

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Modelo geotécnico para la evaluación de geoceldas construidas a partir de impresión 3D como sistemas de reforzamiento de suelo**

**Daniel Sebastián Alzamora Almeida**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 12 de diciembre de 2022

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Modelo geotécnico para la evaluación de geoceldas construidas a partir de  
impresión 3D como sistemas de reforzamiento de suelo**

**Daniel Sebastián Alzamora Almeida**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Laura Ibagón, MSc**

Quito, 12 de diciembre de 2022

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Daniel Sebastián Alzamora Almeida

Código: 00200522

Cédula de identidad: 1723356158

Lugar y fecha: Quito, 12 de diciembre de 2022

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

En el presente trabajo se analizan los beneficios de utilizar geoceldas como un sistema de reforzamiento de suelos mediante la construcción de geoceldas utilizando programas de diseño mecánico e impresión 3D. Posteriormente se construyó un modelo geotectónico en laboratorio para que, con la ayuda de un software de procesamiento de imagen (PIVlab) se pudieran extraer datos para la construcción de una curva fuerza vs deformación. Finalmente, se presentan datos que demuestran que el uso de geoceldas puede elevar hasta en 10 veces la capacidad portante del suelo utilizando como material de relleno el mismo suelo de análisis. Adicionalmente se presentan 3 anexos en donde se encuentra de manera detallada el proceso de construcción de geoceldas utilizando impresión 3D, el proceso para realizar un ensayo de corte y un manual para el correcto uso de PIVlab.

**Palabras clave:** Geoceldas, impresión 3D, reforzamiento de suelo, PIVlab, capacidad portante.

## **ABSTRACT**

The present project analyzes the benefits of using geocells as a reinforcement system for granular soils thanks to the construction of geocells by using mechanical design programs and 3D printing. Afterwards, it was built a geotechnical model in the laboratory so that, with the help of a processing image software (PIVlab) it could be possible to extract data to construct a force vs deformation curve. Finally, it is presented data that prove that the use of geocells can increase up to 10 times the bearing capacity of soils by using as filling material the same soil of study. Additionally, it is presented 3 annexes where it is detailed the process of the construction of geocells using 3D printing, the process to make a direct shear test and a manual for the correct use of PIVlab.

Key words: Geocells, 3D printing, soil reinforcement, PIVlab, bearing capacity.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción .....</b>	<b>13</b>
Justificación del trabajo .....	16
Objetivos .....	16
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos .....	16
Revisión bibliográfica .....	16
<b>Desarrollo del Tema.....</b>	<b>18</b>
Materiales y equipos .....	18
Método de fabricación de las geoceldas .....	18
Características del suelo de análisis .....	19
Curva granulométrica.....	19
Densidad .....	21
Ensayo de corte .....	21
Construcción del modelo geotécnico en el laboratorio.....	22
Resultados y discusión.....	25
<b>Conclusiones .....</b>	<b>32</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>34</b>
<b>Anexo A: ELABORACIÓN DE GEOCELDAS .....</b>	<b>36</b>
<u>Modelo N1</u> .....	36
<u>Modelo N2</u> .....	38
<b>Anexo B: ENSAYO DE CORTE .....</b>	<b>40</b>
<b>Anexo C: PASO A PASO PARA EL ANÁLISIS DE IMAGEN UTILIZANDO PIVlab</b>	<b>46</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Peso de la arena.....	21
Tabla 2. Densidad de la arena .....	21
Tabla 3. Esfuerzo normal vs esfuerzo cortante .....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Efecto washboard.....	15
Ilustración 2. Modelos de geoceldas .....	19
Ilustración 3. Curva granulométrica .....	19
Ilustración 4. Plano del acople entro la cabeza de la prensa hidráulica y el pistón utilizado ..	23
Ilustración 5. Acople construido y colocado en la cabeza de la prensa hidráulica .....	24
Ilustración 6. Caja con 23cm de arena .....	24
Ilustración 7. Modelo geotectónico montado.....	25
Ilustración 8. Modelo con geocelda con una indentación de 2.82mm.....	26
Ilustración 9. Modelo sin geocelda con una indentación de 2.31mm .....	26
Ilustración 10. Modelo con geocelda con una indentación de 13.17mm.....	27
Ilustración 11. Modelo sin geocelda con una indentación de 13.56mm .....	27
Ilustración 12. Modelo con geocelda con una indentación de 15.23mm.....	28
Ilustración 13. Modelo sin geocelda con una indentación de 15.45mm .....	28
Ilustración 14. Sumatoria de desplazamiento en el eje Y del modelo sin geocelda .....	29
Ilustración 15. Sumatoria de desplazamiento en el eje Y del modelo con geocelda .....	30
Ilustración 16. Grafica fuerza vs desplazamiento .....	30
Ilustración 17. Modelo y medidas del patrón de las geoceldas en AutoCAD .....	36
Ilustración 18. Tiras de acetato después de la aplicación de calor.....	36
Ilustración 19. Pegamento epóxico utilizado para las uniones de las geoceldas .....	37
Ilustración 20. Vista lateral y frontal del modelo de geoceldas creado en Inventor .....	38
Ilustración 21. Prototipos de las geoceldas en diferentes plásticos. ....	39
Ilustración 22. Opción para encerar el equipo .....	40
Ilustración 23. Caja de corte .....	40
Ilustración 24. Caja de corte retirada .....	40

Ilustración 25. Caja de corte desarmada. ....	41
Ilustración 26. Piedra pómez dentro de la caja de corte. ....	41
Ilustración 27. Papel filtro sobre la piedra pómez. ....	41
Ilustración 28. Caja de corte asegurada con los tornillos laterales. ....	41
Ilustración 29. Suelo de análisis dentro de la caja de corte. ....	42
Ilustración 30. Tope superior apenas en contacto con los bordes de la caja de corte. ....	42
Ilustración 31. Segunda pieza de papel filtro y piedra pómez. ....	42
Ilustración 32. Perilla para el ajuste de la caja de corte. ....	42
Ilustración 33. Caja de corte junto con la muestra de análisis dentro del equipo. ....	42
Ilustración 34. Pieza central de la máquina de corte. ....	43
Ilustración 35. Sensor de canal 1 colocado. ....	43
Ilustración 36. Extracción de los tornillos del paso N4 y ajuste de los otros dos tornillos. ....	43
Ilustración 37. Botón para colocar los parámetros del ensayo. ....	44
Ilustración 38. Diámetro de la caja de corte y esfuerzo normal. ....	45
Ilustración 39. Velocidad de corte. ....	45
Ilustración 40. Escenario de grabación. ....	46
Ilustración 41. Ejecución de PIVlab ....	47
Ilustración 42. Opción para cargar videos o imágenes en PIVlab ....	47
Ilustración 43. Ajuste del número de frames a analizar ....	47
Ilustración 44. Menú “Main tasks quick access” ....	48
Ilustración 45. Menú para colocar mascararas. ....	48
Ilustración 46. Coordenadas utilizadas para la región de interés. ....	48
Ilustración 47. Datos colocados para el apartado de pre-processing ....	49
Ilustración 48. Frame con los filtros aplicados. ....	49
Ilustración 49. Parámetros colocados en PIV settings ....	50

Ilustración 50. Áreas de análisis. 3 pasadas .....	50
Ilustración 51. Apartado de análisis de los frames. ....	50
Ilustración 52. Ejemplo de longitud de referencia. ....	51
Ilustración 53. Parámetros para calibrar las imágenes.....	51
Ilustración 54. Velocidad fotograma.....	51
Ilustración 55. Herramienta de “Image based validation” .....	52
Ilustración 56. Parámetros para “image based validation” .....	52
Ilustración 57. Frame con los filtros de “image based validation” activados .....	52
Ilustración 58. Herramienta de “Velocity based validation” .....	53
Ilustración 59. Opción para redefinir los límites de velocidad .....	53
Ilustración 60. Opción para elegir los límites de velocidad.....	53
Ilustración 61. Límites de velocidad.....	53
Ilustración 62. Comparación del mismo frame antes y después de definir los límites de velocidad .....	54
Ilustración 63. Herramienta “Modify plot appearance”.....	55
Ilustración 64. Opciones en “Modify plot appearance” .....	55
Ilustración 65. Herramienta “Spatial: Derive parameters/ modify data” .....	56
Ilustración 66. Suavizar información.....	56
Ilustración 67. Opciones del apartado de “Display parameter” .....	56
Ilustración 68. Imagen referencial de una gráfica de desplazamiento en v .....	57
Ilustración 69. Herramienta “Temporal: Derive parameters” .....	57
Ilustración 70. Opción “Calculate mean” y “Calculate sum” .....	58
Ilustración 71. Herramienta “Markers / distance / angle”.....	58
Ilustración 72. Parámetros de la herramienta “markers” .....	58
Ilustración 73. Imagen referencial de los marcadores colocados .....	59

Ilustración 74. Imagen referencial de la línea de medición. ....	59
Ilustración 75. Herramienta “set points” .....	59
Ilustración 76. Valores obtenidos de la medición. ....	59

## INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo, casi el 80% de vías de acceso son caminos no pavimentados los cuales, en muchas ocasiones, se encuentran sobre suelos débiles los cuales requieren una estabilización para que las vías puedan seguir siendo funcionales (Geo-Technologies, 2018). Es así como una de las soluciones que los ingenieros han planteado es el uso de geoceldas como sistemas de refuerzo o estabilización. Las geoceldas son sistemas de confinamiento tridimensional las cuales están conformadas por paneles de polietilenos de alta densidad, poliéster u otro tipo de polímeros, los mismos que están soldados entre si mediante uniones ultrasónicas para así crear un sistema resistente a esfuerzos de compresión, empuje, fuerzas hidrodinámicas y que a su vez, es resistente a la radiación ultravioleta. (IFAI, 2018). Típicamente el espesor de cada tira es de 1.2mm, su altura 100mm y las dimensiones internas de cada uno de sus panales se acerca a los 250mm (Koerner, 2005). Sin embargo, en el mercado existen varios tipos de geoceldas con diferentes tamaños tanto de los panales como en las alturas. Estos sistemas de reforzamiento de suelo están conformados por tres componentes: las geoceldas, el material de relleno y componentes adicionales como anclajes, grapas, tendones, etc.

Al momento de fabricar geoceldas existen dos variantes, geoceldas de pared no perforada y geoceldas de pared perforada. Las geoceldas de pared no perforada aumentan la fricción entre el geo-sintético y el material de relleno utilizado, mientras que, las geoceldas de pared perforada permiten el acople de las partículas del material de relleno entre las perforaciones permitiendo así la circulación de fluidos, nutrientes y raíces sobre el suelo (GeoPolimeros, 2018).

Este tipo de sistema de confinamiento celular se lo utiliza comúnmente para:

- Soporte de cargas en vías.
- Cimentaciones

- Muros de contención.
- Protección y revegetalización de taludes y canales.

(GeoPolimeros, 2018)

El objetivo principal de este método de estabilización de suelos es crear un sistema donde el material de relleno se mantenga en su lugar evitando desplazamientos gracias al confinamiento por tensión que las geoceldas ofrecen. Esto es posible gracias a que los esfuerzos se distribuyen de mejor manera en un área de mayor tamaño que, en este caso, vienen siendo las paredes de las geoceldas (Viana, 2018). Esto da como resultado que la capacidad portante del suelo aumente permitiendo así, la aplicación de esfuerzos más grandes y reduciendo los asentamientos hasta en un 80% (Geo-Technologies, 2018). En otras palabras, este sistema de confinamiento funciona como una cohesión aparente al material aumentando así su resistencia al corte y brindando una mayor rigidez al sistema (GeoPolimeros, 2018).

El uso de estos sistemas de confinamiento celular tiene varias ventajas tales como:

- Reducción en el espesor de pavimento en carreteras y el uso de materiales de relleno hasta en un 50%.
- Aumentan la vida útil de las carreteras de grava.
- Mejoran la distribución de carga gracias a la presencia de una mayor área.
- Disminuyen los asentamientos hasta en un 80%.
- Son aplicables en cualquier tipo de clima.
- Se reducen los costos de agregados, transporte y colocación.
- El relleno dentro de las geoceldas puede ser material reciclado o de baja calidad lo cual reduce la explotación de canteras, esto quiere decir, que las emisiones de CO2 disminuyen.

(Geo-Technologies, 2018)

Para su instalación en la vida real se siguen 4 pasos:

1. Preparación del terreno: Se remueve rocas grandes, raíces, posibles escombros y se deja la superficie sobre la cual se va a colocar las geoceldas lo más uniforme posible.
2. Preparación de los anclajes: Se excavan zanjas para colocar los anclajes o bastones los cuales van a sujetar a las geoceldas.
3. Colocación de las geoceldas: Se extienden las geoceldas sobre la superficie que se quiere reforzar y se las sujeta con los bastones.
4. Traslapes: Con en uso de grapas o bastones se realizan las conexiones entre las geoceldas adyacentes.

(GeoPolimeros, 2018).

Gracias a sistemas de reforzamiento de suelo como las geoceldas, se plantea una posible solución a problemas como el efecto washboard. El efecto washboard consiste en la aparición de ondas a lo largo de vías no pavimentadas debido a: falta de humedad, baja calidad del suelo y hábitos de conducción (Riaño, 2018). De este último punto, se conoce que el fenómeno washboard se produce principalmente por cambios bruscos de aceleraciones o frenados los cuales, producen desplazamientos en las partículas del suelo (University of Nevada, 2002).



*Ilustración 1. Efecto washboard*

En este proyecto se utilizará un modelo a escala reducida en laboratorio para evaluar el comportamiento de geoceldas ante una geometría circular, la cual simula la indentación de una rueda, utilizando geoceldas construidas a partir de poliuretano termoplástico impresas en 3D y los resultados se obtendrán del análisis por imagen utilizando PIVlab.

### **Justificación del trabajo**

Este proyecto busca demostrar de manera experimental los beneficios del uso de geoceldas en el reforzamiento y estabilización de suelos. El utilizar un modelo a escala reducida en laboratorio permite entender de manera económica el comportamiento del sistema, con lo cual, se generan modelos cuyos resultados pueden ser posteriormente escalados a tamaño real.

### **Objetivos**

#### *Objetivo general*

- Desarrollar un modelo experimental que permita evaluar el comportamiento de las geoceldas en materiales granulares.

#### *Objetivos específicos*

- Diseñar y construir geoceldas utilizando impresión 3D y diferentes tipos de plásticos.
- Obtener en laboratorio las características del suelo de análisis (curva granulométrica, densidad del suelo y ensayo de corte).
- Analizar en 2D los asentamientos del suelo ante una carga estática.
- Analizar los desplazamientos del suelo utilizando PIVlab.
- Verificar la efectividad de las geoceldas en la reducción de asentamientos en el suelo.

### **Revisión bibliográfica**

Para el entendimiento del uso de geoceldas, se extrajo información de papers académicos de la plataforma “Science Direct” y de los repositorios de universidades como: Universidad Católica

de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Universidad Militar Nueva Granada y de la Universidad de los Andes (Colombia). De esta última institución, se recuperaron dos trabajos en donde se realizaron modelos de geoceldas a escala reducida y se las pusieron a prueba en laboratorio.

