

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Modelo Experimental para la evaluación de la indentación de una rueda  
de acero de 25.4 mm en un suelo**

**Fernando David Rivera Chica**

**Ingeniería Civil**

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

Quito, diez de mayo de 2022

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

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

**Modelo Experimental para la evaluación de la indentación de una rueda de acero  
de 25.4 mm en un suelo**

**Fernando David Rivera Chica**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Laura Ibagón, Ingeniero Civil**

Quito, diez de mayo 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: Fernando David Rivera Chica

Código: 206407

Cédula de identidad: 1724762362

Lugar y fecha: Quito, diez de mayo 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## UNPUBLISHED DOCUMENT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

El presente trabajo de proyecto integrador expone, una solución estática para relacionar el efecto dinámico denominado *washboard effect*, con el modelo teórico de capacidad portante propuesto por Karl Terzaghi y modificado por Meyerhof.

Se busca relacionar las deformaciones experimentales mediante un ensayo de aplicación de carga con un elemento similar a una rueda sobre una muestra de suelo y mediante P.I.V. (*Particle Image Velocimeter*), determinar el desplazamiento de la muestra de suelo en un determinado tiempo, de esta manera determinar por un área de contacto entre la rueda y el suelo, los esfuerzos efectivos aplicados.

Así mismo, calcular mediante la ecuación de capacidad portante los esfuerzos últimos de la muestra de suelo estudiada al momento de falla, y comparar de manera global con los esfuerzos efectivos hallados en el análisis experimental mediante el software P.I.V.

**Palabras clave:** *Washboard*, Capacidad Portante, Esfuerzo Ultimo, Esfuerzo efectivo, *Particle Image Velocimeter*.

## ABSTRACT

The present integrative project work exposes a static solution to relate the dynamic effect called washboard effect, with the theoretical model of bearing capacity proposed by Karl Terzaghi and modified by Meyerhof.

It is sought to relate the experimental deformations by means of a load application test with an element similar to a wheel on a soil sample and by means of P.I.V. (Particle Image Velocimeter), determine the displacement of the soil sample in a certain time, in this way determine by a contact area between the wheel and the ground, the effective efforts applied.

Likewise, using the bearing capacity equation, calculate the ultimate stresses of the soil sample studied at the time of failure, and compare globally with the effective stresses found in the experimental analysis using the P.I.V.

**Key words:** Washboard, Bearing Capacity, Ultimate Stress, Effective Stress, Particle Image Velocimeter

## Tabla de Contenidos

INTRODUCCIÓN.....	11
DESARROLLO DEL TEMA.....	23
Resultados .....	34
-Resultados Experimentales.....	35
-Resultados Teóricos.....	37
-Resultados Finales .....	40
CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
ANEXO A: Plano Diseño Experimental .....	45
ANEXO B: Vista Frontal Contenedor Experimental .....	45
ANEXO B: Vista Frontal Contenedor Experimental .....	45
ANEXO C: Vista Diagonal Contenedor Experimental .....	46
ANEXO D: Dimensiones Contenedor Experimental .....	46

## Índice de Tablas

Tabla 1: Deformaciones y Esfuerzos por cada Frame.....	36
Tabla 2: Análisis Granulométrico.....	38
Tabla 3: Peso Específico Seco.....	38
Tabla 4: Medidas Experimentales Área de Contacto .....	39
Tabla 5: Capacidad Portante Distintos Ángulos de Fricción.....	40
Tabla 6: Cargas y Deformaciones para Fotogramas.....	41
Tabla 7: Capacidad portante para distintos ángulos de fricción.....	41
Tabla 8: Resultados Finales.....	41

## Índice de Figuras

Ilustración 1: Vía no pavimentada con ondulaciones (Physics, 2013).....	11
Ilustración 2: Ondulaciones vía en Jama-Manabí.....	11
Ilustración 3: Anuncio de fenómeno washboard (Clifton,2022).....	12
Ilustración 4: Desplazamiento en suelo (Azizi, 2009).....	15
Ilustración 5: Límite inferior de capacidad portante (Feng et al, 2018).....	16
Ilustración 6: Modelo de capacidad portante por cohesión y fricción (Feng et al, 2018).....	16
Ilustración 7: Criterio de falla para un cimiento delgado (Feng et al, 2018).....	17
Ilustración 8: Análisis de velocidades según criterio de falla (Feng et al, 2018).....	17
Ilustración 9: Mecanismo de falla en un cimiento (Feng et al, 2018).....	18
Ilustración 10: Modelo de disipación de energía a una tangente al movimiento (Feng et al, 2018).....	19
Ilustración 11: Límite superior de capacidad portante (Feng et al, 2018).....	20
Ilustración 12: Modelo de cohesión para límite inferior (Feng et al, 2018).....	20
Ilustración 13: Análisis de esfuerzos por círculos de Mohr (Feng et al, 2018).....	20
Ilustración 14: Modelo de fricción para límite inferior (Feng et al, 2018).....	21
Ilustración 15: Comparación entre diferentes círculos de Mohr por diferencia de esfuerzos (Feng et al, 2018).....	22
Ilustración 16: Prensa de Múltiples Velocidades para celda de carga de 50 kN (Matest, 2022).....	24
Ilustración 17: Celda de Carga de 50 kN (Matest, 2022).....	24
Ilustración 18: Estrato de Arena.....	25
Ilustración 19:Foto referencial de cámara (One Plus, 2022).....	25
Ilustración 20: Contenedor Experimental.....	26
Ilustración 21: Vástago.....	26
Ilustración 22: Placas de Acero para Acople.....	26
Ilustración 23: Cilindros de Acero vista superior.....	27
Ilustración 24: Cilindros de Acero vista frontal.....	27
Ilustración 25: Software MATLAB (Matlab, 2022).....	27
Ilustración 26: Curva Granulométrica Referencial (Das, 2015).....	28
Ilustración 27:Acople vástago con celda de carga.....	29
Ilustración 28: Placas y cilindros ensamblados.....	29
Ilustración 29: Ensamblaje entre vástago y cilindro con placa.....	30
Ilustración 30: Estrato de Suelo en contenedor.....	30
Ilustración 31: Modelo experimental.....	31
Ilustración 32: Aplicación de carga mediante cilindro a estrato de suelo.....	31

Ilustración 33: Encendido de Prensa .....	32
Ilustración 34:Modelo Referencial de toma de datos .....	32
Ilustración 35: Imagen previa al contacto entre cilindro y estrato de suelo .....	33
Ilustración 36: Deformación del suelo posterior al contacto entre cilindro y estrato de suelo.....	33
Ilustración 37: Curva Granulométrica .....	38
Ilustración 38:Evolución de Capacidad Portante.....	40

## INTRODUCCIÓN

Cuando los vehículos transcurren de manera reiterativa por vías no pavimentadas, tales como vías de tipo lastrado, normalmente compuestas de gravas o arena, se forma un patrón de ondulaciones con formas similares que es reconocido como un fenómeno que en inglés y para el presente informe se presentará como *washboard*, esto genera un problema al momento de recorrer una vía no pavimentada ya que genera incomodidad por la forma que toma el pavimento, y además representa una pérdida de fricción entre el neumático y el pavimento por lo que reduce la adherencia del vehículo a la vía y aumenta de manera significativa la inseguridad de los usuarios.



*Ilustración 1: Vía no pavimentada con ondulaciones (Physics, 2013)*

Solo en Ecuador el 57% de la red vial del país se encuentra con superficie de rodadura afirmada, que puede presentar el fenómeno denominado *washboard* al ser vías no pavimentadas (Banco de Desarrollo de América Latina, 2020). Esto ocurre debido al efecto dinámico que generan las ruedas de los vehículos sobre las vías principalmente en una superficie granular sometida a tensiones tangenciales similar a algunos fenómenos que ocurren en otros comportamientos dinámicos estudiados desde el punto de vista físico tales como en vías férreas, lechos de arena debajo de fluidos, discos lubricados u ondulaciones similares en vías cubiertas de nieve.



*Ilustración 2: Ondulaciones vía en Jama-Manabí*

Actualmente el fenómeno *washboard* representa un desafío para el correcto mantenimiento de las vías no pavimentadas, así como para su diseño inicial según el tipo de suelo que se pretenda utilizar, debido a que el *washboard* presenta un patrón periódico corrugado. Este fenómeno se busca determinar con ciertos parámetros y modelos dinámicos, su ocurrencia. Para este dilema se optó por definir al fenómeno de manera experimental con modelos teóricos de penetración del neumático sobre un grupo de diferentes suelos tales como los realizados por autores como Tarbelet, Morris & McElwaine, Bitbol entre otros (Hewitt, 2011). Sin embargo, esto utiliza un término de difusión, que se refiere a una distribución uniforme de partículas en un sistema ideal, un análisis físico que no es del todo comprobado para este tipo de fenómenos (Percier et al, 2013).

Sin embargo, los estudios que representan de mejor manera el fenómeno de *washboard* es un modelo experimental realizado por Baptiste Percier, Sébastien Manneville et al. En el modelo un cuerpo similar a una plancha inclinada, sin necesidad de poseer las características de una rueda, al ser arrastrada sobre el suelo a una cierta velocidad y generando un impacto dinámico entre la superficie del objeto y la superficie del suelo, genera una inestabilidad en el arado según el peso del objeto sobre la superficie plana generando pequeñas ondulaciones sobre la superficie (Percier et al, 2013).



*Ilustración 3: Anuncio de fenómeno washboard (Clifton,2022)*

Para el análisis de este fenómeno en el presente informe se busca determinar el comportamiento al que se somete el suelo al ser sometido a esfuerzos similares a los de un neumático, para esto utiliza el análisis de capacidad portante que se refiere a la cantidad que una cimentación puede soportar de carga previa a la falla del suelo, que se puede generar en los cimientos, y fue propuesta inicialmente por Terzaghi en 1943 con una propuesta para cimientos con un nivel freático muy profundo o despreciando el mismo.

