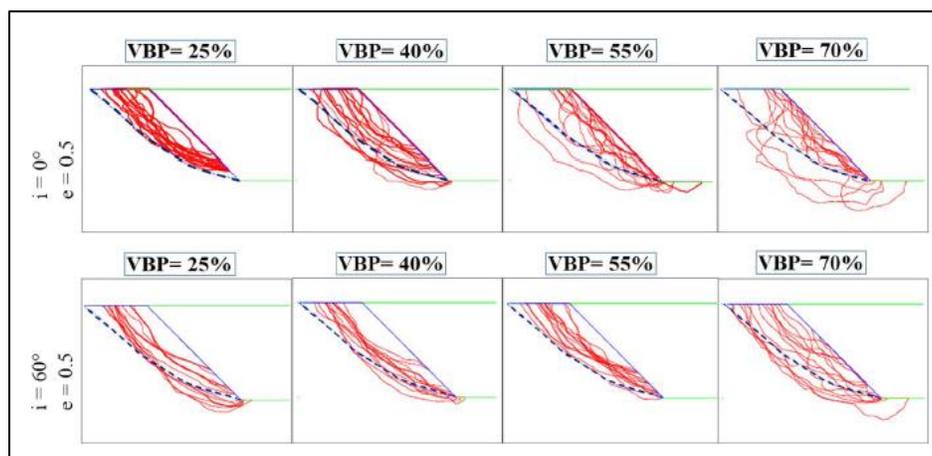
Guerra C et al. (2016) con base al estudio (Guerra C & Pinzón J, 2015) realizaron un análisis por método de elementos finitos de taludes en suelos binarios, con altura de 10m, pendiente 1:1 y diferentes proporciones de bloques variando la relación de largo y ancho. La investigación consistió en dos etapas, la primera se enfocó en un análisis de equilibrio límite (LEM) a un material al cual se le simplificó sus parámetros de resistencia bloque - matriz con superficies de falla circular; el segundo análisis parte de los resultados de método de elementos finitos para proyectar superficies tortuosas para un enfoque de equilibrio límite. Los autores concluyen que, a mayor proporción de bloques las superficies de falla son más tortuosas y se traduce en factores de seguridad más altos. Del anterior estudio Montoya-Araque et al. (2020) considera que existen limitaciones en el modelo utilizado debido a la geometría circular de los bloques, tamaño uniforme y la relación mínima de  $0,1sh$ , siendo  $sh$  (*Slope height*) la altura del talud entre el diámetro de las partículas de 1 metro con la altura del talud de 10 metros, escasamente por encima del límite de  $0,05sh$ .

Minuto D & Morandi L (2015) analizaron la estabilidad de un suelo bituminoso coluvial de 40 metros de altura, se consideró un material de matriz con  $c=10$  KPa y  $\Phi= 27^\circ$ . Adicionalmente determino que el ángulo de fricción de la matriz aumenta  $4^\circ$  por cada 10% de incremento del VBP cuando es más del 25%. En la investigación se evidenció que bajo softwares geotécnicos usados popularmente la superficie de falla corta gráficamente los bloques, por lo que esta situación no pasa realmente, dado que la superficie de falla cruza por la matriz rodeando los bloques.

Napoli et al. (2018) desarrollaron análisis de suelos binarios en taludes por método de elementos finitos y método de equilibrio límite con softwares comerciales. En este trabajo se concluyó que por el método de equilibrio límite solo se desarrollaron superficies de falla en las zonas poco profundas del talud donde no se encontraban bloques, por el contrario, en zonas más profundas no se generaban superficie de falla porque interceptaban los bloques que claramente tienen una mayor resistencia. Lo anterior se debe a la limitación del software; por lo cual una de las principales conclusiones del estudio es que analizar *bimrocks* por métodos de equilibrio límite no es viable por las superficies de falla circular que se generan.

El análisis de los efectos de la forma e inclinación de los bloques en *bimrocks* por medio de método de elementos finitos lo realizó Napoli et al. (2021), donde analizó un talud con altura de 50m e inclinación de 45°, generó 601 análisis en 2D con el código FEM RS2 de Rocscience. Los investigadores proyectaron el geomaterial con diferentes VBP, orientaciones y formas de bloque (circular/ ligeramente elíptica para la mezcla sedimentaria y elíptica para la mezcla tectónica).

Para cada VBP y configuración geométrica se generaron 15 modelos para una validez estocástica, donde demostraron que el incremento del factor de seguridad depende del aumento de la tortuosidad de la superficie de falla que va relacionada directamente con la proporción del VBP. Como se evidencia en la Figura 4 a mayor VBP mayor tortuosidad de la superficie de falla, generando factores de seguridad más altos especialmente para VBP iguales al 55 % y al 70 %.



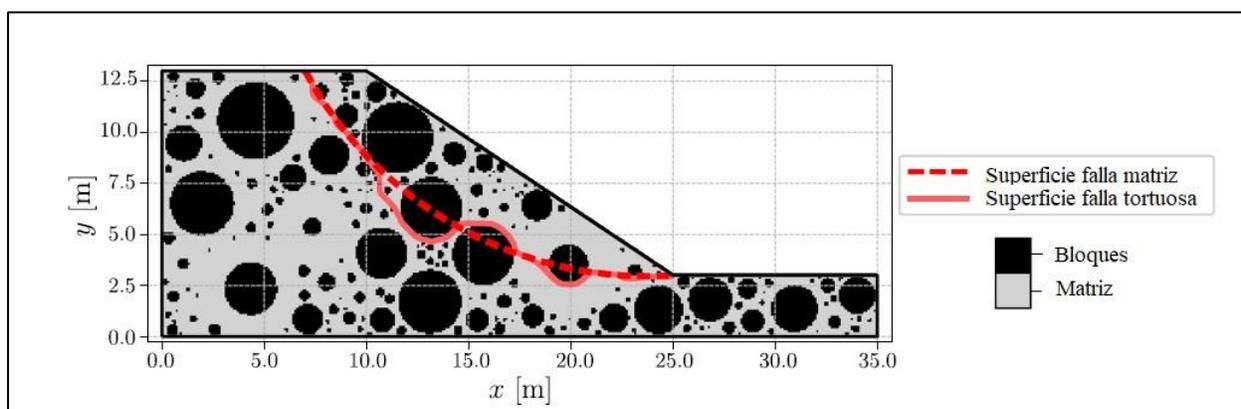
**Figura 4.** Superposición de las 15 superficies de falla obtenidas para cada VBP considerado de las configuraciones *bimrock* que tienen bloques  $e=0.5$   $i=0^\circ$  y  $60^\circ$ . El resultado del modelo solo de matriz también se muestra con la línea de puntos, a modo de comparación. Fuente: (Napoli et al., 2021)

Los investigadores colombianos Montoya-Araque & Suarez-Burgoa (2018), desarrollaron un software denominado pyBIMstab, el cual realiza análisis de estabilidad 2D de taludes formados por bloques en matriz, este crea superficies de falla tortuosas generadas con el algoritmo de búsqueda de trayectorias optimas denominado A\*(A star). Este software reproduce un enfoque acertado al tipo de fallas que se presentan en los suelos binarios.

La investigación de Montoya-Araque et al. (2020), fue reproducir y ampliar los resultados de (Medley Edmund W & Sanz PF, 2004) que consistía en una ladera con pendiente de  $35^\circ$  de inclinación, altura de 10 metros y las propiedades geomecánicas fueron  $c = 10 \text{ kPa}$ ,  $\Phi = 25^\circ$ ,  $\gamma_m = 174 \text{ kN m}^{-3}$  y  $\gamma_b = 20 \text{ kN m}^{-3}$ . El estudio consistió en realizar 1110 modelos automatizados con la herramienta pyBIMstab con el algoritmo de búsqueda de ruta óptimo propuesto denominado A\*. En la Figura 5 se evidencia el perfil utilizado en la investigación y la proyección de la superficie de falla tortuosa.

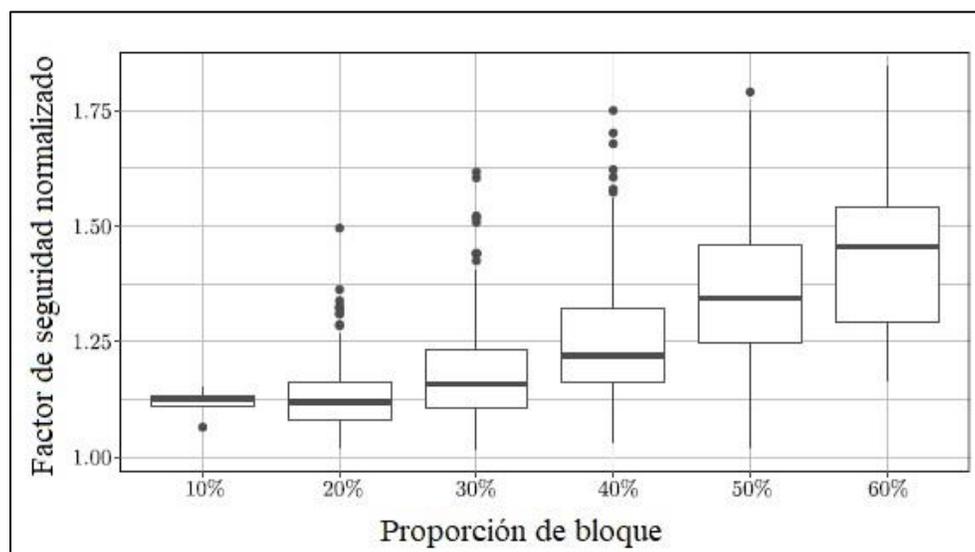
En el proceso investigativo surgen 2 parámetros valiosos, el primero es la relación de longitud tortuosa (TLR) siglas en inglés; que se refiere a la relación de la longitud de la superficie tortuosas y la longitud de superficie de falla con ausencia de bloques.

El segundo parámetro es rugosidad o ancho medio tortuoso (ATW) siglas en inglés: que se refiere a la desviación media de la trayectoria de una superficie de falla con respecto a la superficie de falla de solo matriz.



**Figura 5.** Superficie de falla tortuosa de un Binslope. Fuente: (Montoya-Araque et al., 2020)

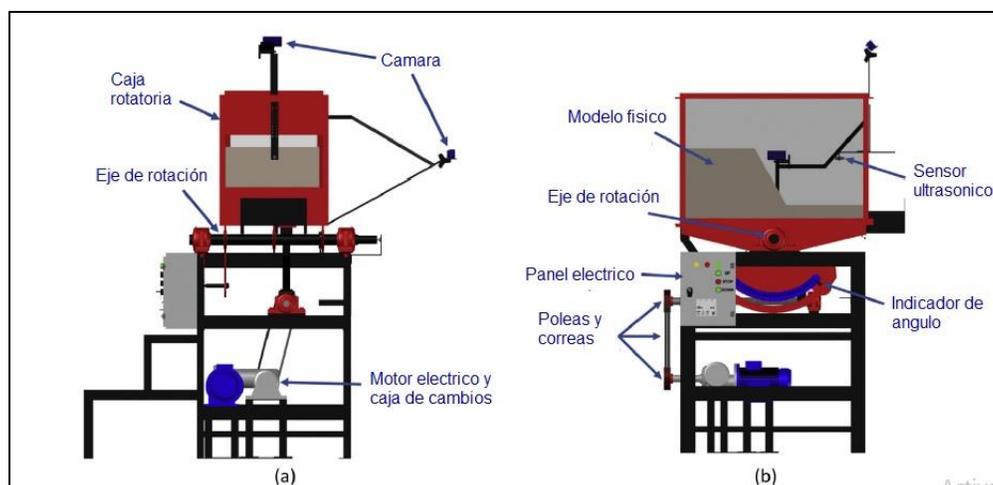
Uno de los resultados más relevantes es la identificación de la dispersión de los factores de seguridad al aumentar el VBP como se evidencia en la Figura 6 en el diagrama de cajas, donde se logra identificar que al aumentar VBP aumenta también la variabilidad presentada para el factor de seguridad, los puntos negros son valores atípicos. Adicionalmente Montoya-Araque et al. (2020) observaron que los factores de seguridad para *Bimrocks* con la misma proporción de bloques, dependerá de la distribución aleatoria de los bloques dentro del talud, siendo cada distribución de bloques y la TFS única para cada modelo.



**Figura 6.** Diagramas de caja que muestran el aumento en la dispersión para mayores proporciones de bloque. La dispersión se representa con el rango intercuartil (longitud de la caja) y la longitud de los bigotes. Los puntos negros representan valores atípicos. Fuente: (Montoya-Araque et al., 2020)

#### 4.1.2 Investigaciones en modelación física de taludes en suelos binarios

Realizada una investigación profunda sobre los *bimslopes* y *bimrocks*, se determinó que el último estudio de modelación física realizado fue el de Khorasani et al. (2019) donde utilizaron un dispositivo denominado mesa basculante como se observa en la Figura 7. Todos los *bimslopes* construidos tenían altura de 30 cm, ancho de 50 cm y ángulo de inclinación inicial de la pendiente de 60°. Se utilizaron VBP de 20%, 30%, 40% y 50%, de cada VBP se realizaron 10 modelos, para un total de 40 diferentes modelos físicos.



**Figura 7.** Mesa basculante para modelación física Fuente: (Khorasani et al., 2019)

La matriz se realizó con arena de Firuzkooh (No. 161) y 1,5% de vaselina para que la mezcla tuviera cohesión y se pudiera realizar la pendiente del talud. En la Figura 8 se puede observar la construcción de los bloques en moldes elipsoidales. Al asignar formas específicas a los bloques, se pretendía disminuir la incertidumbre y la complejidad en los resultados. Los componentes de los bloques fabricados incluían 40 % yeso, 20 % cemento y 40 % agua.



**Figura 8.** Construcción de bloques con mezcla de cemento, yeso y agua en molde elipsoidal. Fuente: (Khorasani et al., 2019)

Construidos la matriz y los bloques, se procedió a crear el modelo en la caja principal de la mesa basculante, donde se dividió en 2 capas de 15 cm y se colocaba las partículas en diferentes ubicaciones y VBP como se ejemplifica en la Figura 9. Se midieron los ángulos de inclinación de las caras posterior a la falla de cada uno de los modelos donde aumentaba el ángulo de falla a medida que incrementaba el VBP en comparación con el ángulo de falla del talud de solo matriz. Los investigadores concluyeron que el área más grande de la superficie de deslizamiento significa que la superficie de falla tuvo que superar una mayor resistencia al corte a través de los bloques

generando una mayor tortuosidad. posteriormente se realizaron análisis estadísticos de los resultados.



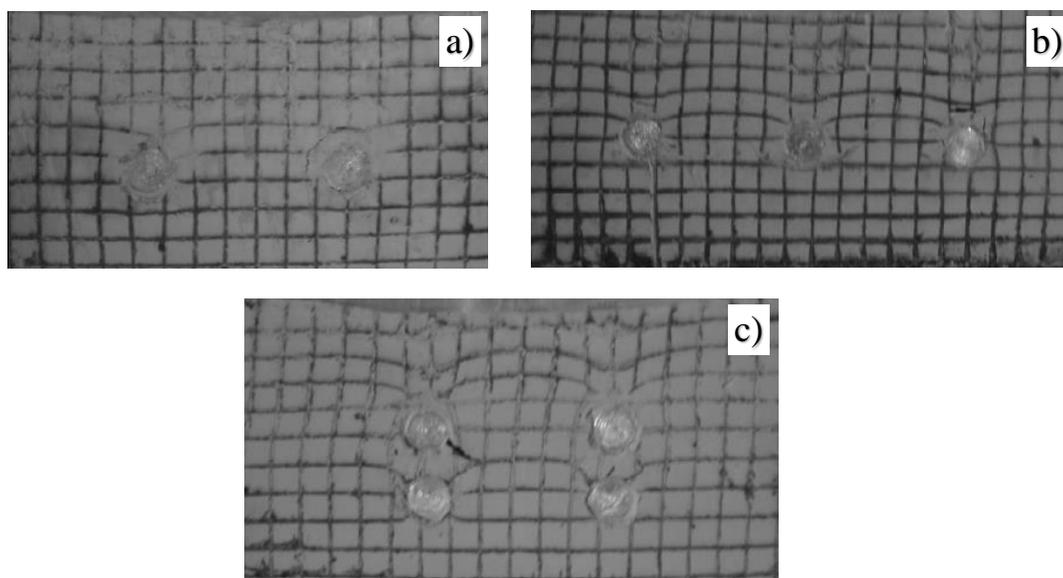
**Figura 9.** Modelos de Bimslopes a) preparación del modelo b) Resultado del ensayo. Fuente: (Khorasani et al., 2019)

El principal resultado de la investigación fue la creación de una ecuación entre las variaciones en el rango del factor de seguridad y VBP con un coeficiente de determinación significativo:  $VarSF = 0.008VBP$  [(R<sup>2</sup>) de 0,95]. Mediante el uso de esta ecuación, es posible evaluar el rango de factores de seguridad basados en VBP y estimar conservadoramente el factor de seguridad de un *Bimslope*. Adicional corroboraron, tal como otros estudios lo han demostrado que los *Bimslopes* son significativamente más estables cuando su VBP es mayor al 20%.

#### **4.1.3 Investigaciones de suelos binarios con matriz cohesiva**

Caicedo et al. (2003) investigaron a través de modelos físicos en maquina centrífuga sobre la superposición de deformaciones y desplazamientos debido a múltiples partículas rígidas. Los modelos tenían unas dimensiones de 12 cm de largo, 7 cm de alto y 2.5 cm de profundidad, la matriz se realizó con caolinita, se consolidó por peso propio hasta un 36% en vuelo de centrífuga de 30 minutos a 200 gravedades. Luego realizó agujeros en la muestra de arcilla para insertar los cilindros de acero de 7mm, finalmente se completó el proceso de consolidación del suelo.

Los desplazamientos verticales con 2 y 3 inclusiones estuvieron en el rango de 4.5mm a 5 mm, pero con 4 inclusiones los asentamientos variaron en la inclusión superior e inferior, donde se presentó un asentamiento de 3.9mm en la inclusiones inferiores y hasta un asentamiento de 13mm en las inclusiones superiores. En la Figura 10 se presenta el patrón de deformación obtenida después del vuelo en maquina centrífuga.

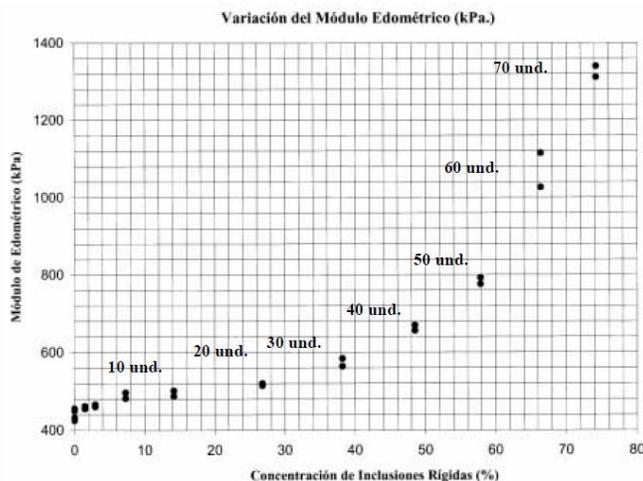


**Figura 10.** Patrón de deformación para a) 2 inclusiones b) 3 inclusiones c) 4 inclusiones. Fuente: (Caicedo et al., 2003)

Los investigadores concluyen que, la superposición de la zona de compresión de la partícula superior y la zona de tensión de las partículas de la parte inferior genera mayores asentamientos en las inclusiones superiores

Zambrano & Caicedo. (2005) estudiaron la compresibilidad de mezclas de arcilla e inclusiones rígidas bajo modelación en centrífuga, el suelo binario fue representado con caolín y cilindros de aluminio de 9,4 cm. Los autores decidieron colocar la partículas rígidas desde el inicio con la matriz arcillosa y posteriormente hacer el proceso de consolidación de la muestra binaria.

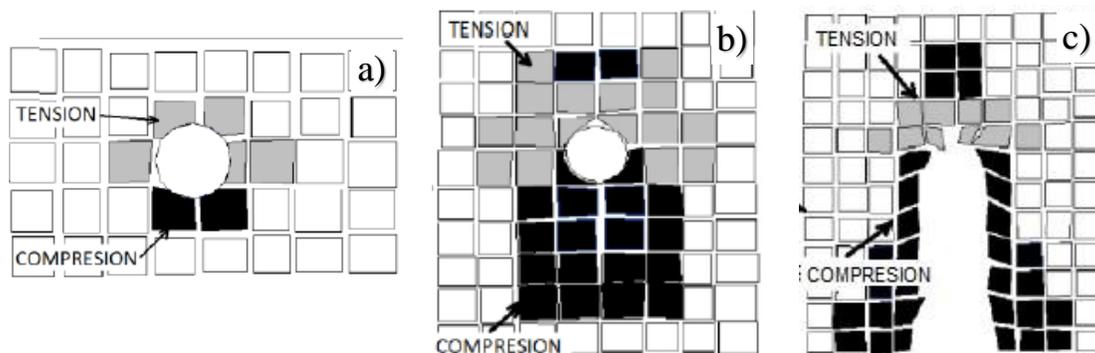
Lograron establecer el aumento del módulo edométrico con el incremento de la concentración de inclusiones rígidas, como se evidencia en la Figura 11.



**Figura 11.** Variación del Módulo edométrico con la concentración de inclusiones rígidas Fuente: (Zambrano & Caicedo., 2005)

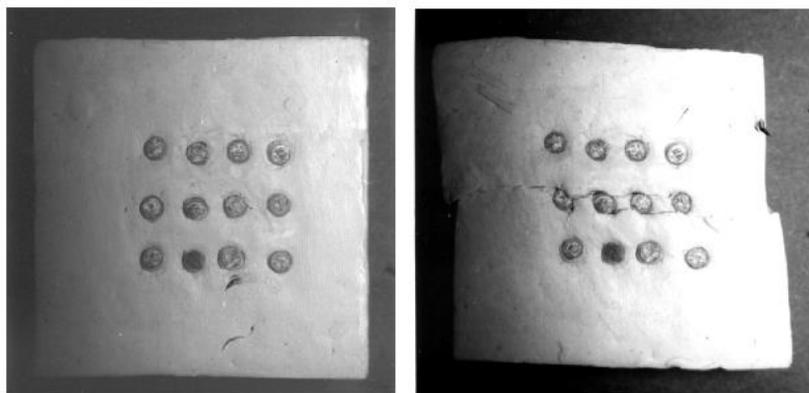
El estudio sobre Modelación física y numérica de mezclas arcilla-inclusiones rígidas realizado por Lozada (2012), en el que analizó el desplazamiento y deformación volumétrica de una mezcla de arcilla con una inclusión rígida y diferentes densidades a partir de la modelación física en máquina centrífuga. Primero realizó el proceso de consolidación del suelo arcilloso simulado a partir de una mezcla de 60% caolín y 40% Bentonita, posteriormente realizaba un agujero con un tubo metálico retirando material para finalmente insertar la partícula rígida, siendo esta de 0.8 cm de diámetro y variando la densidad ( $2.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $3.2 \text{ g/cm}^3$  y  $7.6 \text{ g/cm}^3$ ).

La investigadora a través de análisis de imágenes estableció la deformación volumétrica a tensión y compresión en cada uno de los modelos con inclusiones rígidas y diferentes densidades (ver Figura 12).



**Figura 12.** Campo deformación volumétrica con una inclusión rígida a diferentes densidades a)  $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ , b)  $\rho=3.2 \text{ g/cm}^3$  c)  $\rho=7.6 \text{ g/cm}^3$  Fuente: (Lozada, 2012)

Adicionalmente Vallejo (2017) desarrolló en su investigación ensayos de corte directo para determinar el comportamiento del suelo arcilloso con inclusiones rígidas expuestas al cizallamiento. El estudio consistió en someter muestras de arcillas que contenían varillas de madera a condiciones de esfuerzo cortante. El proceso constructivo consistió consolidar las muestras por 5 días a una presión de 25.7 kPa, posteriormente realizaba un agujero con un tubo metálico retirando material para finalmente insertar las varillas de madera de diámetros de 2.2 cm y 0.95 cm. En la Figura 13 se evidencia el ensayo de un modelo con 12 varillas de 0.95 cm de diámetro, el cual se sometió a un esfuerzo normal de 102 kPa, determinó que se desarrollaron vacíos en la interfaz de las varillas y la arcilla, generando discontinuidades inducidas por la compresión y los vacíos, lo que finalmente produjo la superficie de falla continua.



*Figura 13. Muestra de arcilla con 12 varillas antes y después que haya sido sometida a condiciones de esfuerzo en el corte directo. Fuente: (Vallejo, 2017)*

#### **4.2 Fundamentos de la Modelación Física en Máquina Centrífuga Geotécnica**

El principal objetivo de la modelación física es poder representar el comportamiento que tendrá una condición real, bajo un modelo en laboratorio. Se puede analizar procesos de consolidación, rotura, deformaciones etc. En geotecnia se ha pretendido representar problemas comunes en la práctica, como análisis de estabilidad de taludes y terraplenes, comportamiento de cimentaciones y túneles, entre otros.

De acuerdo con Caicedo (2003), el investigador pionero en realizar experimentos con modelos en centrífuga fue E. Phillips en 1869, aplicando las ecuaciones diferenciales que controlan el equilibrio de los cuerpos elásticos. Phillips planteó la fuerza centrífuga para poder generar la

similitud en el comportamiento entre modelos y prototipos; este concepto fue puesto en marcha en la práctica hasta los años 30 por los Estados Unidos y la antigua Unión Soviética. Según Lozada et al. (2021) más de 110 máquinas centrífugas geotécnicas existían en el mundo hasta el 2010, con plataformas de longitudes desde centímetros hasta metros.