Del trabajo de *“Geoceldas como alternativa para la reducción del efecto washboard en las vías no pavimentadas”* elaborado por David Riaño y el ingeniero Bernardo Caicedo, se obtuvo el proceso para elaborar de manera manual las geoceldas, tanto su geometría inicial como sus dimensiones las cuales serán descritas más adelante.

Para el correcto uso del programa PIVlab se utilizaron los manuales y los videos explicativos de William Thielicke que Mathworks proporciona al usuario en su sitio web.

Utilizando las normativas ASTM se realizaron los ensayos para obtener la curva granulométrica del suelo (ASTM C136-06) y los ensayos de corte (ASTM D3080-04).

Finalmente, las dimensiones finales de las geoceldas en los modelos construidos con impresión 3D fueron extraídos del catálogo de geoceldas de la empresa “GeoPolimeros”.

## DESARROLLO DEL TEMA

### **Materiales y equipos**

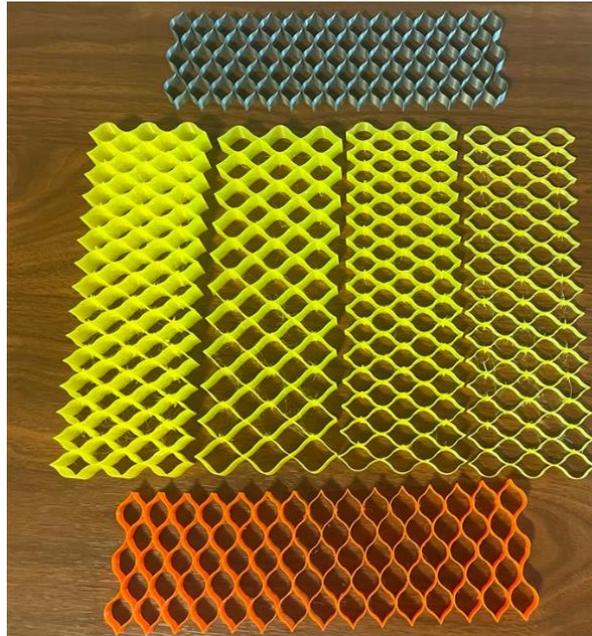
Para la elaboración de las geoceldas se utilizó acetato de grado médico (láminas de acetato utilizadas para radiografías y resonancias magnéticas) las cuales tienen un mayor espesor que los acetatos convencionales, esto con el fin de brindar mayor rigidez a las paredes de las geoceldas. Sin embargo, debido a la alta cantidad de tiempo que se requiere para construir estos modelos y a la imprecisión que existe al momento de unir las tiras de acetato, se optó por utilizar impresión 3D. Gracias a este método se redujo considerablemente el tiempo de manufactura y se consiguió que las uniones tengan una precisión milimétrica. Para esto se utilizó la impresora 3D Original Prusa i3 MK3S y el material del cual se imprimieron las geoceldas fue TPU (thermoplastic polyurethane).

Para el suelo de análisis se utilizó arena de sílice la cual, debido al tamaño de sus granos no requirió de marcadores extra para obtener puntos que fueran reconocibles para PIVlab. Así mismo, se utilizaron 2 reflectores para eliminar potenciales sombras o cambios de luz los cuales pudieron causar problemas en el análisis de imagen.

Finalmente se utilizó una caja transparente de 50cm x 35cm x 7cm, medio cilindro de 2cm de radio el cual fue utilizado para simular la indentación de una llanta en una vía no pavimentada y la prensa hidráulica de la Universidad San Francisco de Quito.

### **Método de fabricación de las geoceldas**

Como se mencionó antes, el método utilizado fue la impresión 3D. Gracias a este método de fabricación fue posible realizar diferentes modelos de geoceldas con diferentes alturas, geometrías, espesores y materiales. En el Anexo A en la página 36 se presenta de manera detallada el proceso que se siguió para la creación de las geoceldas.

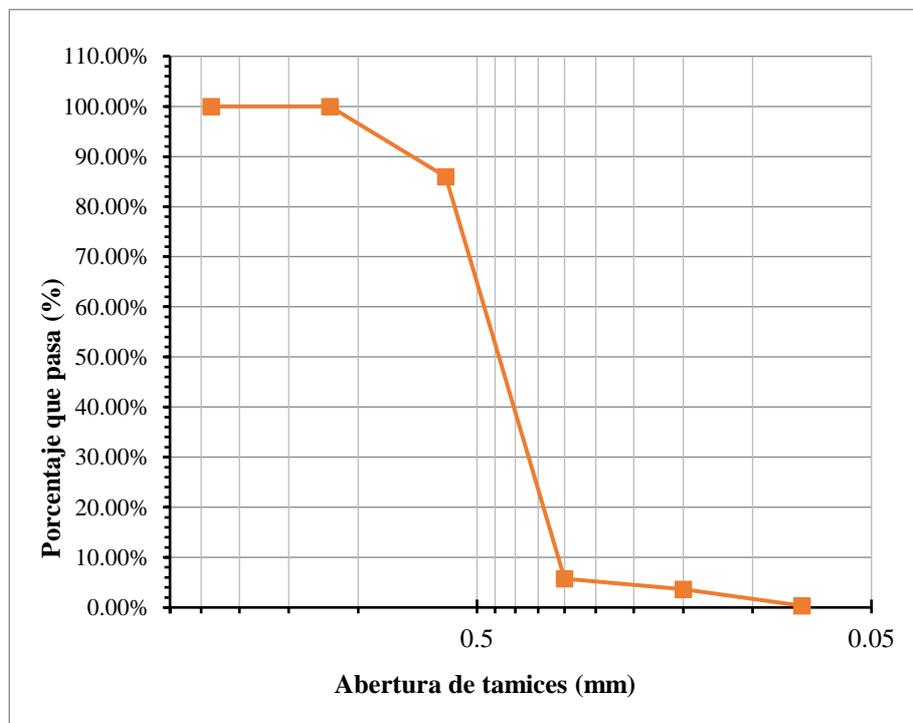


*Ilustración 2. Modelos de geoceldas*

## Características del suelo de análisis

### *Curva granulométrica*

Utilizando la normativa ASTM C136 se realizó el análisis granulométrico por tamizado. A continuación se presenta la curva granulométrica de la arena de análisis:



*Ilustración 3. Curva granulométrica*

De esta gráfica, se obtienen los valores de D10, D30 y D60 para el cálculo del coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura. Para este suelo los valores son:

- D10: 0.11mm
- D30: 0.25mm
- D60: 0.45mm

El coeficiente de uniformidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Remplazando los datos se tiene que:

$$C_u = \frac{0.45}{0.11}$$

$$C_u = 4.09$$

El coeficiente de curvatura se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}}$$

Remplazando los datos se tiene que:

$$C_c = \frac{(0.25)^2}{0.11 * 0.45}$$

$$C_c = 1.26$$

De estos valores se concluye que, al ser el valor de  $C_u$  mayor a 4, la arena de análisis contiene un amplio rango de tamaños de partículas. Finalmente, se observa que la arena se encuentra bien gradada debido a que cumple con  $1 < C_c < 3$  (Azizi, 2000)

### ***Densidad***

Para obtener la densidad del suelo se utilizó la técnica de pluviometría. Este método consiste en dejar caer la arena desde una misma altura y de esta manera la energía con la que cae es igual en todas sus capas. Para esto, lo que se hizo fue amarrar una regla a la base de un embudo y a medida que la arena caía dentro de un envase de dimensiones conocidas, la regla junto con el embudo eran levantadas colocando varias capas hasta llenar el envase. A continuación se presentan los resultados obtenidos de tres ensayos con la misma arena.

<b>Muestra</b>	<b>Peso con envase [g]</b>	<b>Peso arena [g]</b>
1	1639.99	1351.35
2	1641.02	1352.38
3	1641.35	1352.71

*Tabla 1. Peso de la arena*

<b>Muestra</b>	<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>
1	1.41	1413.5
2	1.41	1414.6
3	1.41	1414.9
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.41</b>	<b>1414.3</b>

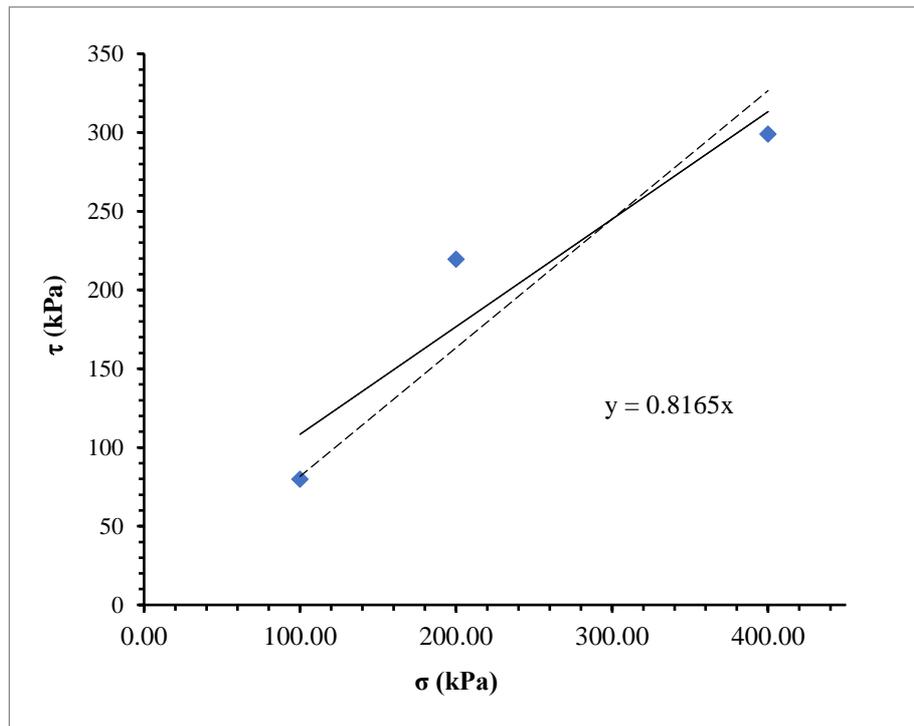
*Tabla 2. Densidad de la arena*

### ***Ensayo de corte***

En el Anexo B de la página 40 se presenta de manera detallada el proceso realizado para el ensayo de corte. Para la arena de análisis, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

<b>Normal Stress [kPa]</b>	<b>Shear stress [kPa]</b>
100	79.794
200	219.556
400	298.962

*Tabla 3. Esfuerzo normal vs esfuerzo cortante*



Gráfica 1. Ensayo de corte

El ángulo de fricción se calculó de la siguiente manera:

$$\phi = \tan^{-1}(\theta)$$

En donde:

- $\theta$ : Valor de la pendiente

$$\phi = \tan^{-1}(0.8165)$$

$$\phi = 0.685$$

Pasando este valor a grados se obtiene que el ángulo de fricción es:

$$\phi = 39.2^\circ$$

### Construcción del modelo geotécnico en el laboratorio

Para el armado del modelo geotécnico en el laboratorio, lo primero que se realizó fue construir un acople para poder unir la cabeza de la prensa hidráulica con el pistón que se utilizó. Para esto, se tomaron las medidas del acople original de la prensa y en el programa inventor se modeló la pieza. A continuación se presenta el plano con las medidas utilizadas:

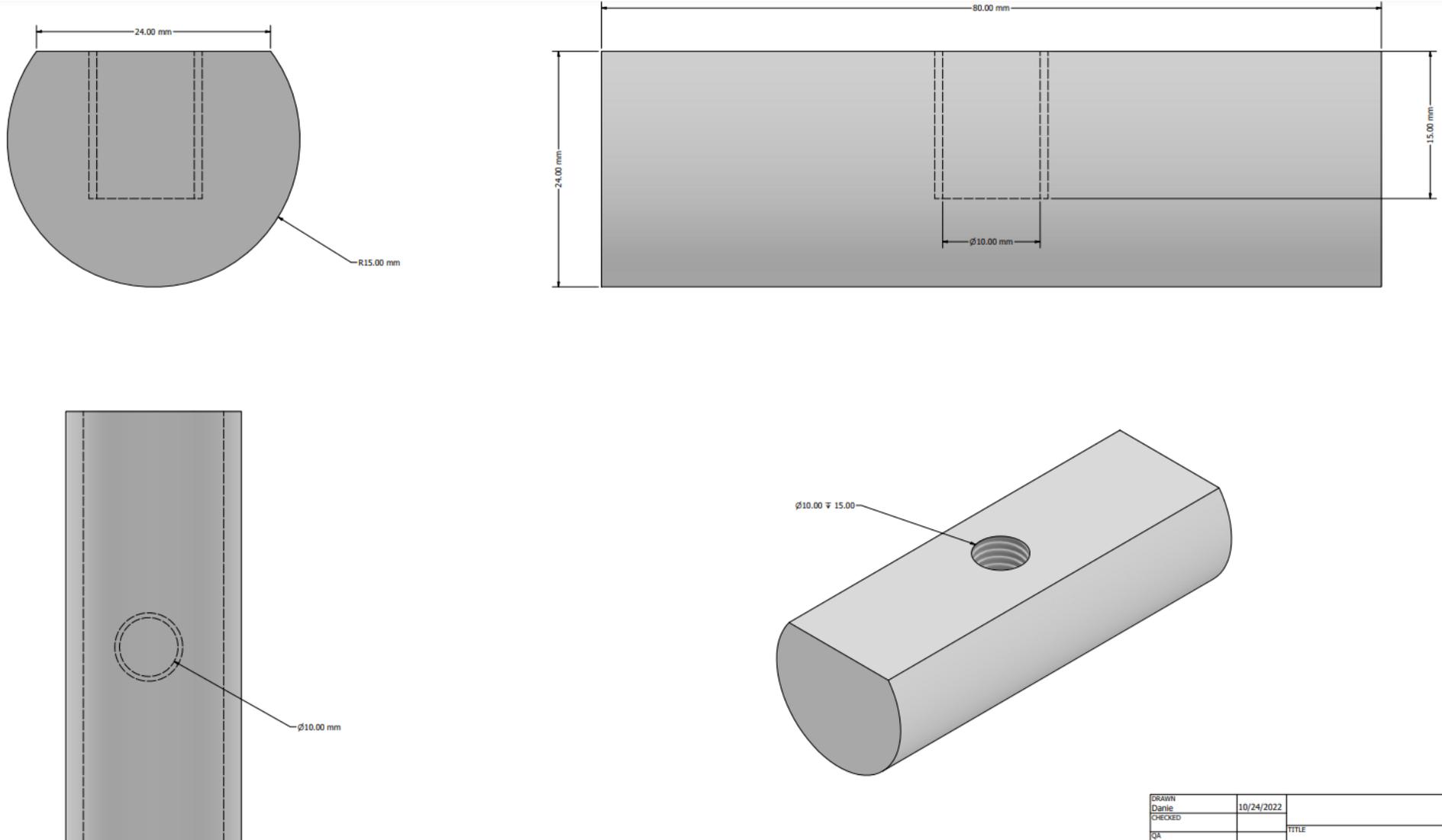


Ilustración 4. Plano del acople entro la cabeza de la prensa hidráulica y el pistón utilizado

Una vez realizado el modelo, con apoyo del personal del área de ingeniería mecánica, se maquinó la pieza con las medidas exactas.



