

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Indentaciones circulares en suelos**

**María Isabel Burbano Porras**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Ingeniera Civil

Quito, 13 de mayo de 2023

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

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

**Indentaciones circulares en suelos**

**María Isabel Burbano Porras**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Juan Pablo Villacreses, Msc, Ing. Vial**

Quito, 13 de mayo de 2023

## © 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: María Isabel Burbano Porras

Código: 00204097

Cédula de identidad: 1725430852

Lugar y fecha: Quito, 13 de mayo de 2023

## 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## UNPUBLISHED DOCUMENT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

Las indentaciones circulares se pueden producir debido a varios fenómenos producidos en el suelo. Un claro ejemplo es el washboarding el cual: “genera ondulaciones que aparecen espontáneamente debido a la acción de llantas en caminos no pavimentados”, (Taberlet, Morris, & McElwaine, 2007). Es importante mencionar que existen varios métodos para determinar los esfuerzos producidos en el suelo debido a dichas indentaciones. Para motivos de esta investigación se tuvieron en cuenta dos modelos, un modelo experimental y otro teórico. El modelo teórico, inicia tomando en cuenta la capacidad portante explicada por Terzhagui, para el modelo experimental, se usaron ruedas de acero de diferente diámetro, una prensa hidráulica, y una caja de acrílico reforzada con acero. Se procedió a poner diferentes cargas en la muestra, y dicho procedimiento se grabó con un teléfono para después ser analizado con un programa PIV. Por último, se procedió a utilizar un software de elementos finitos, Abaqus, el cual ayuda a evaluar los diferentes esfuerzos producidos en la muestra de arena, después de la indentación con la rueda de acero.

**Palabras clave:** Indentación, capacidad portante, esfuerzo-deformación, elementos finitos, Abaqus.

## ABSTRACT

Circular indentations can occur due to different phenomena. A clear example of this is the wash boarding effect which: “generates undulations that appear spontaneously due to the action of tires on unpaved roads”, (Taberlet, Morris, & McElwaine, 2007). It is important to mention that there are several methods to determine stresses produced due to indentations. In this investigation two models were taken into account, an experimental and a theoretical model. The theoretical model starts by considering the bearing capacity explained by Terzhagui, for the experimental model, steel wheels, a hydraulic press and a steel-reinforced acrylic bow were used. The sample was subjected to different loadas and the procedure was recorded to be analyzed with software PIV. Finally, a finite element software, Abaqus, was used to evaluate the different stresses produced in the sand sample due to the indentation.

**Key words:** Indentation, bearing capacity, stress-strain, finite element, Abaqus.

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>MATERIALES Y METODOLOGÍA: .....</b>	<b>10</b>
- Materiales:.....	10
- Modelo experimental: .....	11
- Modelo teórico: .....	11
- Modelo numérico: .....	12
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS: .....</b>	<b>14</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>15</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>16</b>

**TABLA DE FIGURAS**

Ilustración 1: Curva granulométrica (Alzamora, D., 2022) .....	10
Ilustración 2: Modelo experimental (Gonzalez, S., 2023) .....	11
Ilustración 3: Caja y rueda de acero en software Abaqus .....	12
Ilustración 4: Condiciones de borde. ....	13
Ilustración 5: Curva esfuerzo-deformación de tres modelos (Gonzalez, S., 2023). ....	14
Ilustración 6: Distribución de esfuerzos de modelo numérico.....	14



## INTRODUCCIÓN

Las indentaciones circulares se pueden producir debido a varios fenómenos producidos en el suelo. Un claro ejemplo es el washboarding el cual: “genera ondulaciones que aparecen espontáneamente debido a la acción de llantas en caminos no pavimentados”, (Taberlet, Morris, & McElwaine, 2007). Es importante mencionar que existen varios métodos para determinar los esfuerzos producidos en el suelo debido a dichas indentaciones. Para motivos de esta investigación se tuvieron en cuenta dos modelos, un modelo experimental y otro teórico en los cuales se obtuvieron gráficas de esfuerzo-deformación comparables con los valores obtenidos en el modelo numérico. Y esto se hizo con la premisa de que como ingenieros se quiere saber siempre los esfuerzos generados en el suelo debido a cargas externas [...] teniendo en cuenta que las deformaciones dependerán del tipo de carga externa aplicada. (Budhu, 2011).