Por lo anterior una herramienta que se ha utilizado en las últimas décadas para la modelación física en geotecnia es la maquina centrífuga, que ha generado excelentes resultados para analizar el comportamiento de estructuras geotécnicas. La modelación física en centrífuga se centra en que las condiciones de esfuerzo del prototipo y el modelo sean las mismas, esto se puede lograr si se aumentan las fuerzas de gravedad ( $g$ ), generando un campo de aceleración por la rotación del modelo en una maquina centrífuga. Para replicar de manera certera los esfuerzos que se presentan en el prototipo, es necesario aplicar al modelo a escala  $1/n$  un campo gravitacional ( $n$ ) veces más grande al que se presenta en el prototipo (Vargas Lozada, 2003). Por lo anterior un modelo a escala 1:100 se debe someter a una aceleración de 100  $g$  para tener el mismo campo de esfuerzos.

Las leyes de escala se enfocan en poder lograr que los esfuerzos del prototipo y el modelo lleguen a ser iguales, por lo cual si a un suelo con una densidad específica se le aplica una aceleración ( $n$ ) veces la de la gravedad de la tierra; el esfuerzo vertical del modelo  $\sigma_{vm}$  a una profundidad  $h_m$ , está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{vm} = \rho N g h_m$$

$\sigma_{vm}$  = Esfuerzo vertical en el modelo

$\rho$  = Densidad del suelo

$N$  = Factor de aceleración

$g$  = Aceleración Terrestre

$h_m$  = Profundidad en el modelo

El esfuerzo vertical del prototipo esta dado por:

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p$$

$\sigma_{vp}$  = Esfuerzo vertical en el prototipo

$h_p$  = Profundidad en el prototipo

Al igualar las dos ecuaciones  $\sigma_{vm} = \sigma_{vp}$ , considerando que la densidad del suelo y donde se simula de igual manera la historia de esfuerzo, se obtiene que el factor de escala es  $1/N$  y  $h_p = N \cdot h_m$ .

Teniendo en cuenta el parámetro a analizar, el factor de escala puede variar, en la Tabla 1 se describe los factores de escala de los principales parámetros que se utilizan para la maquina centrífuga geotécnica.

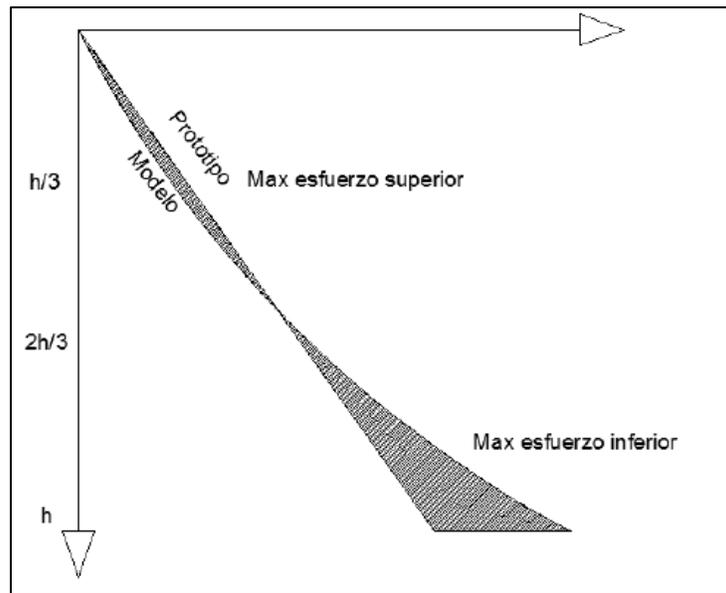
Tabla 1. Principales factores de escala para ensayos de centrífuga. Fuente: (Lozada et al., 2021)

| Parámetro                 | Factor de escala<br>(Modelo / Prototipo) | Unidades                        |
|---------------------------|--|---------------------------------|
| Aceleración               | 1  | m/s <sup>2</sup>                |
| Longitud                  | 1/N                                      | m                               |
| Área                      | 1/N <sup>2</sup>                         | m <sup>2</sup>                  |
| Volumen                   | 1/N <sup>3</sup>                         | m <sup>3</sup>                  |
| Masa                      | 1/N <sup>3</sup>                         | Nm <sup>-1</sup> s <sup>2</sup> |
| Esfuerzo                  | 1  | Nm <sup>-2</sup>                |
| Deformación               | 1  | -                               |
| Fuerza                    | 1/N <sup>2</sup>                         | N                               |
| Peso unitario             | N  | Nm <sup>-1</sup> s <sup>2</sup> |
| Tiempo<br>(Consolidación) | 1/N <sup>2</sup>                         | s                               |

#### 4.2.1 Limitaciones de la modelación en centrífuga

**4.2.1.1 Variación del esfuerzo vertical.** Existe una variación del esfuerzo vertical con la profundidad, en el que se identifica un cambio de comportamiento lineal a no lineal a los  $2/3h$ , como se puede evidenciar en la Figura 14. Al realizar modelos en centrífugas se genera un campo

de aceleración inercial,  $a = \omega^2 * r$ , donde  $\omega$  es la velocidad angular y  $r$  es el radio de algún elemento del suelo en el modelo, por lo que se genera un error generando una pequeña variación de la aceleración a través de todo el modelo por que el  $r$  no será igual en todos los puntos de evaluación del modelo. Este error en el diseño de la maquina centrífuga tiende a disminuirse al escoger acertadamente el radio efectivo. Según Lozada (2012) las maquinas centrífugas se diseñan para que el error sea inferior al 3% con relación a los esfuerzos del prototipo por lo que se llega a considerar un error despreciable.



**Figura 14.** Variación de esfuerzos modelo y prototipo. Fuente: (Taylor, 1995)

**4.2.1.2 Efecto asociado a ley de escala – tamaño de partículas.** El tamaño de las partículas debe ser escalado  $N$  veces según la ley de escala para el parámetro de longitud, por lo anterior si en el modelo se utiliza una arena con tamaño de partícula de 0.05mm a 0.1mm y se acelera a 100g se estaría simulando una partícula de 0.0005mm a 0.001mm que se encuentra en el rango de una arcilla.

**4.2.1.3 Efecto asociado a ley de escala – Campo de aceleración.** También denominado efecto Coriolis, el cual consiste en una fuerza artificial perpendicular al movimiento que se genera cuando una masa es acelerada en un campo rotacional. La fuerza artificial varía del punto de análisis de rotación. Un ejemplo del efecto es simular que una persona se encuentra en una maquina

giratoria de un parque de diversiones la cual lanza un objeto a un objetivo fijo, por el efecto Coriolis, el objeto tomara una trayectoria no lineal, haciendo que finalmente el objeto caiga a un costado del objetivo.

La aceleración de Coriolis está definida por:

$$a_c = 2 \cdot \omega \cdot v$$

Donde:

$a_c$  = Aceleración de Coriolis

$\omega$  = Velocidad angular rotacional de la centrífuga

$v$  = Velocidad de una partícula de masa en el modelo

La aceleración inercial,  $a$ , del modelo es igual a:

$$a = \omega^2 \cdot R_c = \omega \cdot V$$

Donde:

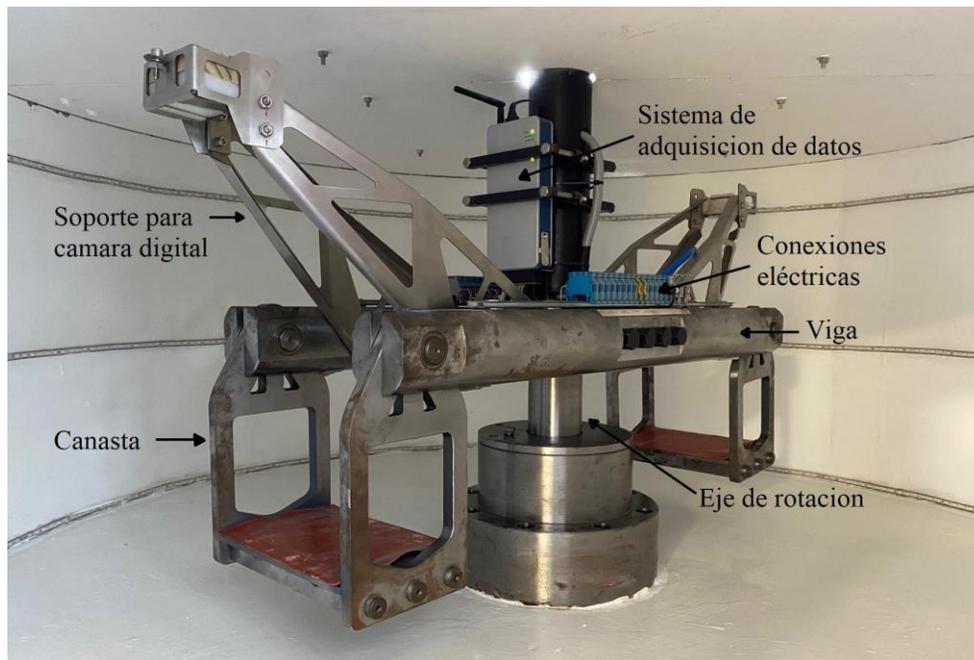
$a$  = Aceleración Inercial

$V$  = Velocidad del modelo durante el vuelo en la centrífuga

### **4.3 Características de Máquina centrífuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería**

La centrífuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ver Figura 15), es una centrífuga tipo viga, con un radio de 610 mm, con un eje central de rotación, en ambos costados de la viga se encuentran unas canastas donde se sitúan las cajas para las modelaciones, con un peso máximo de 12 kg para cada caja. Las dimensiones internas de la caja son 17 cm de longitud, 10 cm de ancho y 12 cm de alto. La centrífuga tiene la capacidad de acelerar desde 10 g hasta 200 g (Lozada et al., 2021).

Para los procesos de consolidación de las muestras de suelos fino, la universidad cuenta con 5 consolidómetros automáticos, cada uno tiene un sensor de medida de aplicación de carga y sensor de medida del pistón de desplazamiento. El consolidómetro tiene la capacidad de aplicar carga desde 3kg a 200 kg con una precisión de +- de 1,5 kg, el software Labview permite adquirir datos en tiempo real de las cargas y desplazamientos.



*Figura 15. Centrifuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente: Propia*

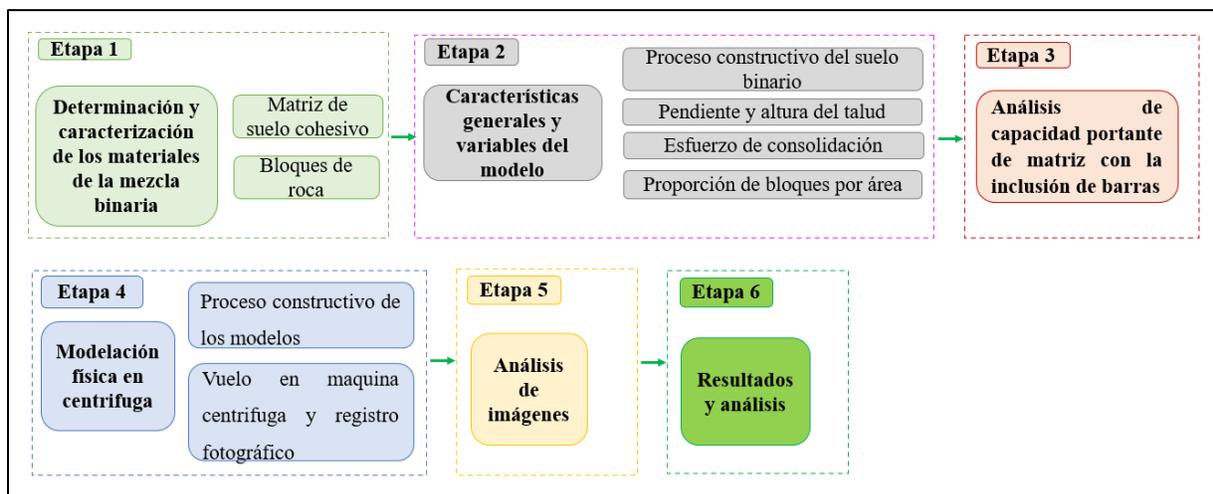
#### **4.4 Análisis de imágenes mediante PIV**

Para un análisis eficaz de los ensayos realizados en la modelación física en maquina centrífuga, es necesario realizar comparaciones del antes y después de la prueba y una de las técnicas más eficaces es la velocimetría de imágenes de partículas (*Particle Image Velocimetry - PIV*). (Stanier et al., 2015) desarrollaron un aplicativo gratuito de análisis de imágenes para MATLAB diseñado para aplicaciones de investigación en ingeniería geotécnica y estructural denominado GeoPIV-RG.

Con la base de una imagen de la posición espacial inicial y con el registro opcional de una o varias imágenes del intermedio de la prueba y la imagen final, el aplicativo da como resultado el campo vectorial y los desplazamientos vertical, horizontal y resultante de cada una de las partículas que integran la imagen.

## 5. Metodología

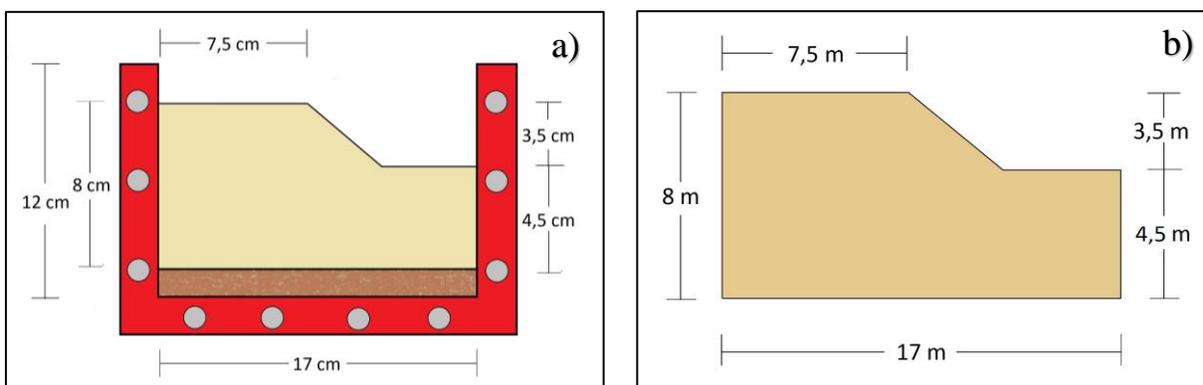
La metodología que se desarrolló en la presente investigación es la siguiente:



*Figura 16. Metodología investigativa. Fuente: Propia*

### 5.1 Determinación y caracterización de los materiales de la mezcla binaria

Para este trabajo de investigación se determinó que el número de gravedades es  $N=100g$  en los ensayos en maquina centrífuga. En la Figura 17 se presenta un esquema con las dimensiones del modelo y del prototipo del talud que se simulará.



*Figura 17. Esquema de talud a) escala modelo b) escala prototipo. Fuente: Propia*

A continuación, se describen los materiales que se utilizaron para la construcción de la mezcla binaria:

### 5.1.1 Matriz de suelo cohesivo

Para simular la matriz de suelo cohesivo, se utilizó caolín que presenta alto contenido de mineral caolinita, el cual fue mezclado con agua hasta alcanzar una humedad de 1,5 veces el límite líquido para borrar la historia de esfuerzos y generar una mezcla homogénea.

Los resultados de los ensayos de límites de Atterberg para la caracterización del material fueron tomados de la investigación (Esquivel, 2023) los cuales se determinaron en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en donde utilizó la misma mezcla de caolín y agua, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2. Valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del Caolín. Fuente:(Esquivel, 2023)

|                           |    |
|---------------------------|----|
| Límite líquido (%)        | 77 |
| Límite plástico (%)       | 51 |
| Índice de plasticidad (%) | 26 |

Con la carta de plasticidad y los valores obtenidos, el suelo clasifica según el SUCS como un limo de alta plasticidad MH (Esquivel, 2023), (ver Figura 18).

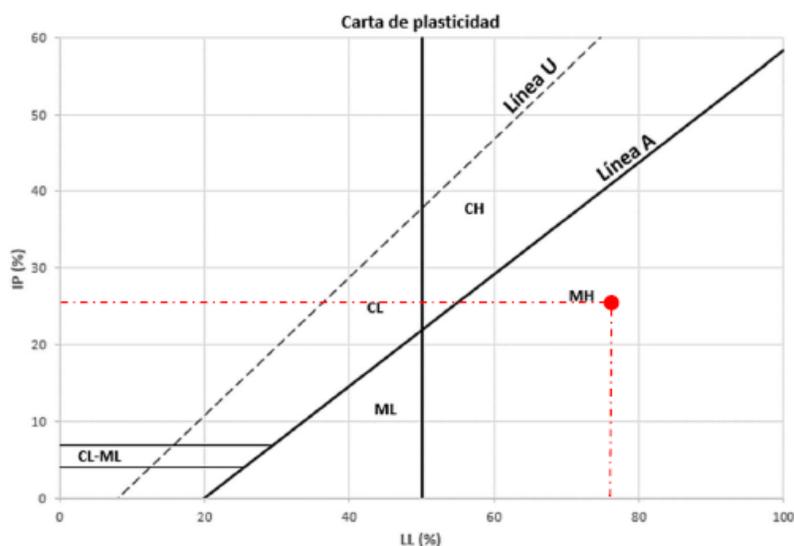


Figura 18. Carta de plasticidad y clasificación del suelo Caolín. Fuente:(Esquivel, 2023)

### 5.1.2 Bloques de roca

Para representar los bloques de roca en el suelo binario se determinó utilizar barras de aluminio, teniendo en cuenta su densidad igual a  $2.7 \text{ g/cm}^3$  la cual es aproximadamente la densidad de un basalto y un valor cercano al peso unitario seco de material rocoso el cual es de  $2.6 \text{ g/cm}^3$ .

De acuerdo con las dimensiones de la caja de la maquina centrífuga y la altura del talud del modelo es necesario establecer el diámetro de las barras de acuerdo con la longitud característica ( $L_c$ ) que permite escalar la masa de suelo binario y el problema de análisis, siendo  $L_c$  la altura del talud.

El diámetro de barra de 0.8 cm tiene 23% de relación entre el diámetro de la barra y la longitud característica (ver Tabla 3), siendo un diámetro de fácil acceso comercialmente. De acuerdo con las 100 gravedades a las que se sometería el modelo, el diámetro para la escala prototipo representa un bloque de 80 cm. Por lo tanto, se concluye que para simular la roca y teniendo en cuenta el análisis en 2D se utilizaron barras de aluminio circulares de diámetro de 0,8cm y longitud de 10 cm que corresponde al ancho de la caja del modelo en centrífuga.

Tabla 3. Relación porcentual entre el diámetro de la barra y la longitud característica . Fuente: Propia

| Lc (cm) | Diámetro barra (cm) | Relación diámetro barra/Lc |
|---------|---------------------|----------------------------|
| 3,5     | 0,8                 | 23%                        |

## 5.2 Características generales y variables del modelo

A continuación, se presentan las alternativas de cada una de las variables que se contemplaron durante esta investigación.

### 5.2.1 Proceso constructivo del suelo binario

Para poder representar el talud de suelo binario en la modelación física en maquina centrífuga, es necesario determinar cuál sería el método más viable para insertar las barras de aluminio dentro de la matriz. Como se pudo establecer en el numeral 4.1.2 diferentes autores han desarrollado diversas técnicas en la preparación de la matriz con inclusión de partículas. Lozada (2012) y Vallejo (2017) ejecutaron primero el proceso de consolidación del suelo arcilloso, posteriormente

realizaron un agujero con un tubo metálico retirando material para finalmente insertar las partículas rígidas a sus modelos.

Por otro lado, Caicedo et al. (2003) inicialmente procedió a ejecutar una consolidación del 36% del suelo, posteriormente realizó agujeros en la muestra de suelo para insertar las partículas rígidas, y de este modo finalizar el proceso de consolidación del suelo. Análogamente Zambrano & Caicedo. B. (2005) decidieron colocar la partículas rígidas desde el inicio con la matriz arcillosa y posteriormente consolidar la muestra binaria.

Como se evidencia en los diferentes estudios, existe una variabilidad de procesos constructivos para realizar la muestra binaria, para esta investigación se optó por probar dos métodos con el fin de definir la mejor técnica constructiva:

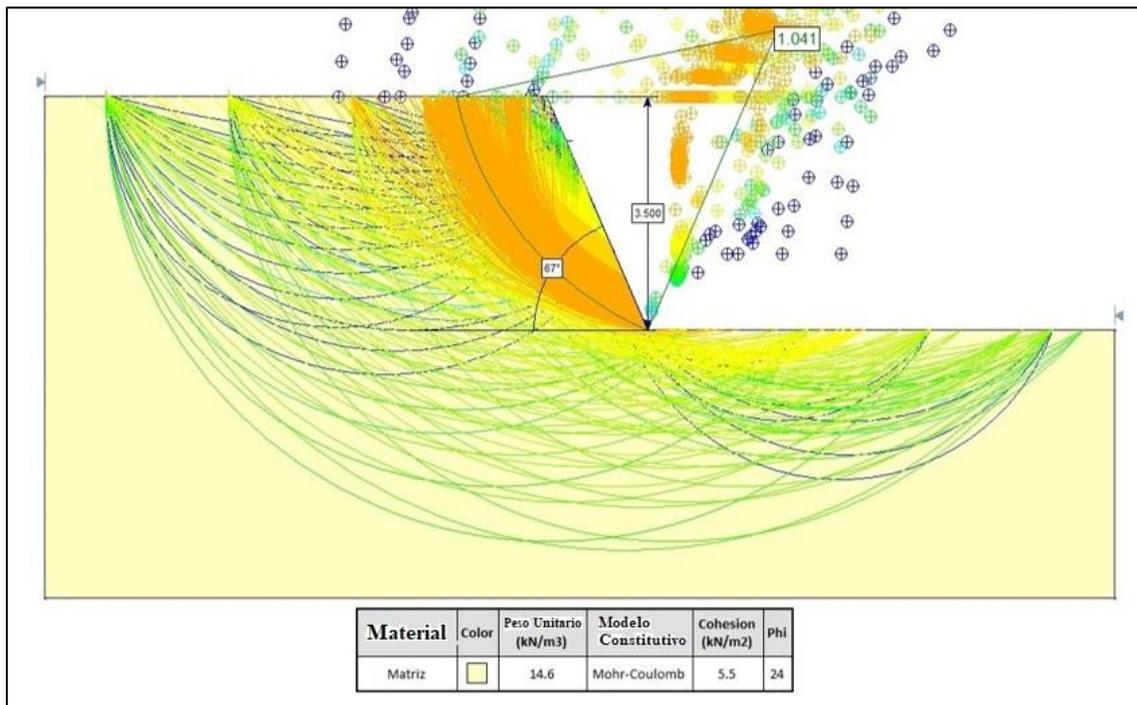
- Proceso constructivo con instalación de barras después de la consolidación
- Proceso constructivo con instalación de barras antes de la consolidación

### ***5.2.2 Pendiente y altura del talud***

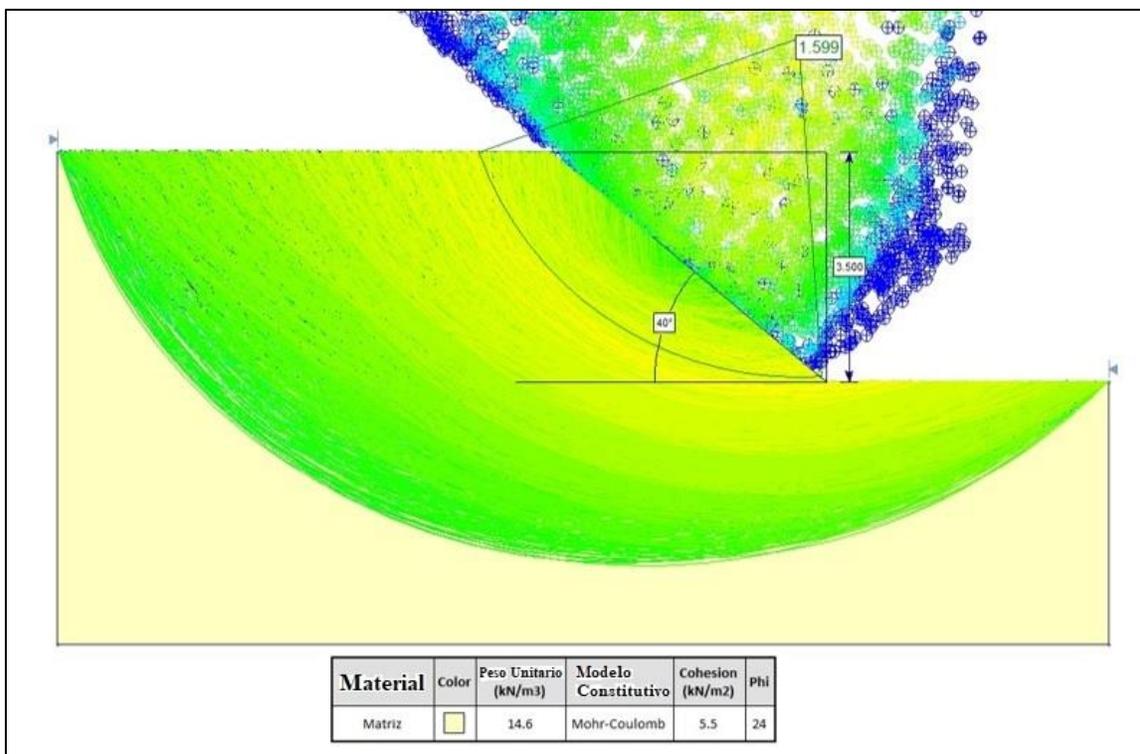
Para definir la pendiente y la altura del talud a modelar en la centrífuga geotécnica se realizó un modelo en el software Slide 2D. La altura del talud se estableció como 3.5m (escala prototipo) que corresponde a 3.5 cm (escala modelo), esta altura se determinó con base a la restricción del tamaño de la caja en donde se fabrican los modelos en la centrífuga y para permitir el desarrollo completo de la superficie de falla. Manteniendo esta altura definida, se calculó que para una pendiente de  $67^\circ$  se obtiene un factor de seguridad 1.041 (ver Figura 19) presentando un estado de equilibrio en el modelo. Se utilizó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y los parámetros de resistencia de Lozada et al. (2022)  $\gamma=14.6 \text{ KN/m}^3$ ,  $c'= 5.5 \text{ kPa}$  y  $\phi= 24^\circ$ , determinados para un esfuerzo de consolidación de 30kPa.