*Ilustración 5. Acople construido y colocado en la cabeza de la prensa hidráulica*

Posteriormente, se construyó la caja con las dimensiones especificadas en la sección de “materiales y equipos” y se la reforzó en sus costados para que pueda soportar la presión ejercida. Con esto listo, se colocó la arena dentro de la caja hasta una altura de 23cm respecto a la base.



*Ilustración 6. Caja con 23cm de arena*

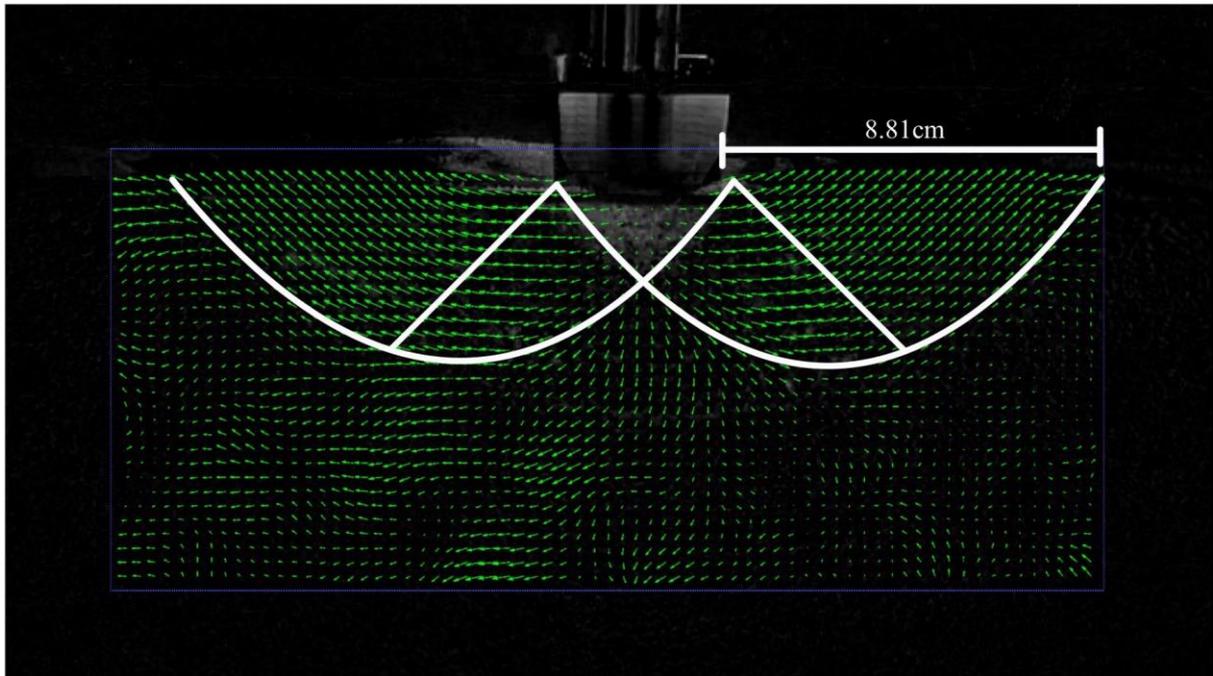
Finalmente, se colocó un fondo negro detrás de la caja para que al momento de procesar las imágenes en PIVlab exista una distinción de color entre la arena y el color de la pared del fondo. Asimismo, para evitar cualquier tipo de sombra o cambio de luz, se colocaron dos reflectores apuntando hacia la caja.



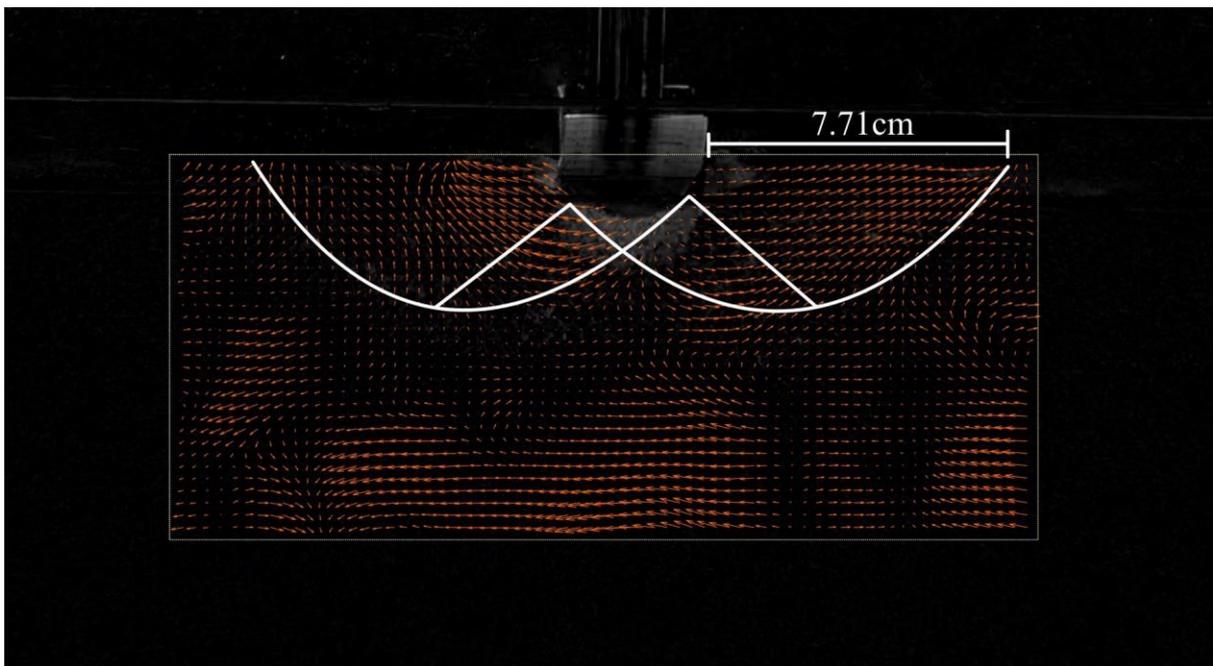
*Ilustración 7. Modelo geotectónico montado*

### **Resultados y discusión**

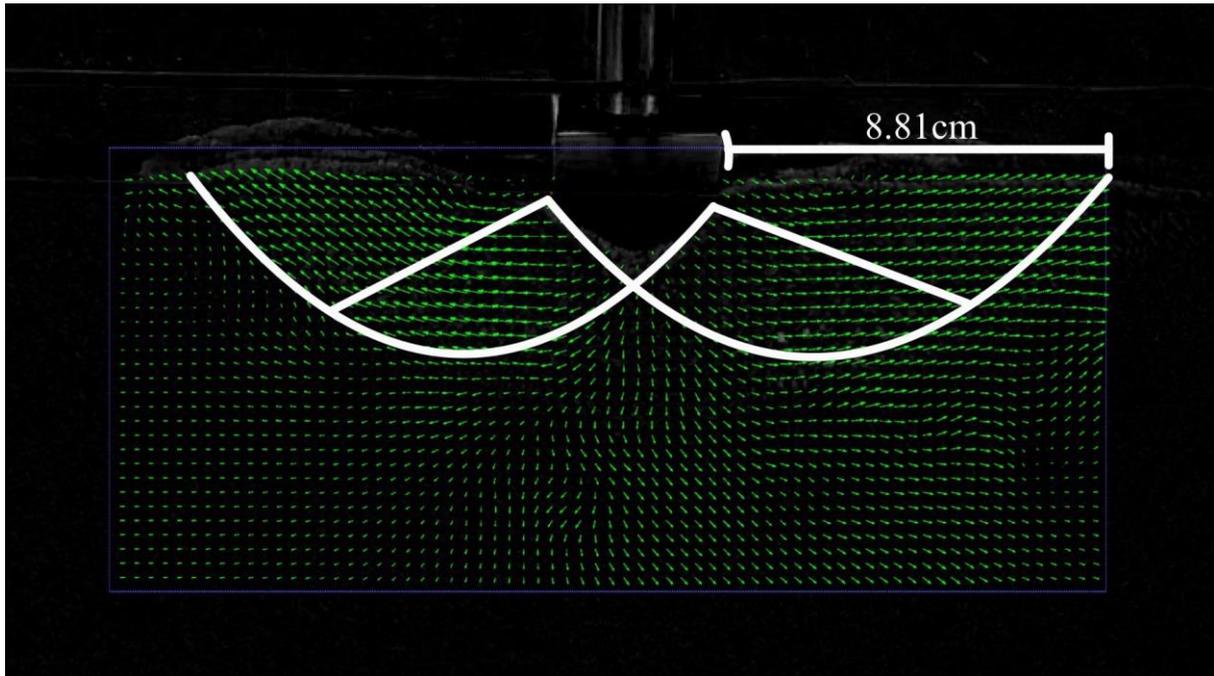
A continuación se presentan los resultados de los modelos con geocelda y sin geocelda obtenidos del procesamiento de imagen utilizando PIVlab para diferentes valores de indentación. En estas graficas se puede observar los vectores de desplazamiento de las partículas de arena dentro de la región de interés (ROI: Region of interest) la cual es detallada y explicada en el anexo C en la página 46. No se analiza toda la caja de arena debido a que solo en la zona de interés se presenta un desplazamiento de partículas.



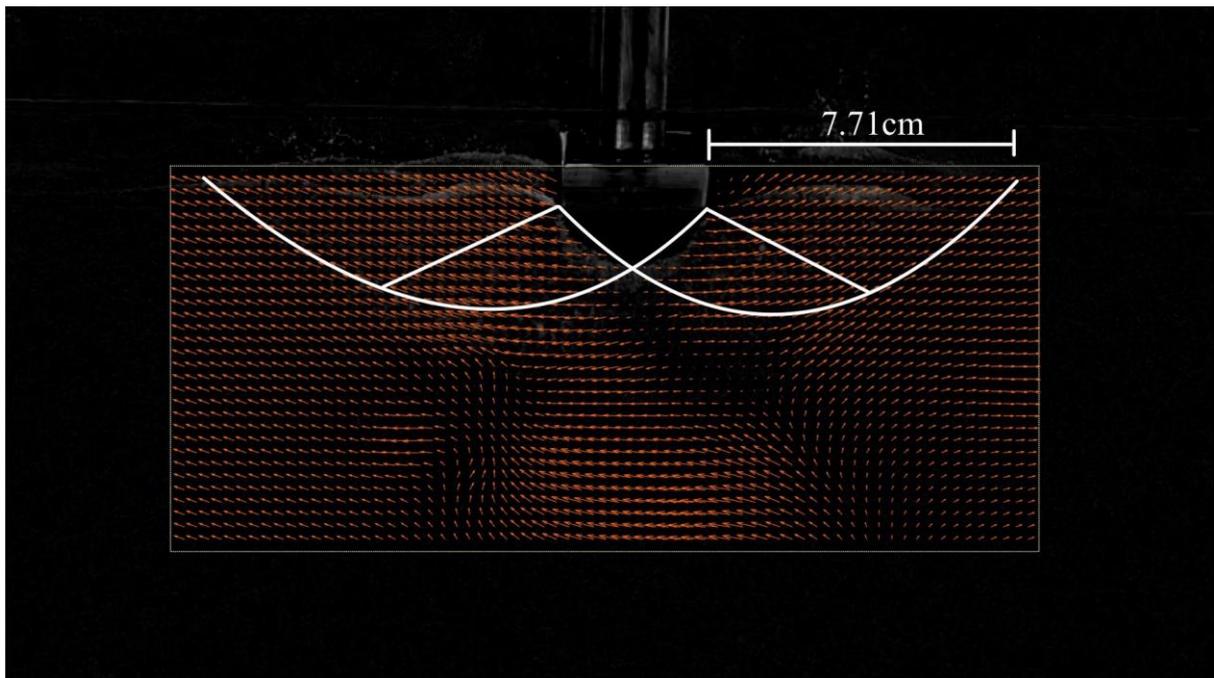
*Ilustración 8. Modelo con geocelda con una indentación de 2.82mm*



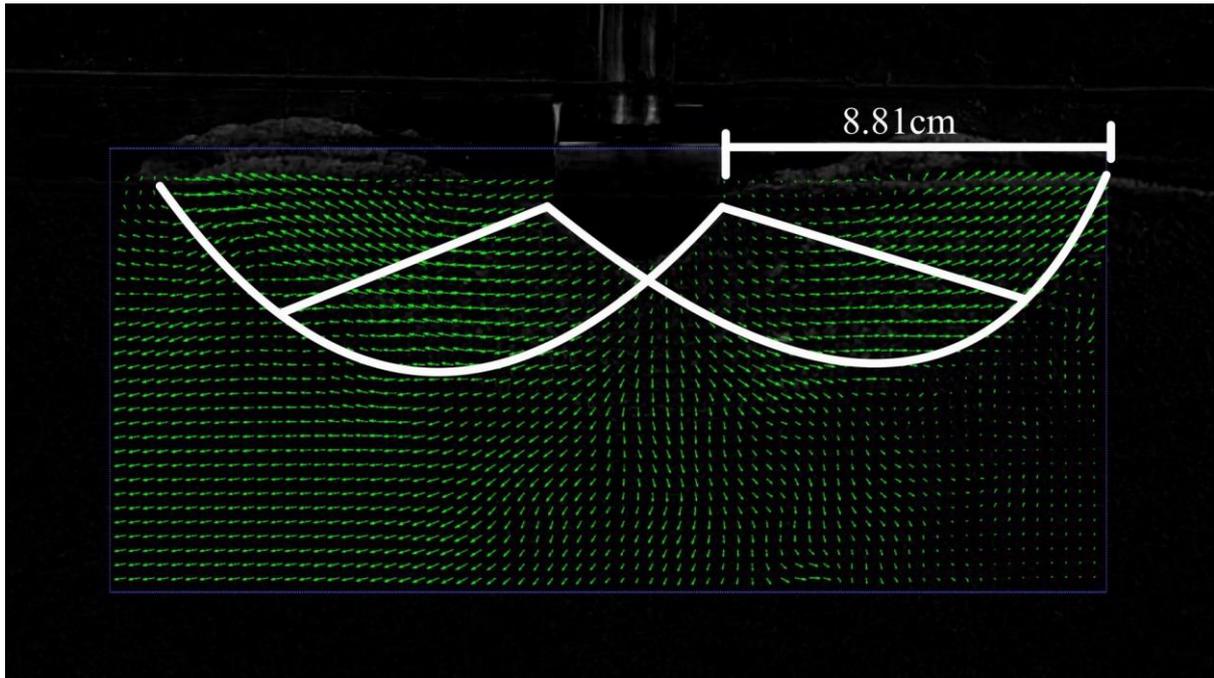
*Ilustración 9. Modelo sin geocelda con una indentación de 2.31mm*