El modelo teórico, inicia tomando en cuenta la capacidad portante explicada por Terzhagui, en la cual se determina los esfuerzos producidos en el suelo usando la siguiente ecuación:

$$qu = c'(N_c) + q(N_q) + \frac{1}{2}(\gamma)BN_\gamma$$

Donde los términos de  $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$  son, respectivamente, contribuciones de cohesión, sobrecarga y peso específico del suelo analizado, (Das, 2007).

Para el modelo experimental, se usaron ruedas de acero de diferente diámetro, una prensa hidráulica, y una caja de acrílico reforzada con acero. Se procedió a poner diferentes cargas en la muestra, y dicho procedimiento se grabó con un teléfono para después ser analizado con un programa PIV, del cual se obtuvieron los valores de desplazamientos por cada carga dada por la prensa hidráulica, para así usar la ecuación anteriormente expuesta.

Po último, se procedió a utilizar un software de elementos finitos, Abaqus, el cual ayuda a evaluar los diferentes esfuerzos producidos en la muestra de arena, especificando sus propiedades, así como las propiedades de la rueda de acero y que dichos resultados puedan ser comparables con aquellos encontrados en los anteriores modelos.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA:

### - Materiales:

El material utilizado para la experimentación se lo hizo con 500 gr de arena de muestra total, de la cual se obtuvo la densidad promedio de  $1414.3 \text{ kg/m}^3$ . El método utilizado para la distribución de partículas fue hecho según los lineamientos presentados en la (ASTM-D6913/D6913M, 2017) encontrando la siguiente curva granulométrica:

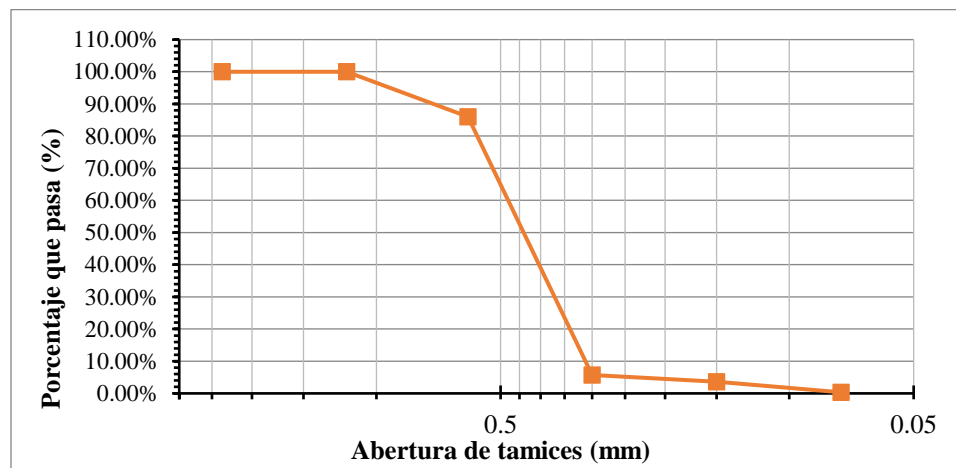


Ilustración 1: Curva granulométrica (Alzamora, D., 2022)

Esta curva nos ayuda a entender las características del suelo teniendo en cuenta el tamaño de las partículas.

- Modelo experimental:

Se montó una prensa hidráulica, sobre una caja de acrílico con reforzamiento de acero de 50x30 cm, la cual se llenó con arena para simular el suelo. En la prensa se montaron tres ruedas de acero de diámetros de: 0.036m, 0.056m y 0.07m respectivamente.