Durante la investigación el ángulo de inclinación del talud tuvo que ser modificado a  $40^\circ$ , debido a que los modelos presentaban colapso total con porcentajes de ABP muy bajos y no era viable determinar los objetivos de la investigación. En consecuencia, se optó en disminuir la pendiente

del talud. Se determinó el factor de seguridad con un valor de 1.599, manteniendo los mismos parámetros de resistencia (ver Figura 20).



*Figura 19. Factor de seguridad para pendiente de 67°. Fuente: Propia*



*Figura 20. Factor de seguridad para pendiente de 40°. Fuente: Propia*

### 5.2.3 Esfuerzo de consolidación

Se consideraron esfuerzos de consolidación de 30kPa, 40kPa y 50kPa, con el fin de determinar con qué condiciones de consolidación el talud presentaría un comportamiento viable para esta investigación con la presencia de las barras de aluminio.

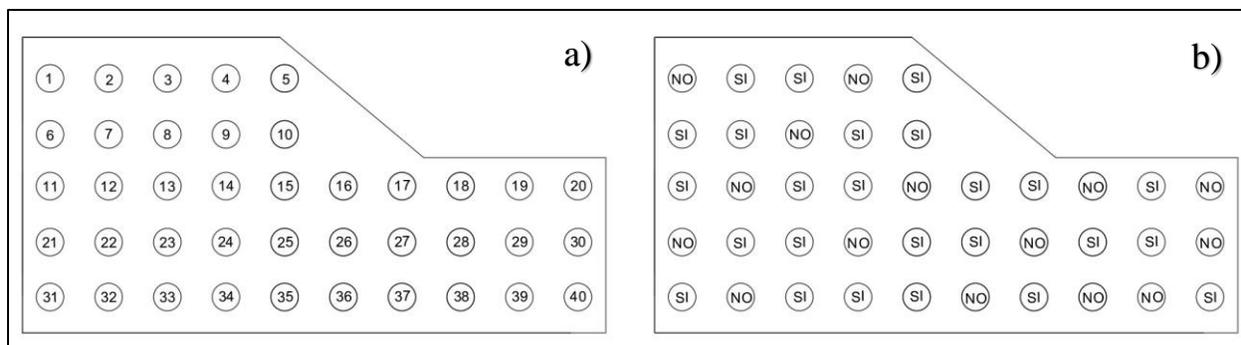
### 5.2.4 Proporción de bloques por área

La proporción de bloques por área o *Areal Block Proportion* (ABP) en inglés, se define en la literatura como la relación porcentual entre el área total de bloques dividida en el área total del talud. En esta investigación existió un limitante para alcanzar altos porcentajes de ABP debido al mayor número de barras insertadas dentro del modelo, en el proceso de consolidación la placa de distribución de carga se inclinaba y existía la posibilidad de presentar daños en los consolidómetros neumáticos, por lo anterior se alcanzó un porcentaje máximo del 19.26% (49 barras)

Para cada modelo se numeró y proyectó los espacios de las posibles posiciones donde se insertaría las barras con una distribución y separación homogénea en todo el área del talud. Seguidamente para determinar en qué espacios se insertaría o no la barra se realizó un proceso de aleatoriedad con el empleo del software Excel utilizando la función aleatorio. Se estableció que los números entre 0 y 0,499 se tomaría como instalación de la barra y entre 0,5 y 0,999 se tomaría como la no instalación de la barra (ver Tabla 4). En la Figura 21 se evidencia un ejemplo del proceso de aleatoriedad explicado anteriormente y lo expuesto en la Tabla 4.

Tabla 4. Ejemplo de proceso de aleatoriedad para instalación de las barras. Fuente: Propia

| Posición | Numero aleatorio | ¿Instalación de la barra? |
|----------|------------------|---------------------------|
| 1        | 0,849            | NO                        |
| 2        | 0,476            | SI                        |
| 3        | 0,292            | SI                        |
| 4        | 0,942            | NO                        |
| 5        | 0,295            | SI                        |
| 6        | 0,323            | SI                        |
| 7        | 0,421            | SI                        |
| 8        | 0,593            | NO                        |
| 9        | 0,118            | SI                        |
| 10       | 0,346            | SI                        |



**Figura 21.** a) Numeración de la posible ubicación de las barras b) ubicación definitiva de la instalación de las barras Fuente: Propia

### 5.3 Análisis de capacidad portante de matriz con la inclusión de barras

A continuación, se presenta un análisis de capacidad portante de las partículas rígidas embebidas en el suelo fino. Este análisis se realiza para garantizar que la falla obtenida en el modelo físico no sea producida por capacidad portante del suelo.

Los investigadores Randolph & Houlsby (1984), lograron determinar la resistencia última del suelo para un pilote circular cargado lateralmente en suelo cohesivo, asumiendo una deformación perfectamente plástica del suelo. Se realizaron análisis de límite inferior y superior donde se obtuvo una solución exacta.

El análisis de límite inferior es el que se asocia al encontrar un conjunto de esfuerzos que estén en equilibrio con las cargas aplicadas y que no supere el criterio de fluencia del material de estudio. La falla de carga final determinada por el análisis de límite inferior está dada por:

$$\frac{P}{cD} = \pi + 2\Delta + 2\cos\Delta + 4 \left[ \cos\left(\frac{\Delta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right] \quad (1)$$

El análisis de límite superior el cual se relaciona con el mecanismo de falla y la carga de falla, la falla de carga final determinada por el análisis de límite superior está dada por:

$$\frac{P}{cD} = \pi + 2\Delta + 4\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \left( \sqrt{2} + \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \right) \quad (2)$$

Donde:

$c$ = Resistencia al corte

$D$ = Diámetro del pilote

$\Delta$ = Factor de adhesión del pilote

Para pilotes embebidos horizontalmente en arcillas, es necesario determinar las fuerzas que actúan para el equilibrio de las partículas, las cuales son: flotabilidad, capacidad portante del suelo y el peso de la partícula.

De acuerdo con Lozada et al. (2014) la resistencia última ( $Q_u$ ) del suelo es la suma de la capacidad portante y la fuerza flotante del suelo. Suponiendo que el pilote es perfectamente liso se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q_u = (\pi + 6) C_u D + \frac{\pi}{4} \gamma_{cl} D^2 \quad (3)$$

La fuerza vertical debido al peso del pilote está dado por:

$$F_b = \frac{\pi}{4} \gamma_c D^2 \quad (4)$$

Donde:

$\gamma_{cl}$  = Peso unitario de la arcilla

$\gamma_c$  = Peso unitario del pilote

$C_u$  = Resistencia al corte no drenado

Para este trabajo de investigación se utilizaron los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales en condición consolidado no drenado realizados por Esquivel (2023). En la Tabla 5 se evidencian la resistencia al corte no drenada ( $C_u$ ) y el peso unitario para cada esfuerzo de consolidación.

Tabla 5. Resultados de Resistencia al corte no drenada ( $C_u$ ) y Pesos unitarios ( $\gamma$ ) de ensayos Triaxial CU. Fuente: (Esquivel, 2023)

|                               |      |       |       |
|-------------------------------|------|-------|-------|
| $\sigma_c$ (kPa)              | 30   | 40    | 50    |
| $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 13.8 | 14.5  | 14.7  |
| $C_u$ (kPa)                   | 9.07 | 10.92 | 13.57 |

Utilizando las ecuaciones (3) y (4) se obtiene la resistencia última del suelo de la matriz con la influencia de la barra en escala prototipo, con diámetro de 0,8m, longitud de 10m y densidad igual a 27 kN/m<sup>3</sup>, en la Tabla 6 se evidencian los resultados obtenidos y el factor de seguridad para cada uno de los esfuerzos de consolidación el cual se determina dividiendo la resistencia ultima ( $Q_u$ ) en la fuerza vertical que ejerce la barra ( $F_b$ ).

Tabla 6. Resultados de resistencia última del suelo. Fuente: Propia

|                                    | $\sigma_c = 30\text{kPa}$ | $\sigma_c = 40\text{kPa}$ | $\sigma_c = 50\text{kPa}$ |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $C_u$ (kPa)                        | 9,07                      | 10,92                     | 13,57                     |
| $\gamma_{cl}$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 13,8                      | 14,5                      | 14,7                      |
| $F_b$ barra (KN)                   | 13,57                     | 13,57                     | 13,57                     |
| $Q_u$ (KN)                         | 73,27                     | 87,15                     | 106,63                    |
| Factor de seguridad                | 5,40                      | 6,42                      | 7,86                      |

De acuerdo con lo anterior, se obtiene que en ninguno de los esfuerzo de consolidación la barra de aluminio sobrepasa la resistencia última del suelo, obteniendo factores de seguridad de 5,4 para consolidación de 30kPa y alcanzando factor de seguridad de 7,86 para consolidación de 50kPa. Por lo anterior se establece que la matriz de suelo arcilloso no se vería afectada por colapso por capacidad portante.

## 5.4 Modelación física en centrífuga

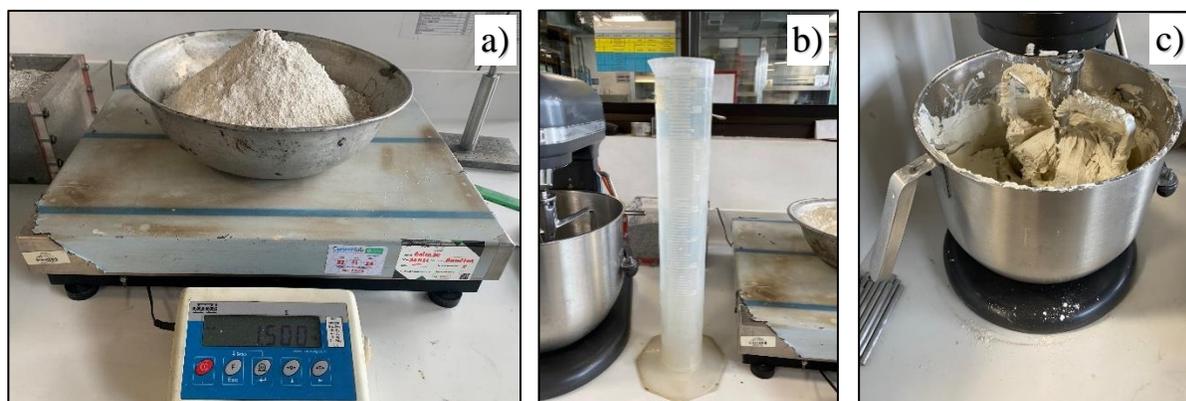
### 5.4.1 Proceso constructivo de los modelos

De acuerdo con las alternativas de preparación de los modelos, se procedió a realizar dos tipos de procesos constructivos a) Instalación de barras posterior a la consolidación b) Instalación de barras antes a la consolidación. A continuación, se especifica el procedimiento en el cual algunas etapas varían de acuerdo con el tipo de proceso constructivo.

**5.4.1.1 Preparación de la caja.** El proceso realizado consiste en las siguientes etapas:

1. Disponer de la caja donde se realizará el modelo, limpiar las paredes de la caja y aplicar en las paredes internas de la caja aceite lubricante que evitará que la mezcla de caolín se adhiera a las paredes de la caja y afecte el resultado final de la modelación física
2. Introducir una capa de arena fina aproximadamente 1.5 cm, la cual impide que la mezcla se salga de la caja por el agujero que se encuentra en la parte inferior de una de las paredes de acrílico para facilitar al proceso de consolidación de la muestra.
3. Finalmente se ubica el papel filtro para separar la capa de arena con la mezcla.

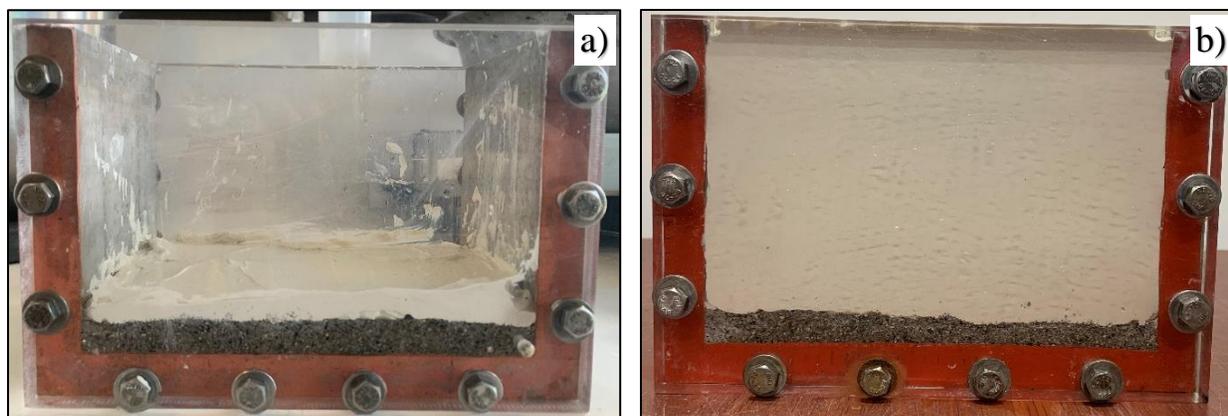
**5.4.1.2 Preparación de matriz de suelo binario.** Se prepara la mezcla con caolín y agua utilizando cantidades específicas para alcanzar 1.5 veces el límite líquido. Con la ayuda del mezclador mecánico se consigue una mezcla homogénea (ver Figura 22).



*Figura 22. Preparación de la mezcla a) Caolín b) Agua c) Mezcladora mecánica. Fuente: Propia*

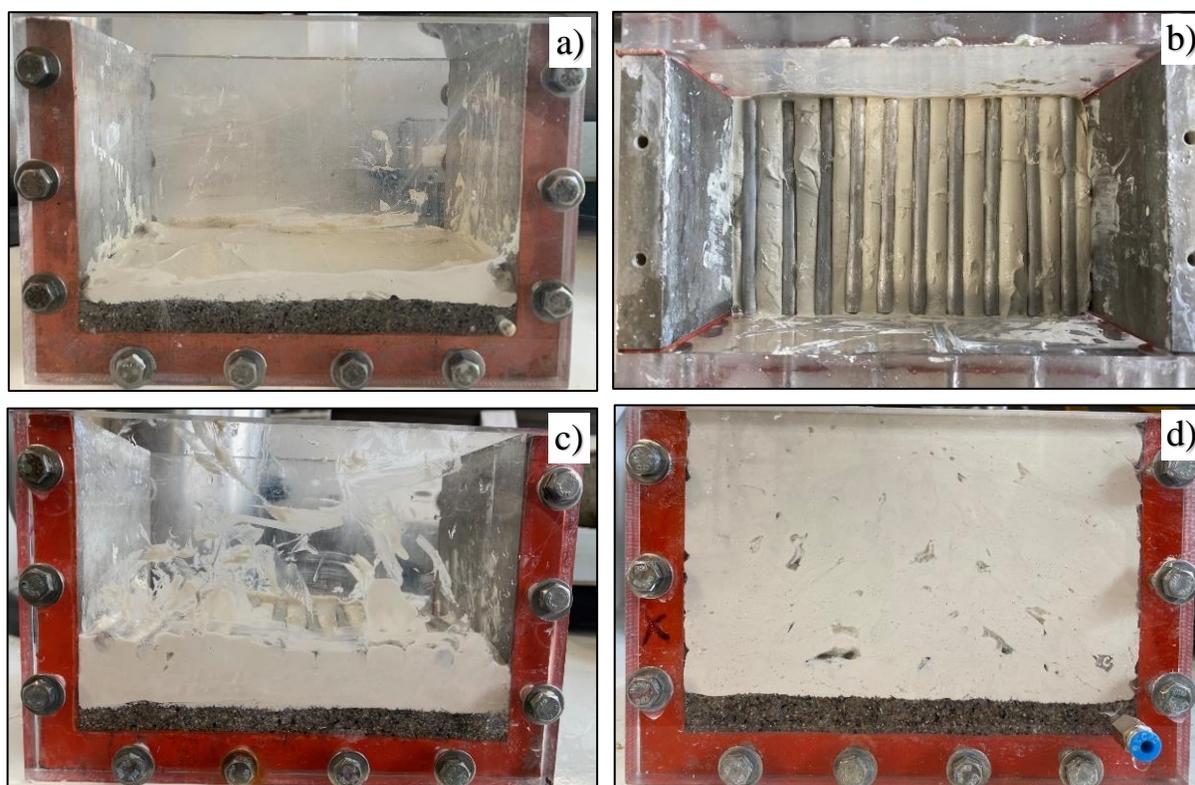
### 5.4.1.3 Vertimiento de matriz.

**5.4.1.3.1 Proceso constructivo con instalación de barras después de la consolidación.** En esta etapa se introduce la mezcla homogénea por capas distribuyéndola en toda el área del fondo de la caja con la ayuda de una espátula plástica, verificando dejar la menor cantidad de vacíos, hasta alcanzar la altura total de la caja (ver Figura 23). Finalmente se coloca otro papel filtro encima de la mezcla.



**Figura 23.** Preparación del modelo a) primera capa de mezcla b) caja llena con mezcla. Fuente: Propia

**5.4.1.3.2 Proceso constructivo con instalación de barras antes a la consolidación.** En esta etapa se introduce la mezcla homogénea distribuyéndola en toda el área del fondo de la caja con la ayuda de una espátula plástica, verificando dejar la menor cantidad de vacíos hasta alcanzar una primera capa de un espesor mínimo de 1 cm. Al finalizar cada capa se ubican las barras de acuerdo con la distribución aleatoria determinada previamente, se repite el proceso hasta alcanzar el nivel máximo de la caja (ver Figura 24). Finalmente, se sitúa otro papel filtro encima de la mezcla.



**Figura 24.** Preparación del modelo a) primera capa de mezcla b) Primera línea de barras vista superior c) segunda línea de barras vista frontal d) caja llena con mezcla y barras al interior. Fuente: Propia

**5.4.1.4 Consolidación.** El proceso de consolidación de los modelos se realiza bajo la metodología INV E 151-13, donde se toman especímenes confinados lateralmente permitiendo el drenaje, los cuales se cargan axialmente duplicando progresivamente la fuerza de presión, hasta lograr el esfuerzo máximo requerido.

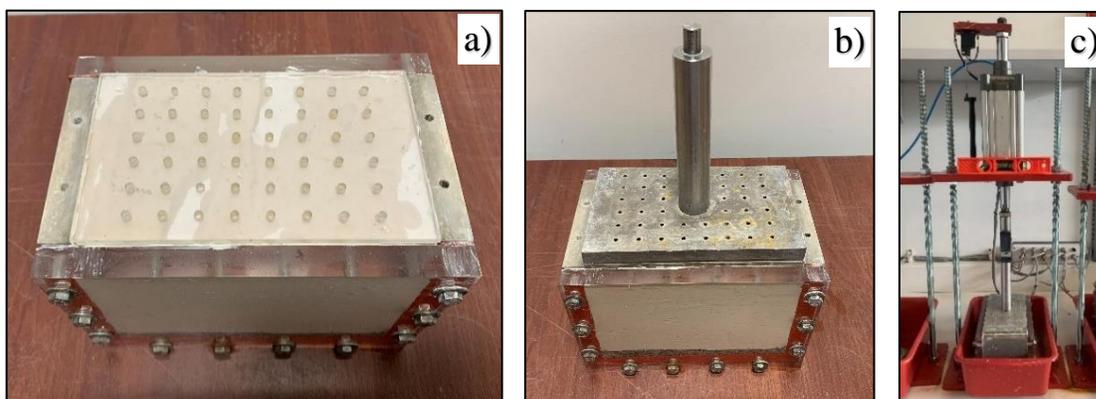
En esta investigación se realizaron consolidaciones con esfuerzos máximos de 30kPa, 40kPa y 50kPa. Teniendo en cuenta las dimensiones de 17cm x 10cm de la placa de distribución se deben tener diferentes configuraciones para el aumento de la carga y así alcanzar el esfuerzo máximo deseado, como se evidencia en la Tabla 7.

*Tabla 7. Incrementos de carga para diferentes esfuerzos de consolidación. Fuente: Propia*

| Esfuerzo | Incrementos de carga (Kg) |      |    |    |    |
|----------|---------------------------|------|----|----|----|
| 30kPa    | 6.5                       | 13   | 26 | 52 |    |
| 40kPa    | 8.8                       | 17.5 | 35 | 70 |    |
| 50kPa    | 5.5                       | 11   | 22 | 44 | 88 |

Utilizando la metodología de Taylor, en el que grafica el desplazamiento vertical vs. la raíz del tiempo, se puede determinar el  $t_{90}$ , tiempo necesario para alcanzar el 90% de la consolidación primaria. El proceso anterior se realizó en cada estado de esfuerzos para garantizar efectivamente la consolidación y así poder realizar el incremento de carga.

Teniendo claro los incrementos de carga y la metodología para comprobar la consolidación, se instala la caja con el modelo en el consolidometro neumático, colocando previamente papel filtro, seguido de un acrílico perforado el cual permitirá el drenaje, la placa de distribución de carga y el pistón, para finalmente ubicarse dentro de la celda de carga. Con el uso de un nivel se verifica que el bastidor de carga se encuentre perfectamente nivelado horizontalmente (ver Figura 25).

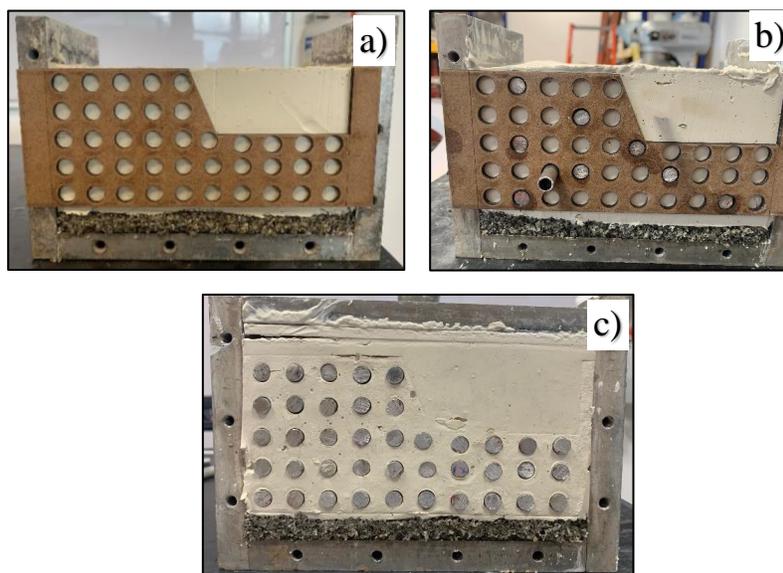


**Figura 25.** a) Instalación de placa acrílica perforada b) Instalación de Pistón c) Instalación de modelo en consolidometro neumático. Fuente: Propia

#### 5.4.1.5 Preparación de los modelos para modelación en maquina centrífuga.

**5.4.1.5.1 Proceso constructivo con instalación de barras posterior a la consolidación.** A continuación, se describe el procedimiento realizado para construir los modelos con las barras instaladas posterior al proceso de consolidación:

En esta etapa se retirarán los acrílicos laterales de las cajas, luego, con la ayuda de una placa guía se pasa un tubo de aluminio con el fin de retirar el material para finalmente insertar la barra en el modelo (ver figura 26)



**Figura 26.** a) Placa guía b) Tubo pasando por el modelo c) Modelo con barras instaladas. Fuente: Propia

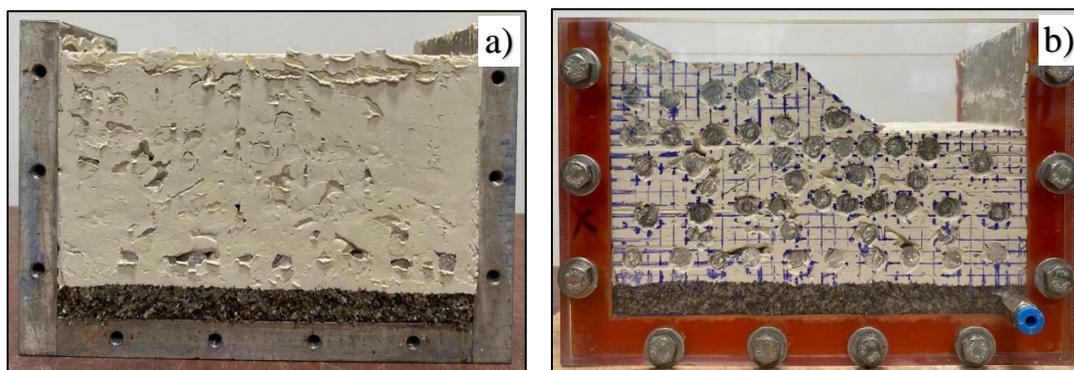
Posteriormente se hizo el corte del talud con la pendiente seleccionada, seguido, se realiza una cuadrícula en la cara frontal del modelo con el uso de un marco con hilos separados cada 5cm y azul de metileno. Finalmente se instalan de nuevo los acrílicos laterales de la caja (ver Figura 27).