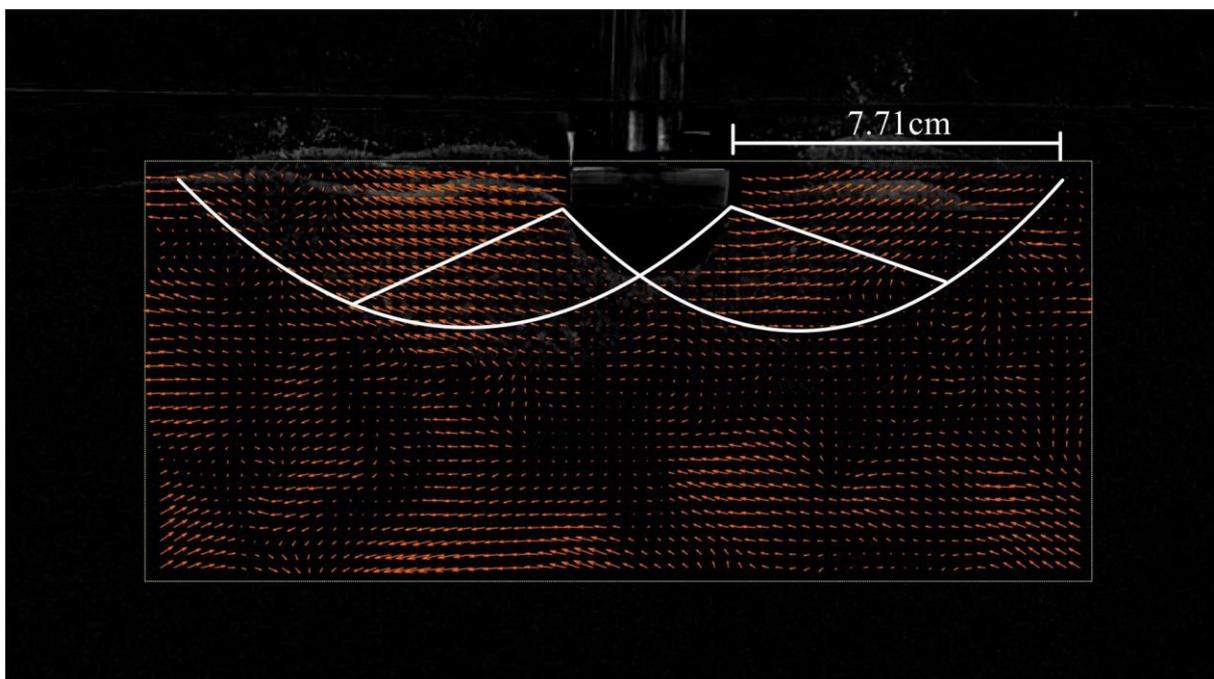
*Ilustración 10. Modelo con geocelda con una indentación de 13.17mm*



*Ilustración 11. Modelo sin geocelda con una indentación de 13.56mm*



*Ilustración 12. Modelo con geocelda con una indentación de 15.23mm*



*Ilustración 13. Modelo sin geocelda con una indentación de 15.45mm*

De las imágenes presentadas, se puede observar claramente las superficies de falla para ambos casos. Sin embargo, se observa que el modelo con geocelda se expande de mayor manera horizontalmente. Esto ocurre debido a que al indentarse la rueda, la geocelda se deforma y mueve de una manera más controlada todo el material alrededor y dentro de ella. En la Ilustración 13 se observa todo lo contrario, el comportamiento del modelo sin geocelda es más desordenado aunque de igual manera se puede observar su superficie de falla.

Una de las herramientas de PIVlab permite realizar una sumatoria de todos los frames para de esta manera conocer como fueron los desplazamientos totales. La escala presentada es para el desplazamiento en Y y se encuentra en unidades de [m/s], para obtener valores de distancia se debe multiplicar por el tiempo que existe entre cada frame. En el anexo C de la página 46 se explica detalladamente como calcular este valor. Para este caso el “time step” del modelo sin geocelda es de 9.33 segundos y para el modelo con geocelda es de 10 segundos.

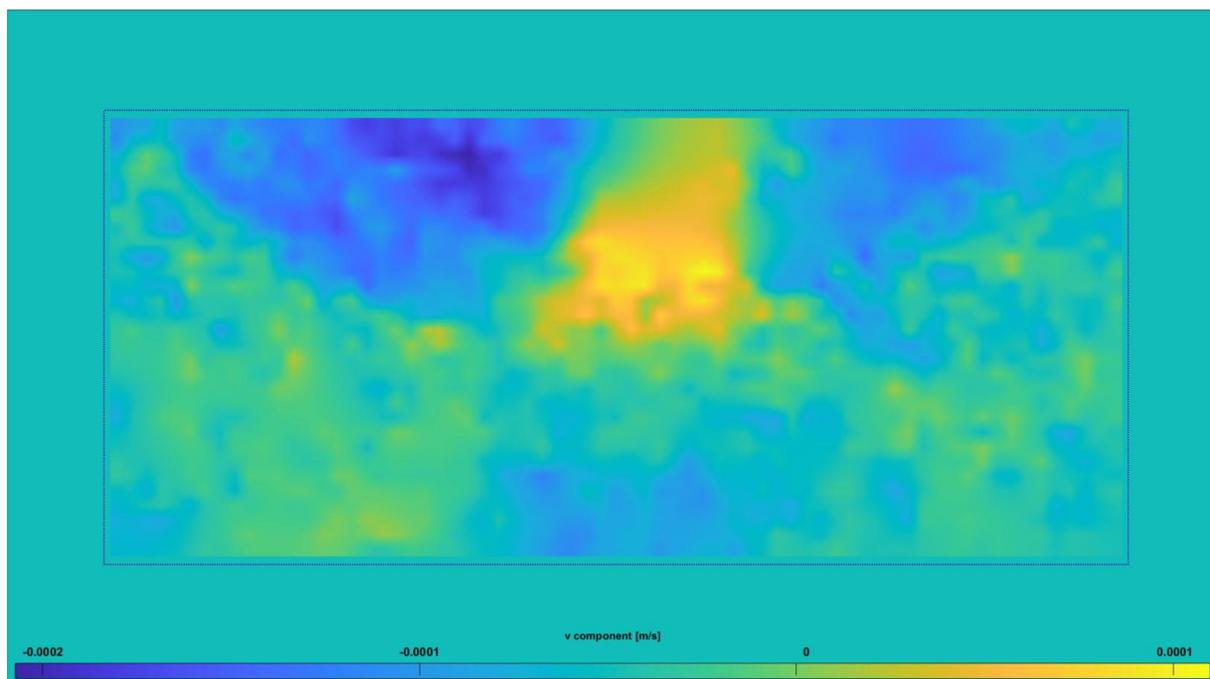


Ilustración 14. Sumatoria de desplazamiento en el eje Y del modelo sin geocelda

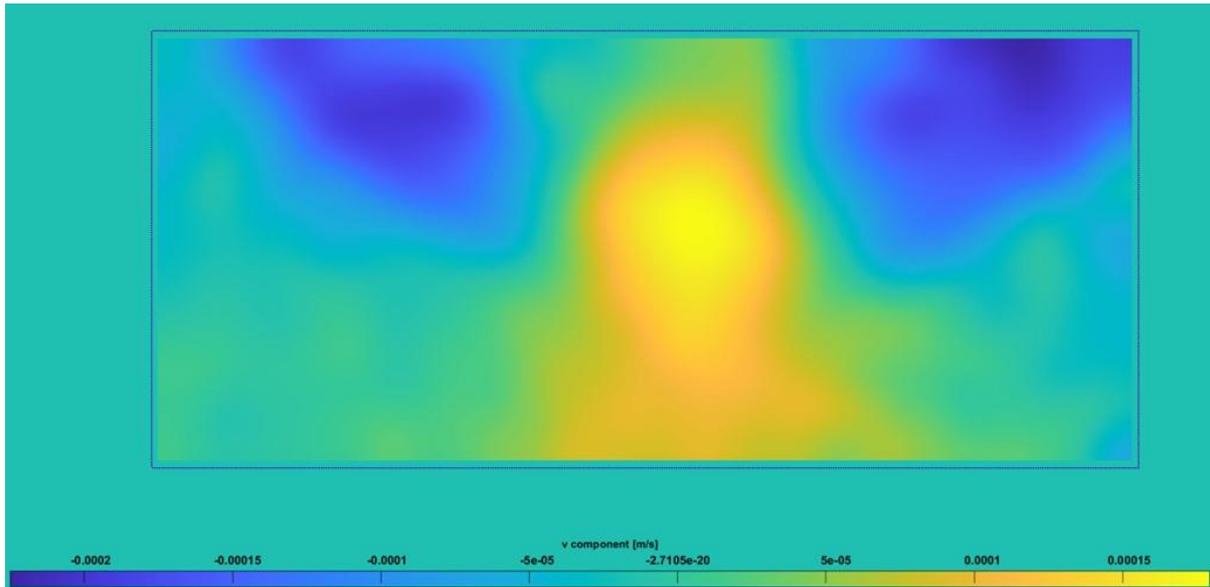


Ilustración 15. Sumatoria de desplazamiento en el eje Y del modelo con geocelda

Como se mencionó antes, el modelo sin geocelda presenta desplazamientos más caóticos en comparación al modelo con geocelda. En la Ilustración 14 e Ilustración 15 se observa que los puntos de mayor desplazamiento fueron en el centro, que es el punto de contacto con la rueda, y en los lados de la parte superior, es decir, la superficie de falla.

Finalmente, se realizó la misma simulación utilizando diferentes alturas en las geoceldas. A continuación se presenta la gráfica que recopila todos estos resultados.

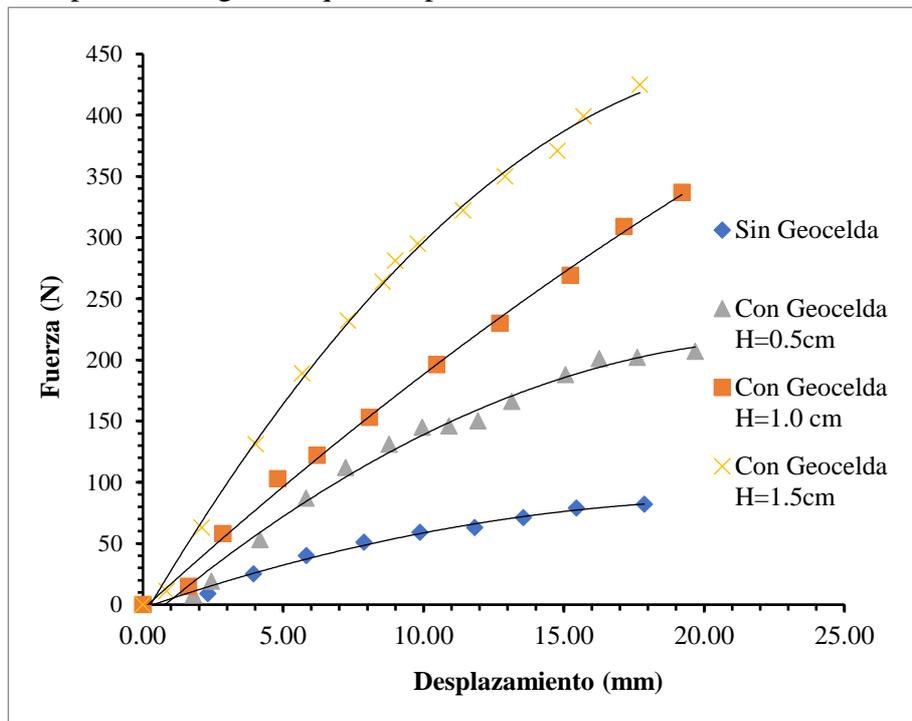


Ilustración 16. Gráfica fuerza vs desplazamiento

Como se puede observar en la Ilustración 16, se verifica que con una misma geometría de los panales pero con una mayor altura, la capacidad de carga aumenta. Si se compara la capacidad de carga entre el modelo sin geocelda y el modelo con geoceldas de 1.5cm de altura, se observa que la capacidad portante aumenta en casi 10 veces. Esto demuestra la efectividad de las geoceldas para el reforzamiento de suelos.

## CONCLUSIONES

- Para los ensayos en laboratorio se recomienda el uso de normas ASTM y no cualquier otro tipo de información que se pueda encontrar en internet.
- Para la elaboración de geoceldas se recomienda el uso de modelos construidos en programas de diseño mecánico para posteriormente imprimirlas en 3D.
- Se recomienda el uso del material TPU para la construcción de geoceldas debido al comportamiento parecido que se tiene con las geoceldas reales.
- En caso de utilizar programas como PIVlab, se debe prestar especial atención a las potenciales variaciones de luz que pueden ocurrir al momento de realizar la grabación (cambios de intensidad o sombras).
- Se recomienda utilizar diferentes colores en las zonas que se vaya a realizar el procesamiento de imagen, en este caso, un color para el fondo, un color para la arena y un color para la rueda.
- Se logró identificar las superficies de falla en ambos modelos gracias al procesamiento de imagen. Así mismo, gracias a esto se observó de manera casi perfecta los vectores de desplazamiento de varias partículas dentro de la región de interés.
- Se observó que el comportamiento del modelo sin geocelda es más caótico en cuanto al desplazamiento de sus partículas respecto al modelo con geocelda.
- Las zonas de mayor desplazamiento de material ocurren en el centro (punto de contacto entre la rueda y la arena) y a los lados de la rueda.
- Se comprobó la efectividad de las geoceldas como sistemas de reforzamiento de suelo. Utilizando geoceldas de 1.5cm de altura se aumentó en casi 10 veces la capacidad portante del suelo.