Sin embargo, los suelos poseen propiedades complejas que tornan el estudio mecánico del suelo complicado por lo que para realizar este análisis en la ingeniería geotécnica se ha optado por proponer unas propiedades ideales para el suelo como que el material será completamente lineal, será idealmente elástico y deformable, es homogéneo a lo largo del estrato estudiado y deben ser medibles en una estratigrafía adecuada para el estudio, finalmente por simplificación del estado global del estrato se asume un terreno horizontal plano con una amplitud de estudio “infinita” para idealizar completamente el estrato.

Para el análisis ideal de este tipo de carga inmediata previa al fallo global del sistema se ha propuesto la teoría de elasticidad, de la cual en la actualidad se usa el modelo propuesto por Vesic en 1975, para esto la capacidad portante es una expresión de resistencia Mohr-Coulomb que relaciona ambas teorías y propone la siguiente ecuación para una cimentación corrida:

$$q_{ult} = c' * (N_q - 1) * \cot\phi' + q * N_q + \gamma * B * (N_q - 1) * \tan\phi'$$

De donde las variables representan:

$q_{ult}$  = Capacidad ultima

$c'$  = Cohesion efectiva

$q$  = Sobrecarga externa

$q = \gamma_1 * D_f$ ,  $\gamma_1$  = peso unitario de suelo externo,  $D_f$  =  
profundidad de la cimentacion desde la superficie de terreno

$\gamma$  = Peso unitario del suelo debajo al cimientto

$B$  = Ancho de cimientto

$\phi'$  = Angulo friccionante interno de suelo

$N_q, N_c, N_\gamma$  = Factor de capacidad portante

Para cimentaciones cuadradas se resume entonces la ecuación de capacidad ultima de carga como (Prandtl, 1920):

$$q_{ult} = 1.3 * c' * N_c + q * N_q + 0.4 * \gamma * B * N_\gamma$$

Para cimentaciones circulares en cambio

$$q_{ult} = 1.3 * c' * N_c + q * N_q + 0.3 * \gamma * B * N_\gamma$$

Por lo que se realiza una generalización de la capacidad de carga ultima en una ecuación general expresada por Bowles en 1988 como:

$$q_{ult} = c' * N_c * F_{cs} * F_{cd} * F_{ci} + q * N_q * F_{qs} * F_{qd} * F_{qi} + \frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma * F_{\gamma s} * F_{\gamma d} * F_{\gamma i}$$

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s} = \text{Factores de forma}$

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d} = \text{Factores de profundidad}$

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i} = \text{Factores de inclinacion de carga}$

Por otro lado, los factores de capacidad portante se analizan de un límite superior e inferior como se denota posteriormente.

Para los factores de forma las ecuaciones que lo describen son:

$$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) * \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$$

$$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) * \tan\phi'$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 * \left(\frac{B}{L}\right)$$

Para los factores de profundidad descritos se utilizan las ecuaciones de:

Si  $\frac{D_f}{B} \leq 1$ , para  $\phi' = 0$

$$F_{cd} = 1 + 0.4 * \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$$F_{qd} = 1$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Para  $\phi' > 0$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c * \tan\phi'}$$

$$F_{qd} = 1 + 2 * \tan\phi' * (1 - \text{sen}\phi')^2 * \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Para  $\left(\frac{D_f}{B}\right) > 1$ ,  $\phi' = 0$

$$F_{cd} = 1 + 0.4 * \tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$$F_{qd} = 1$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Para  $\phi' > 0$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c * \tan\phi'}$$

$$F_{qd} = 1 + 2 * \tan\phi' * (1 - \text{sen}\phi')^2 * \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Para los factores de inclinación por otro lado se encuentran mediante las ecuaciones

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^o}{90^o}\right)^2$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta^o}{\phi'}\right)$$

La expresión de capacidad portante en su capacidad ultima es definida a partir del segundo teorema de teoría de plasticidad evaluado mediante un límite superior en la carga de colapso, que corresponde a un modelo cinéticamente posible, permitiendo hallar una solución para dos de los factores de capacidad portante  $N_c$  y  $N_q$  para materiales con un peso ideal a un ángulo  $\alpha$  del estrato en su centro comparada con la horizontal propuesto por Reissner en 1924.

En cambio, para factor de capacidad portante  $N_\gamma$ , los valores pueden ser tomados de un gran rango de características según diversos autores, así como regulaciones al análisis de suelo según la región de estudio o diferentes propiedades por la condición del suelo al momento de estudio.

Límite superior, es cualquier mecanismo de un cuerpo sometido a una deformación con un grado de disipación de energía que se busca equiparar a un grado de fuerzas externas, esto se realiza estimando un colapso en el rango plástico de la zona plástica del suelo que será mayor que el verdadero colapso por carga en el suelo.

Normalmente los análisis se realizan usando el modelo convencional, en el que se analiza un muro sometido a la presión del suelo, y se considera una superficie rígida del suelo de análisis y se analiza a dos cuerpos que son igual de rígidos, pero en uno de los dos materiales que en este caso es el suelo el elemento de análisis se desliza relativamente, con respecto al muro, en su superficie.



Ilustración 4: Desplazamiento en suelo (Azizi, 2009)

Debido a que la zona superficial del suelo se encuentra en movimiento va a poseer una velocidad que se puede relacionar directamente con la ecuación de disipación de energía como:

$$D = \tau du$$

Debido a que las fuerzas internas de fricción y la cohesión de las partículas en la superficie desplazada, debe ser acompañada de una velocidad separada para el análisis por la exigencia de una velocidad tangencial a la superficie de falla.

$$D = \tau du - \sigma dv = (\tau - \sigma \tan \phi) du$$

Y en caso de que  $\tau = 0$  la ecuación se vuelve:

$$D = \sigma \tan \phi du$$

De esta manera si es que se encuentra un mecanismo capaz de igualar el esfuerzo realizado por las cargas externas con la energía disipada por el movimiento de suelo analizado, entonces se expresa que las cargas externas representan un límite superior, que se logra visualizar en la siguiente imagen:

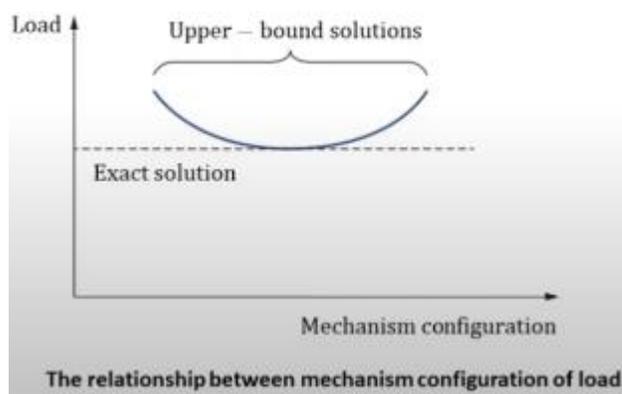


Ilustración 5: Límite inferior de capacidad portante (Feng et al, 2018)

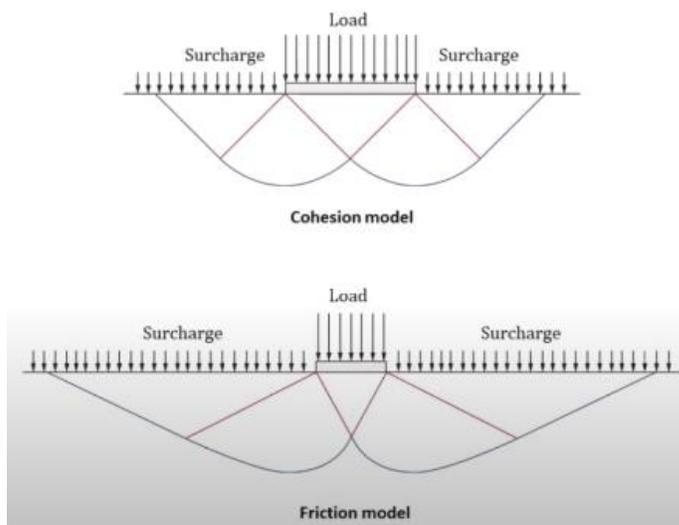
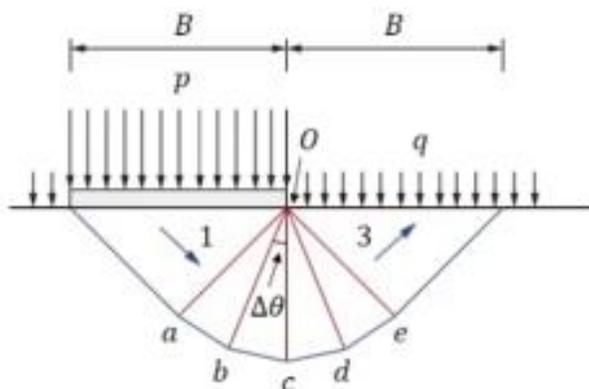


Ilustración 6: Modelo de capacidad portante por cohesión y fricción (Feng et al, 2018)

Esto se analiza para un modelo cohesivo y friccionante, por otra parte, si el análisis se realiza para una cimentación pequeña, en un suelo arcilloso y se considera su colapso, al reconocer que será un efecto

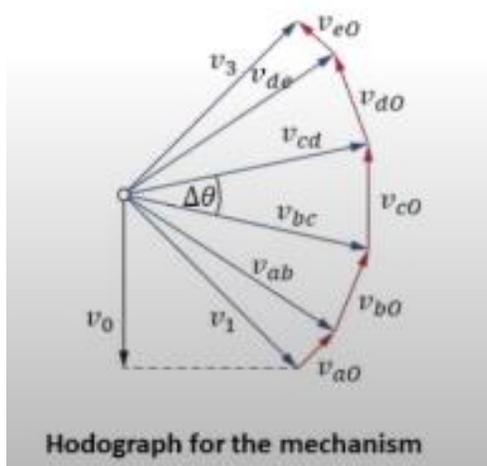
circular con tres diferentes áreas de análisis que se simplifican en triángulos, se escoge el área del centro de la fundación para dividir de manera equitativa en triángulos el área como se presenta:



**Failure mechanism for a shallow foundation on clay**

*Ilustración 7: Criterio de falla para un cimiento delgado (Feng et al, 2018)*

Al poseer un arco con ángulos similares al poseer movimiento se puede calcular las velocidades como vectores correspondientes a los triángulos divididos:



*Ilustración 8: Análisis de velocidades según criterio de falla (Feng et al, 2018)*

Se puede entonces calcular el rango de energía que se va a disipar a lo largo del arco de análisis, para lo que se multiplica la longitud del arco por el esfuerzo sometido al arco y por la velocidad relativa de desplazamiento del estrato:

$$r\Delta\theta * c_u * v$$

Realizando un análisis global de la energía disipada en cada una de las velocidades de análisis se obtiene que:

$$\sum 2rc_u v \Delta\theta$$

A lo que se puede realizar un análisis infinitesimal a la expresión se tiene entonces una integral con un límite de cero hasta un espesor mínimamente infinitesimal relacionado al ángulo:

$$\int_0^{\theta} 2rc_u v d\theta = 2rc_u v \theta$$

Se calcula entonces la expresión y se obtiene:

$$2 \left( \frac{B}{\sqrt{2}} \right) c_u * \sqrt{2} v_o \theta = 2B c_u v_o$$

El rango total simplificado para la energía disipada con un ángulo estimado a 90 grados en radianes se puede expresar la ecuación como:

$$2B c_u v_o + \pi B c_u v_o = (2 + \pi) B c_u v_o$$

Y si se analiza la energía del cimiento como:  $(p - q) B v_o$

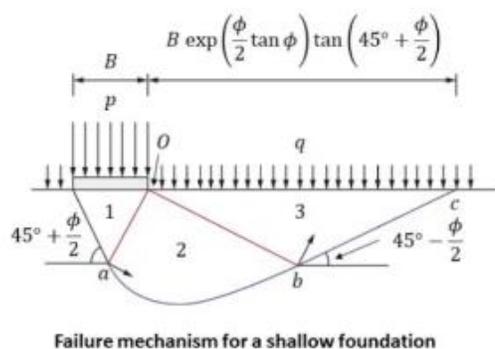
Se reemplaza en la ecuación general de disipación de energía se tiene:

$$(p - q) B v_o = (2 + \pi) B c_u v_o$$

Con esto se analiza entonces el factor  $N_c$  de capacidad portante:

$$N_c = \frac{p - q}{c_u} = (2 + \pi)$$

Por otro lado, para un modelo friccional, con un cimiento con dos zonas rígidas en lugar de una se tiene que:



*Ilustración 9: Mecanismo de falla en un cimiento (Feng et al, 2018)*

Si hay un esfuerzo de 90 grados la energía de disipación asociada es nula:

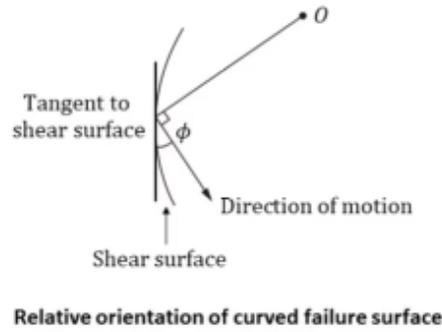


Ilustración 10: Modelo de disipación de energía a una tangente al movimiento (Feng et al, 2018)

Por lo que se puede expresar el ángulo de curvatura como:

$$\tan \phi = \frac{dr}{r d\theta}$$

Si se integra para diferentes ángulos de curvatura o distintos radios de análisis se obtiene la expresión:

$$\int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \int_0^\theta d\theta$$

$$\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) = \theta \tan \phi$$

Y se establece por geometría que:

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi}$$

Se puede calcular la componente de velocidad mayor como:

$$v_o \tan\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2}\right) e^{\frac{\pi}{2} \tan \phi}$$

Y si se iguala a la energía Perdida en el sistema se tiene que:

$$pBv_o = B \left[ q \tan\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2}\right) e^{\frac{\pi}{2} \tan \phi} \right] * \left[ v_o \tan\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2}\right) e^{\frac{\pi}{2} \tan \phi} \right]$$

De esto se despeja y se obtiene el factor  $N_q$  de capacidad portante:

$$N_q = \frac{p}{q} = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) e^{\pi \tan \phi}$$

Además, el límite inferior se establece que, si hay un grupo de fuerzas externas con esfuerzos uniformes en el equilibrio interno y sobrepasan la resistencia de criterio, funcionan como un factor de seguridad y representan un límite inferior de colapso. Si se aplica un esfuerzo constante que se encuentre en equilibrio con el criterio de falla del suelo, se nombra a este análisis el límite inferior.

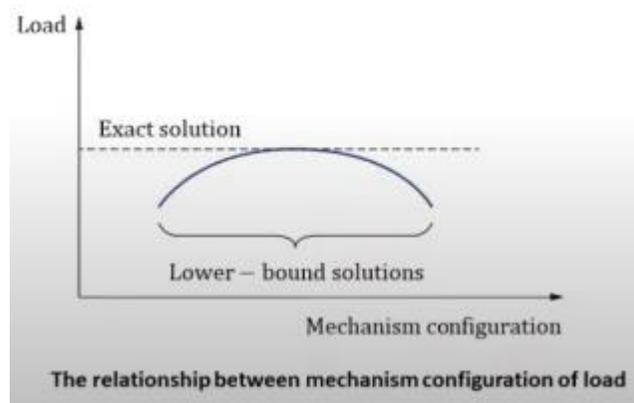


Ilustración 11: Límite superior de capacidad portante (Feng et al, 2018)

Para un modelo de cohesión, se asume un cimiento con tres áreas de análisis, y una carga  $P$  que debe ser aplicada hasta que ocurra el colapso del sistema, como la dirección de los esfuerzos son verticales se propone que gira en torno a un ángulo de 90 grados.

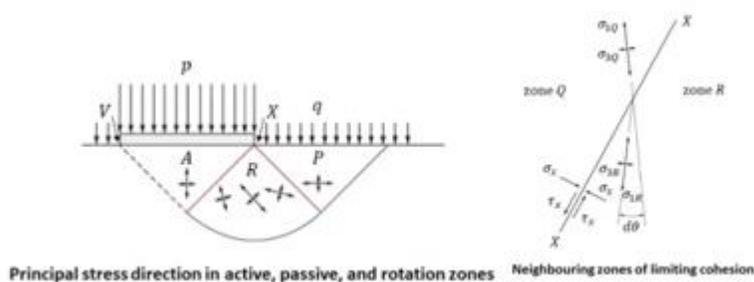


Ilustración 12: Modelo de cohesión para límite inferior (Feng et al, 2018)

Por lo que se realiza un análisis de los esfuerzos mediante círculos de Mohr, en los que la zona Q y R de los esfuerzos principales se encuentran en equilibrio, de donde se expresa que:

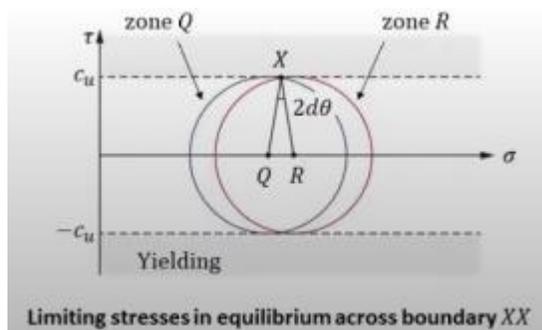


Ilustración 13: Análisis de esfuerzos por círculos de Mohr (Feng et al, 2018)

Para el análisis se propone que la zona R puede desplazarse de manera horizontal de manera arbitraria para el análisis del estrato sometido a diferentes esfuerzos, en el eje sigma. Mediante regla de Seno y reconociendo que el círculo de Mohr R menos Q será igual a la distancia entre ambos ( $ds$ ). Por lo

que si se asume que las consideraciones infinitesimales se harán para distintas distancias se puede estimar mediante una integral:

$$\int_{S_1}^{S_2} ds = \int_0^\theta 2c_u d\theta$$

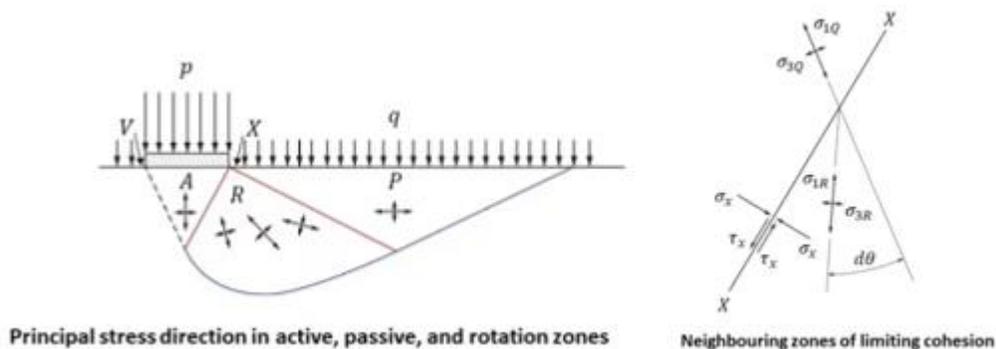
Con límites de integración entre la distancia que existe entre los círculos de Mohr y para la cohesión límites según el ángulo al que difiera en el mismo punto entre ambos radios. Además, si se ubica a 90 grados al ángulo de análisis se obtiene:

$$p = q + \pi c_u + 2c_u = q + (2 + \pi)c_u$$

Consecuentemente se expresa entonces que el factor de capacidad portante  $N_c$  es:

$$N_c = \frac{p - q}{c_u} = (2 + \pi)$$

Por otra parte, para el modelo de fricción se tiene que el esfuerzo aplicado es mayor que en el caso anterior por lo que el área de falla aumenta en dos zonas como en el caso del límite superior:



*Ilustración 14: Modelo de fricción para límite inferior (Feng et al, 2018)*

Se tiene entonces que el círculo de Mohr en una de las dos zonas será mayor que en la otra debido a que no son uniformes como para el caso de cohesión, por lo que al no ser iguales se debe tomar un punto en común para ambos círculos:

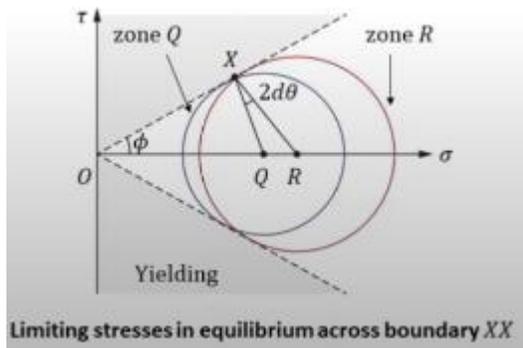


Ilustración 15: Comparación entre diferentes círculos de Mohr por diferencia de esfuerzos (Feng et al, 2018)

Se aplica la regla de los senos para determinar la diferencia de desplazamiento simplificando la expresión:

$$\frac{QR}{\sin QXR} = \frac{QX}{\sin \phi RX} \rightarrow \frac{ds}{\sin 2d\theta} \rightarrow \frac{ds}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} \rightarrow \frac{ds}{2d\theta} = \frac{s \sin \phi}{\cos \phi}$$

A lo que se simplifica a:

$$\frac{ds}{s} = 2 \tan \phi d\theta$$

Si se entrega la ecuación:

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{s} = \int_0^{\theta} 2 \tan \phi d\theta$$

Donde los límites se expresan mediante:

$$\frac{s_2}{s_1} = e^{2\theta \cdot \tan \phi}$$

Y se obtiene la expresión:

$$p = q \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{2\theta \cdot \tan \phi} \rightarrow \frac{p}{q} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{\pi \tan \phi}$$

De donde se expresa entonces el factor de capacidad portante  $N_q$ .

$$N_q = \tan \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2} \right)^2 e^{\pi \tan \phi}$$

Por otra parte, se busca realizar un análisis fotográfico mediante el complemento para el software MATLAB, denominado P.I.V. (Particle Image Velocimeter), que tiene una adaptación para análisis geotécnico del cual surge el nombre de GEOPIV, este complemento se busca utilizar para determinar las

deformaciones ocurridas en el suelo al realizar el procedimiento experimental que se explica en el apartado de protocolo experimental.

El P.I.V. se toma como herramienta para dicho proyecto ya que mediante un registro fotográfico de varios fotogramas realizadas a un mismo punto de análisis en un intervalo de tiempo permite analizar los cambios de velocidades entre un punto y otro mediante un análisis vectorial de cada uno de los píxeles de los fotogramas analizados. El software es capaz de analizar de esta manera los vectores separando cada uno de los fotogramas y sus píxeles creando diferentes capas por cada imagen en intervalos de tiempo y así creando un campo vectorial que después entre todas las imágenes recopiladas otorgan un valor de posiciones diferentes y el software según las diferencias en posición de los campos vectoriales calcula distintas velocidades (White, 2003).

## **DESARROLLO DEL TEMA**

### **-Metodología del Experimento**

A continuación, se presenta el experimento a realizar para determinar las condiciones físicas que ocurren al someter una carga en un modelo estático con propiedades similares a la geometría de un neumático para simular el fenómeno de *washboard*, para esto se realiza una indentación o aplicación de carga sobre un suelo de agregado grueso como es la arena.

Con una fuerza determinada se busca hallar los valores de deformaciones del suelo, producto de una carga axial ejercida, mediante este se busca comparar los resultados obtenidos mediante un análisis teórico por medio de la teoría de capacidad portante previamente detallada, junto a un análisis fotográfico mediante un complemento computacional del software Matlab, que analiza las deformaciones mediante píxeles y desplazamientos referenciales entre distintas imágenes denominado P.I.V (Particle Image Velocimeter).

### **-Materiales**

Los materiales para utilizar en el modelo experimental se muestran a continuación:

- Prensa Universal de velocidades múltiples S215A:

ASPHALT



S215A  
**Universal multispeed load frame,  
 50 kN digital measurement**  
 (Asphalt - Soil)

*Ilustración 16: Prensa de Múltiples Velocidades para celda de carga de 50 kN (Matest, 2022)*

Posee la función de aplicar una carga constante sobre una base dinámica que varía su posición de perpendicular, con cierta velocidad, hacia el vástago o pistón ubicado en la zona superior asegurado a la celda de carga.

- Celda de Carga de 50 KN:



*Ilustración 17: Celda de Carga de 50 kN (Matest, 2022)*

Tiene la función de generar la carga a ser aplicada en la prensa universal de velocidades múltiples S215A.

- Arena:



*Ilustración 18: Estrato de Arena*

Es un pequeño estrato de arena en la que se debe analizar las deformaciones a ocurrir después de aplicar el contacto entre el cilindro y el estrato a una determinada carga.

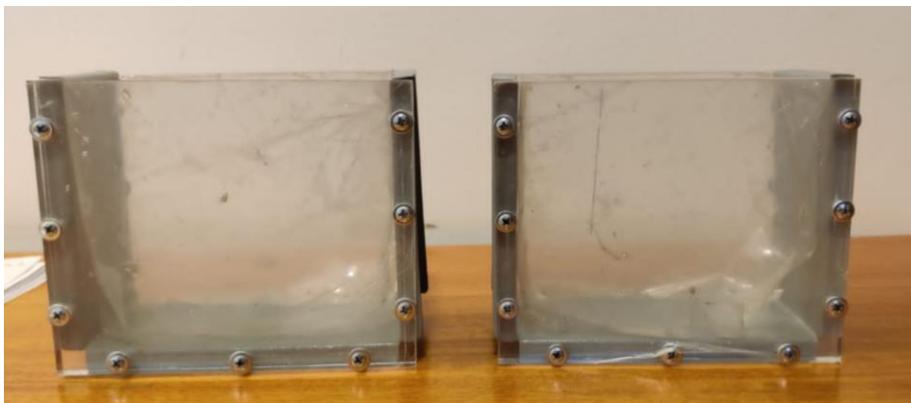
- Cámara Fotográfica Celular:



*Ilustración 19:Foto referencial de cámara (One Plus, 2022)*

Se utiliza para captar las imágenes a lo largo de un tiempo y a gran velocidad de las deformaciones ocurridas en el estrato de suelo.

- Contenedor Experimental de Acrílico y Latón:



*Ilustración 20: Contenedor Experimental*

Cumple la función de confinar el estrato de suelo en un área determinada para el análisis de las deformaciones desde una determinada altura de referencia. Las dimensiones se exponen en el ANEXO #1.

- Vástago:



*Ilustración 21: Vástago*

Se encarga de acoplar las placas de los cilindros, a la prensa universal mediante dos roscas a cada uno de sus extremos. Las dimensiones se exponen en el ANEXO #1.

- Placas:



*Ilustración 22: Placas de Acero para Acople*

Son las encargadas de juntar los cilindros al vástago, mediante dos pernos sujetos al cilindro y una guía donde se enrosca uno de los extremos del vástago. Las dimensiones se exponen en el ANEXO #1.

- Cilindro:



*Ilustración 23: Cilindros de Acero vista superior*



*Ilustración 24: Cilindros de Acero vista frontal*

Es el encargado de aplicar la carga sobre el suelo debido a su similitud geométrica con la parte inferior de un neumático, por lo que se utiliza la mitad de los cilindros, que deben acoplarse a las placas y por consiguiente al vástago. Para el presente experimento se utilizará diferentes diámetros de cilindros sobre el estrato, las dimensiones de cada cilindro se exponen en el ANEXO #1.

- Software (MATLAB, P.I.V):



*Ilustración 25: Software MATLAB (Matlab, 2022)*

Mediante el software de MATLAB y el complemento P.I.V, se busca determinar las deformaciones ocurridas en el estrato de suelo mediante un análisis fotográfico.

## **-Requerimientos**

Previamente, a la realización del ensayo experimental se debe asegurar un estrato de suelo con un tamiz determinado para el análisis de deformaciones. Para esto se requiere que la arena se encuentre adecuadamente tamizada para poseer una homogeneidad en el estrato, por lo que se debe garantizar un agregado grueso bien gradado con un coeficiente de uniformidad mayor a 6 y un coeficiente de gradación entre 1 y 3 (Das, 2015).

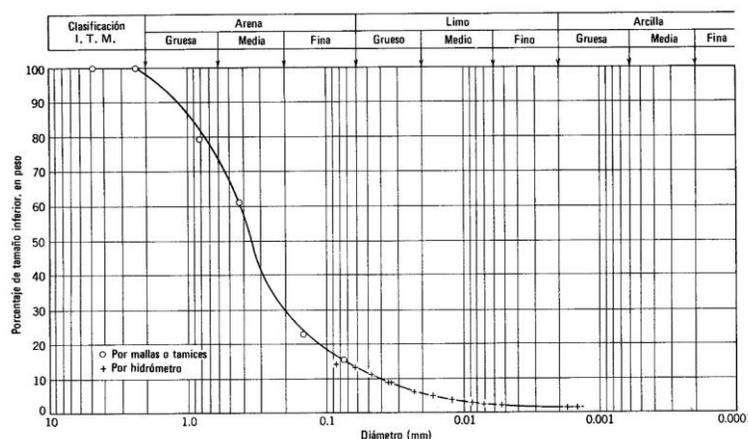


Ilustración 26: Curva Granulométrica Referencial (Das, 2015)

$$Coeficiente_{uniformidad} = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D60: Diámetro del 60% más fino en la curva granulométrica.