*Figura 27. Corte del talud y marcación de cuadrícula en cara frontal del modelo. Fuente: Propia*

**5.4.1.5.2 Proceso constructivo con instalación de barras antes a la consolidación.** A continuación, se describe el procedimiento realizado para construir los modelos con las barras instaladas antes del proceso de consolidación:

En esta etapa se retiran los acrílicos laterales de las cajas, luego, se debe localizar y limpiar frontalmente las barras, seguido, se hizo el corte del talud con la pendiente seleccionada. Posteriormente se realiza una cuadrícula en la cara frontal del modelo con el uso de un marco con hilos separados cada 5cm y azul de metileno y finalmente se instalan de nuevo los acrílicos laterales de la caja (Ver Figura 28)



*Figura 28. a) Modelo posterior a la consolidación b) Corte del talud y marcación de cuadrícula en cara frontal del modelo. Fuente: Propia*

#### 5.4.2 Vuelo en maquina centrífuga y registro fotográfico.

Se instaló el modelo en una de las canastas de la máquina centrífuga y del otro costado en la otra canasta se instaló un caja llena de arena con el peso exacto del modelo para generar un balance de la máquina. Finalmente se realiza el vuelo a 100 gravedades y duración de 10 minutos en la maquina centrífuga lo cual corresponde a una duración de 69 días para la escala prototipo.



*Figura 29. Modelo instalado dentro de maquina centrífuga previo al inicio del vuelo. Fuente: Propia*

#### 5.5 Análisis de imágenes

Para el proceso de análisis de imágenes fue necesario realizar un registro fotográfico antes y después del vuelo; posterior a cada vuelo se analizó visualmente las imágenes comparando el antes y el después, para establecer los principales desplazamientos entre la posición inicial y final de los límites del talud, adicionalmente identificar si existió un mecanismo de falla claro.

Identificados los modelos definitivos los cuales lograron la viabilidad investigativa se utilizó el software GeoPIV\_RG (Stanier et al., 2015). Con los resultados arrojados del software se determinaron las magnitudes de deformación y las superficies de falla generadas en el modelo, de este modo se pudo evidenciar el comportamiento de los taludes con diferentes ABP (*Areal Block Proportion*).

## 6. Resultados y análisis

Esta investigación es de índole experimental y no tiene precedente alguno de análisis de estabilidad de taludes de suelos binarios modelados en maquina centrífuga, durante el mismo proceso de investigación se determinaron las variables adecuadas para definir los modelos específicos que se le realizaría análisis de imágenes mediante el software GeoPIV\_RG.

En este trabajo se realizó un total de 18 modelos (ver Tabla 8), de los cuales 2 modelos presentaron problemas en el proceso de consolidación por lo que no garantizaban veracidad en los resultados, razón por la cual no se tuvieron en cuenta para el análisis. En el ejercicio investigativo, se decidió hacer tres modelos reemplazando el tipo de inclusión a tubos de aluminio con una densidad de  $0,955 \text{ gr/cm}^3$ , pero manteniendo el mismo diámetro de 8 mm; esta decisión se tomó con una intención netamente experimental con el fin de compararlos con sus similares con barras y lograr definir el proceso constructivo. El área de los modelos se determinó con las dimensiones antes del vuelo en centrifuga.

Tabla 8. Características de los modelos de talud de suelos binarios. Fuente: Propia

| Modelo | Proceso constructivo * | Pendiente | Esfuerzo de consolidación | Tipo de inclusión | No. de inclusiones | Área   | ABP    |
|--------|------------------------|-----------|---------------------------|-------------------|--------------------|--------|--------|
| 1      | No aplica              | 67°       | 30 kPa                    | Barra             | 0                  | 105,4  | 0%     |
| 2      | D.C                    | 67°       | 30 kPa                    | Barra             | 20                 | 105,4  | 9,54%  |
| 3      | D.C                    | 67°       | 30 kPa                    | Barra             | 40                 | 105,4  | 19,08% |
| 4      | No aplica              | 40°       | 30 kPa                    | Barra             | 0                  | 110,09 | 0%     |
| 5      | D.C                    | 40°       | 30 kPa                    | Barra             | 43                 | 110,09 | 19,63% |
| 6      | D.C                    | 40°       | 30 kPa                    | Tubo              | 43                 | 110,09 | 19,63% |
| 7      | A.C                    | 40°       | 30 kPa                    | Tubo              | 43                 | 110,09 | 19,63% |
| 8      | A.C                    | 40°       | 50 kPa                    | Tubo              | 40                 | 120,29 | 16,72% |
| 9      | No aplica              | 40°       | 50 kPa                    | Barra             | 0                  | 110,09 | 0%     |
| 10     | A.C                    | 40°       | 50 kPa                    | Barra             | 40                 | 120,29 | 16,72% |
| 11     | A.C                    | 40°       | 40 kPa                    | Barra             | 40                 | 120,29 | 16,72% |
| 12     | A.C                    | 40°       | 30 kPa                    | Barra             | 40                 | 127,09 | 15,82% |
| 13     | No aplica              | 40°       | 40 kPa                    | Barra             | 0                  | 110,09 | 0,00%  |
| 14     | A.C                    | 40°       | 40 kPa                    | Barra             | 49                 | 127,89 | 19,26% |
| 15     | A.C                    | 40°       | 40 kPa                    | Barra             | 25                 | 110,09 | 11,42% |
| 16     | A.C                    | 40°       | 40 kPa                    | Barra             | 32                 | 110,09 | 14,61% |

\*El proceso constructivo se refiere al momento de la instalación de las barras A.C: Barras instaladas antes de consolidación D.C: Barras instaladas después de consolidación.

## 6.1 Caracterización del suelo cohesivo

### 6.1.1 Ensayo de humedad

Se determinó el contenido de humedad de la matriz del suelo cohesivo después del proceso de consolidación, de acuerdo con la norma INV. E - 122 -13. Se realizaron 5 ensayos con esfuerzo de consolidación de 40 kPa, pero con diferentes ABP (*Areal Block Proportion*). Es importante resaltar que la muestra se obtuvo de la zona de corte para realizar el talud, los resultados se evidencian en la Tabla 9. El contenido de humedad se calcula con la siguiente ecuación:

$$w = \frac{W1 - W2}{W2 - Wc} \times 100$$

Donde:

w: contenido de agua, %

W1: Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g.

W2: Masa del recipiente con el espécimen seco, g.

Wc: Masa del recipiente, g.

Tabla 9. Contenido de humedad matriz de suelo cohesivo. Fuente: Propia

|              | <b>Ensayos de humedad</b> |              |              |              |              |
|--------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|              | 0% (ABP)                  | 11.42% (ABP) | 14.61% (ABP) | 16.72% (ABP) | 19.26% (ABP) |
| Wc (g)       | 54.31                     | 55.53        | 55.96        | 54.41        | 54.41        |
| W1 (g)       | 78                        | 68,99        | 73,61        | 66,44        | 66,44        |
| W2 (g)       | 67.78                     | 63.12        | 66.02        | 61.14        | 61.14        |
| <b>W (%)</b> | <b>75.87</b>              | <b>77.34</b> | <b>75.45</b> | <b>78.36</b> | <b>78.75</b> |

Se obtuvo un valor promedio de 77.2% de contenido de humedad en la matriz de suelo cohesivo con desviación estándar de 1.47. No se estableció una relación directa del contenido de humedad con el ABP, considerando la sensibilidad en los resultados de este ensayo.

### 6.1.2 Peso unitario

Para determinar el peso unitario se utilizó la norma ASTM D7263 específicamente por el método B. En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a 5 modelos con esfuerzo de consolidación de 40 kPa, con diferentes porcentajes ABP (*Areal Block Proportion*)

Tabla 10. Contenido de humedad matriz de suelo cohesivo. Fuente: Propia

|                               | Ensayos de peso unitario |                 |                 |                 |                 |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                               | 0%<br>(ABP)              | 11.42%<br>(ABP) | 14.61%<br>(ABP) | 16.72%<br>(ABP) | 19.26%<br>(ABP) |
| Masa (g)                      | 23.69                    | 13.46           | 17.65           | 30              | 12.03           |
| Volumen (cm <sup>3</sup> )    | 13.73                    | 7.92            | 10.24           | 18.03           | 7.18            |
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )   | 1.73                     | 1.70            | 1.72            | 1.66            | 1.68            |
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | <b>16.92</b>             | <b>16.67</b>    | <b>16.90</b>    | <b>16.32</b>    | <b>16.44</b>    |

El valor promedio de peso unitario para el suelo cohesivo posterior a la consolidación con esfuerzo de 40kPa es de 16.65 kN/m<sup>3</sup> con desviación estándar de 0.27.

### 6.1.3 Resistencia al corte

Con el uso de una mini veleta de corte Humboldt H-4212MH (ver Figura 30), se pudo determinar la resistencia al corte no drenada del suelo cohesivo posterior al proceso de consolidación, determinando la fuerza de torsión requerida para fallar el suelo. El procedimiento de uso de la mini veleta se describe a continuación:

- Se hincan la base de la mini veleta en el suelo
- Se gira el cabezal de la mini veleta hasta la falla del material
- Se suelta y se verifica el valor resultante (1 REV = 1.0 kg/cm<sup>2</sup>)
- El valor resultante se multiplica por el factor de la base grande (0.2 kg/cm<sup>2</sup>)
- Se obtiene la resistencia al corte no drenada



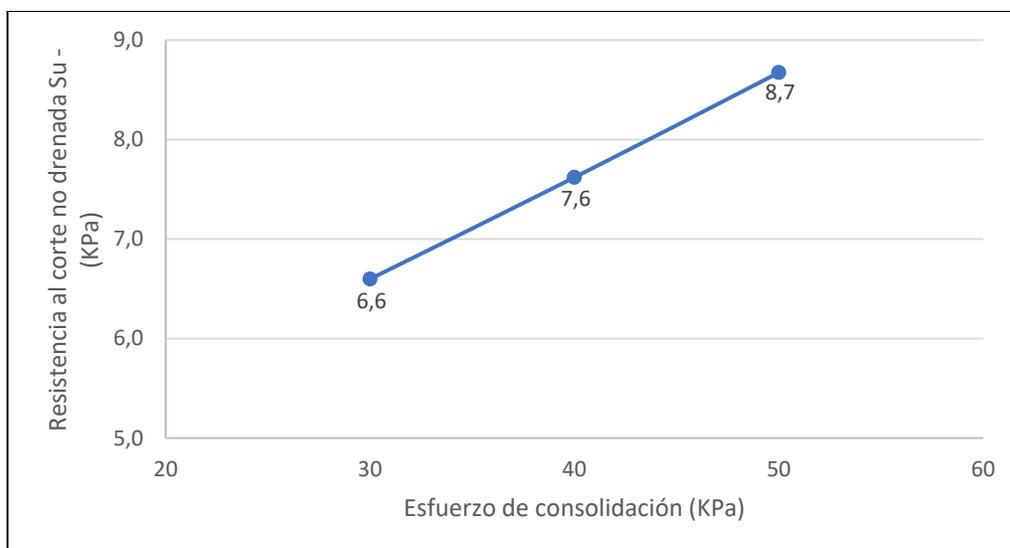
**Figura 30.** Ensayo de resistencia al corte no drenada con mini veleta. Fuente: Propia

Para cada modelo se realizó el ensayo 2 veces en la zona que posteriormente se realizaría el corte del talud, evitando la zona en la que se encontraban las barras las cuales podría afectar el resultado final del ensayo. En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos de la resistencia al corte no drenada (Cu) mediante el ensayo de mini veleta con diferentes esfuerzos de consolidación.

**Tabla 11.** Resistencia al corte no drenada de suelo cohesivo con el ensayo de mini veleta. Fuente: Propia

| Modelo | Consolidación | Valor 1 | Valor 2 | Valor promedio | Resistencia corte no drenada - Cu (kPa) | Resistencia corte no drenada - Su (kPa) promedio |
|--------|---------------|---------|---------|----------------|---|--|
| 3      | 30 kPa        | 0,31    | 0,32    | 0,315          | 6,17                                    | 6,6  |
| 6      | 30 kPa        | 0,35    | 0,36    | 0,355          | 6,96                                    |  |
| 12     | 30 kPa        | 0,33    | 0,35    | 0,34           | 6,66                                    |  |
| 13     | 40 kPa        | 0,41    | 0,34    | 0,375          | 7,35                                    | 7,6  |
| 14     | 40 kPa        | 0,41    | 0,4     | 0,405          | 7,94                                    |  |
| 15     | 40 kPa        | 0,39    | 0,36    | 0,375          | 7,35                                    |  |
| 16     | 40 kPa        | 0,41    | 0,39    | 0,40           | 7,84                                    |  |
| 9      | 50 kPa        | 0,44    | 0,45    | 0,445          | 8,72                                    | 8,7  |
| 10     | 50 kPa        | 0,42    | 0,46    | 0,44           | 8,62                                    |  |

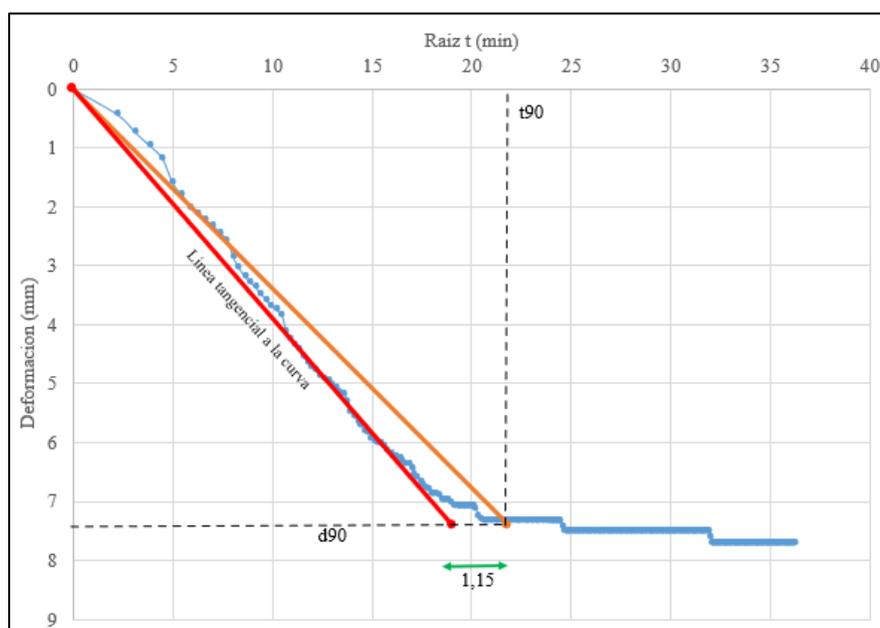
Se observa un comportamiento de incremento lineal de la resistencia al corte no drenada con el aumento del esfuerzo de consolidación, como se presenta en la Figura 31.



**Figura 31.** Resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ) Vs Esfuerzo de consolidación. Fuente: Propia

## 6.2 Consolidación

De acuerdo con el procedimiento plasmado en la sección 5.4.1.4, fue necesario graficar las curvas de consolidación para cada incremento de carga, de este modo se verificó la consolidación efectiva, permitiendo realizar el siguiente incremento de carga. En la Figura 32 se presenta la curva de consolidación del modelo 16 (esfuerzo de consolidación 40kPa) para la primera carga de 6.5 kg.



**Figura 32.** Curva de consolidación para esfuerzo de 40 kPa. Fuente: Propia

En la tabla 13 se evidencian los resultados de los asentamientos finales por cada uno de los modelos, diferenciándose en sus variables. Es importante recordar que para los modelos con proceso constructivo D.C\* en el momento de la consolidación no tenían barras en su interior.

Tabla 12. Asentamientos finales por modelo. Fuente: Propia

| Modelo | Proceso constructivo * | Esfuerzo de consolidación | No barras | ABP    | Asentamiento final (mm) |
|--------|------------------------|---------------------------|-----------|--------|-------------------------|
| 1      | N/A                    | 30 kPa                    | 0         | 0%     | 22,3426                 |
| 2      | D.C                    | 30 kPa                    | 20        | 9,54%  | 22,3096                 |
| 3      | D.C                    | 30 kPa                    | 40        | 19,08% | 22,1838                 |
| 4      | N/A                    | 30 kPa                    | 0         | 0%     | 22,6116                 |
| 5      | D.C                    | 30 kPa                    | 43        | 19,63% | 22,0290                 |
| 9      | N/A                    | 50 kPa                    | 0         | 0%     | 27,2780                 |
| 10     | A.C                    | 50 kPa                    | 40        | 16,72% | 21,6721                 |
| 11     | A.C                    | 40 kPa                    | 40        | 16,72% | 20,2926                 |
| 12     | A.C                    | 30 kPa                    | 40        | 15,82% | 20,0001                 |
| 13     | N/A                    | 40 kPa                    | 0         | 0,00%  | 24,8199                 |
| 14     | A.C                    | 40 kPa                    | 49        | 19,26% | 16,7951                 |
| 15     | A.C                    | 40 kPa                    | 25        | 11,42% | 21,6183                 |
| 16     | A.C                    | 40 kPa                    | 32        | 14,61% | 21,2336                 |

\*El proceso constructivo se refiere al momento de la instalación de las barras A.C: Barras instaladas antes consolidación D.C: Barras instaladas después consolidación

Con un total de cinco modelos sin barras en el proceso de consolidación a 30kPa, en la Figura 33 se puede evidenciar los asentamientos obtenidos, presentando una diferencia de 0,58 mm entre el valor mínimo y máximo, siendo consistentes los resultados.

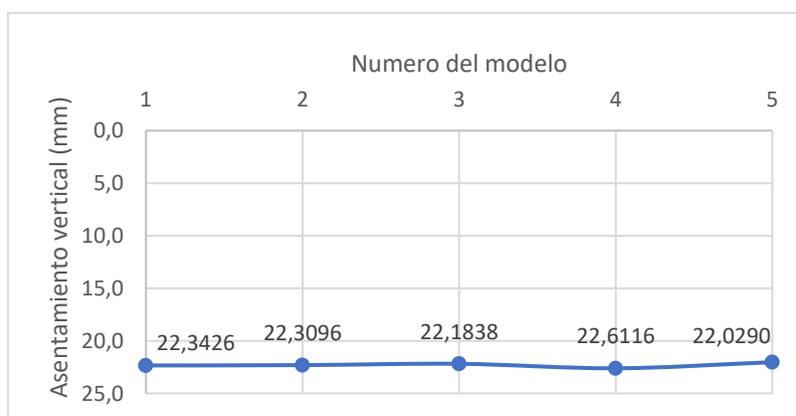
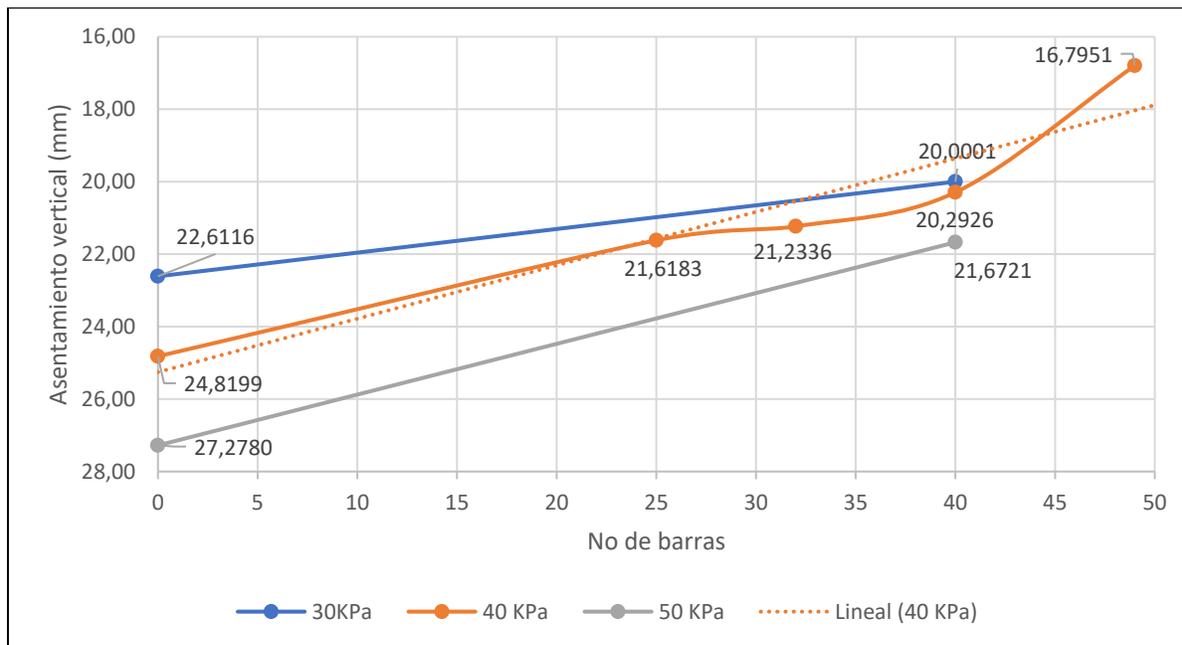


Figura 33. Asentamiento de modelos sin barras en consolidación – Esfuerzo de consolidación 30 kPa.

Fuente: Propia

Se efectuó la comparación de los asentamientos verticales con diferente cantidad de número de barras y esfuerzos de consolidación. Como se presenta en la Figura 34 se comprueba que a mayor número de barras el asentamiento disminuye proporcionalmente para los tres esfuerzos de consolidación.

Los asentamientos obtenidos para el esfuerzo de consolidación de 40kPa mantiene una linealidad hasta un ABP del 16,72% (40 barras), pero se presenta un efecto de disminución exponencial del asentamiento hasta alcanzar el ABP del 19,26% (49 barras). Comportamiento que se debe a la disminución de la altura del suelo entre las barras y la mayor ocupación de los cuerpos solidos de aluminio generando una restricción de la deformación vertical.

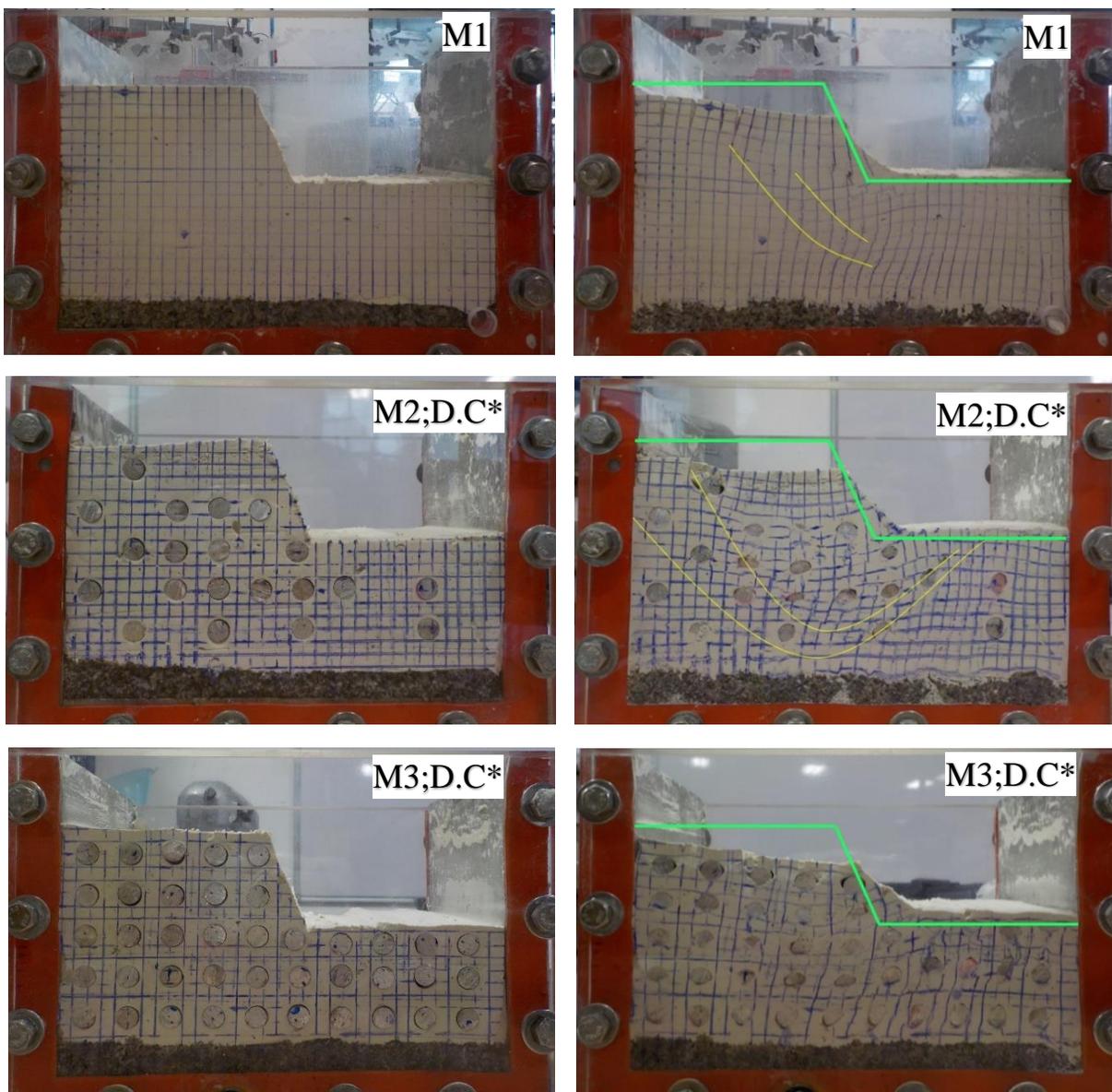


**Figura 34.** Asentamiento de modelos con diferente cantidad de barras y esfuerzos de consolidación. Fuente: Propia

### 6.3 Análisis del registro fotográfico

Durante la investigación fue necesario hacer un análisis preliminar a las imágenes del antes y después para un seguimiento del comportamiento de cada modelo. En la Figura 35 se presentan los modelos con inclusión de las barras después de la consolidación, pendiente 67° y esfuerzo de consolidación 30kPa; donde se logró evidenciar que para el M1 existe una clara falla del talud con desplazamiento muy notorios; para el M2 con ABP 9,54% (20 barras) se generaron una superficies en forma de “V” con grandes deformaciones, las cuales no son típicas de falla por estabilidad en

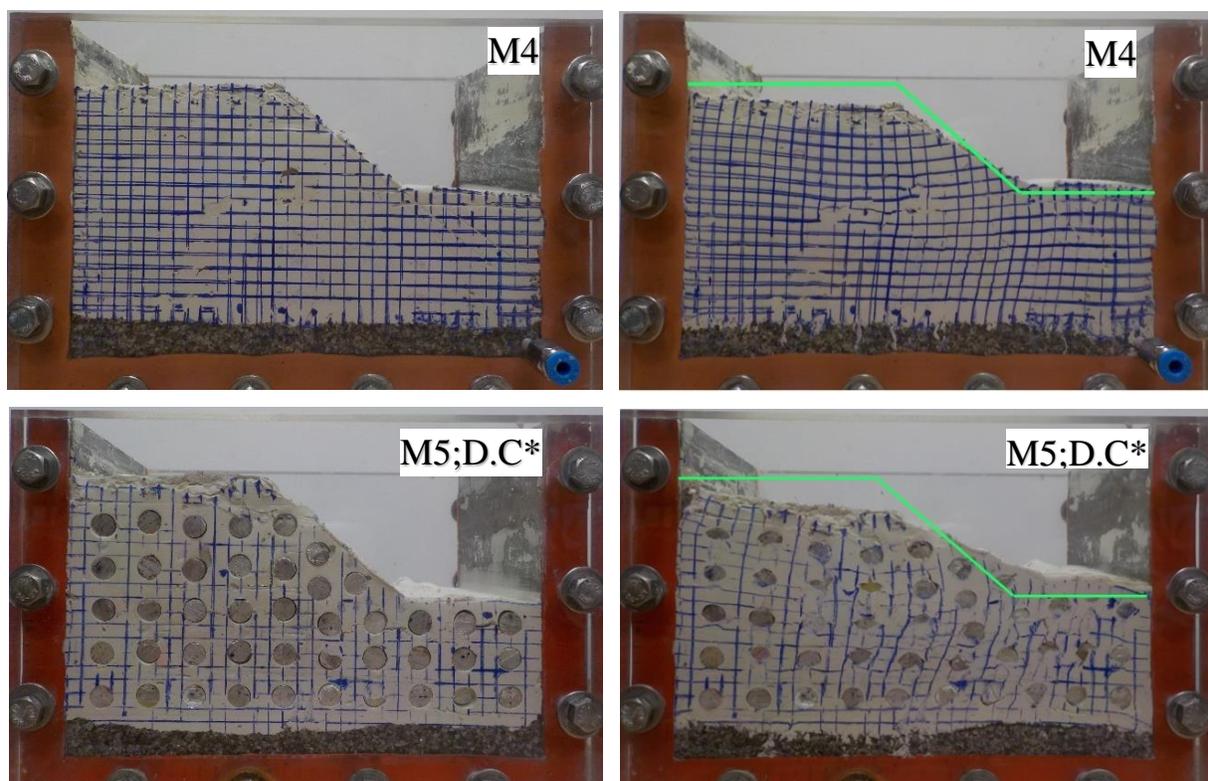
taludes; para el M3 con ABP 19,08% (40 barras) se presenta un colapso del talud sin una generación clara de una superficie de falla.