- Se comprobó que el material de relleno puede ser el mismo suelo que se desea reforzar, no se requiere necesariamente de otro tipo de material.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

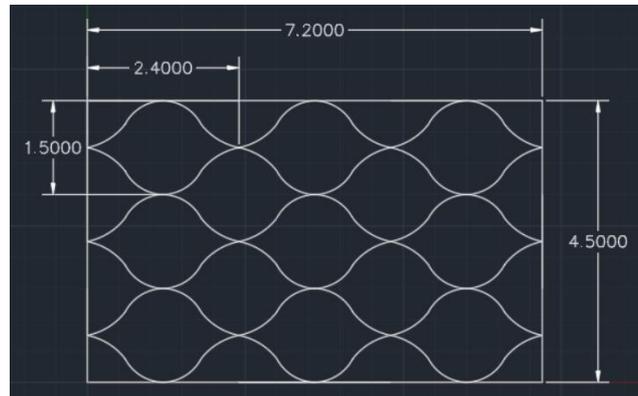
- ASTM. (2004). Método de ensayo estandar para corte directo de suelos bajo condiciones de drenaje consolidadas (Norma D3080-04). Obtenido de [https://www.astm.org/d3080\\_d3080m-11.html](https://www.astm.org/d3080_d3080m-11.html)
- ASTM. (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (Norma C136-06). Obtenido de <https://www.astm.org/c0136-06.html>
- Azizi, F. (2000). *Applied analyses in geotechnics*. London: E&FN SPON.
- Barrera, D., & Franco, H. F. (2019). *Estudio del comportamiento de geo-celdas elaboradas a partir de llantas usadas, mediante pruebas de carga cíclicas en vías no pavimentadas*. Ibagué: Universidad de Ibagué. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12313/1821>
- Cañon, S. M. (2018). *Beneficios técnicos y económicos en el uso de geoceldas en estructura de pavimentos frente a los sistemas tradicionales*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10983/22580>
- Cuartas, C. M. (2015). *Optimización y refuerzo de estructuras de pavimento flexible mediante geoceldas*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/13740>
- Duarte, M. C., & Sierra, V. (2011). *Estudio del comportamiento de un material de subrasante típico de bogotá estabilizado con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga mediante pruebas de laboratorio*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10554/7505>
- GeoPolimeros. (2018). Catálogo de geoceldas. Colombia. Obtenido de <https://www.catalogo.geopolimerossas.com/wp-content/uploads/2018/05/Manual-y-procedimiento-de-Geoceldas.pdf>

- Geo-Technologies, P. (2018). *PRS Geo-Technologies*. Obtenido de <https://www.prs-med.com/es/aplicaciones/carreteras-y-autopistas/vias-de-acceso-temporales/>
- Huesker. (2018). *Geosynthetics*. Obtenido de <https://geosyntheticsmagazine.com/1970/01/01/geocells/>
- IFAI. (2018). *Geosynthetics*. Obtenido de <https://geosyntheticsmagazine.com/1970/01/01/geocells/>
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*. New Jersey: Pearson Education.
- Riaño, D. M. (2018). *Geoceldas como alternativa para la reducción del efecto washboard en las vías no pavimentadas*. Bogotá: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/38967/u820726.pdf?sequence=1>
- Thielicke, W. (2021). PIVlab tutorial. Obtenido de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-particle-image-velocimetry-piv-tool-with-gui>
- University of Nevada. (2002). Causes and cures for washboarding. *StreetWise*.
- Viana, A. M. (2018). *Evaluación del uso de geoceldas sobre suellos arcillosos mediante modelación en centrífuga geotécnica*. Bogotá: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/38971/u820735.pdf?sequence=1>
- Yang, X., Han, J., Pokharel, S., Manandhar, C., Parson, R., Leshchinsky, D., & Halahmi, I. (2012). Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. *Geotextiles and Geomembranes*, 95-103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.10.004>

## ANEXO A: ELABORACIÓN DE GEOCELDAS

### Modelo N1

Para la fabricación de las geoceldas se procedió a generar un modelo en AutoCAD con las siguientes medidas (unidades en centímetros):



*Ilustración 17. Modelo y medidas del patrón de las geoceldas en AutoCAD*

Este modelo se creó para posteriormente imprimirlo en una lámina de 9mm de MDF con la ayuda de una impresora láser. Debido a que para este caso particular la altura de las geoceldas es de 1cm, al momento de imprimir sobre la madera se ingresó en una profundidad de 5mm, de esta manera la manipulación de las tiras de acetato se vuelve más simple.

Una vez con el patrón impreso sobre la lámina de MDF, se procedió a recortar tiras del acetato de grado médico de 9cmx1cm. Posteriormente, se colocaron las tiras dentro de la lámina de MDF y se aplicó calor para que el acetato adquiriera su nueva geometría.



*Ilustración 18. Tiras de acetato después de la aplicación de calor*

El siguiente paso consistió en retirar las tiras de acetato del molde y pegar sus uniones utilizando el epóxico presentado a continuación:



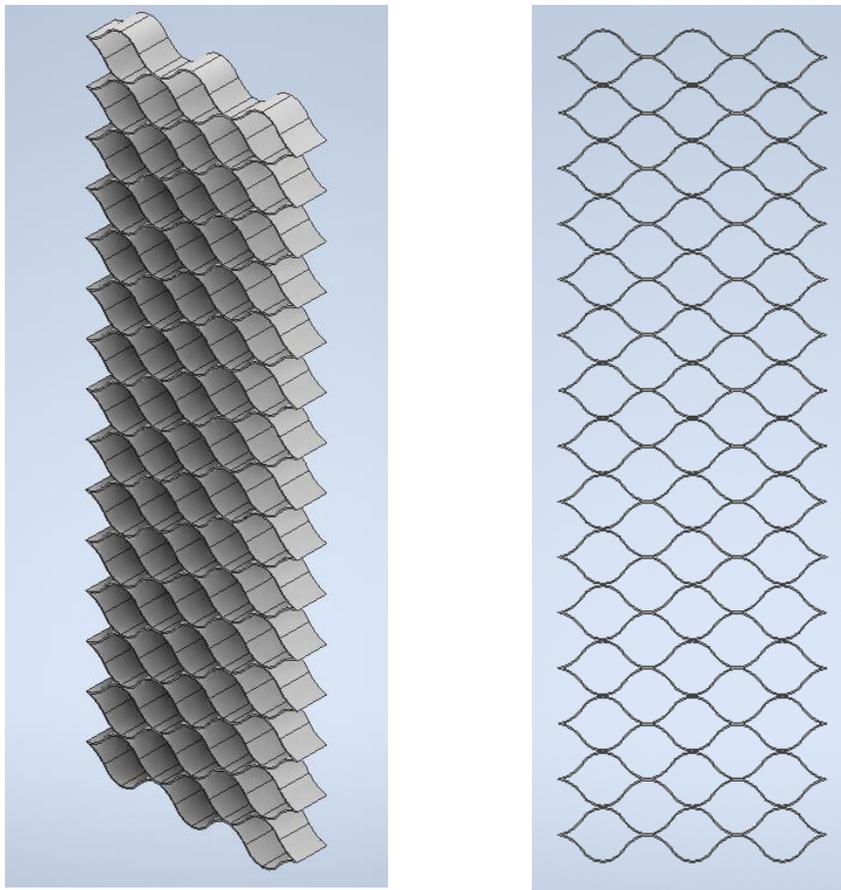
*Ilustración 19. Pegamento epóxico utilizado para las uniones de las geoceldas*

Se utilizó este pegamento debido a la alta resistencia que ofrece (2 toneladas o 2500psi). Para este tipo de proyectos no se recomienda el uso de pegantes como brujita o superbond debido a que al momento de someter a las geoceldas a una carga este pegante no es capaz de mantener las uniones fijas y el sistema de confinamiento falla. Otra recomendación es el uso de guantes al momento de manipular las tiras de acetato y el pegante mostrado.

Una vez colocado el pegamento epóxico en las uniones de las geoceldas, se colocaron pinzas para fijar su posición y asegurar una correcta unión entre las tiras de acetato. Después de 12 horas se retiraron las pinzas y se obtuvo un patrón de 6 tiras de acetato. El proceso se repite las veces necesarias hasta obtener suficientes geoceldas para cubrir el área requerida.

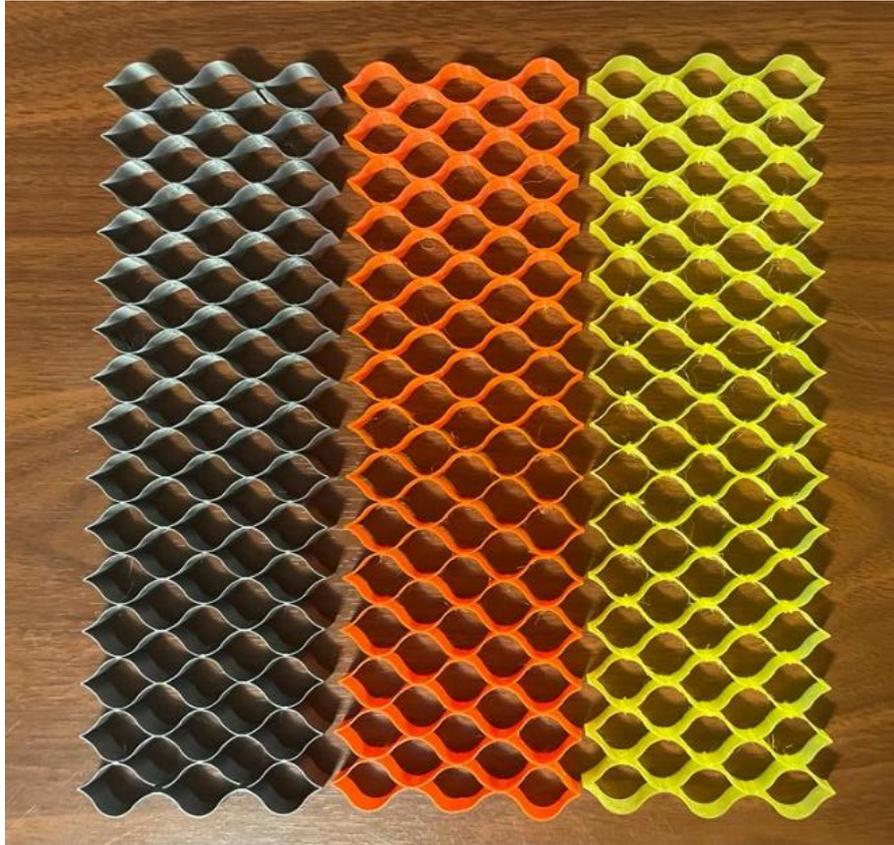
## **Modelo N2**

Debido a la gran cantidad de tiempo que lleva la fabricación de geoceldas utilizando tiras de acetato y a las posibles imperfecciones al tratarse de un trabajo manual, se optó por construir geoceldas utilizando impresión 3D. Para esto se generó un modelo en el programa Inventor Professional con las mismas dimensiones descritas en el modelo N1 para posteriormente guardar el archivo en formato (\*.slt), formato en el cual la impresora 3D lee los archivos. Cabe mencionar que para que se dé una buena impresión, la calidad en la cual se debe guardar el archivo debe ser en “High”.



*Ilustración 20. Vista lateral y frontal del modelo de geoceldas creado en Inventor*

Para este modelo se utilizó un espesor de 0.4mm, esto debido a que es el espesor más pequeño que se puede imprimir. Posteriormente se realizaron varias impresiones con diferentes tipos de plásticos, esto con el fin de replicar de la mejor manera una geocelda real.



*Ilustración 21. Prototipos de las geoceldas en diferentes plásticos.*

Para este proyecto se eligió como la mejor opción al poliuretano termoplástico o más conocido como TPU (thermoplastic polyurethane). En la Ilustración 21 el prototipo hecho de TPU es el modelo de color amarillo. Con el material y la geometría definidos, se pudo construir diversos modelos donde se varió su altura y el patrón de las geoceldas. Finalmente, con este método se redujo de 12h a 4h el tiempo requerido para tener un modelo completo de geoceldas.

## ANEXO B: ENSAYO DE CORTE

A continuación se presenta de manera detallada el proceso realizado para el ensayo de corte.

### Paso N1

En la pantalla del equipo de presiona la opción marcada en la Ilustración 22 para encerrar la máquina.



Ilustración 22. Opción para encerrar el equipo

### Paso N2

Se retira la caja de corte de la máquina y se limpian posibles restos de ensayos previos.



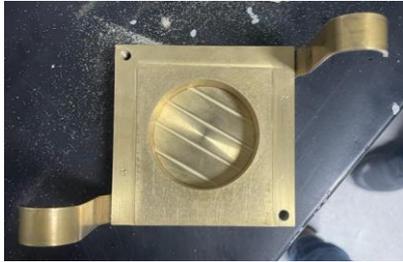
Ilustración 24. Caja de corte retirada



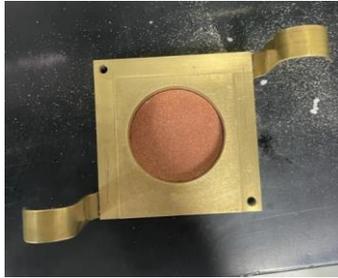
Ilustración 23. Caja de corte

### Paso N3

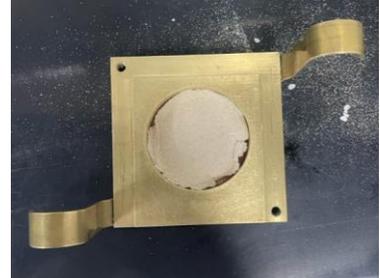
Se desarma la caja de corte y se limpia cualquier impureza. Posteriormente se coloca la piedra pómez y papel filtro.



*Ilustración 25. Caja de corte desarmada.*



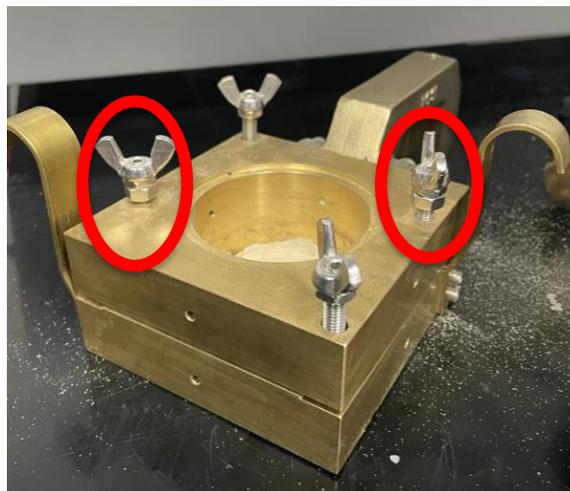
*Ilustración 26. Piedra pómez dentro de la caja de corte.*



*Ilustración 27. Papel filtro sobre la piedra pómez.*

### Paso N4

Se coloca la parte superior de la caja de corte y se asegura con los tornillos señalados en la Ilustración 28. Cabe mencionar que los tornillos señalados se los ajusta hasta el fondo, mientras que los dos restantes de preferencia se los debe retirar.



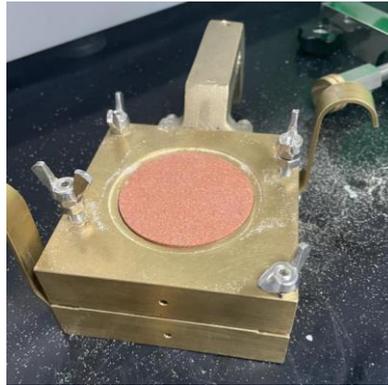
*Ilustración 28. Caja de corte asegurada con los tornillos laterales.*

### Paso N5

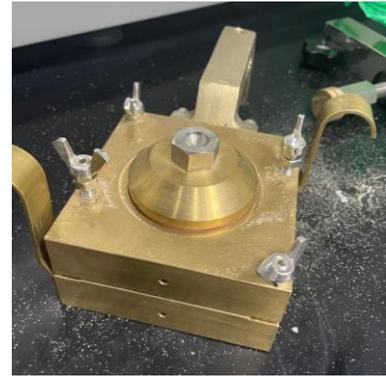
Posteriormente se coloca el material de análisis de tal manera que dentro de la caja de corte también entre otra pieza de papel filtro y otra pieza de piedra pómez. Adicionalmente se debe verificar que el tope superior este apenas hundido dentro de la caja.



*Ilustración 29. Suelo de análisis dentro de la caja de corte.*



*Ilustración 31. Segunda pieza de papel filtro y piedra pómez.*



*Ilustración 30. Tope superior apenas en contacto con los bordes de la caja de corte.*

### Paso N6

Se afloja la perilla señalada en la Ilustración 32 para que la caja de corte pueda ser introducida de manera fácil. Una vez colocada a caja de corte se ajusta la misma perilla.



*Ilustración 32. Perilla para el ajuste de la caja de corte.*



*Ilustración 33. Caja de corte junto con la muestra de análisis dentro del equipo.*

### Paso N7

Se coloca en posición la pieza que va a realizar la conexión entre la caja de corte y la carga axial que se va a ejercer. En la Ilustración 34 se observa la pieza antes descrita. Cabe mencionar que se debe asegurar con las roscas laterales hasta que las barras laterales se queden firmes. El ajustar muy fuerte o el no ajustar o suficiente produce errores al momento de realizar el corte.