D10: Diámetro del 10% más fino en la curva granulométrica

$$Coeficiente_{gradación} = \frac{D_{30}^2}{D_{60} + D_{10}}$$

Por otro lado, la celda de carga, y la prensa de múltiples velocidades deben estar correctamente colocadas y ensambladas entre sí, así como un eje superior nivelado en la celda de carga, para así garantizar una fuerza axial en un solo punto del vástago y perpendicular al eje superior del estrato de suelo a analizar.

Además, se debe evitar movimientos externos que perturben el análisis fotográfico del estrato de suelo, eso quiere decir que el punto de referencia en el que se ubica la cámara fotográfica de estudio debe ser fijo y se debe evitar cualquier rotación o traslación de igual manera en la cámara fotográfica.

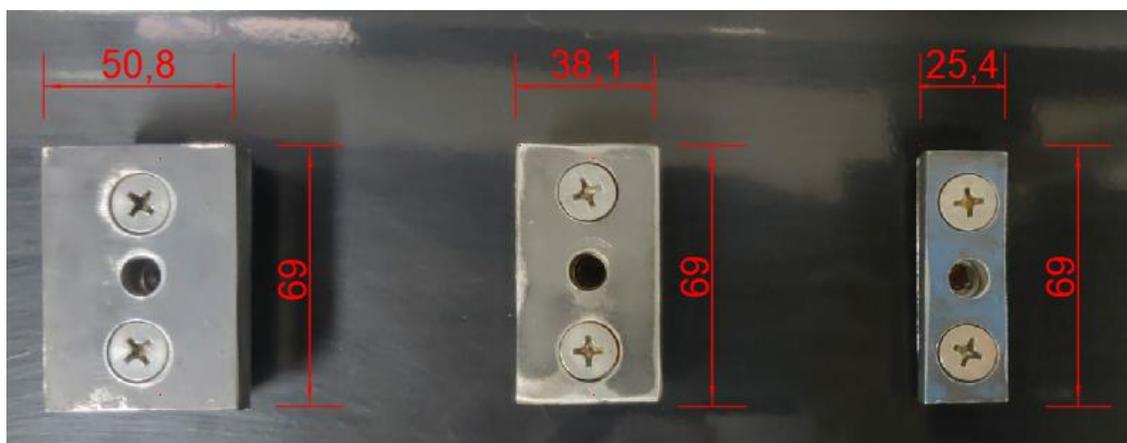
### -Método Experimental

1. Se debe ensamblar la prensa, esto quiere decir que se debe ensamblar la celda de carga a la prensa.



*Ilustración 27: Acople vástago con celda de carga*

2. Se debe juntar los cilindros con sus respectivas placas según iguales dimensiones que se justifican en el ANEXO #1, y se debe juntar las placas al vástago.



*Ilustración 28: Placas y cilindros ensamblados*

3. Se requiere ensamblar el vástago a la celda de carga junto al cilindro y su respectiva placa  
*Nota: Se debe alinear el cilindro a la parte frontal de la prensa por lo que se propone utilizar rodela para asegurar el cilindro a la prensa y al mismo tiempo este alineado.*



*Ilustración 29: Ensamblaje entre vástago y cilindro con placa*

4. Se necesita que la prensa se encuentre en una posición adecuada para el proceso de aplicación de carga por lo que se debe alinear a la base inferior de la prensa.
5. Se asegura que la distancia sea optima entre la base inferior de la prensa, respecto al vástago ensamblado en la celda de carga para el correcto contacto entre el cilindro y el suelo.
6. Se coloca el estrato de suelo a una altura determinada en la contenedor de análisis.



*Ilustración 30: Estrato de Suelo en contenedor*

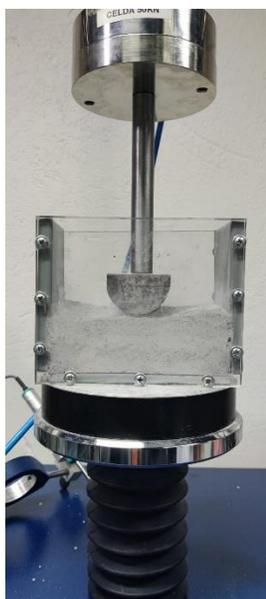
7. Se ubica el contenedor sobre la base móvil de la prensa de múltiples velocidades.
8. Se ajusta y se alinea el contenedor al vástago junto al cilindro para la correcta indentación y penetración de carga, y así evitar cualquier contacto entre el cilindro y la contenedor.

*Nota: El contacto que se prevé es entre el cilindro y el estrato de suelo*



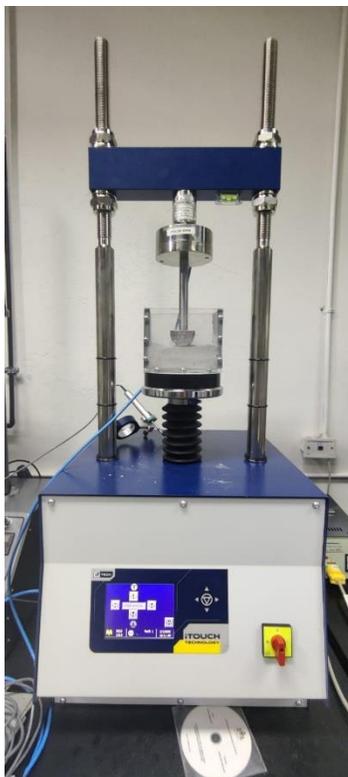
*Ilustración 31: Modelo experimental*

9. Se ajusta la cámara fotográfica alineada y fija en relación con el contenedor apuntando hacia un mismo punto del estrato de suelo, asegurando que el movimiento de la cámara respecto a dicho punto sea nulo.



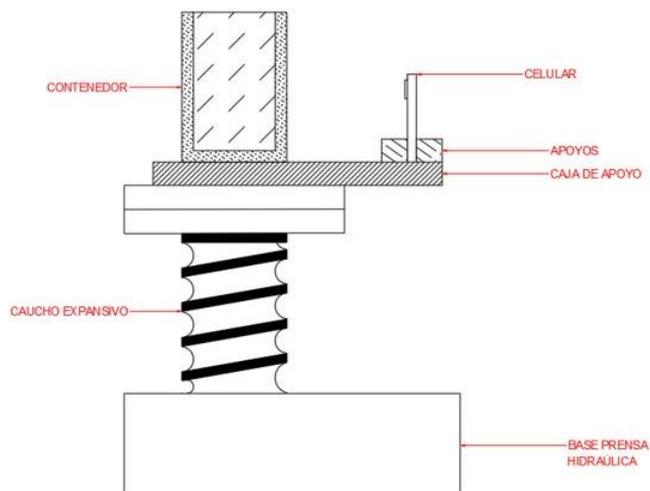
*Ilustración 32: Aplicación de carga mediante cilindro a estrato de suelo*

10. Se procede a encender la cámara fotográfica y la prensa para seguidamente aplicar el cilindro sobre el suelo a una velocidad determinada.



*Ilustración 33: Encendido de Prensa*

11. Mediante la cámara se toman distintos fotogramas por segundo, mientras la prensa se va acercando al cilindro, se debe registrar de igual manera todo el contacto realizado entre el suelo y el cilindro.

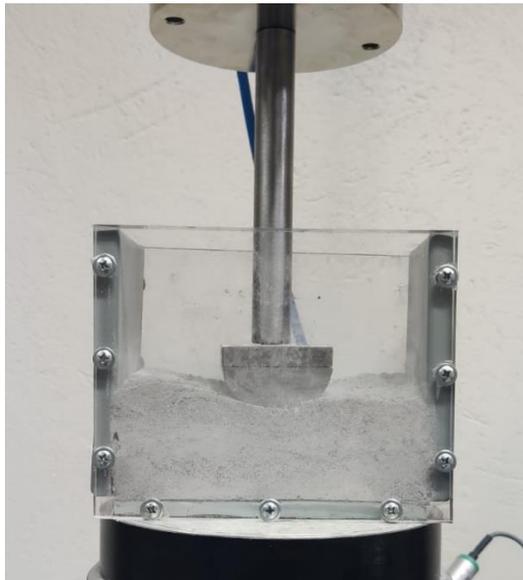


*Ilustración 34: Modelo Referencial de toma de datos*

12. Se toman fotografías de la deformación del suelo hasta observar una indentación del cilindro sobre el suelo.



*Ilustración 35: Imagen previa al contacto entre cilindro y estrato de suelo*



*Ilustración 36: Deformación del suelo posterior al contacto entre cilindro y estrato de suelo*

13. Se repite el procedimiento para los distintos diámetros de cilindro.

#### **-Método Interpretación de Datos**

1. Se requiere el complemento P.I.V. para MATLAB.
2. Se importan las imágenes una vez el complemento esté funcionando en MATLAB
3. Se selecciona el comando *PAIRWISE*, y se escoge todos los fotogramas del archivo importado en el software
4. Se toma el comando *DRAW MASK FOR CURRENT FRAME*. Se delimita el contorno del

- espacio a analizar por el software y se aplica la opción *MASK*.
5. Mediante la barra de herramientas se selecciona *IMAGE SETTINGS*, y a continuación la opción *IMAGE PRE-PROCESSING*.
  6. Con la opción escogida previamente se modelan los fotogramas del archivo importado, y se limpian cualquier imperfección de las imágenes o píxeles que interfieran con el análisis adecuado del fotograma.
  7. Se escoge el comando *ANALYSIS*, donde se abre la opción *PIV SETTINGS*, o se puede utilizar el comando predeterminado *SUGGEST SETTINGS*. Mediante mejor equipamiento fotográfico se puede escoger diferentes comandos que aseguran un mejor análisis.
  8. Para el presente experimento se utiliza el comando predeterminado otorgado por el software.
  9. Se añade con el comando *ANALYZE CURRENT FRAME*, para determinar el campo vectorial, a partir de los píxeles para determinar el sentido de los vectores en el fotograma de estudio.
  10. Mediante el comando previamente escogido *ANALYSIS*, se escoge la opción *ANALYZE ALL FRAMES*, se ejecuta el programa para determinar el resultado por cada uno de los fotogramas.
  11. Se debe calibrar mediante una distancia previa entre puntos por medio del comando *CALIBRATION*, y se asigna un punto de origen para las coordenadas.
  12. Se validan los datos ubicados en el archivo importado mediante el comando *POST-PROCESSING*, se toma la opción *IMAGE BASED VALIDATION*, y permite obviar vectores despreciables para el análisis.
  13. Se puede escoger de igual manera la opción *VELOCITY BASED VALIDATION*, con *SELECT VELOCITY LIMITS*, esto con el fin de ubicar todos los vectores de velocidad para el fotograma de interés y el área delimitada previamente para todos los fotogramas.
  14. Seguidamente para visualizar los resultados se escoge el comando *PLOT*, con las opciones otorgadas por el software se puede analizar la velocidad de los vectores y de las partículas con las cuales se puede determinar un desplazamiento que para el análisis del presente experimento representa las deformaciones.
  15. Finalmente, si se desea visualizar los resultados en otro tipo de software se puede exportar a diferentes formatos.