**Figura 35.** Resultados de los modelos con pendiente  $67^\circ$  y esfuerzo de consolidación  $30\text{kPa}$  \*D.C: Barras instaladas después de consolidación. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia

Con el objetivo de obtener una falla menor que no llegue al colapso como se evidenció hasta el modelo 3, se decidió en los siguientes modelos realizar el cambio la pendiente del talud a  $40^\circ$ . En Figura 36 se observa el M4 Sin barras y con pendiente de  $40^\circ$ , presentan leves desplazamientos

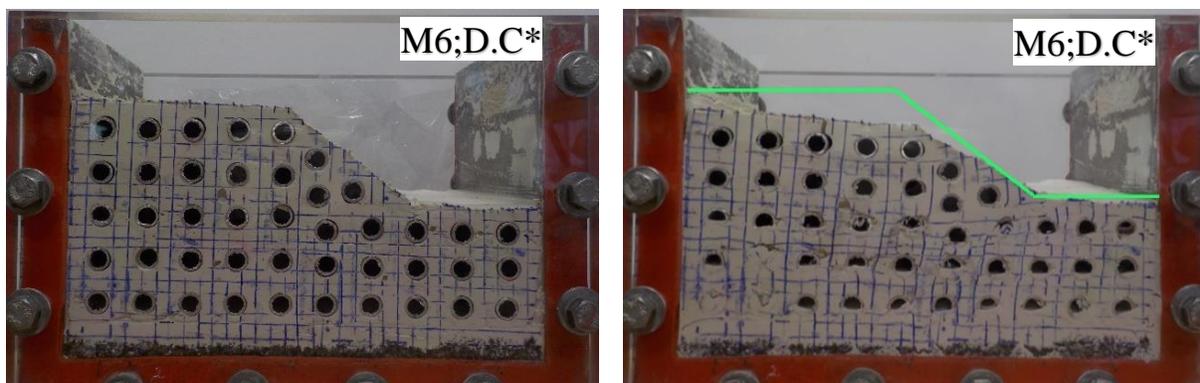
sin una superficie de falla definida con un mejor comportamiento comparado con el M1, seguido, el M5 con ABP 19,63% (43 barras) presento un colapso total.



**Figura 36.** Resultados de los modelos con pendiente 40° y esfuerzo de consolidación 30kPa \*D.C: Barras instaladas después consolidación. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia

Mediante los resultados M4 y M5, se logró interpretar que el M5 pudo haber fallado por capacidad portante, por lo cual se realizaron modelos reemplazando la inclusión de barras de aluminio a tubos de aluminio con el mismo diámetro de 8 mm y longitud de 10 cm.

La Figura 37 presenta el modelo M6 con inclusión de los tubos después de la consolidación, pendiente 40° y esfuerzo de consolidación 30kPa; el cual presento un mejor comportamiento que el M5, por lo que se podría inferir que el peso de las barras si estaba influyendo en el colapso del modelo, sin embargo, siguió presentando grandes deformaciones verticales fomentando más el aplastamiento a la falla del talud.



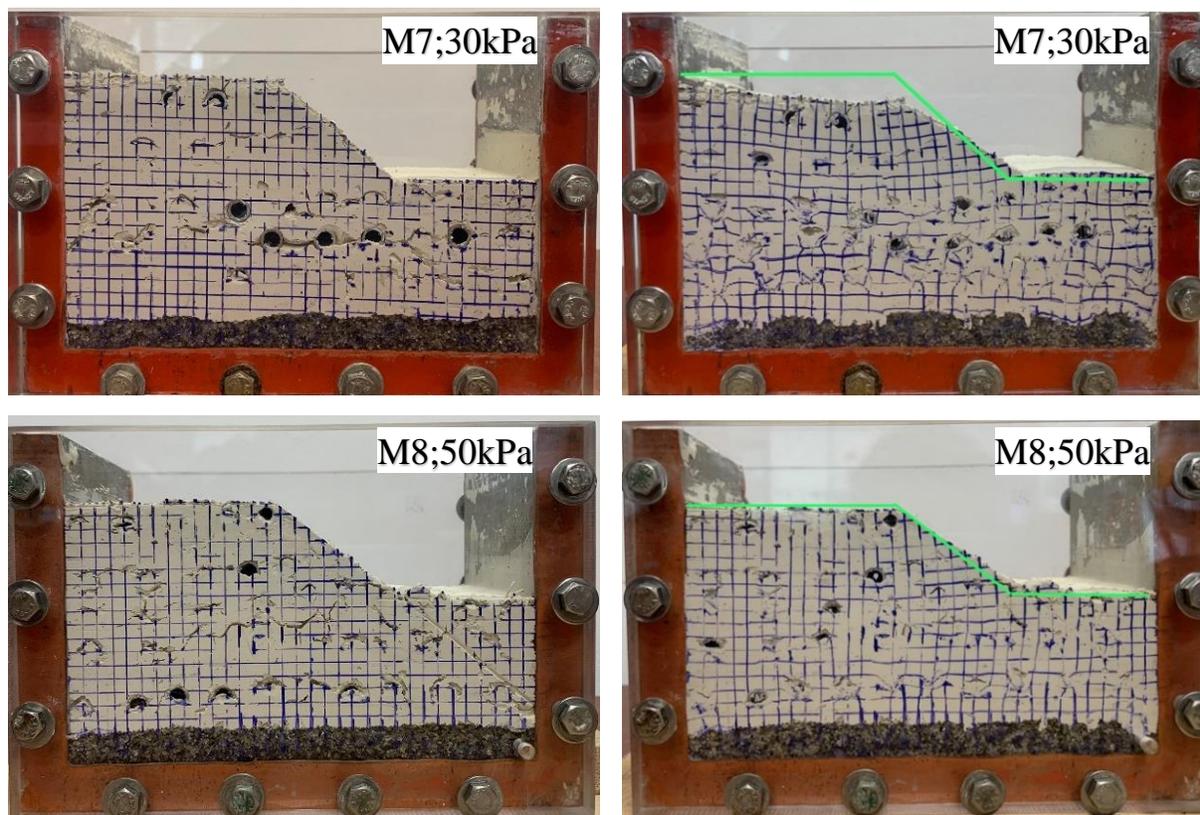
**Figura 37.** Resultados del modelo 8 con pendiente  $40^\circ$  y esfuerzo de consolidación 30kPa \*D.C: Barras instaladas después consolidación. Costado izquierdo antes del vuelco, costado derecho después del vuelco. Fuente: Propia

Los modelos M7 y M8 se presentan en la Figura 38 con inclusión de tubos en aluminio antes de la consolidación. El M7 presentó una mejor estabilidad con menores desplazamientos en comparación al M6. Lo anterior es determinante para identificar que el proceso constructivo adecuado para la instalación de las partículas rígidas es antes de la consolidación.

En el proceso de insertar las barras posterior a la consolidación se altera la configuración del suelo, afectando directamente su resistencia al corte, logrando que se presente el colapso total como se identificó en los modelos con mayor cantidad de barras M3 y M5. Asimismo, se estableció que al instalar la barra después de retirar el material arcilloso quedaban unas cavidades entre la matriz y la barra generando mayor inestabilidad en el talud; adicionalmente no se podía garantizar un control de la resistencia al corte del suelo en los ensayos.

En el modelo M8 se aumentó el esfuerzo de consolidación a 50 kPa, como se evidencia en la figura 35 para el M8 después del vuelco, los desplazamientos son ligeramente perceptibles, reflejando muy poca variación.

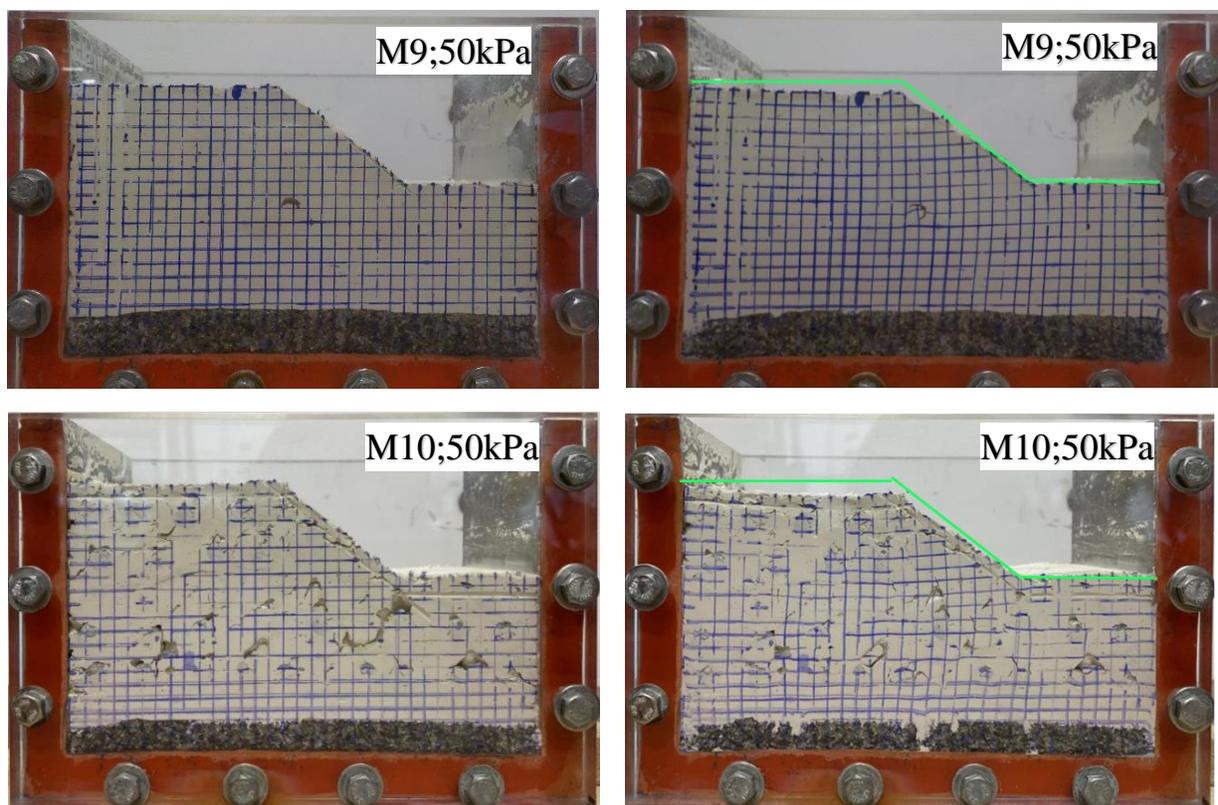
Para M7 y M8, se evidencian en las imágenes después del vuelco una distorsión en las líneas de referencia, las cuales generan una perspectiva de asentamientos verticales en los tubos. La causa de este fenómeno es debido a las fuerzas ejercidas durante el vuelco provocando que el suelo ingrese dentro de los orificios del tubo.



*Figura 38. Resultados de los modelos con inclusión de tubos antes de la consolidación, pendiente 40° esfuerzo de consolidación 30kPa y 50kPa. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia*

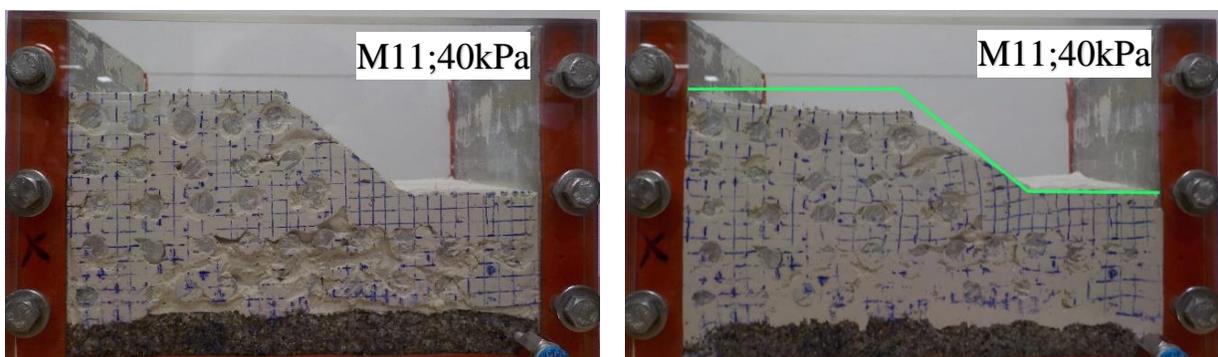
Después de realizados los primeros 8 modelos, se pudo establecer que el proceso constructivo de la instalación de las barras sería antes de la consolidación y la pendiente del talud definitiva sería de 40°. Para poder comparar entre modelos era necesario realizar cuatro modelos más para determinar cuál sería el esfuerzo de consolidación definitivo para llegar a la viabilidad investigativa.

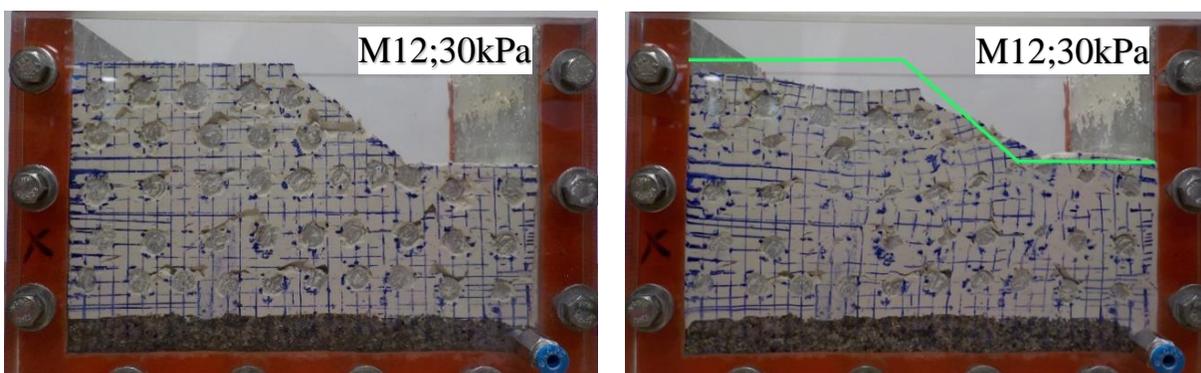
En la Figura 39 se presenta el modelo M9 y M10 con esfuerzo de consolidación de 50 kPa, el primero sin barras y el segundo con ABP 16,72% (40 barras). El M9 presenta mínimos desplazamientos y sin evidencia de superficie de falla, el M10 tiene levemente un mayor desplazamiento en la cresta del talud y abultamiento en la pata del talud. Con los últimos resultados se precisó que la diferencia en desplazamientos con un esfuerzo de consolidación de 50kPa son mínimos y no se podría hacer una diferenciación evidente variando los porcentajes ABP.



**Figura 39.** Resultados de los modelos con inclusión de barras antes de la consolidación, pendiente  $40^\circ$  con 0% ABP y 16,72% ABP. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia

Para establecer el esfuerzo de consolidación definitivo, se realizaron los modelos M11 (40kPa) y M12 (30kPa), ambos con 40 barras que representan ABP 16,72% y ABP 15,82% respectivamente (ver Figura 40). M12 presenta un ABP levemente menor porque obtuvo un asentamiento menor generando una mayor área, como se evidenció en la tabla 8.





**Figura 40.** Resultados de modelos con inclusión de barras antes de la consolidación, pendiente  $40^\circ$  con 16,72% ABP y 15,82% ABP. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia

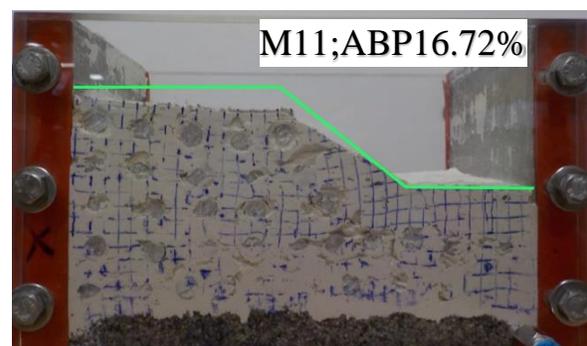
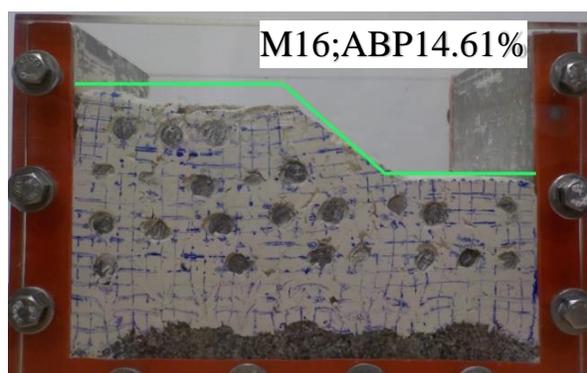
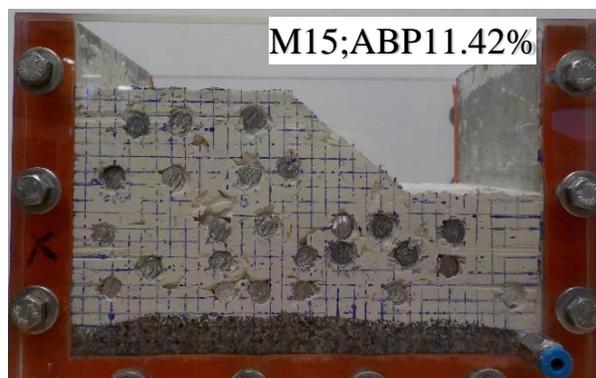
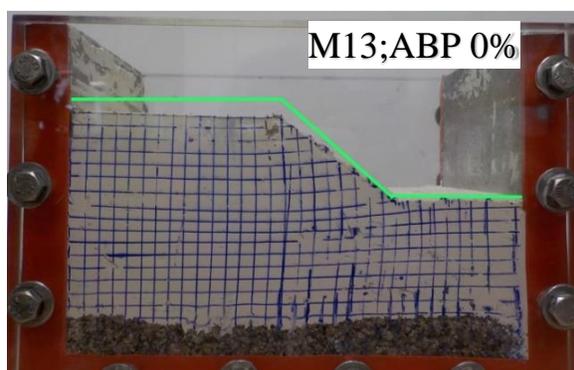
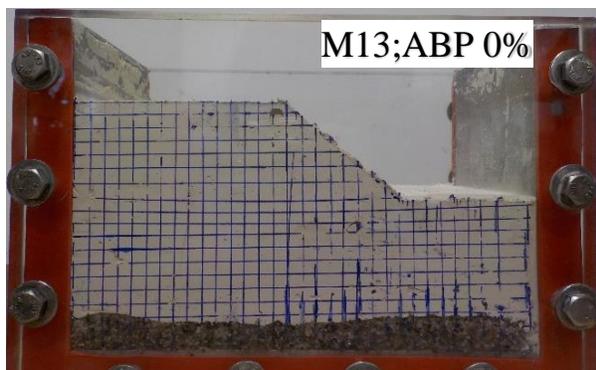
Realizando una comparación de los modelos M10, M11 y M12 los cuales presentan las mismas características exceptuando el esfuerzo de consolidación de 50kPa, 40kPa y 30kPa respectivamente, se evidenció que existen mayores desplazamientos con la disminución del esfuerzo de consolidación. Adicionalmente se pudo determinar que para continuar con esta investigación se define el esfuerzo de consolidación de 40kPa, en el cual se encontró un punto intermedio entre los leves desplazamientos encontrados en los modelos con consolidación de 50kPa y las fuertes fallas determinadas en los modelos con esfuerzo de consolidación de 30kPa.

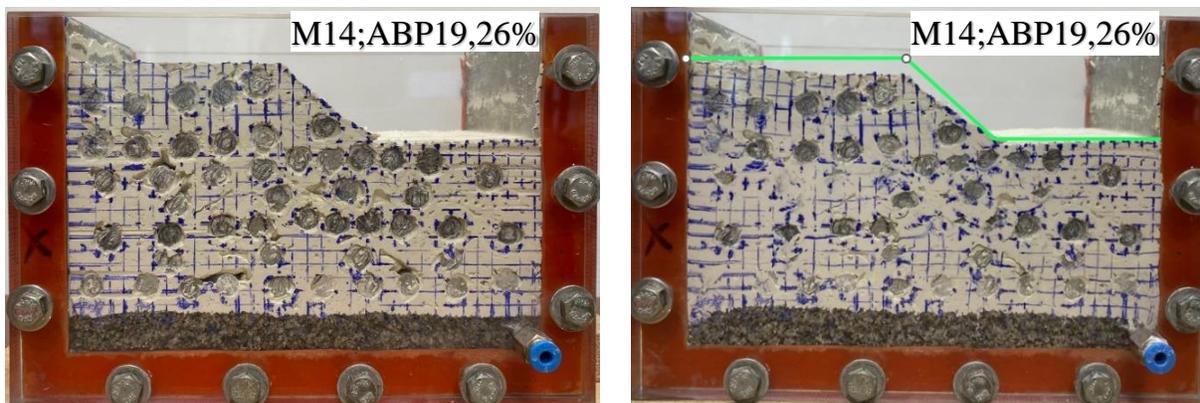
Posterior a la realización de 12 modelos, se logró determinar los parámetros constantes y la variable de estudio del porcentaje del ABP, que se describen a continuación:

- Proceso constructivo: Inclusión de las barras antes del proceso de consolidación.
- Pendiente del talud:  $40^\circ$
- Esfuerzo de consolidación: 40 kPa
- ABP: 0%, 11.42% (25 barras), 14.61% (32 barras), 16.72% (40 barras) y 19.26% (49 barras)

En la Figura 41 se presentan los 5 modelos con los parámetros definitivos con aumento progresivo del porcentaje de ABP, donde se reflejan los desplazamientos y la posición inicial y final de cada modelo. En el M14 con ABP 19.26% (49 barras), la altura del talud fue de 3.35cm, debido a que

las barras ubicadas en la zona del pie del talud en la consolidación no descendieron lo suficiente para poder realizar el corte de 3.5cm.





**Figura 41.** Resultados de modelos con variables definitivas, inclusión de barras antes de la consolidación, pendiente 40°, esfuerzo de consolidación 40kPa. Costado izquierdo antes del vuelo, costado derecho después del vuelo. Fuente: Propia

#### 6.4 Análisis de imágenes mediante el uso GeoPIV\_RG

Se realizó un análisis detallado mediante el uso del programa GeoPIV\_RG a los cinco modelos presentados en la Figura 41 donde se obtuvieron desplazamientos resultantes y vectores de desplazamientos, con los cuales se pudo determinar de manera precisa el comportamiento de los taludes de acuerdo con el porcentaje de ABP (*Areal Block Proportion*).

En la tabla 14 se presentan las variables de los cinco modelos definitivos a los cuales se realizó el análisis detallado de imágenes. Siendo el ID el código para identificar específicamente los cinco modelos definitivos.