Finamente se coloca el sensor del canal 1 en la parte superior, en la Ilustración 35 se observa su posición correcta.



*Ilustración 34. Pieza central de la máquina de corte.*



*Ilustración 35. Sensor de canal 1 colocado.*

### Paso N7

Se colocan en los otros dos huecos los tornillos que fueron retirados en el paso N4. Se ajusta hasta que apenas entren en contacto con la caja de corte. Posteriormente se retiran los tornillos con los que se ajustó totalmente la caja de corte. Esto permite que a placa superior pueda desplazarse lateralmente y se genere el ensayo de corte.



*Ilustración 36. Extracción de los tornillos del paso N4 y ajuste de los otros dos tornillos.*

### Paso N8

A continuación se colocan los parámetros necesarios en la máquina de corte. En la Ilustración 37 se observa la opción que hay que señalar para colocar los parámetros del ensayo.



*Ilustración 37. Botón para colocar los parámetros del ensayo.*

### Paso N9

A continuación se detalla cada parámetro indicado en la Ilustración 38 e Ilustración 39.

1. Shear box: Diámetro interior de la caja de corte.
2. Vertical stress: Esfuerzo normal para el cual se va a realizar el ensayo.
3. Consolidation: Para este ensayo al tratarse de una arena se quitó la selección de este parámetro.
4. Shear: Al utilizar esta opción se despliega una nueva pestana en donde se colocan los parámetros de corte.
5. Shear speed: Utilizando la normativa ASTM D3080-04 se calculó este valor. Este dato depende del tipo de suelo que se quiera analizar.
6. Con esta opción empieza el ensayo de corte.



Ilustración 38. Diámetro de la caja de corte y esfuerzo normal.

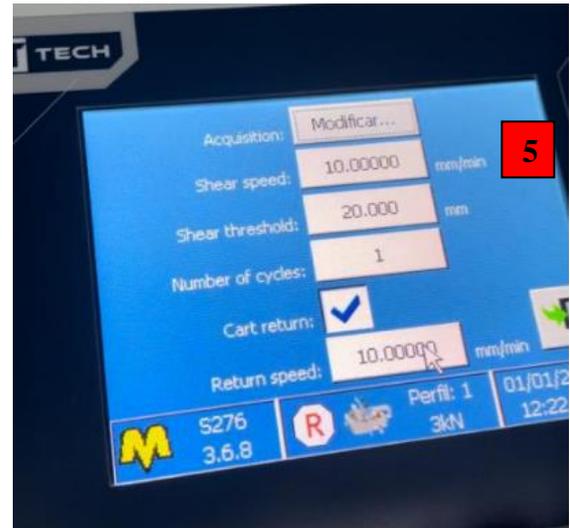


Ilustración 39. Velocidad de corte.

## ANEXO C: PASO A PASO PARA EL ANÁLISIS DE IMAGEN UTILIZANDO PIVLAB

### Paso N1

Al momento de preparar el escenario se debe intentar eliminar la mayor cantidad de perturbaciones posibles en la imagen, es decir, se debe evitar el cambio en la intensidad de luz, sombras, movimiento de objetos, entre otros. Para este ensayo se colocó una cartulina negra en el fondo para que se distinga claramente el movimiento del pistón y la arena. Así mismo, se colocaron dos reflectores para tener buena iluminación y eliminar potenciales sombras de la imagen. Finalmente con la ayuda de un trípode se colocó la cámara y de esta manera se evitó totalmente un posible movimiento del dispositivo de grabación.



*Ilustración 40. Escenario de grabación.*

### Paso N2

Una vez obtenidos los videos o imágenes necesarias, se ejecuta Matlab, se selecciona la opción de “Apps” y en ella se ejecuta PIVlab.

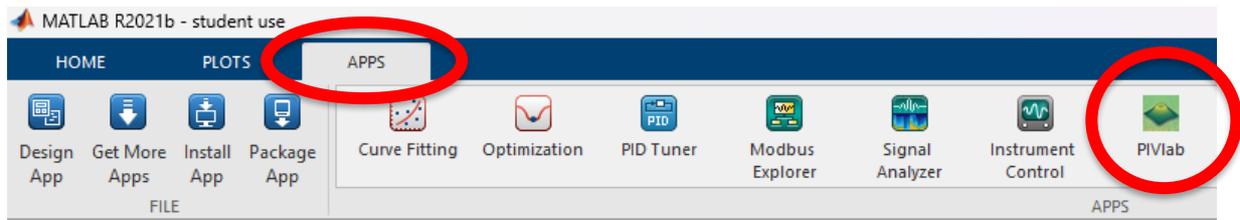


Ilustración 41. Ejecución de PIVlab

### Paso N3

Una vez abierta la aplicación, se procede a cargar las imágenes o videos. Una vez cargado el video se elige la cantidad de frames que se desean analizar, este valor se modifica en la opción “Process every nth frame”. En la parte inferior izquierda de la Ilustración 43 se puede previsualizar el número de frames que se van a analizar y cuales son.

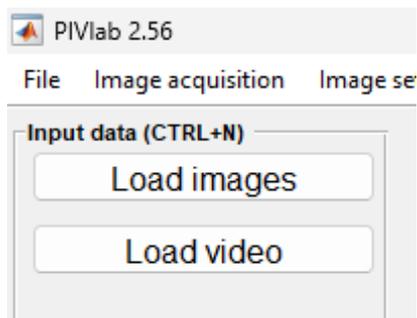


Ilustración 42. Opción para cargar videos o imágenes en PIVlab

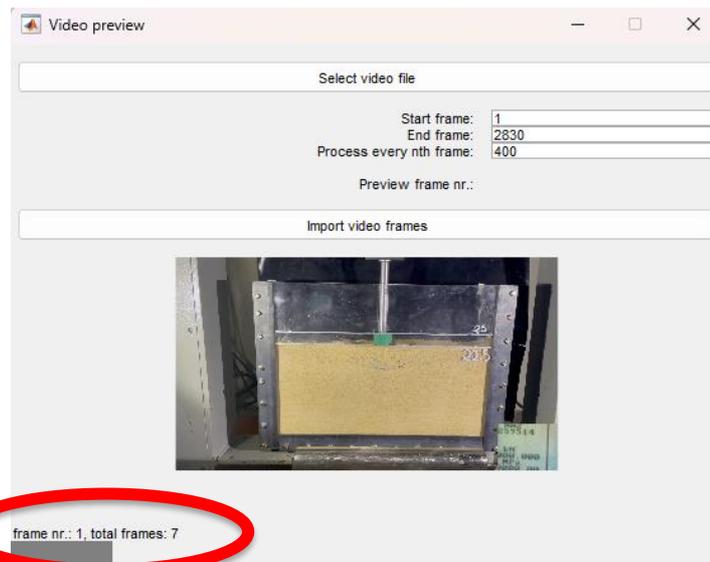


Ilustración 43. Ajuste del número de frames a analizar

### Paso N4

Una vez cargados los frames de interés, se procede a trabajar con el menú “Main tasks quick access” que aparecerá en la parte inferior izquierda de PIVlab. En él se encuentra de manera secuencial (de izquierda a derecha) los pasos necesarios para procesar las imágenes. A continuación se presenta una descripción de cada una de las opciones señaladas en la Ilustración 44.

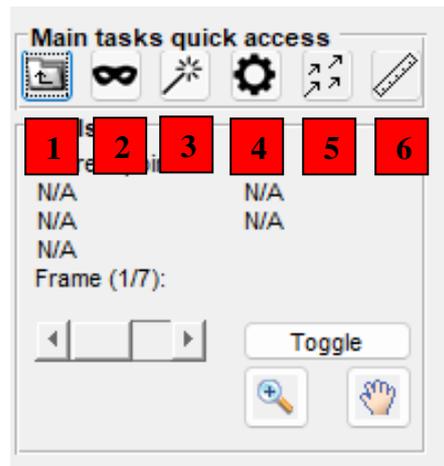


Ilustración 44. Menú “Main tasks quick access”

1. Load images: Opción para cargar imágenes o videos.
2. ROI, Mask: ROI o region of interest, sirve para colocar la zona que se requiere analizar. Esto se puede realizar manualmente seleccionando la opción “Select ROI” o se puede utilizar coordenadas tal y como se muestra en la Ilustración 46. La opción de mascara sirve para tapar regiones dentro de la zona de análisis. Es posible dibujar una máscara y aplicarla a todos los frames o dibujar mascaras individuales para cada frame. Cabe mencionar que una vez dibujada la máscara se debe clicar dos veces sobre la zona dibujada para que la máscara se active.

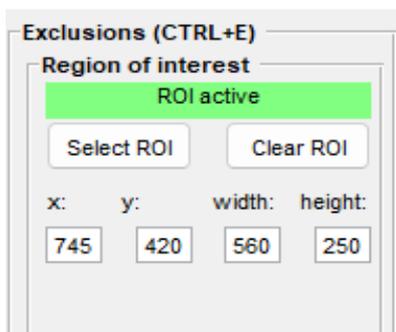


Ilustración 46. Coordenadas utilizadas para la región de interés.

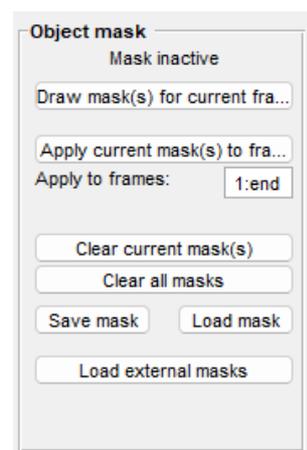


Ilustración 45. Menú para colocar mascaras.

3. Pre-processing: En este apartado de eliminan posibles errores en la imagen como cambios de intensidad de luz, sombras, contraste, entre otras. Debido a que se preparó un escenario el cual evitaba estas alteraciones, la única opción que se selecciono fue la de “Enable CLAHE” (Contrast limited adaptive histogram equalization), esta opción mejora el contraste de la imagen permitiendo que cada pixel obtenga información más clara. En la Ilustración 48 se observa como unicamente la zona del ROI mejora al aplicar los filtros con los parametros colocados en la Ilustración 47.

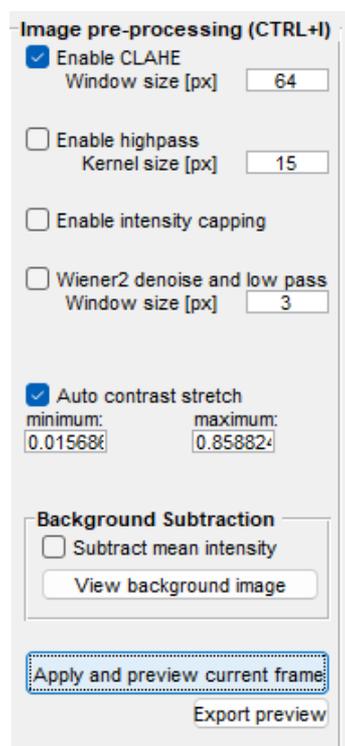


Ilustración 47. Datos colocados para el apartado de pre-processing

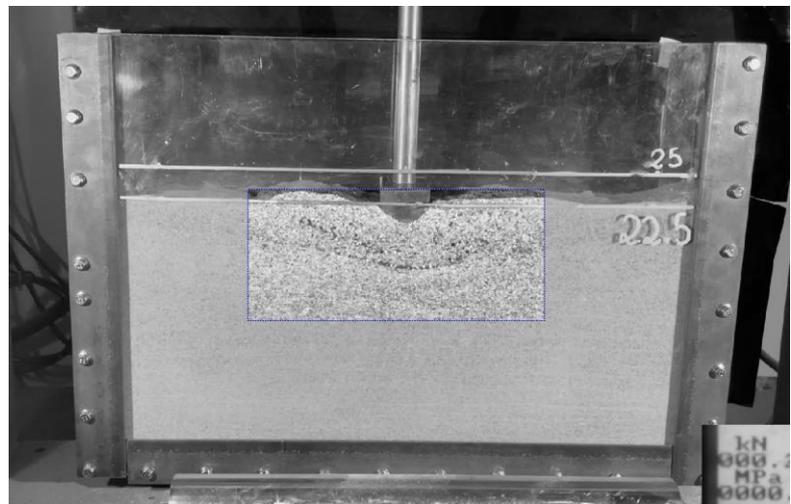


Ilustración 48. Frame con los filtros aplicados.

4. PIV settings: En esta sección se coloca como van a ser analizados los pixeles. En la opción de “PIV algorithm” se recomienda siempre utilizar la opción de “FFT window deformation” ya que es el algoritmo más avanzado de PIVlab. En la sección de “interrogation area” el primer valor debe ser al menos cuatro veces más grande que el desplazamiento máximo de las imágenes. En la Ilustración 50 se observa como seria el

análisis en caso de elegir 3 pasadas. En la Ilustración 49 se observa los datos utilizados para cada pasada, como se puede observar cada pasada es la mitad de la anterior.

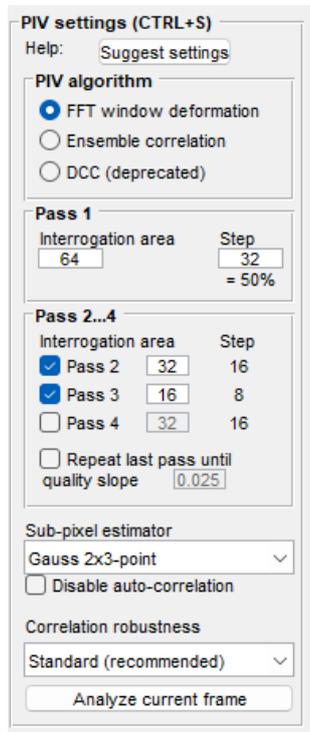


Ilustración 49. Parámetros colocados en PIV settings

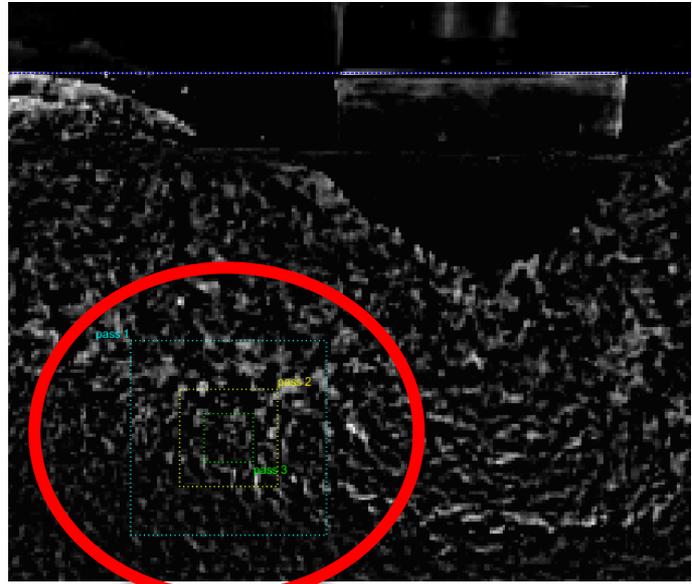


Ilustración 50. Áreas de análisis. 3 pasadas

5. Analyze: En esta sección se analizan todos los frames con todos los filtros y parámetros aplicados previamente.

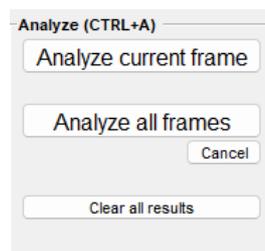


Ilustración 51. Apartado de análisis de los frames.