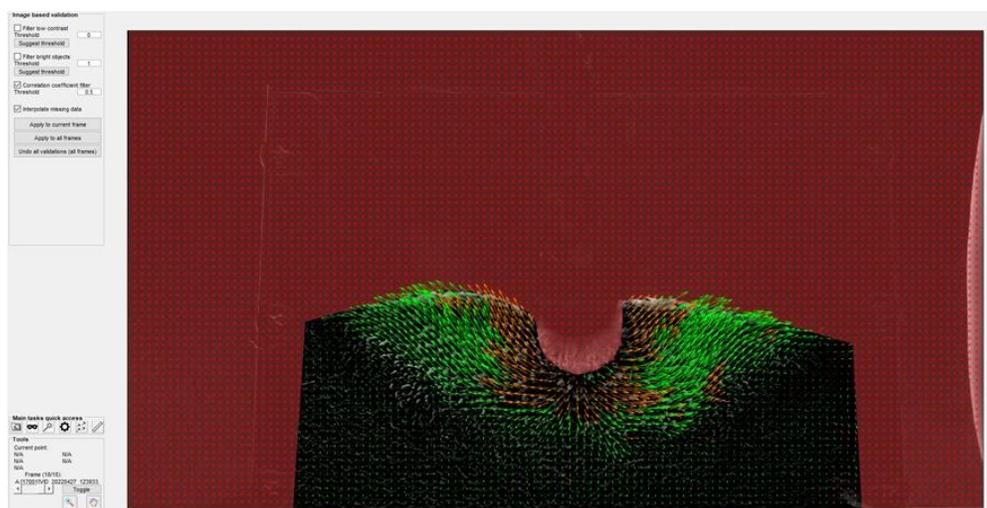
## **Resultados**

## -Resultados Experimentales

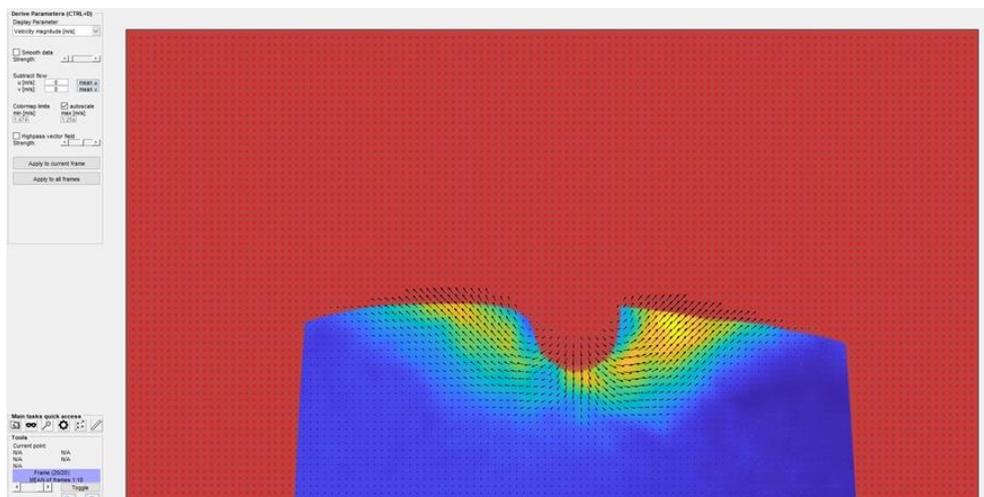
Se realiza el análisis de los resultados para el cilindro de 25.4 mm, mediante el software de P.I.V. en el que se determina entonces de la siguiente manera los resultados por cada fotograma:



*Ilustración 37: Determinación de área de análisis*



*Ilustración 38: Vectores de velocidad de muestra de suelo*



*Ilustración 39: Resultados Finales mediante P.I.V.*

Se halla entonces por cada uno de los fotogramas la deformación para una partícula de la muestra de suelo, y las cargas, así como los esfuerzos aplicados para cada uno de los fotogramas donde se tiene que:

# Frame	y [m]	dy [m]	t	dy [mm]	Deformaciones	Cargas	Esfuerzo kN/m <sup>2</sup>
1	-0.05	0.0000	0.03	0.00	0.00	0.00	3.62
1000	-0.05	0.0000	33.47	0.00	0.00	0.01	25.36
2000	-0.05	0.0000	66.93	0.00	0.33	0.05	92.39
3000	-0.05	0.0000	100.40	0.00	1.03	0.07	123.19
4000	-0.05	0.0022	133.87	2.20	1.74	0.09	166.67
5000	-0.05	0.0022	167.34	2.20	2.44	0.10	172.10
6000	-0.05	0.0043	200.80	4.30	3.14	0.11	201.09
7000	-0.05	0.0043	234.27	4.30	3.85	0.11	192.03
8000	-0.05	0.0043	267.74	4.30	4.55	0.10	186.59
9000	-0.05	0.0043	301.20	4.30	5.25	0.12	222.83
10000	-0.05	0.0065	334.67	6.50	5.95	0.12	221.01
11000	-0.05	0.0065	368.14	6.50	6.66	0.12	215.58
12000	-0.05	0.0065	401.61	6.50	7.36	0.13	235.51
13000	-0.04	0.0086	435.07	8.60	8.06	0.15	262.68
14000	-0.04	0.0086	468.54	8.60	8.76	0.13	226.45
15000	-0.04	0.0107	502.01	10.70	9.47	0.12	211.96
16000	-0.04	0.0107	535.48	10.70	10.17	0.13	237.32
17000	-0.04	0.0107	568.94	10.70	10.87	0.15	275.36
18000	-0.04	0.0107	602.41	10.70	11.58	0.23	407.61

*Tabla 1: Deformaciones y Esfuerzos por cada Frame*



Ilustración 40: Esfuerzo vs Deformación Cilindro 25.4mm

#### -Resultados Teóricos

Se realiza una medición de la granulometría utilizada para la muestra de suelo utilizada en el ensayo donde se obtuvieron las siguientes propiedades del suelo con sus respectivos porcentajes que pasan por cada uno de los tamices en un procedimiento de tamizado, así como el cálculo de los coeficientes de uniformidad y de gradación del suelo:

$$Cu = \frac{D60}{D30} = 1.54$$

$$Cc = \frac{D30^2}{D60 * D10} = 1.41$$

GRADACION MECANICA						
TAMIZ	ABERTURA [mm]	PESO RETENIDO [g]	PESO ACUMULADO O [g]	RETENIDO PARCIAL [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	QUE PASA [%]
N°8	2.36	320.56	320.56	64.25%	64.25%	35.75%
N°16	1.18	31.38	351.94	6.29%	70.54%	29.46%
N°30	0.6	105.00	456.94	21.05%	91.59%	8.41%
N°50	0.3	33.26	490.20	6.67%	98.26%	1.74%
N°200	0.105	4.35	494.55	0.87%	99.13%	0.87%
Bandeja	0	4.35	498.90	0.87%	100.00%	0.00%
<b>TOTAL</b>		<b>498.90</b>			<b>COEF. DE UNIFORMIDAD</b>	<b>1.54</b>

ERRO  
R

0.22%

COEF. DE  
CURVATURA

1.41

Tabla 2: Análisis Granulométrico

Se presenta entonces la curva granulométrica en función de la abertura de tamiz utilizada para el porcentaje que pasa cada uno de los tamices, se puede observar que el tamaño de las partículas se encuentra entre 0.1 a 2.4 mm, lo que muestra que el suelo puede estar considerada entre una arena gruesa o una grava fina (Ibañez, 2008):