*Tabla 13. Características de los cinco modelos definitivos. Fuente: Propia*

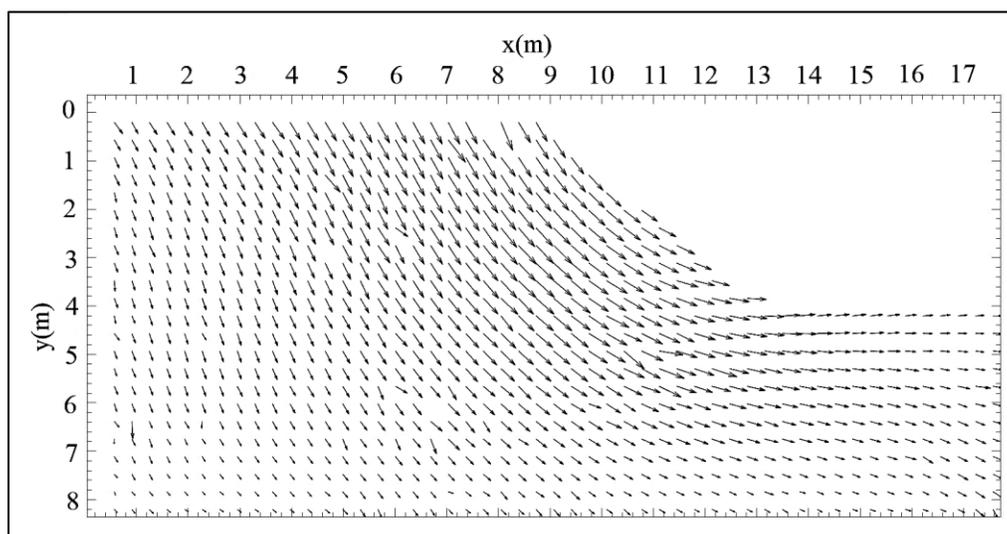
| Modelo | ID  | Esfuerzo de consolidación | Pendiente | No barras | Área   | ABP    |
|--------|-----|---------------------------|-----------|-----------|--------|--------|
| 13     | MD1 | 40 kPa                    | 40°       | 0         | 110,09 | 0,00%  |
| 15     | MD2 | 40 kPa                    | 40°       | 25        | 110,09 | 11,42% |
| 16     | MD3 | 40 kPa                    | 40°       | 32        | 110,09 | 14,61% |
| 11     | MD4 | 40 kPa                    | 40°       | 40        | 120,29 | 16,72% |
| 14     | MD5 | 40 kPa                    | 40°       | 49        | 127,89 | 19,26% |

De acuerdo con los vectores de desplazamiento a escala prototipo obtenidos mediante el análisis de imágenes del programa GeoPIV\_RG se pudo proyectar la superficie de falla de cada uno de los taludes de suelo binario, como se pudo apreciar desde la figura 42 a la 51. Se determinó que el deslizamiento provocado en los taludes fue una superficie de falla rotacional de base, considerando que la falla en todos los casos supera el pie o pata del talud.

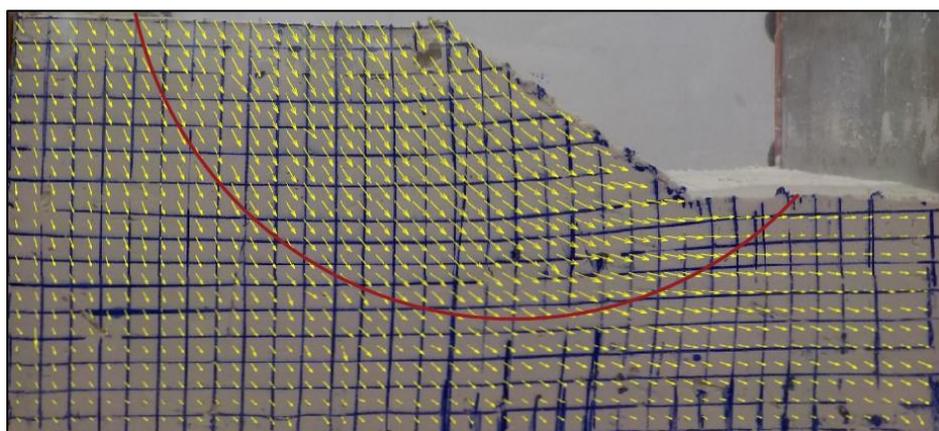
### 6.4.1 Vectores de desplazamiento

#### MD1 - 0% ABP

En la Figura 42 se presentan los vectores de desplazamiento a escala prototipo del modelo con 0% de ABP los cuales en la zona de la pendiente tienen magnitudes del orden de 0,48m, levemente mayores a otras zonas que presentan mayor estabilidad, la dirección de los vectores representa una superficie de falla circular en el modelo. Los vectores de desplazamiento y superficie de falla se proyectan en el modelo real para una mejor comprensión del análisis de imágenes (ver Figura 43).



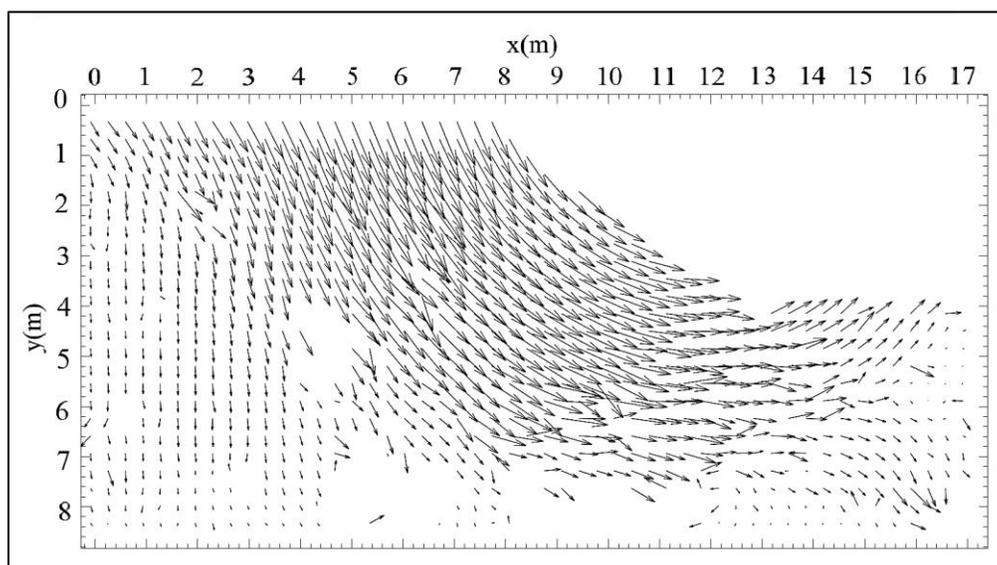
**Figura 42.** Vectores de desplazamiento para MD1 con 0% ABP. Fuente: Propia



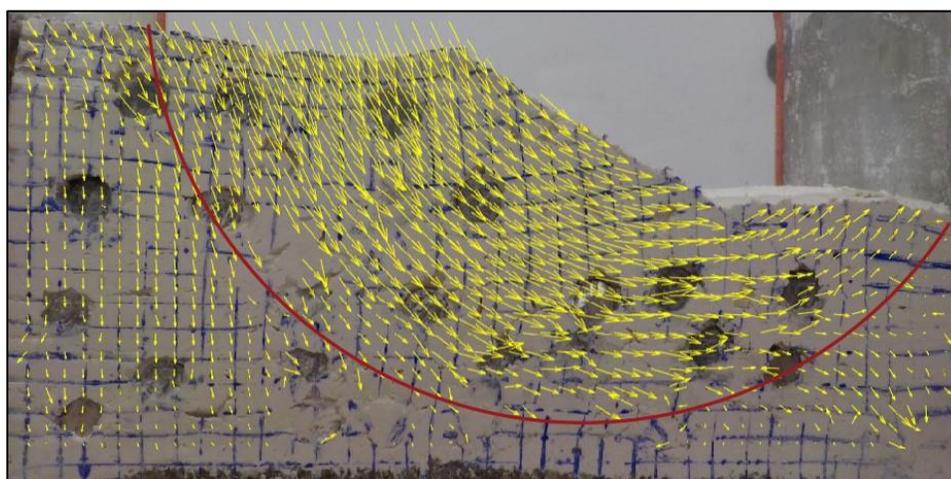
**Figura 43.** Vectores de desplazamiento para MD1 con 0% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia

### MD2 – 11.42% ABP

En la Figura 44 se muestra el modelo con ABP= 11.42%, a través de los vectores de desplazamiento a escala prototipo se identificó una superficie de falla circular muy definida; donde la magnitud de los vectores alcanza hasta 1,0m, en algunas zonas se presentan vectores con diferentes direcciones a causa de la presencia de las barras. Los vectores de desplazamiento y superficie de falla se proyectan en el modelo real para una mejor comprensión del análisis de imágenes (ver Figura 45)



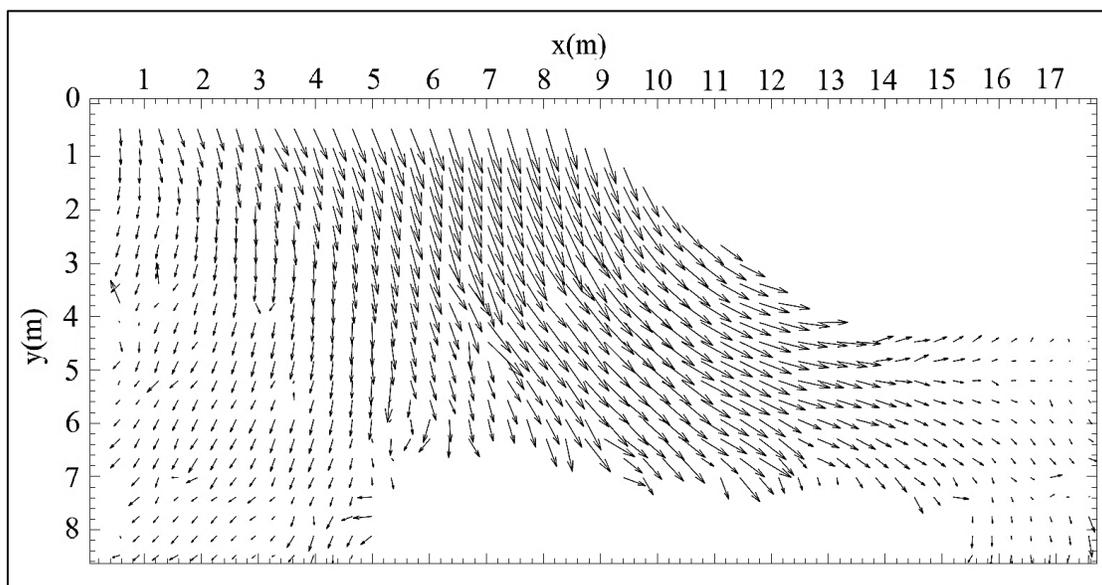
*Figura 44. Vectores de desplazamiento para MD2 con 11.42% ABP. Fuente: Propia*



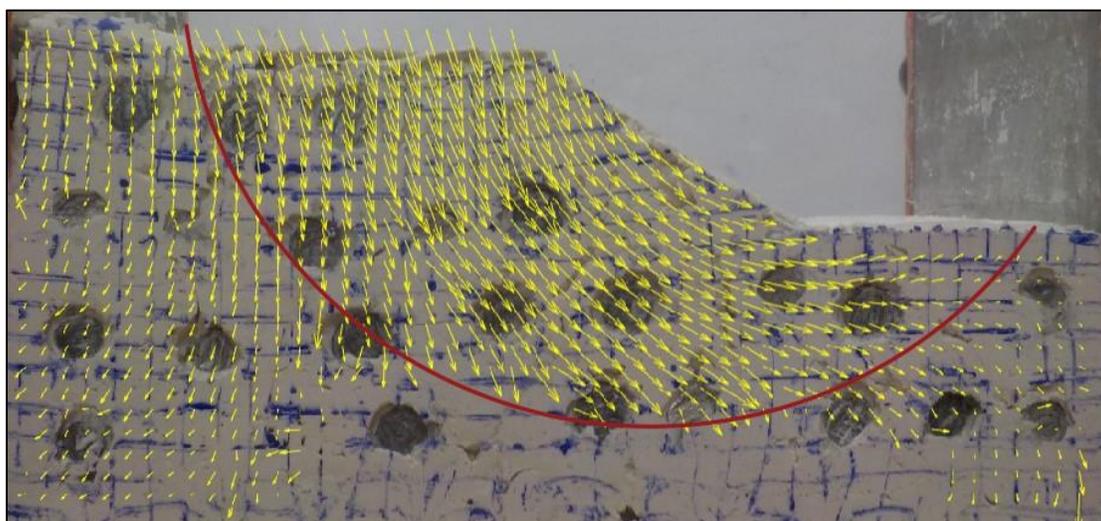
*Figura 45. Vectores de desplazamiento para MD2 con 11.42% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia*

### MD3 – 14.61% ABP

Los vectores de desplazamiento a escala prototipo que se presentan en la Figura 46 del modelo con ABP=14,61%, muestran una disminución de la magnitud de los vectores comparado con el modelo MD2 con valores máximos de 0.8m al igual que una reducción del área que abarca la superficie de falla. Los vectores de desplazamiento y superficie de falla se proyectan en el modelo real para una mejor comprensión del análisis de imágenes (ver Figura 47)



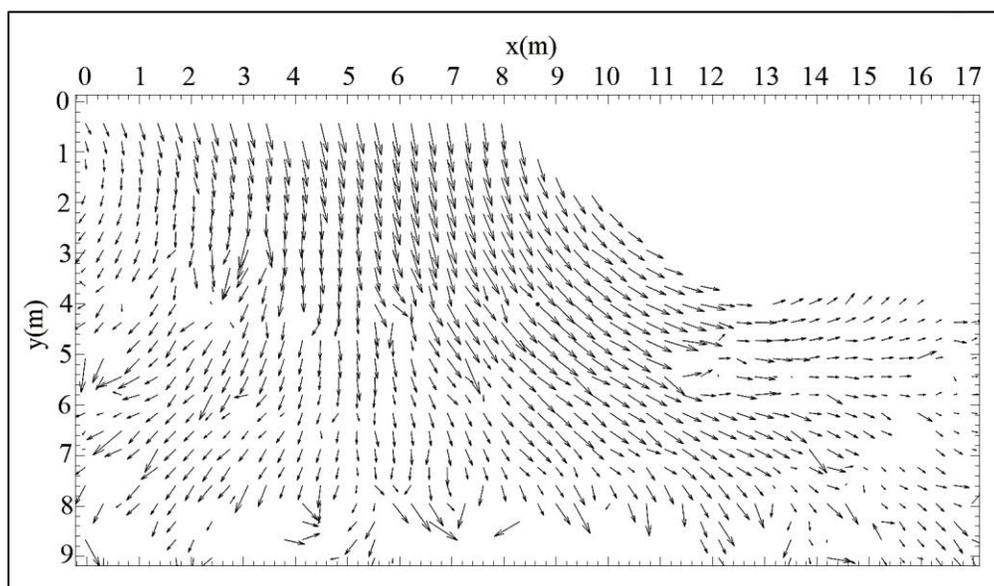
*Figura 46. Vectores de desplazamiento para MD3 con 14.61% ABP. Fuente: Propia*



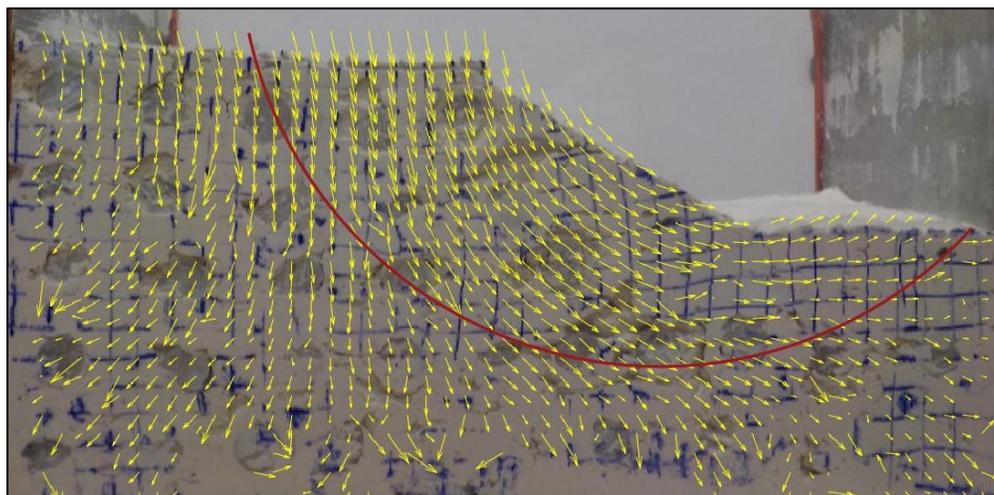
*Figura 47. Vectores de desplazamiento para MD3 con 14.61% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia*

### MD4 – 16.72% ABP

En la Figura 48 muestra el modelo con ABP=16.72%, los vectores de desplazamiento a escala prototipo presentan magnitudes menores comparadas con los tres primeros modelos definitivos, se exhibe claramente una superficie de falla circular con magnitud máxima de 0.75m, pero en algunas zonas se evidencia gran dispersión de magnitudes y direcciones de los vectores debido a la presencia de barras. Los vectores de desplazamiento y superficie de falla se proyectan en el modelo real para una mejor comprensión del análisis de imágenes (ver Figura 49)



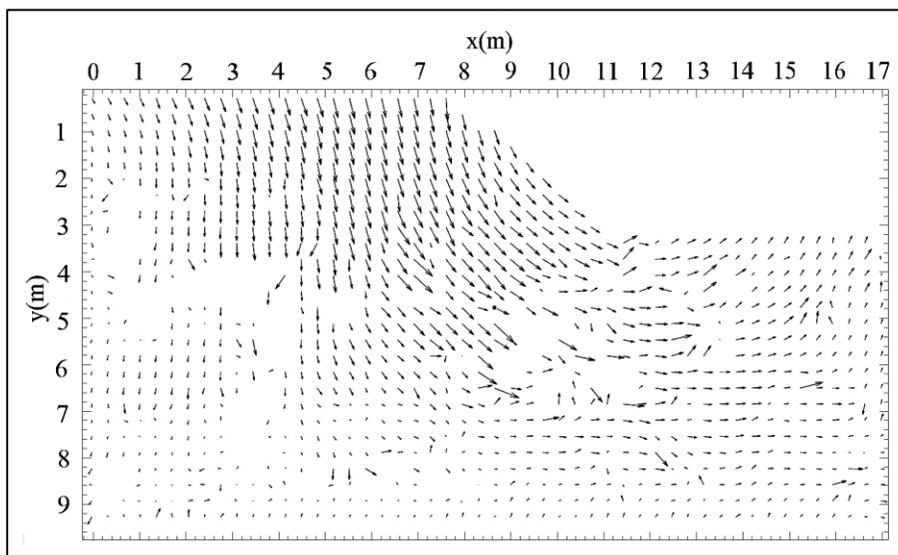
**Figura 48.** Vectores de desplazamiento para MD4 con 16.72% ABP. Fuente: Propia



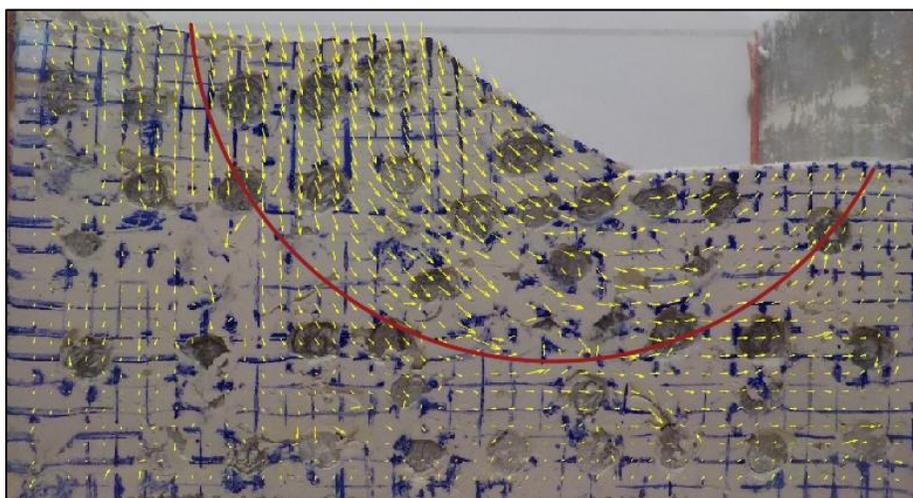
**Figura 49.** Vectores de desplazamiento para MD4 con 16.72% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia

### MD5 – 19.26% ABP

Los vectores de desplazamiento a escala prototipo que se presentan en la Figura 50 del modelo con ABP=19,26% tienen magnitudes máximas en promedio de 0.4m en el área de la superficie de falla circular, en las fronteras del modelo las magnitudes son muy bajas menores a 0,13m, a razón de los anterior, algunos vectores tienen apariencia de punto. Comparado con todos los modelos definitivos es el que mejor comportamiento presentó. Los vectores de desplazamiento y superficie de falla se proyectan en el modelo real para una mejor comprensión del análisis de imágenes (ver Figura 51)



*Figura 50. Vectores de desplazamiento para MD5 con 19.26% ABP. Fuente: Propia*

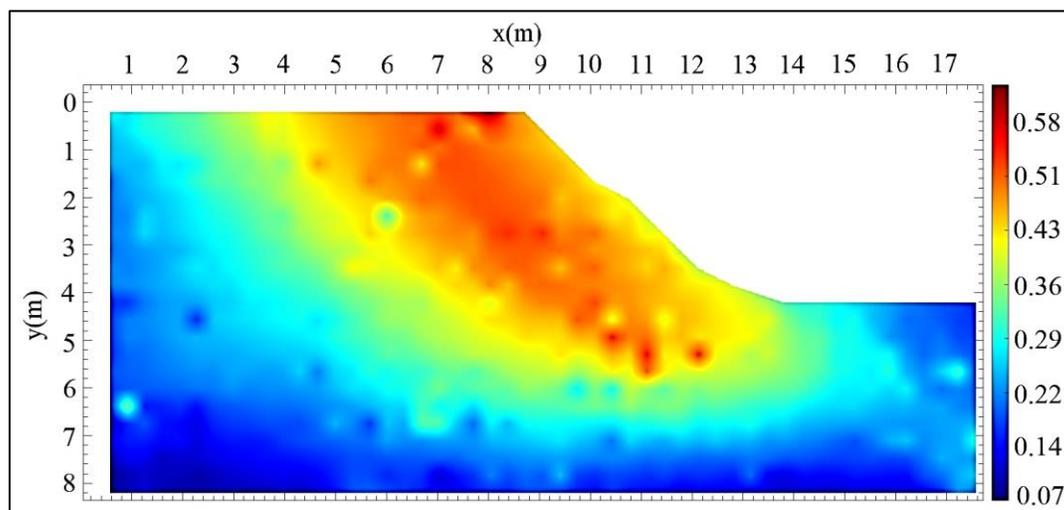


*Figura 51. Vectores de desplazamiento para MD5 con 19.26% ABP y superficie de falla proyectados en el modelo. Fuente: Propia*

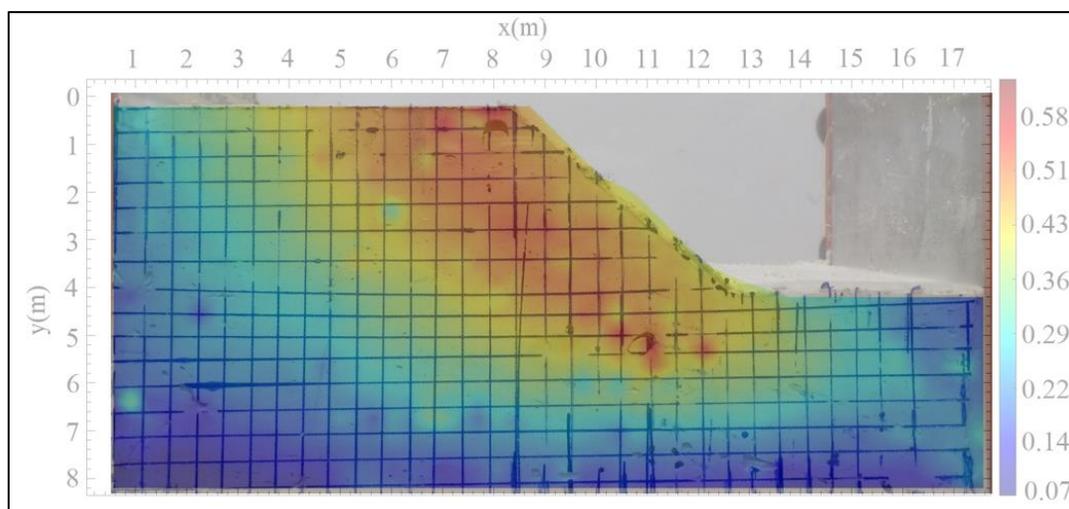
### 6.4.2 Desplazamiento resultante

#### MD1 - 0% ABP

Los desplazamiento resultantes a escala prototipo del MD1 se presentan en la Figura 52, llegando al orden de 0.58m en la cresta del talud y disminuye progresivamente a mayor profundidad hasta desplazamientos de 0.07m. En la Figura 53 se proyecta los desplazamientos resultantes en el modelo real para una perspectiva visual más clara