6. Calibrate: Para que los resultados sean reales, se debe colocar una distancia conocida. Para ello se selecciona la distancia utilizando la opción de “Select reference length” y en el apartado de “Real distance” se coloca el valor real. En caso de que el valor de

“Time step” no lo calcule automáticamente PIVlab, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$time\ step = \frac{\#frames}{fps\ del\ video} * 1000\ [ms]$$

En donde:

- #frames: Valor colocado en el paso N3 en el apartado de “Process every nth frame”
- fps del video: El número de “frames per second” del video completo. Este valor se lo puede observar en las propiedades del video. Ver Ilustración 54.

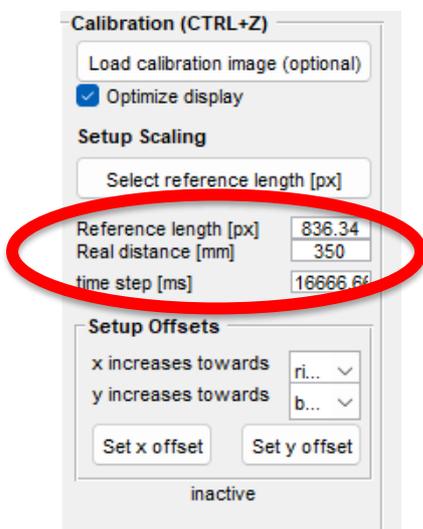


Ilustración 53. Parámetros para calibrar las imágenes.

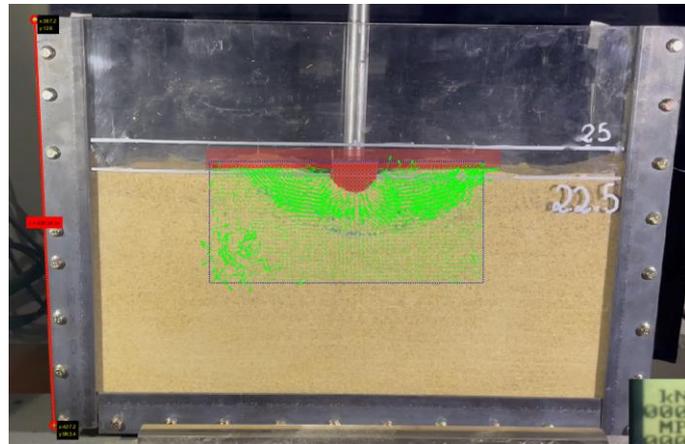


Ilustración 52. Ejemplo de longitud de referencia.

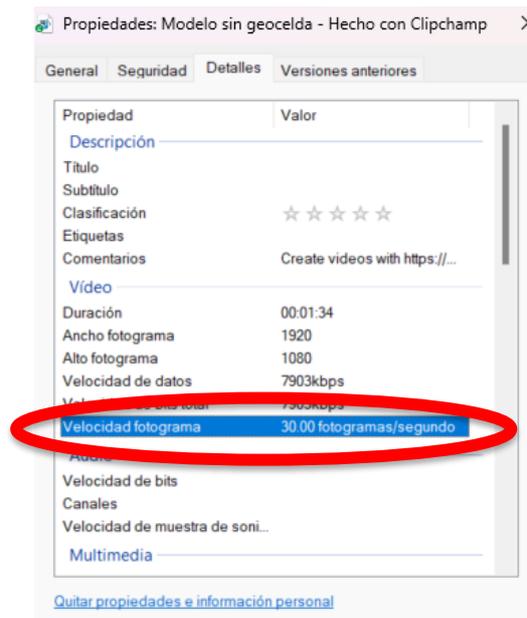


Ilustración 54. Velocidad fotograma

### Paso N5

Una vez calibradas y analizadas las imágenes, se realiza un proceso de post-procesamiento. En el apartado de “post processing” se selecciona la opción de “image based validation”. En este apartado se activan dos filtros, el primer filtro ayuda con el contraste y el segundo filtro con el brillo. En la Ilustración 56 se observan los filtros activados y sus valores, estos últimos son una sugerencia del programa los cuales se obtienen al seleccionar la opción de “Suggest threshold” ubicada debajo de cada uno de los filtros. También se activa la opción de “Interpolate missing data” para que en caso de que los filtros eliminen cierta información importante el programa sea capaz de recuperar estos datos de manera automática utilizando el proceso de interpolación. En la Ilustración 57 se observa uno de los frames con los filtros aplicados, en verde se observa la información real mientras que los vectores de color naranja son resultados de las interpolaciones.

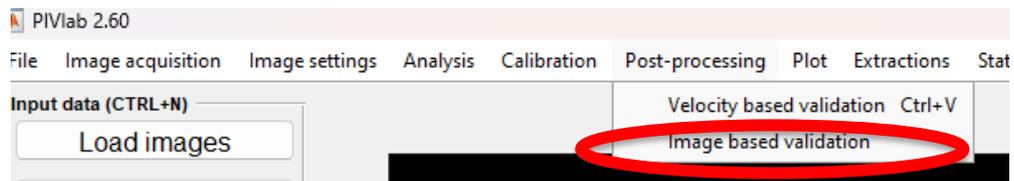


Ilustración 55. Herramienta de “Image based validation”

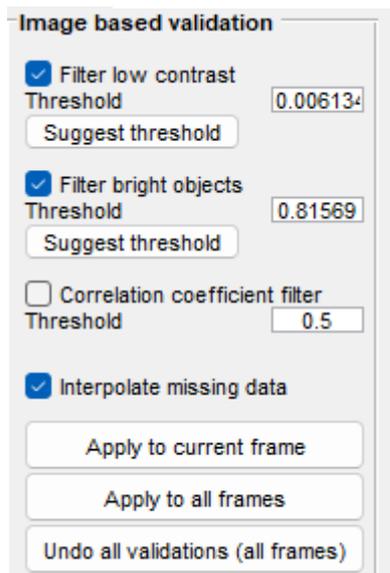


Ilustración 56. Parámetros para “image based validation”

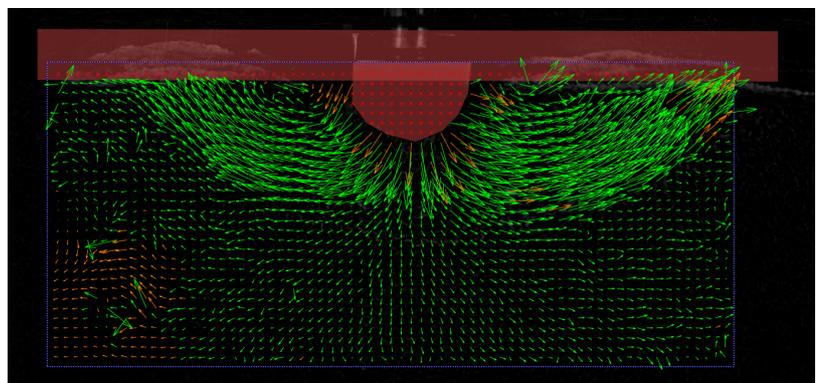


Ilustración 57. Frame con los filtros de “image based validation” activados

El siguiente apartado utilizado en el post-procesamiento de las imágenes fue el de “velocity based validation”. En esta sección se corrigen potenciales vectores erróneos. En la Ilustración 60 se observa la opción que hay que seleccionar para comenzar con el proceso de filtrado de estos vectores. En la Ilustración 61 se observan todos los valores de los vectores, para el proceso de filtrado se selecciona la zona donde existe una mayor concentración de puntos. Este proceso se repite hasta obtener graficas lo más limpias posible. En la Ilustración 59 se muestra la opción para redefinir estos límites las veces que sean necesarias.

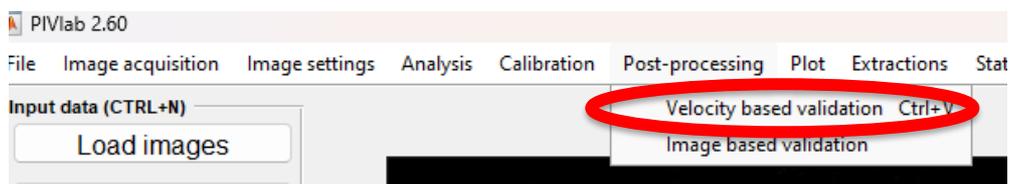


Ilustración 58. Herramienta de “Velocity based validation”

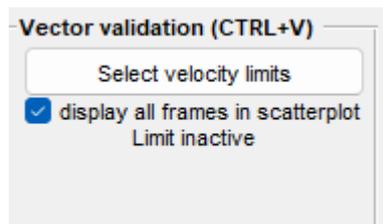


Ilustración 60. Opción para elegir los límites de velocidad

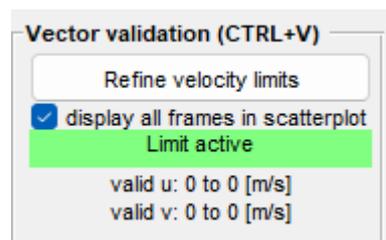


Ilustración 59. Opción para redefinir los límites de velocidad

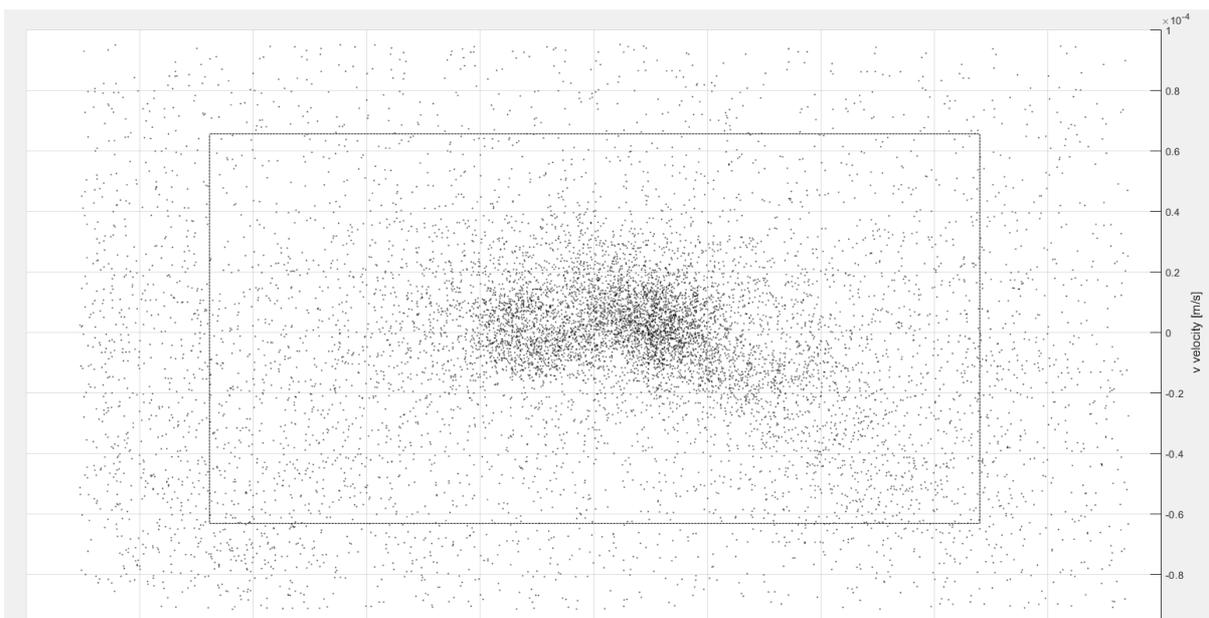
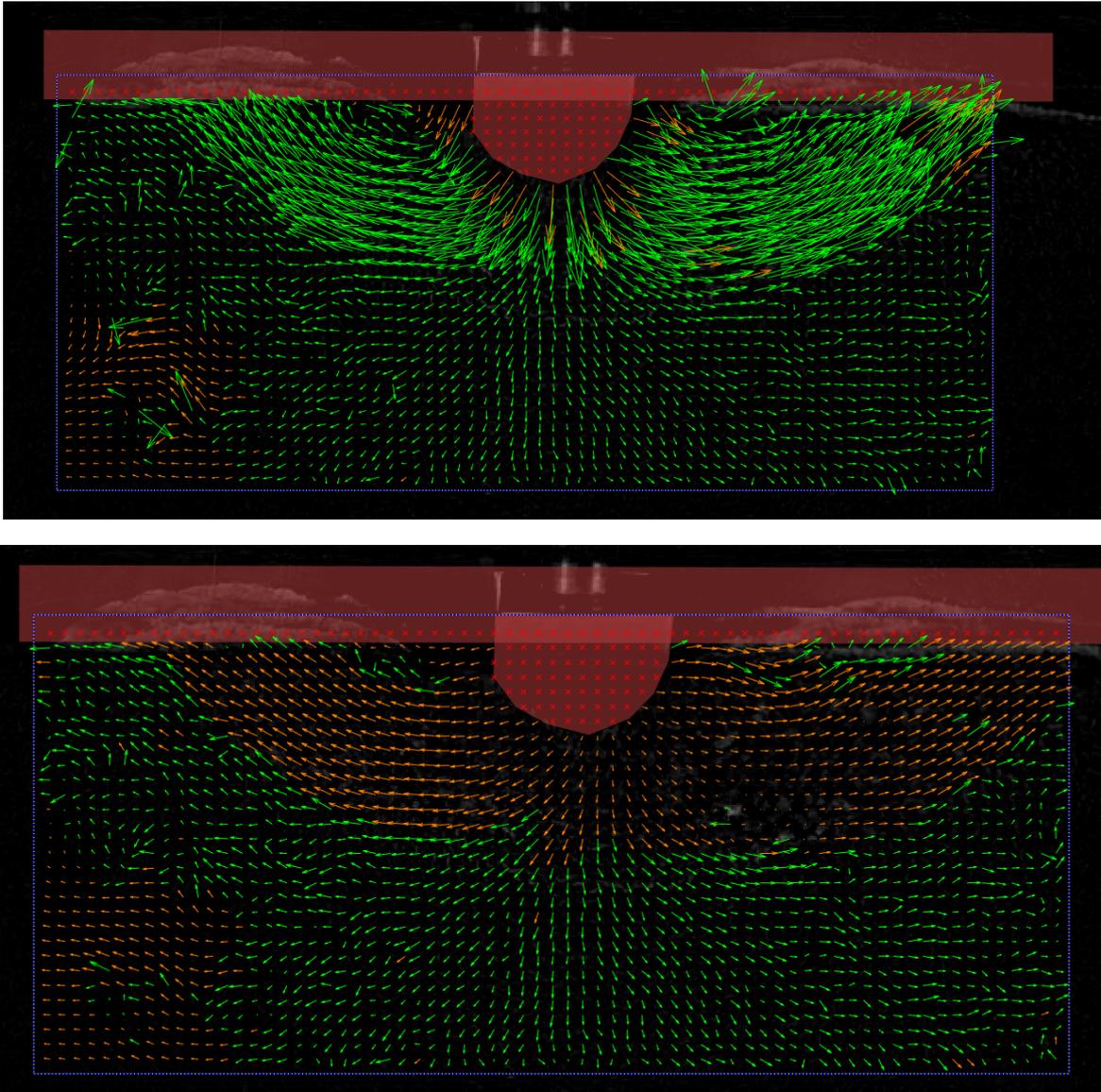