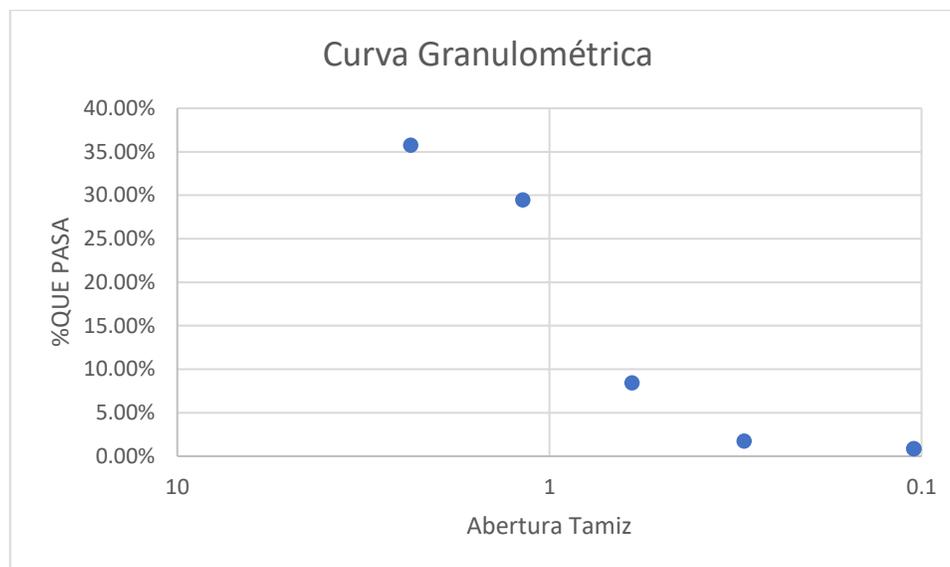


Ilustración 41: Curva Granulométrica

De igual manera, se miden las propiedades físicas de la muestra de suelo a estudiar para poder determinar el peso específico del suelo, para esto se mide el volumen y peso de la muestra, se divide el peso sobre el volumen y se obtiene entonces el peso específico:

$$\gamma = \frac{V}{W} = 18.70 \frac{kN}{m^3}$$

PESO ESPECÍFICO SECO		
V	250.00	ml
V	0.00025	m <sup>3</sup>
W	476.80	g
W	0.48	kg
W	0.00	kN
<b>gamma</b>	<b>18.70</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>

Tabla 3: Peso Específico Seco

A continuación, se realiza el análisis de capacidad portante para esto se debe establecer el área de contacto que existirá entre el cilindro y la muestra del suelo al instante de contacto, por lo que se

miden distintos anchos para el cilindro y se realiza una medición para el área mínima de contacto y el área máxima de contacto en la que se promedia para cada una de las áreas.

Se realizan las mediciones mediante una muestra de tinta aplicada sobre el cilindro en la zona intermedia, aplicada sobre una cartulina y posteriormente sobre un fomi, hasta que se marque la tinta y un área del cilindro, se mide entonces para el área mínima los valores de la cartulina y para el área máxima los valores del fomi. Se muestra a continuación las respectivas medidas:

CILINDRO	MEDIDA ÁREA MÍNIMA			MEDIDA ÁREA MÁXIMA		
	MIN	MAX	PROMEDIO 1 (m)	MIN	MAX	PROMEDIO 2 (m)
CILINDRO 25.4 mm	0,011	0,005	0,008	0,018	0,022	0,02

*Tabla 4: Medidas Experimentales Área de Contacto*

Se debe aclarar que se realiza una medida en campo del ángulo de fricción de la muestra de suelo estudiada, de donde se obtuvo que el ángulo es igual a 38,65 °.



*Ilustración 42: Medida de ángulo de fricción*

Se calcula entonces la capacidad portante para diferentes ángulos de fricción teóricos y el experimental que sería, 35°, 37°, 38,65°, 39°. De donde se tiene la ecuación de capacidad portante:

$$qu = c'NcFcsFcdFci + qNqFqsFqdFqi + \frac{1}{2}\gamma BN\gamma F\gamma sF\gamma dF\gamma i$$

Debido a que para el análisis en cuestión no se consideran los efectos de cohesión ni los efectos de esfuerzo efectivo, la ecuación se simplifica a:

$$qu = \frac{1}{2}\gamma BN\gamma F\gamma sF\gamma dF\gamma i$$

De igual forma, no se considera ni los factores de profundidad al ser un análisis superficial, ni los factores de inclinación por ser una aplicación de carga recta, ni los factores de forma debido a que se asume como una zapata corrida, donde entonces se asumen a todos los factores como iguales a uno y se simplifica la ecuación a:

$$qu = \frac{1}{2} \gamma N \gamma * B$$

Se calcula la capacidad portante para cada uno de los ángulos de fricción, donde el ancho del cilindro se toma para los dos promedios y los factores de carga varían según el ángulo de fricción utilizado:

CAPACIDAD PORTANTE PARA DISTINTOS ANGULOS DE FRICCION										
ANCHO	FACTORES DE CARGA					30	35	37	38,66	39
B (m)	Nr1	Nr2	Nr3	Nr4	Nr5	Q1 (kN/m2)	Q2 (kN/m2)	Q3 (kN/m2)	Q4 (kN/m2)	Q5 (kN/m2)
0,008	22,4	48,03	66,19	87,11	92,25	1,68	3,59	4,95	6,52	6,90
0,02	22,4	48,03	66,19	87,11	92,25	4,19	8,98	12,38	16,29	17,25

Tabla 5: Capacidad Portante Distintos Ángulos de Fricción

Se presentan los resultados de capacidad portante obtenidos en la siguiente gráfica:

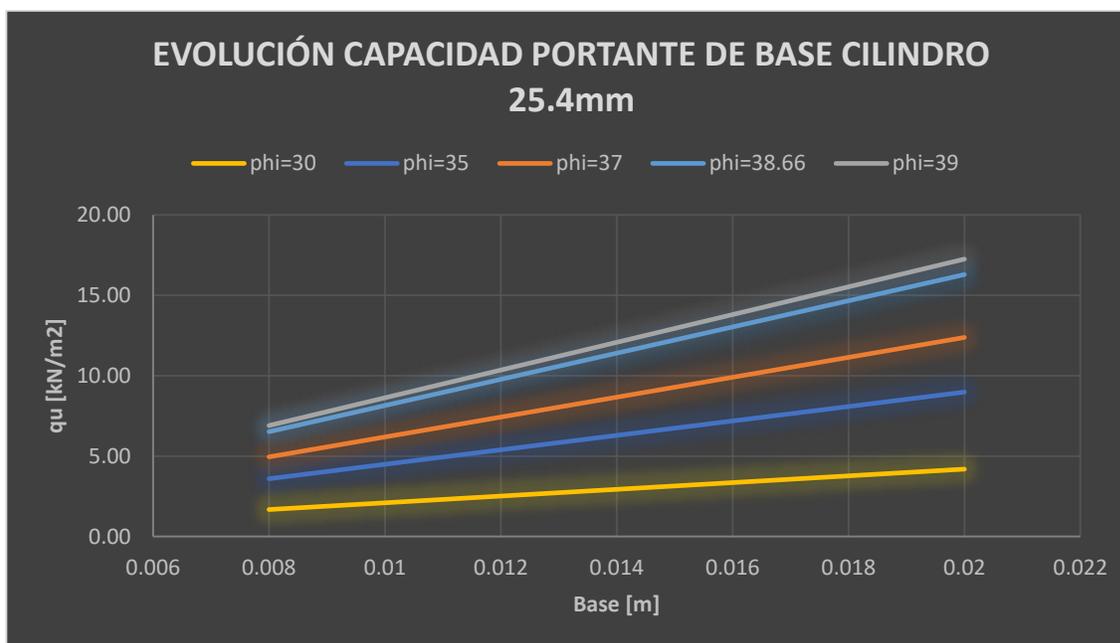


Ilustración 43: Evolución de Capacidad Portante

#### -Resultados Finales

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos por medio de la ecuación de capacidad portante con los obtenidos por medio de P.I.V., donde se compara para un fotograma en específico el área en el instante de contacto según el tiempo al que ocurre el fotograma con su respectivo esfuerzo de donde se tiene que para dos diferentes fotogramas los siguientes valores:

# Frame	B [m]	Y [m]	Dy [m]	t	Dy [mm]	Dy corregido	q	kN/m2
2000	0.03	-0.05	0.00	66.93	0.00	0.33	0.05	24.58

8000	0.04	-0.05	0.00	267.74	4.30	4.55	0.10	37.87
------	------	-------	------	--------	------	------	------	-------

Tabla 6: Cargas y Deformaciones para Fotogramas

Las deformaciones ocurridas en el fotograma descrito son tomadas como la altura de desplante que posee el cilindro para el área determinada por lo que se debe medir entonces nuevamente la ecuación portante tomando en cuenta el valor de desplante es decir que se debe así mismo calcular los factores de carga para el desplante adicionado a la ecuación de capacidad portante, entonces se tiene la ecuación como:

$$qu = \frac{1}{2} \gamma N \gamma * B + D y * B * N q$$

Se utilizan los factores de carga según el ángulo de fricción a utilizar, y se calcula la capacidad portante para el nuevo ancho del cilindro analizado en cada uno de los fotogramas:

CAPACIDADES PORTANTES PARA DISTINTOS ANGULOS DE FRICCION (kN/m2)															
ANCH O	FACTORES DE CARGA										30	35	37	38.66	39
	B	Nr 1	Nr2	Nr3	Nr4	Nr5	NQ 1	NQ 2	NQ 3	NQ 4	NQ 5	Q1	Q2	Q3	Q4
0.030	22. 4	48.0 3	66.1 9	87.1 1	92.2 5	18. 4	33. 3	42.9 2	48.0 3	55.9 6	6.41	13.71	18.88	24.79	26.29
0.039	22. 4	48.0 3	66.1 9	87.1 1	92.2 5	18. 4	33. 3	42.9 2	48.0 3	55.9 6	9.82	20.54	28.05	36.19	38.76

Tabla 7: Capacidad portante para distintos ángulos de fricción

Se compara entonces la diferencia que existe entre la capacidad portante calculada con la capacidad portante medida con P.I.V. con la siguiente ecuación para el ángulo de 38,65 °:

$$\%Error = \frac{Capacidad Portante Calculada - Capacidad Portante Medida}{Capacidad Portante Calculada} \times 100\%$$

Se resumen las ecuaciones con las respectivas capacidades portantes y el error porcentual comparado entre la Qu Experimental con la Qu teórica de un ángulo de 38,65 °:

RESULTADOS FINALES									
CILINDROS	FRAME	BASE [m]	Qu TEÓRICO ANGULOS DE FRICCION [kN/m2]					Qu EXP. [kN/m2]	%Error
			30	35	37	38.66	39		
C1 d=25.4mm	2000	0.030	6.41	13.71	18.88	24.79	26.29	24.58	1%
	8000	0.039	9.82	20.54	28.05	36.19	38.76	37.87	5%

Tabla 8: Resultados Finales

Finalmente, se obtiene como resultados para un fotograma 2000 un 1% de error y para un fotograma de 8000 un 5% de error, que son fotogramas cercanos al punto de falla.