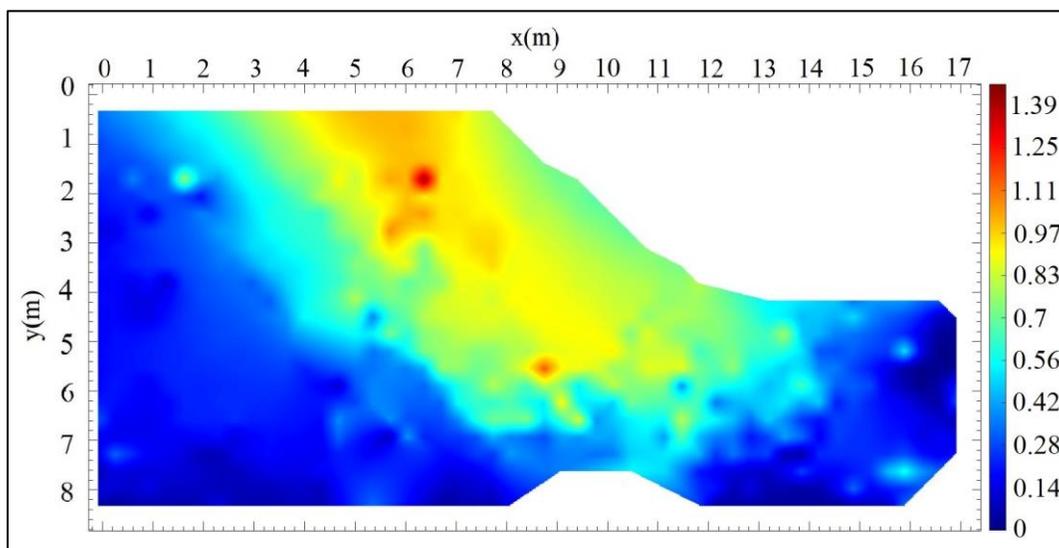
**Figura 52.** Desplazamientos resultantes obtenidos para MD1 con 0% ABP. Fuente: Propia



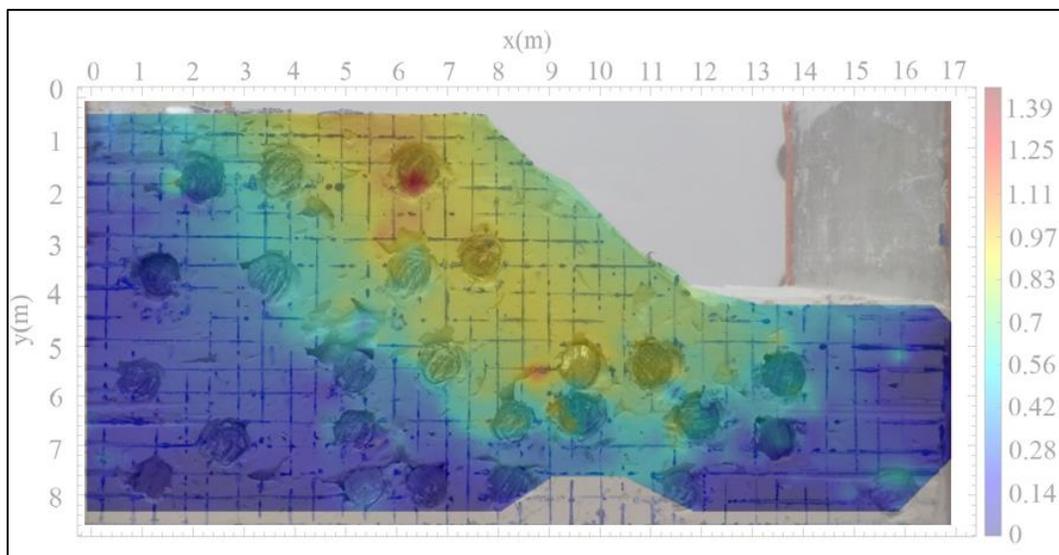
**Figura 53.** Desplazamientos resultantes obtenidos para MD1 con 0% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia

### MD2 – 11.42% ABP

Los desplazamientos resultantes a escala prototipo del MD2 (ver Figura 54) aumentaron a comparación del MD1. En la zona de la pendiente están en el orden de 0,83m a 0.97 m y en unas zonas muy puntuales hay presencia de desplazamiento de 1.39 m; los desplazamientos disminuyen progresivamente a mayor profundidad. En la Figura 55 se logra evidenciar que los desplazamientos de 1.39m están próximos a algunas barras, pero no es un comportamiento generalizado.



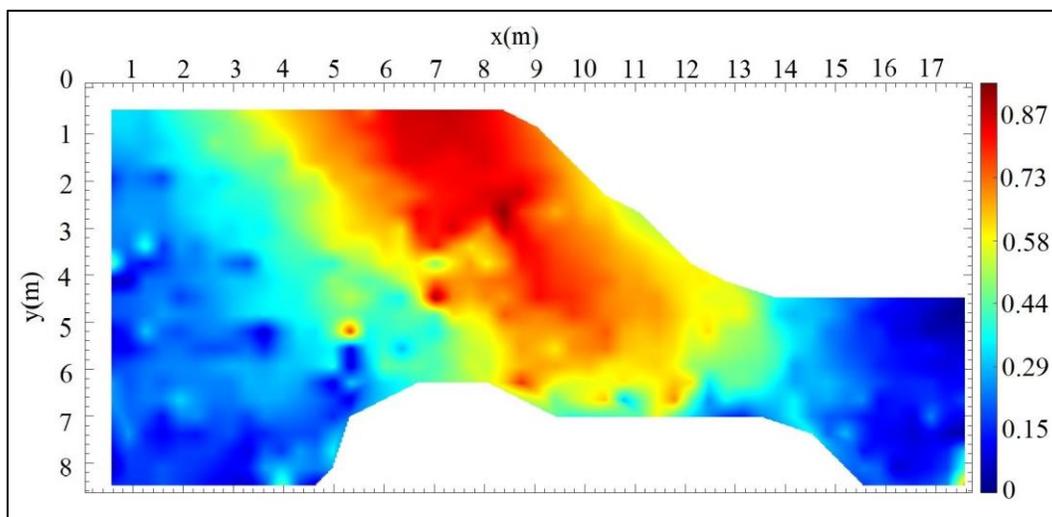
*Figura 54. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD2 con 11.42% ABP. Fuente: Propia*



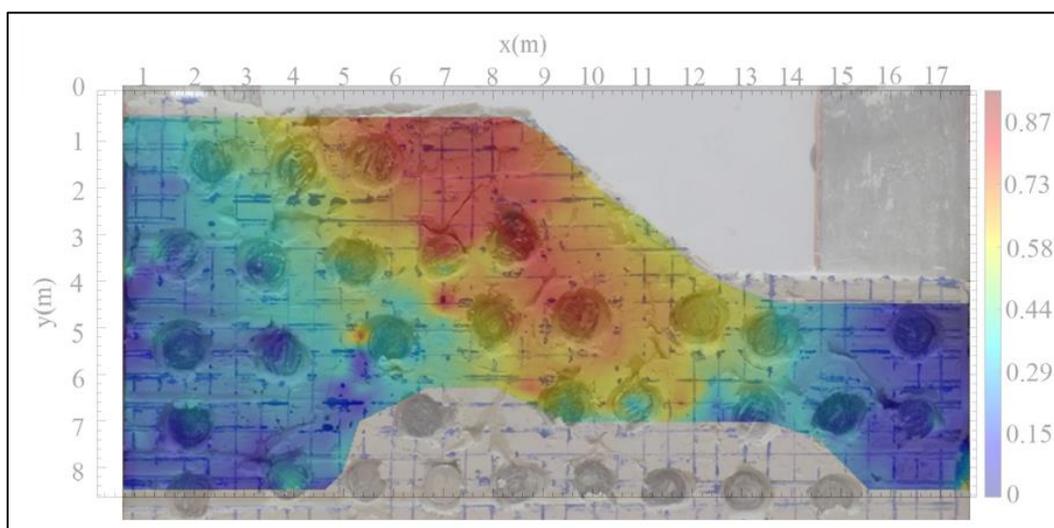
*Figura 55. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD2 con 11.42% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia*

### MD3 – 14.61% ABP

En la Figura 56 se muestra el desplazamiento resultante a escala prototipo, los cuales dentro del área de la superficie de falla presenta valores entre 0.60m y 0.87m, los cuales presentan disminución con el MD2 por lo que se interpreta una mejoría en el comportamiento de la estabilidad del talud. En la Figura 57 se puede evidenciar que los mayores desplazamientos se encuentran en la cresta del talud donde no hay presencia de barras en el modelo.



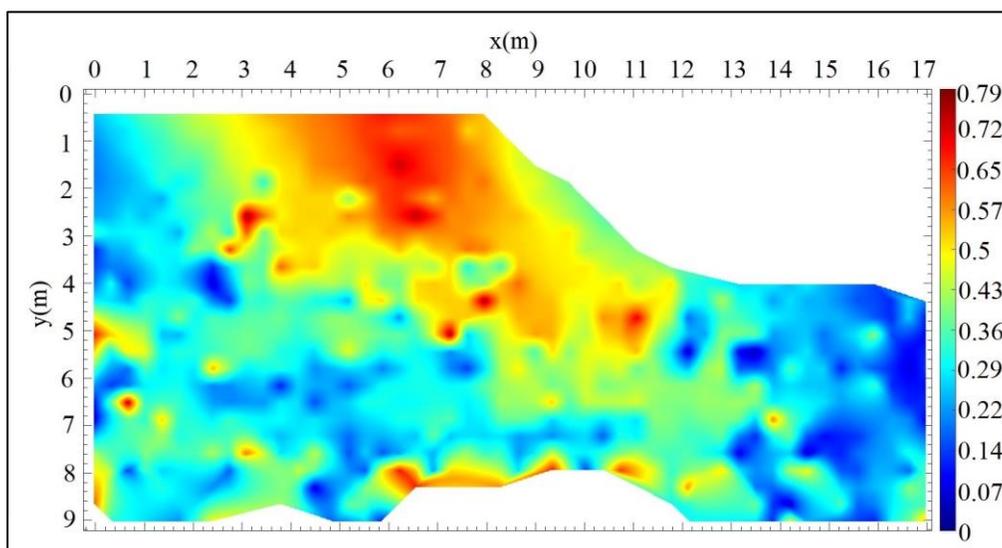
*Figura 56. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD3 con 14.61% ABP. Fuente: Propia*



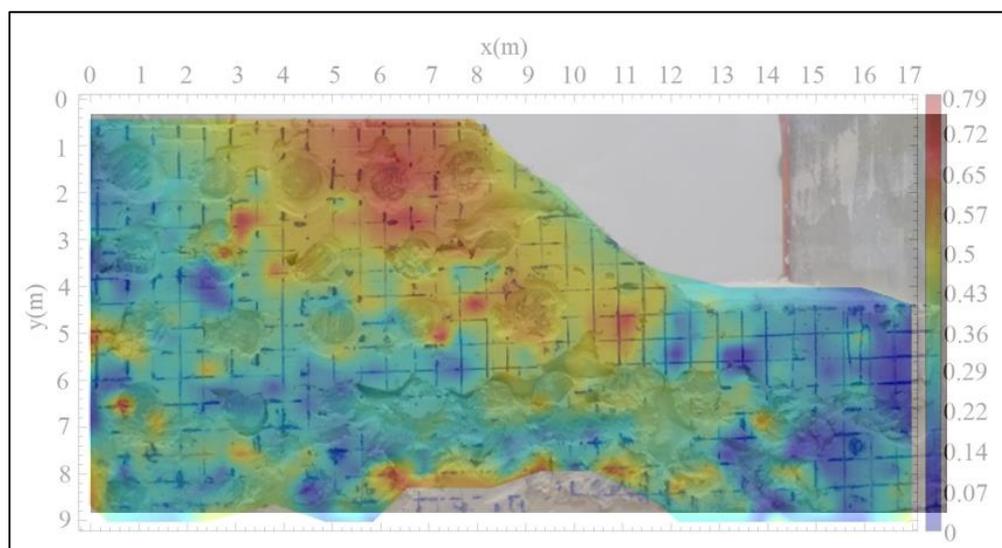
*Figura 57. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD3 con 14.61% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia*

### MD4 – 16.72% ABP

En el MD4 existe un cambio drástico en la visualización de los desplazamientos resultantes a escala prototipo (ver Figura 58) a comparación de los anteriores modelos, de acuerdo con la escala de colores que representa los desplazamientos, existen cambios fuertes de tonalidades sin una disminución progresiva. En la Figura 59 se puede observar que en algunas zonas entre las barras los desplazamientos están en el orden 0.14m y 0.22m, muy inferior comparado con los modelos anteriores, mostrando un mejoramiento en el comportamiento del talud con el aumento del ABP



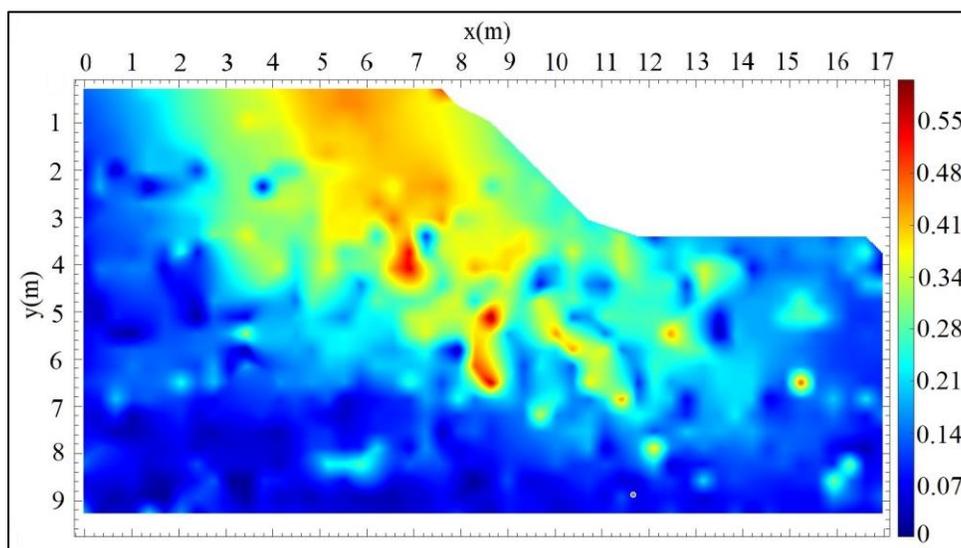
*Figura 58. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD4 con 16.72% ABP. Fuente: Propia*



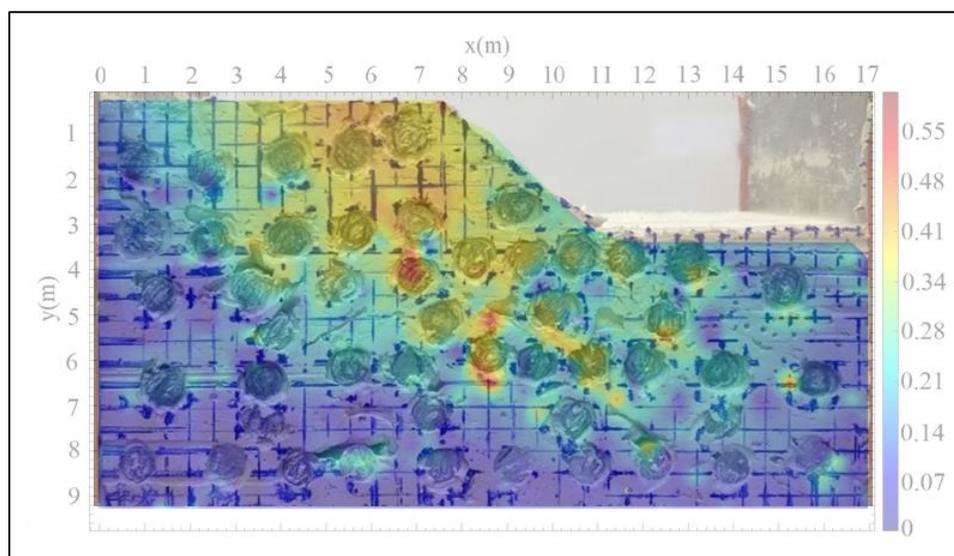
*Figura 59. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD4 con 16.72% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia*

### MD5 – 19.26% ABP

Los desplazamientos resultantes a escala prototipo del MD5 que se observan en la Figura 60 disminuyen en comparación a todos los modelos anteriores, con un desplazamiento máximo en el orden de 0.55m el cual es inferior incluso al MD1 con 0% ABP. Adicional se evidencia que las zonas de desplazamiento entre el amarillo y el rojo (0.34m – 0.55m) son menores a comparación de los colores azules (0.07m – 0.28m). En la Figura 61 se observa que la presencia de las barras influye directamente en la disminución de los desplazamientos resultantes mejorando notoriamente la estabilidad del talud.



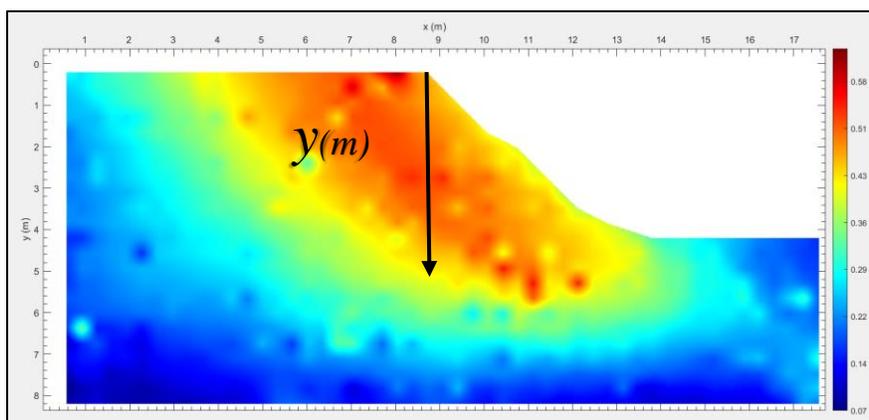
*Figura 60. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD5 con 19.26% ABP. Fuente: Propia*



*Figura 61. Desplazamientos resultantes obtenidos para MD5 con 19.26% ABP proyectado en el modelo. Fuente: Propia*

## 6.5 Efecto del ABP en el comportamiento de taludes de suelos binarios

La Figura 63 muestra el desplazamiento resultante para los diferentes modelos realizados para la profundidad mostrada en la línea negra con origen en la cresta del talud de la Figura 62, donde se puede comparar los desplazamientos a profundidad para cada uno de los 5 modelos.



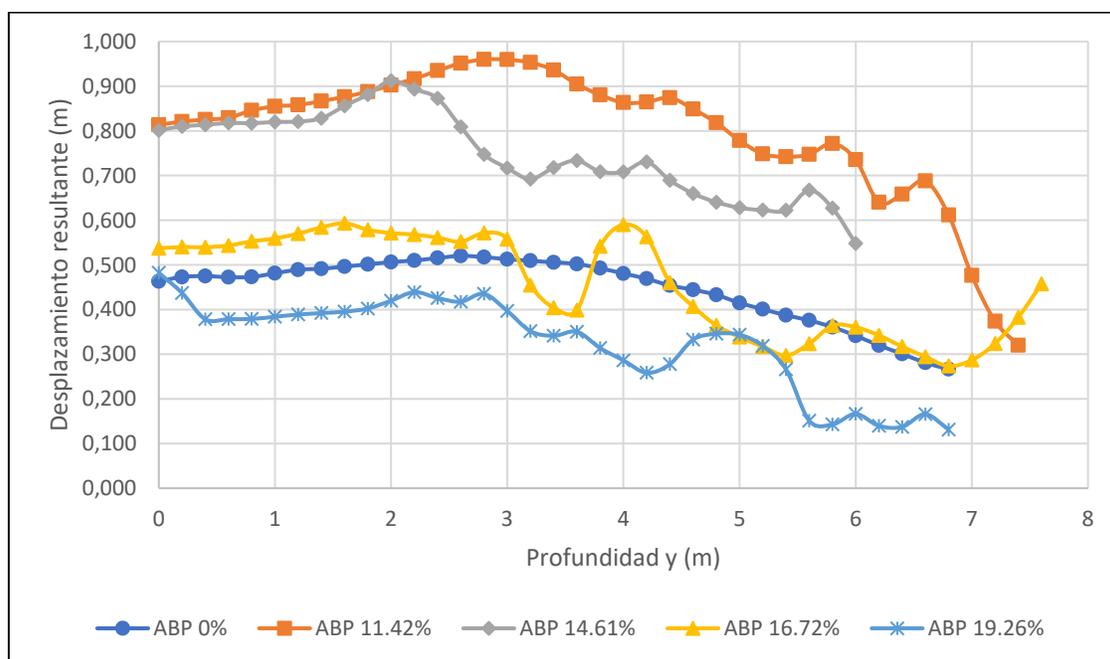
**Figura 62.** Imagen de referencia del análisis de los modelos a profundidad medidos desde la cresta del talud.  
Fuente: Propia

Como resultado se obtiene que los modelos MD2 (11.42% ABP) y MD3 (14.61% ABP), presentan mayores desplazamientos resultantes teniendo como referencia el modelo sin bloques MD1 (0% ABP), esto indica un comportamiento más inestable del talud. Lo anterior es acorde a los estudios de elementos finitos y estocásticos realizados por (Napoli et al., 2021) y (Napoli et al., 2018) en los cuales observó que los factores de seguridad del talud disminuían para VBP entre el 20% y 25% en comparación al talud solo matricial, generando finalmente una inestabilidad de talud.

La Figura 63 muestra que para el modelo el MD4 con un ABP=16.72% se presentan mayores desplazamientos resultantes en los tres primeros metros de profundidad, seguidamente se presenta una variabilidad de mayores y menores desplazamientos resultantes en comparación con el modelo sin bloques MD1 (ABP=0%). Para el modelo MD4 se evidencia que para una profundidad de 4m existe un pico de desplazamiento, este se identifica claramente en la figura 58 siendo atípico al comportamiento general de los desplazamientos resultantes de este modelo. De esta manera se encuentra que para el promedio de los desplazamientos del MD4 (ABP=16.72%) y MD1 (ABP=0%) existe solo una diferencia del 2.7%, por lo que se puede inferir que los dos modelos presentan prácticamente el mismo comportamiento.

Por último, para el modelo con mayor ABP el modelo MD5 (ABP=19.26%) se identifica que los desplazamientos resultantes son inferiores a todos los modelos, disminuyendo el desplazamiento en 0.12m en promedio en comparación al MD1(ABP=0%). Adicionalmente, en este modelo no se presenta alta variabilidad en los desplazamientos sino al contrario, existe una consistencia en disminución del desplazamientos a mayor profundidad. Se concluye que el MD5 con 19.26% de ABP presenta un claro mejoramiento en la estabilidad del talud por la presencia de las barras dentro del modelo.

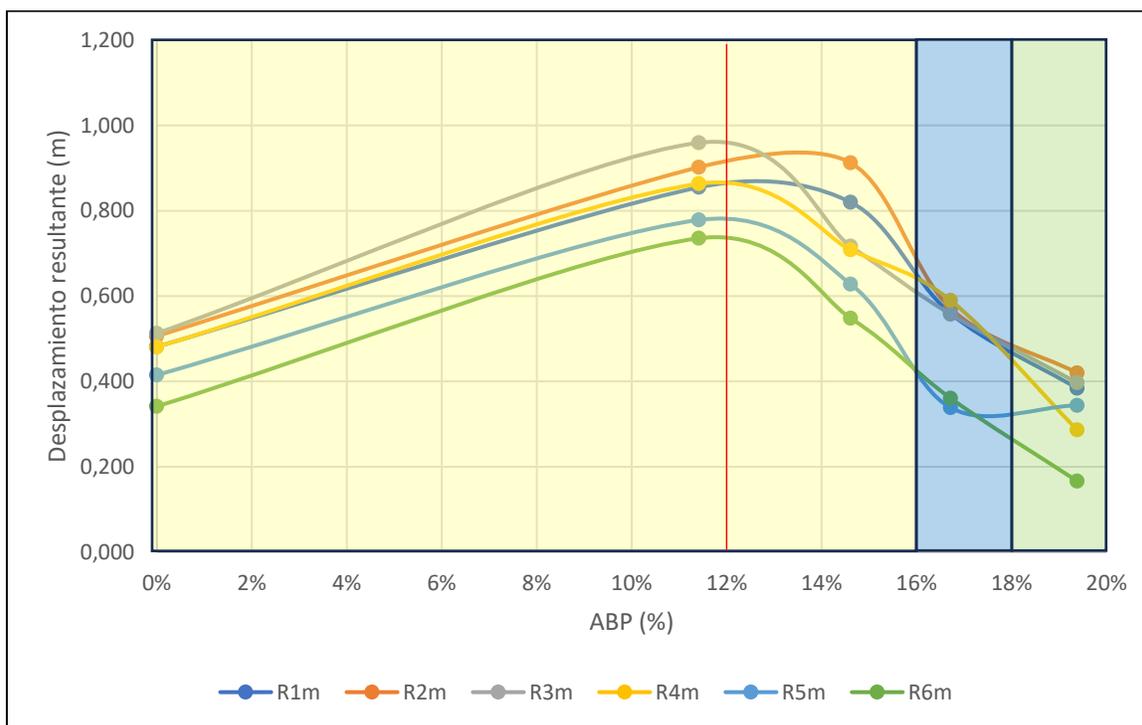
Se logró identificar que la presencia de barras en los modelos genera gran variabilidad ascendente y descendente en los desplazamientos a mayor profundidad, lo que demuestra que existe una interacción entre las barras y la matriz. Por el contrario, el MD1 con 0% de ABP presenta un comportamiento homogéneamente descendente.



**Figura 63.** Desplazamiento resultante vs Profundidad. Fuente: Propia

La Figura 64 presenta el desplazamiento resultante en función del ABP para diferentes profundidades definidas en la línea negra señalada en la Figura 62. En esta figura se observa que existe un incremento en desplazamiento resultantes hasta un ABP=12%, seguidamente inicia la disminución de los desplazamientos lo que indica un cambio positivo para la estabilidad del talud.