Ilustración 61. Límites de velocidad



*Ilustración 62. Comparación del mismo frame antes y después de definir los límites de velocidad*

### Paso N6

Para comprender de mejor manera los resultados, en el apartado de “Plot” se selecciona la opción de “modify plot appearance” para modificar escalas, color de los vectores, colocar una barra de colores, entre otros. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las opciones:

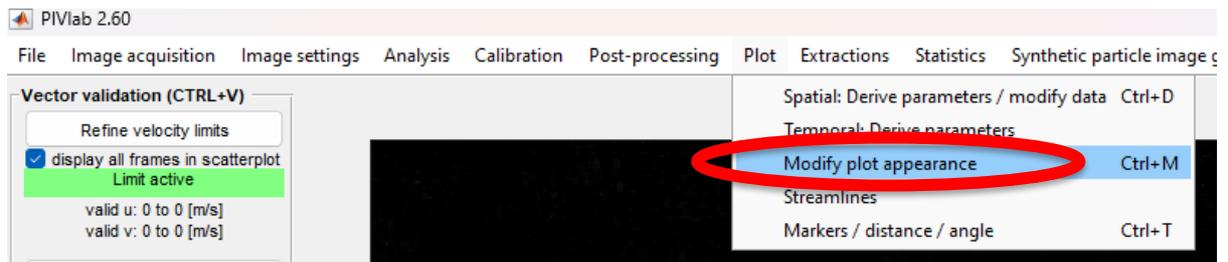


Ilustración 63. Herramienta “Modify plot appearance”

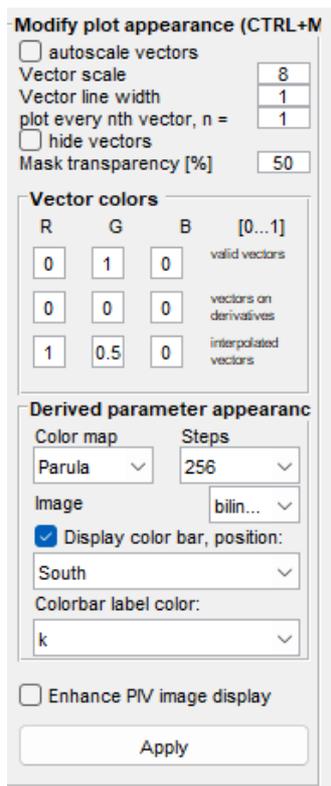


Ilustración 64. Opciones en “Modify plot appearance”

- Vector scale: Sirve para cambiar el tamaño de los vectores.
- Vector line width: Sirve para cambiar el ancho de los vectores.
- Hide vectors: Oculta todos los vectores en los frames.
- Mask transparency: Sirve para colocar la transparencia de la máscara. Un valor de 100 oculta totalmente las máscaras.
- Vectors colors: Utilizando valores de 0-1 se puede cambiar el color de los vectores.
- Display color bar: Muestra una barra de colores en los frames.

## Paso N7

Para observar los resultados, en la pestaña de “plot” se selecciona la opción de “ Spatial: Derive parameters/modify data”. En sección de “derive parameters” se pueden visualizar diferentes opciones para presentar cuadros de desplazamientos en X, desplazamiento en Y, velocidad en X, velocidad en Y, entre otras opciones. En la Ilustración 67 se muestran todas las opciones que se despliegan. En la Ilustración 66 se presenta la herramienta de “smooth data”, esta

herramienta sirve para mejorar la orientación de los vectores y entregar graficas más limpias, se recomienda activar esta herramienta en un 50%.

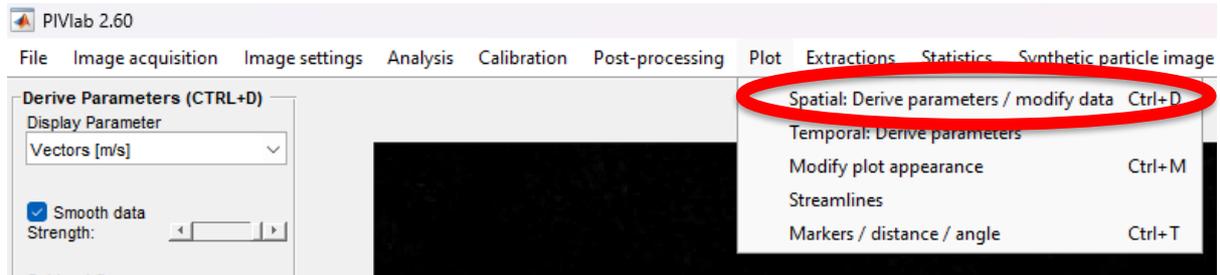


Ilustración 65. Herramienta “Spatial: Derive parameters/ modify data”

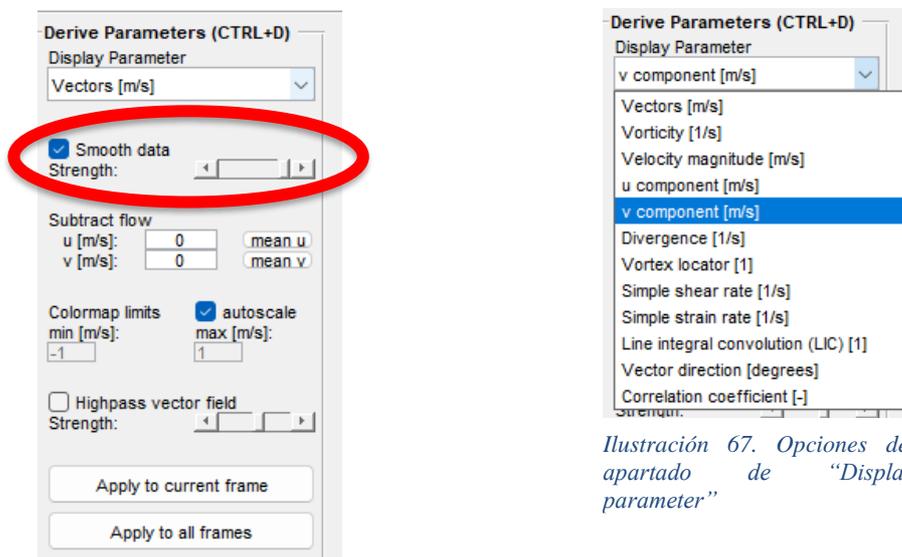


Ilustración 67. Opciones del apartado de “Display parameter”

Ilustración 66. Suavizar información.

Cabe mencionar que PIVlab presenta los desplazamientos en unidades de [m/s], para obtener en unidades de distancia lo que se realiza es multiplicar a los valores de la escala por el “time step” calculado en el paso N4. En la Ilustración 68 se observa un ejemplo de desplazamiento en v. Para PIVlab u es el eje x y v es el eje y.

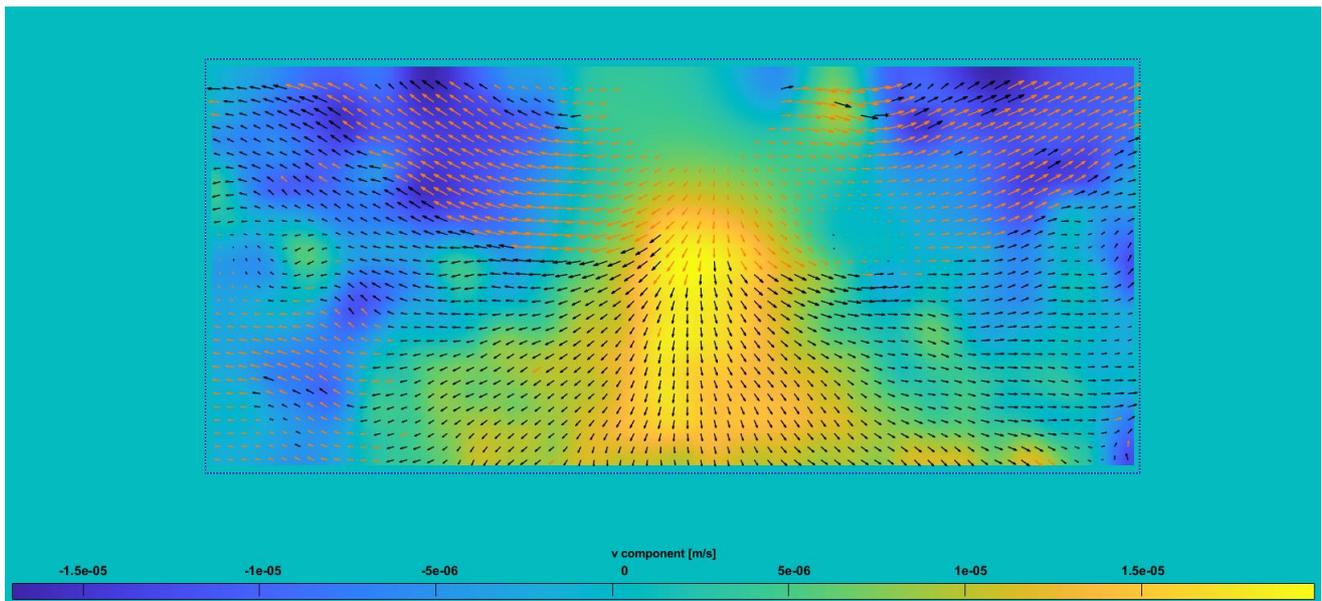


Ilustración 68. Imagen referencial de una gráfica de desplazamiento en  $v$

### Paso N8

PIVlab permite obtener graficas de los valores medios y una sumatoria de todos los valores. Para este estudio resulto útil esta herramienta debido a que permite ver el desplazamiento medio de las partículas de arena y con la sumatoria total se puede tener una idea que como se deforma completamente cada punto de la región de interés.

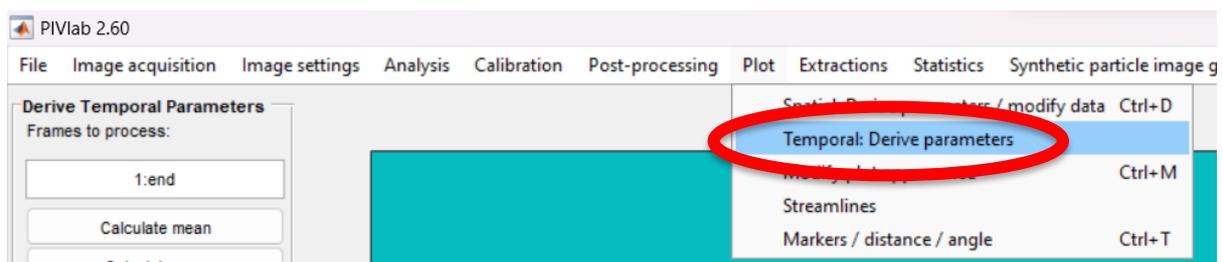


Ilustración 69. Herramienta “Temporal: Derive parameters”

Utilizando la opción de “calculate mean” se genera un nuevo frame con los valores medios. Con la opción de “calculate sum” se obtiene otro frame con la sumatoria de todos los valores de los frames. En la Ilustración 70 se observan las opciones antes descritas.

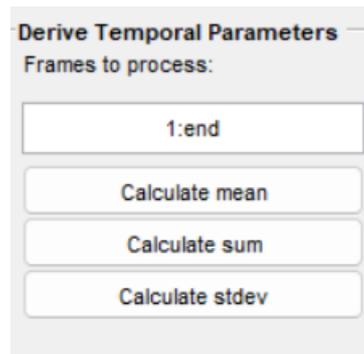


Ilustración 70. Opción “Calculate mean” y “Calculate sum”

### Paso N9

Finalmente, para obtener los valores de desplazamiento de cada frame se utiliza la herramienta de “markers / distance / angle” ubicado en la pestaña de “plot”.

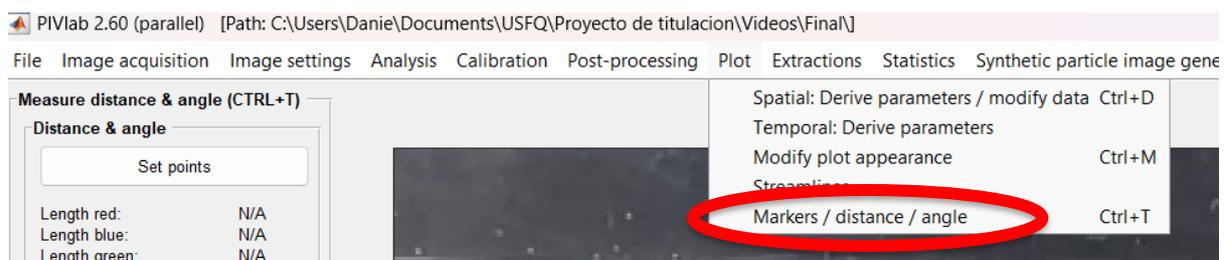


Ilustración 71. Herramienta “Markers / distance / angle”

Utilizando la herramienta de “markers” se colocaron marcadores en la base de la rueda en cada uno de los frames. En la Ilustración 72 se observa que se debe activar la opción de “hold markers” y “display markers”, esto para que no se borren los marcadores de frame en frame y que gracias a su constante visualización se puedan colocar los marcadores de la manera más recta posible.

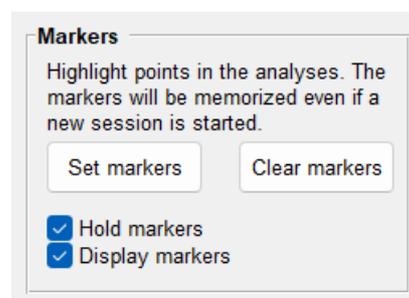


Ilustración 72. Parámetros de la herramienta “markers”



Ilustración 73. Imagen referencial de los marcadores colocados

Una vez colocados los marcadores, con la herramienta “set points” se puede medir la distancia de manera muy precisa. Cabe mencionar que con esta herramienta también es posible medir ángulos. En la Ilustración 75, Ilustración 74, Ilustración 76 se observa el proceso de medición.

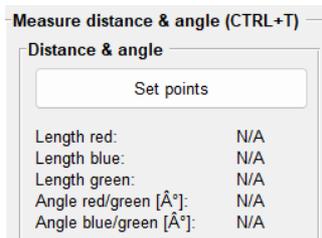


Ilustración 75. Herramienta “set points”



Ilustración 74. Imagen referencial de la línea de medición.

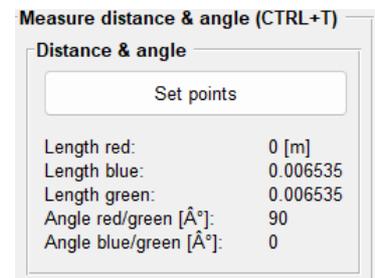


Ilustración 76. Valores obtenidos de la medición.