## CONCLUSIONES

Se puede concluir entonces que la correlación entre los esfuerzos experimentales y teóricos a partir del ensayo realizados son menores al 5% lo que demuestra que se puede considerar a la ecuación de capacidad portante como un criterio valido para determinar los esfuerzos en el momento de falla del suelo de un elemento con forma de cilindro, lo que representa un previo análisis para el fenómeno de washboard y una futura forma de analizar el efecto de este.

De manera específica se establece que los fotogramas 2000 y 8000 poseen un bajo porcentaje de error debido a la cercanía con el momento de falla al realizar el análisis fotográfico, lo que puede llegar a la conclusión de que esto se debe a que mientras el suelo se encuentre posterior al momento de falla la ecuación de capacidad portante no es óptima para realizar este análisis.

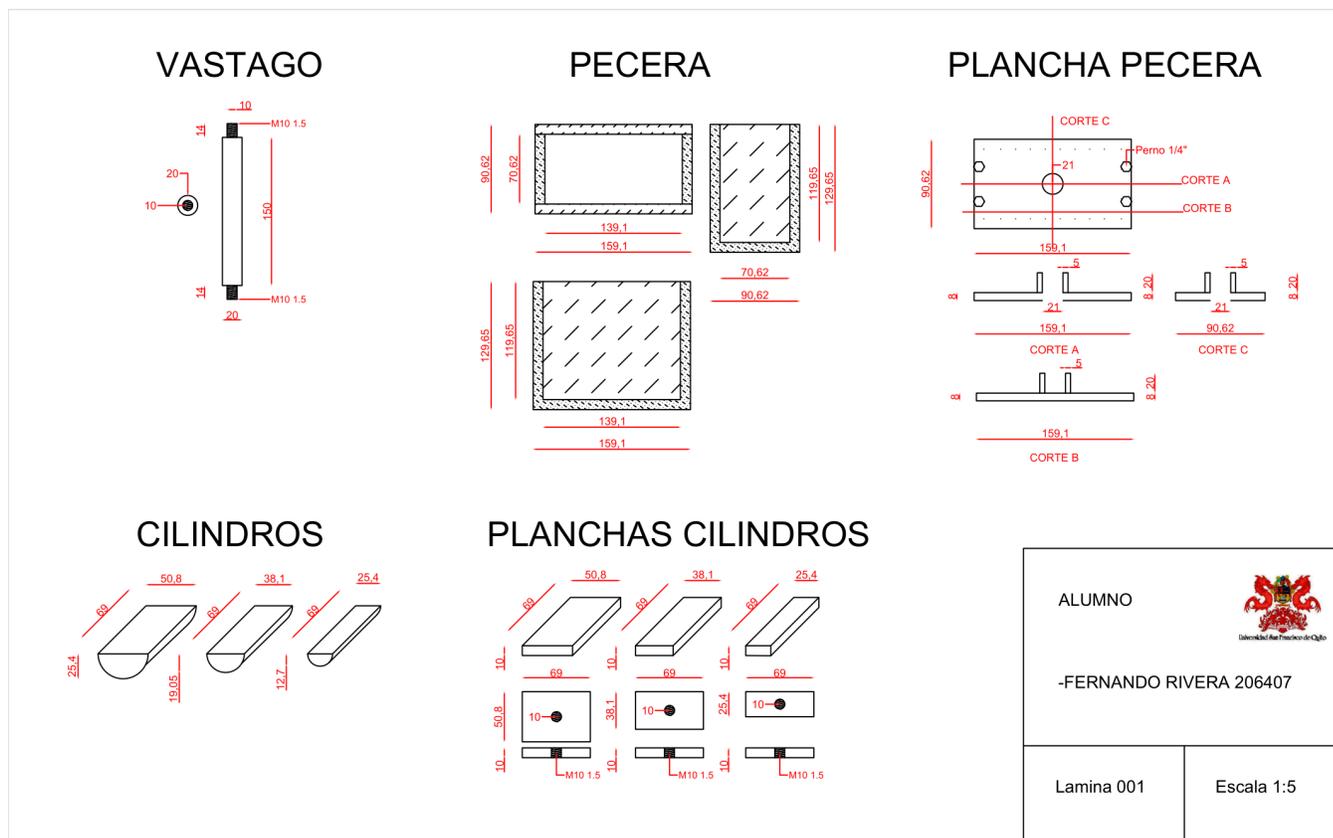
Finalmente se concluye, que el presente proyecto puede ser un gran aporte al momento de determinar los esfuerzos al momento de falla que se genera en la aplicación de carga de los vehículos sobre las vías terciarias o no pavimentadas, y generar una aproximación a una futura solución para solucionar el fenómeno de *washboard effect* y así reducir los problemas de seguridad que ocurren frente a este efecto en vías no pavimentada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azizi, F. (2009). *Applied Analyses in Geotechnics (English Edition)* (1.<sup>a</sup> ed.). Spon.
- Banco de Desarrollo de America Latina. (2020). *ANÁLISIS DE INVERSIONES EN EL SECTOR TRANSPORTE TERRESTRE INTERURBANO LATINOAMERICANO A 2040*. Corporación Andina de Fomento. Recuperado 1 de marzo de 2022, de [https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1537/Ecuador\\_Analisis\\_de\\_Inversiones\\_en\\_el\\_Sector\\_de\\_Transporte\\_Interurbano\\_Terrestre\\_Latinoamericano\\_al\\_2040.pdf?sequence=14&isAllowed=y](https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1537/Ecuador_Analisis_de_Inversiones_en_el_Sector_de_Transporte_Interurbano_Terrestre_Latinoamericano_al_2040.pdf?sequence=14&isAllowed=y)
- Clifton, C. S. (2022, 5 marzo). *Fighting Washboard Gravel Roads*. Clifton. <https://www.southernrockiesnatureblog.com/2019/08/the-county-road-and-bridge-department.html>
- Das, B. M. (2014). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4.<sup>a</sup> ed.). Cengage Learning.
- Feng, Z., Chen, H., Xia, C., Li, S., Cai, J., & He, J. (2018). Prediction of bearing capacity of pile foundation in karst area based on model of metabolic GM (1,1). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 189, 042012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/4/042012>
- González, A. (2016). *CALCULO SIMPLIFICADO DE CAPACIDAD PORTANTE DE CIMIENTOS SUPERFICIALES EN LADERA* (N.º 1). ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA. [https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer\\_ent/calculo\\_simplificado\\_capacidad\\_portante.pdf](https://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/calculo_simplificado_capacidad_portante.pdf)
- Hewitt, I. J. (s. f.). *Granular and fluid washboards* | *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge Core. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/granular-and-fluid-washboards/BB0FBD60E7E15A984897AFE32C4883D7>
- Ibáñez, J. J. (2008, 1 noviembre). *Clasificación de las Partículas Minerales del Suelo por Tamaño*. Un Universo invisible bajo nuestros pies. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/11/01/105541>
- Kurtze, D. (2000, 20 septiembre). *THE GENESIS OF WASHBOARD ROADS*. Worldscientific. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S0217979201007737>
- Matest. (2022). *Universal Multispeed Load Frame*. Matest.Com. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://www.matest.com/en/product/s215a-universal-multispeed-load-frame>
- OnePlus. (2022). *OnePlus 8T*. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.oneplus.com/es/8t/specs>
- Percier, B. (2013, 17 enero). *Modeling a washboard road: From experimental measurements to linear stability analysis*. Researchgate. Recuperado 1 de marzo de 2022, de [https://www.researchgate.net/publication/235627602\\_Modelling\\_Washboard\\_Road\\_from\\_experimental\\_measurements\\_to\\_linear\\_stability\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/235627602_Modelling_Washboard_Road_from_experimental_measurements_to_linear_stability_analysis)
- Physics. (2013, 17 enero). *The Physics of Rough Roads*. <https://physics.aps.org/articles/v6/s11>

- Quesada, L. (2017). *Determinación de la capacidad de carga en cimentaciones superficiales sobre bases estratificadas en suelos friccionales* (N.º 1). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas Facultad de Construcciones.
- Srimahachota, T. (2017, 13 diciembre). *Dynamics of washboard road formation driven by a harmonic oscillator*. *Physical Review E*. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.96.062904>
- White, D. J., Take, W. A., & Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*, 53(7), 619–631. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.619>

### ANEXO A: Plano Diseño Experimental



Anexo 1: Plano de Modelo Experimental

### ANEXO B: Vista Frontal Contenedor Experimental

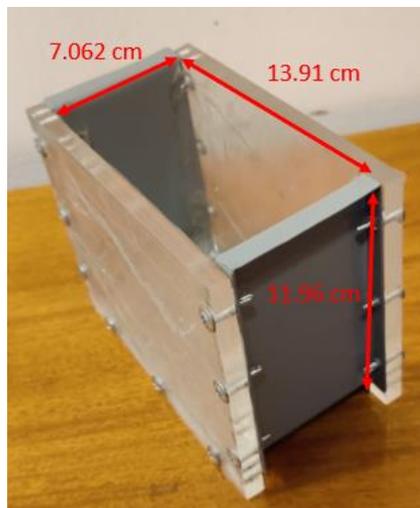


Anexo 2: Vista Frontal Contenedor Experimental

### ANEXO B: Vista Frontal Contenedor Experimental

**ANEXO C: Vista Diagonal Contenedor Experimental**

*Anexo 3: Vista Diagonal Contenedor Experimental*

**ANEXO D: Dimensiones Contenedor Experimental**

*Anexo 4: Dimensiones Contenedor Experimental*