Debido a lo anterior, se pueden plantear tres comportamientos diferentes del sistema suelo-bloque, en la figura se presentan tres regiones, la primera región sombreada en amarillo con ABP menores al 16% en la que está controlada por la resistencia de la matriz. Entre el 16% y el 18% de ABP la región de transición sombreada en azul, donde inicia la disminución de los desplazamientos resultantes por la interacción entre el suelo y los bloques. Finalmente, la región controlada por los bloques sombreada en verde con porcentajes de ABP mayores al 18% donde se establece una disminución de los desplazamientos comparado con ABP=0%



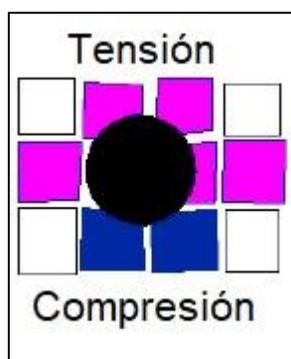
**Figura 64.** Desplazamiento resultante por profundidad. Fuente: Propia

Para interpretar el mejoramiento en la estabilidad del talud con el incremento del ABP (*Areal block proportion*), se puede traer a colación las investigaciones realizadas por Caicedo et al. (2003) y Lozada (2012) en las que validaron que la barra genera una influencia en el suelo, creando zonas de tensión encima de la barra y de compresión debajo de la misma.

Se puede concluir que, para la estabilidad de taludes de suelos binarios, a mayor ABP se generan mayores zonas de tensión y compresión superponiéndose unas con otras; logrando que el suelo

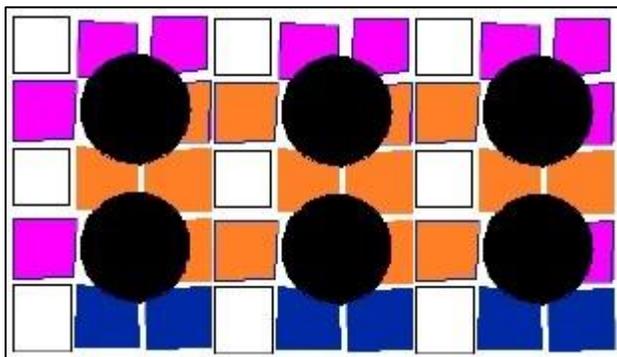
entre las barras presente una sobre consolidación y de este modo genere una resistencia al corte mayor que finamente se traduce en un talud más estable.

En la Figura 65 se presenta el campo de deformación de un suelo cohesivo con la influencia de una barra de aluminio de 0,8cm de la investigación de Lozada (2012), que identifica la zona de tensión y compresión.



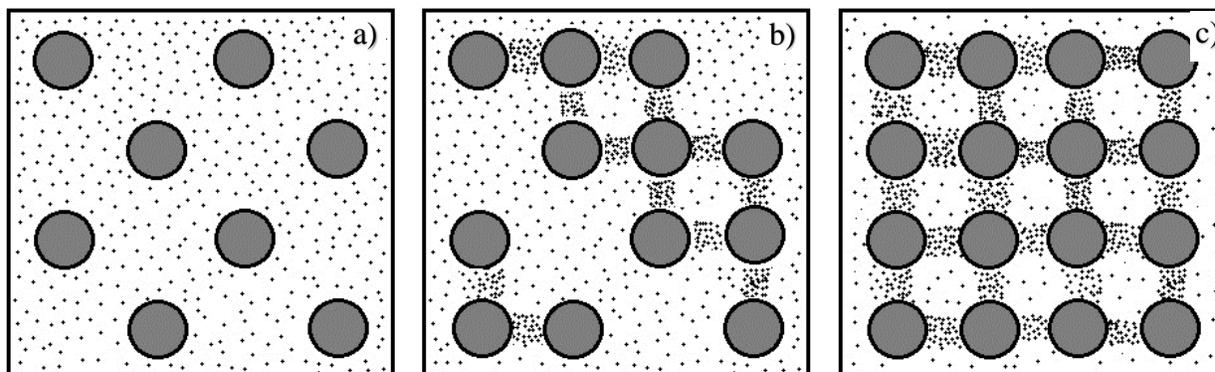
**Figura 65.** Campos de deformación para partícula de  $\rho = 2.5 \text{ gr/cm}^3$  Fuente: (Lozada, 2012). Fuente: Propia

En los taludes creados para esta investigación existían algunas zonas de concentración de barras, donde se evidenció una compensación entre la zona de tensión de la barra inferior y la zona de compresión de la barra superior. En la Figura 66 basado en el estudio de Lozada (2012) se realiza una proyección con mayor número de barras, evidenciando en color naranja la superposición de deformaciones que da lugar a una sobre consolidación en el suelo.



**Figura 66.** Proyección de zonas de superposición de deformaciones. Adaptado de (Lozada, 2012)

Al existir un porcentaje de ABP bajo, las partículas se encuentran muy dispersas y no se alcanza a crear tensión y un campo de esfuerzos mayor a la matriz, sin embargo, si aporta a la inestabilidad por el peso propio de las partículas. Al aumentar considerablemente las partículas y con una distribución proporcional en el modelo, origina una interacción más cercana entre las barras aun cuando no exista contacto directo entre ellas; generando una mayor tensión a la matriz, disminuyendo la relación de vacíos y densificando el suelo (ver Figura 67)



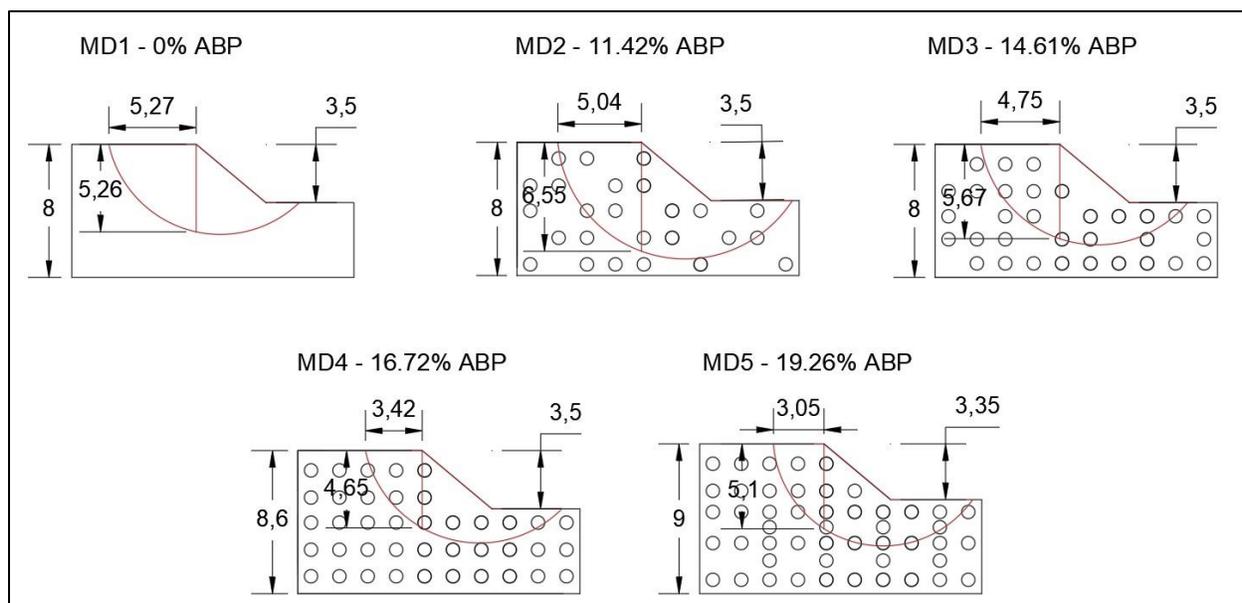
*Figura 67. Comportamiento de la matriz del suelo binario a) Partículas sin interacción b) Transición de interacción de partículas c) Partículas con interacción y generación de sobre consolidación a la matriz. Fuente: Propia*

La estabilidad de los taludes es directamente proporcional a la mejoría de las propiedades del suelo o depósito que lo compone. Los resultados obtenidos en esta investigación van en línea con diferentes estudios que identificaron que, con el incremento del número de partículas en la mezcla binaria, existe un mejoramiento gradual del módulo elástico (Vallejo & Lobo-Guerrero, 2005), un incremento de la resistencia al corte y disminución de la porosidad (Vallejo, 2001) y un aumento del módulo edométrico (Zambrano & Caicedo. B., 2005).

## **6.6 Características de superficie de falla en función del ABP**

Teniendo en cuenta las figuras de los vectores de desplazamiento, fue posible identificar la superficie de falla en cada uno de los modelos. En esta sección se pretende analizar características de la superficie de falla como la profundidad de la superficie de falla, el área deslizada y la distancia desde la cresta del deslizamiento a donde inicia la falla (ver Tabla 15),

Es indispensable comprender que a mayor porcentaje de ABP los asentamientos disminuyeron, por este motivo la altura de los modelos MD4 y MD5 es mayor, siendo necesario para el área deslizada establecer relación con el área total del modelo. En la Figura 68 se presentan los modelos con sus dimensiones.



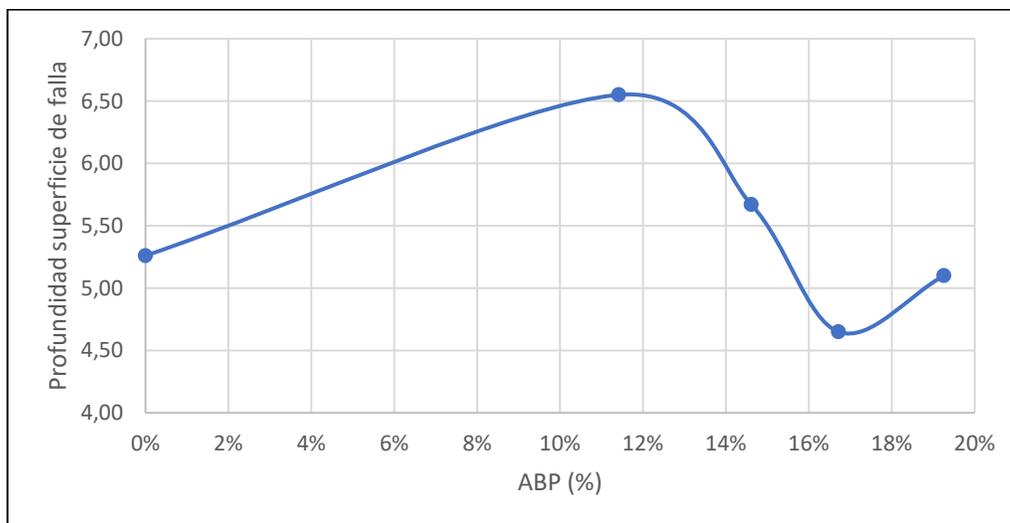
**Figura 68.** Modelos definitivos con dimensiones. Fuente: Propia

**Tabla 14.** Características de la superficie de falla de cada modelo definitivo. Fuente: Propia

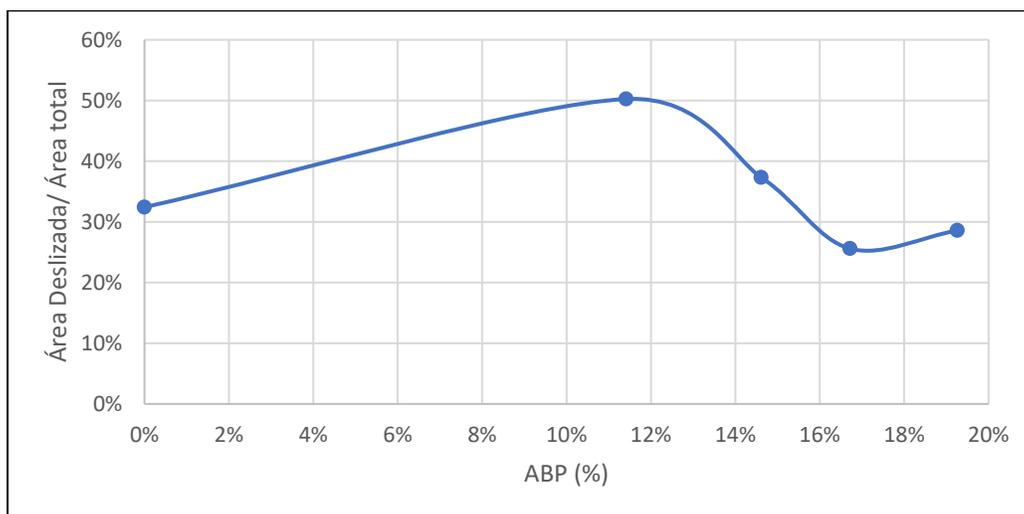
| ID  | AVP    | Profundidad superficie de falla | Área deslizada | Longitud cresta corona | Área total | Relación Área deslizada/Área total |
|-----|--------|---------------------------------|----------------|------------------------|------------|------------------------------------|
| MD1 | 0      | 5,26                            | 35,69          | 5,27                   | 110,09     | 32%                                |
| MD2 | 11,42% | 6,55                            | 55,31          | 5,04                   | 110,09     | 50%                                |
| MD3 | 14,61% | 5,67                            | 41,09          | 4,75                   | 110,09     | 37%                                |
| MD4 | 16,72% | 4,65                            | 30,79          | 3,42                   | 120,29     | 26%                                |
| MD5 | 19,26% | 5,10                            | 36,55          | 3,05                   | 127,89     | 29%                                |

La profundidad de la falla y el área deslizada presentan un comportamiento similar como se observa en las figuras 69 y 70, donde se evidencia una disminución porcentual progresiva entre los modelos MD2 y MD4, sin embargo, en el MD5 aumenta sin que exista una tendencia clara; es posible que con la distribución aleatoria de las barras en el MD5 no favoreció en la disminución

de estas características. Los modelos MD4 y MD5 en ambas características mejora en comparación al MD1, lo cual es consistente y va en línea en lo encontrado en las secciones 6.4.1 y 6.4.2.



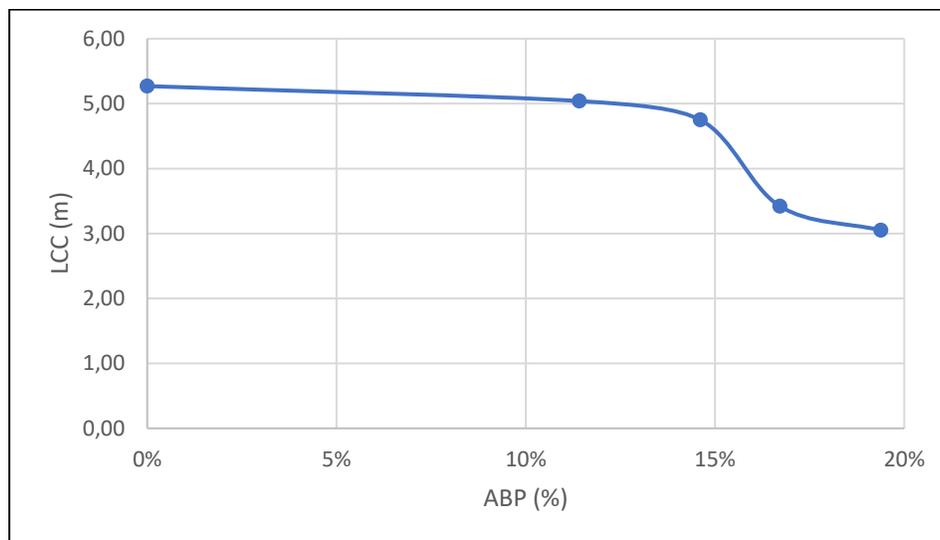
**Figura 69.** Profundidad de falla vs ABP (%). Fuente: Propia



**Figura 70.** Relación área deslizada/ área total vs ABP (%). Fuente: Propia

Una característica importante en el análisis de estabilidad de taludes es conocer la longitud desde la cresta del talud a la corona del posible deslizamiento (LCC), con el fin de identificar las zonas que se encuentren en riesgo si se presenta el movimiento en masa. En la Figura 71 se muestra la disminución de la longitud cresta corona (LCC) con el aumento del % de ABP; existe una

disminución significativa desde el 16.72% de ABP. Se refleja una disminución del 58% de la longitud cresta corona desde el MD1 al MD5.



**Figura 71.** Distancia corona talud vs ABP (%). Fuente: Propia

## 7. Conclusiones

Las formaciones de suelos binarios, *Bimrocks/bimsoils*, mezclas granulares binarias, *soil – rock mixtures* son de alta complejidad debido a las diferentes variables que inciden en su comportamiento y aún más cuando se trata de estabilidad de taludes, esta investigación promovió el análisis de estabilidad de taludes de suelos binarios con matriz cohesiva. A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas:

- Se determinó la relación directa entre el mejoramiento de la estabilidad del talud con el aumento del porcentaje de ABP, mediante modelación física en maquina centrífuga. siendo congruentes con las investigaciones de análisis numérico a través de métodos de elementos finitos y métodos de equilibrio limite.
- Se estableció que la estabilidad del talud aumenta y se encuentra directamente relacionado con la interacción de las partículas y la incidencia de estas en el suelo, causando una sobre consolidación y densificación del material entre las partículas por la presencia del incremento del campo de esfuerzos.
- De acuerdo con los vectores de desplazamiento se logró establecer que las superficies de falla generadas en los taludes posterior a la modelación en maquina centrífuga tienden a ser de tipo rotacional; en esta investigación no se logró identificar la existencia de una superficie de falla tortuosa a través de las barras con el análisis de imágenes mediante GeoPIV\_RG. En los modelos MD4 (ABP=16.72%) y MD5 (ABP=19.26%) se estableció una dispersión de la dirección de algunos vectores de desplazamiento, pero sin un comportamiento claro de tortuosidad; se requiere mayor investigación en modelación física para la identificación de la superficie de falla tortuosa.
- Se identificaron tres comportamientos del sistema suelo-bloque, para ABP menores al 16% el suelo está controlado por la resistencia de la matriz debido a que las partículas se encuentran flotando en la matriz sin lograr una interacción significativa, sin embargo, aportan inestabilidad por el peso propio; entre el 16% y el 18% de ABP un rango de transición donde inicia la disminución de los desplazamientos resultantes por la interacción

entre el suelo y los bloques. Finalmente, para ABP mayores al 18% existe una mejor interacción entre el suelo y los bloques generando un incremento significativo en la estabilidad del talud binario en matriz cohesiva, siendo este porcentaje menor que los determinados por métodos numéricos.

- El mejoramiento de la estabilidad del talud de suelo binario con matriz arcillosa por el incremento del porcentaje de ABP es congruente y complementario a estudios que determinaron el aumento del módulo elástico, resistencia al corte y modulo edometrico con el mayor número de partículas rígidas.
- Se definió un proceso constructivo eficiente y apropiado para el estudio y análisis de estabilidad de taludes de suelos binarios con matriz cohesiva para la modelación física en maquina centrífuga.
- Se confirmó que la máquina centrífuga es una herramienta muy útil para el estudio, análisis y ampliación de conocimientos de la estabilidad de suelos binarios.

## 8. Recomendaciones

Realizada esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros estudios:

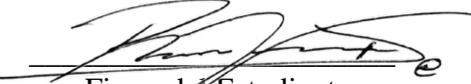
- Tomar en consideración los resultados obtenidos en esta investigación para la actualización de aplicativos y programas que se han desarrollado para el análisis de estabilidad de taludes en suelos binarios, específicamente en matrices cohesivas.
- Realizar análisis numéricos con las características de esta investigación para efectuar comparaciones con los resultados obtenidos en este estudio y de esta manera promover el conocimiento de la estabilidad de taludes en suelos binarios.
- Ampliar las investigaciones de estabilidad de taludes de suelos binarios en modelación física en maquina centrífuga realizando análisis estocásticos y de confiabilidad con variabilidad espacial. Adicional se propone analizar suelos binarios con diferente tipo de matrices.
- Categorizar las investigaciones de suelos binarios dependiendo del tipo de matriz tanto en análisis numéricos como en modelación física. debido a que el comportamiento de la estabilidad del talud va directamente relacionado con la manera que la matriz interactúa con los bloques de roca por lo cual cada tipo de matriz se debe analizar de manera independiente.
- Establecer otras alternativas de consolidación adicional a los consolidómetros neumáticos para poder incrementar los porcentajes de ABP en los modelos de suelos binarios con matriz cohesiva.

## Bibliografía

- Caicedo, B. (2003). Modelación física en centrífuga. *Universidad de Los Andes* .  
[https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer\\_ent/modelacion\\_fisica\\_centrifuga\\_problemas.pdf](https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/modelacion_fisica_centrifuga_problemas.pdf)
- Caicedo, B., Jaime, M. C., L. E. Vallejo., & Lizcano, A. (2003). Self weight consolidation in a centrifuge of a clay mass containing simulated particles. *Proceedings Of The 12th Panamerican Conference And 39th Us Rock Mechanics Symposium Geoinstitute Conference*, 697–703.
- Esquivel L.F. (2023). *Modelación física en centrífuga geotécnica de la influencia de la inclinación en la estabilidad de un talud reforzado con pasto*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Guerra C, & Pinzón J. (2015). *Modelación numerica multiescala de Bimrocks para el análisis de estabilidad de taludes*. Master's thesis Pontificia Universidad Javeriana.
- Guerra C, Pinzón J, Prada L, & Ramos A. (2016). Multiscale modelling of the slope stability of block-in-matrix materials. In *Proceedings: geo-chicago 2016: sustainable geoenvironmental systems* (pp. 658–667).
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*.
- Irfan TY, & Tang KY. (1993). *Effect of the coarse fraction on the shear strength of colluvium*.
- Khorasani, E., Amini, M., Hossaini, M. F., & Medley, E. (2019). Statistical analysis of bimslope stability using physical and numerical models. *Engineering Geology*, 254, 13–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.023>
- Lozada, C. (2012). *Modelación física y numérica de mezclas arcilla-inclusiones rígidas*. Tesis maestría Universidad de los Andes .
- Lozada, C., Avila, L. G., & Campagnoli, S. (2021). *Geotechnical centrifuge applications in the teaching of applied soil mechanics Study of soil atmosphere interaction using a climatic chamber View project Teaching of soil mechanics View project*.  
<https://doi.org/10.26507/rei.v16n32.1188>
- Lozada, C., Caicedo, B., & Vallejo, L. E. (2014). Physical modeling of clay mixtures with large particles. *Physical Modelling in Geotechnics - Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2014, ICPMG 2014*, 2, 1251–1257.  
<https://doi.org/10.1201/b16200-180>
- Lozada, C., Mendoza, C., & Amortegui, J. V. (2022). Physical and Numerical Modeling of Clayey Slopes Reinforced with Roots. *International Journal of Civil Engineering*, 20(9), 1115–1128.  
<https://doi.org/10.1007/s40999-022-00733-0>

- Medley, E. W. (1994). *The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (Bimrocks)*. Ph.d. thesis University of California. University of California .
- Medley Edmund W, & Sanz PF. (2004). *Characterization of Bimrocks (Rock/Soil Mixtures) With Application to Slope Stability Problems*.
- Medley EW, & Goodman RE. (1994). Estimating the block volumetric proportions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). *Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium*, 851–858.
- Minuto D, & Morandi L. (2015). *Engineering Geology for Society and Territory, vol 2: Landslide Processes, Springer International Publishing, chap 192: Geotechnical characterization and slope stability of a relict landslide in bimsoils (blocks in matrix soils)(blocks in matrix soils)* (pp. 1083–1088).
- Montoya-Araque, E. A., & Suarez-Burgoa, L. O. (2018). pyBIMstab: Application software for 2D slope stability analysis of block-in-matrix and homogeneous materials. *SoftwareX*, 7, 383–387. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2018.11.003>
- Montoya-Araque, E. A., Suarez-Burgoa, L. O., & Medley, E. W. (2020). Application of the tortuous surface method to stochastic analysis of bimslope stability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(10), 5329–5340. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01909-5>
- Napoli, M. L., Barbero, M., Ravera, E., & Scavia, C. (2018). A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 101, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.009>
- Napoli, M. L., Barbero, M., & Scavia, C. (2021). Effects of block shape and inclination on the stability of melange bimrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(10), 7457–7466. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02419-8>
- Poesen, J., & Lavee, H. (1994). CATENA Rock fragments in top soils: significance and processes. In *Catena* (Vol. 23).
- Randolph, M. F., & Houlsby, G. T. (1984). The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil. *Géotechnique*, 613–623.
- Raymond LA. (1984). *Melanges: their nature, origin and significance*. Tech. (Geological Society of America Special Papers, Ed.; Vol. 198).
- Stanier, S. A., Blaber, J., Take, W. A., & White, D. J. (2015). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Suárez J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda, Ed.).
- Suárez J. (2000). *Características y comportamiento de los materiales coluviales*. <https://www.erosion.com.co/comportamiento-coluviones/>.

- Taylor, R. N. (1995). *Geotechnical Centrifuge Technology*. (pp. 60–62).
- Vallejo, L. E. (2001). Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1097–1104. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-5-1097>
- Vallejo, L. E. (2017). Analysis of the Fabric Changes in a Simulated Clay-Rock Mixture under Shear. *Geotechnical Frontiers*, 589–594.
- Vallejo, L. E., & Lobo-Guerrero, S. (2005). The elastic moduli of clays with dispersed oversized particles. *Engineering Geology*, 78(1–2), 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.12.003>
- Vargas Lozada, J. C. (2003). *Modelación Física en Centrifuga, de un muro pantalla apuntalado en suelos blandos de Bogotá. Tesis Maestria Universidad de los Andes* .
- Zambrano, C. E., & Caicedo. B. (2005). *Compresibilidad de mezclas de arcilla e inclusiones rígidas*. Universidad de los Andes.

  
Firma del Estudiante

  
Firma del director del Trabajo Dirigido

(ESPACIO RESERVADO)

a. Aprobado: \_\_\_\_\_ Aplazado: \_\_\_\_\_ Rechazado: \_\_\_\_\_

Jurado 1: \_\_\_\_\_

Jurado 2: \_\_\_\_\_

b. Observaciones:

---

---

---

---

---