La prensa cargaba a una razón de 10N/s, y este procedimiento se grabó con un teléfono, para así conocer las indentaciones producidas, para el procesamiento del vídeo obtenido se hizo un análisis de imagen utilizando el software Particle Image Velocimetry (PIV), así se estableció el área de contacto de la rueda que cambia en función del tiempo, con esto se obtuvieron los valores de desplazamiento. El análisis de imagen se lo hizo para instantes de tiempo de 5 segundos. Después, los esfuerzos se obtuvieron de la relación de fuerza actuante sobre el área de contacto, ambos cambiantes en el tiempo. Una vez hecho esto, se graficó la curva de esfuerzo-deformación.



*Ilustración 2: Modelo experimental (Gonzalez, S., 2023)*

- Modelo teórico:

El modelo teórico busca, en base a ecuaciones, encontrar los efectos de las indentaciones circulares. Po ello, el modelo teórico, inicia tomando en cuenta la capacidad portante explicada

por Terzhagui, en la cual se determina los esfuerzos producidos en el suelo usando la siguiente ecuación:

$$qu = c'(N_c) + q(N_q) + \frac{1}{2}(\gamma)BN_\gamma$$

Donde los términos de  $N_c$ ,  $N_q$  y  $N_\gamma$  son, respectivamente, contribuciones de cohesión, sobrecarga y peso específico del suelo analizado, (Das, 2007). Y estos valores se usaron en función de la arena antes descrita.

- Modelo numérico:

Para el modelo numérico se hizo un modelo de elementos finitos, donde se procedió a modelar la caja y rueda de acero en el software Abaqus, para la caja se procedió a darle las características de la arena, y para la llanta se le dieron propiedades del acero. Las propiedades dadas a la arena fueron las siguientes: para el modulo de elasticidad se usó un valor de 1MPa, para su densidad se usó el valor de 1830 kg/m<sup>3</sup>. Para las propiedades del acero se procedió a asignar un modulo de elasticidad de 702GPa y una densidad de 7830 kg/m<sup>3</sup>.

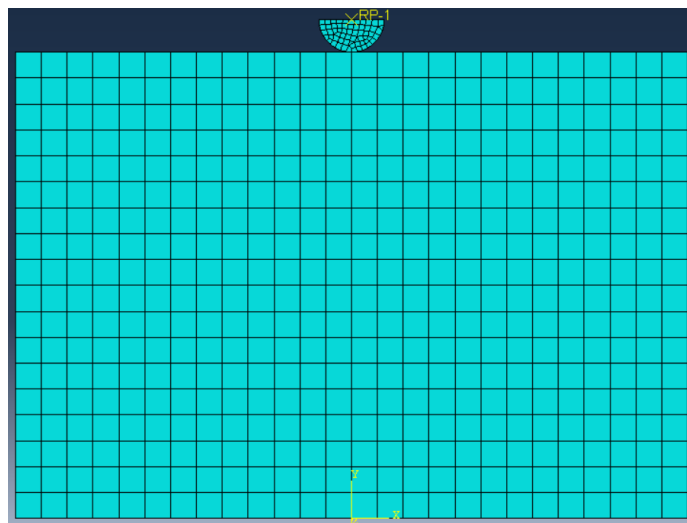


Ilustración 3: Caja y rueda de acero en software Abaqus

Como se puede observar en la ilustración 3, la caja y rueda fueron malladas para el procesamiento de resultados, la malla utilizada fue de dos centímetros, es decir, aproximadamente 700 elementos. Una vez hecho esto, se procedió a asignar condiciones de borde para el adecuado funcionamiento del programa. Primero se asignó una carga geostática, para tener en consideración el peso propio del material, de 9.81 m/s. Luego, se limitaron los desplazamientos verticales en la parte inferior de la caja y los desplazamientos horizontales en las paredes laterales de esta. No obstante, para las paredes laterales se limitó su desplazamiento horizontal y no fue necesario limitar las rotaciones ni desplazamientos verticales, ya que, en la práctica un suelo si sufre de dichos desplazamientos y rotaciones. Posteriormente se asignaron condiciones de borde a la rueda, teniendo en cuenta un desplazamiento vertical de 10 cm y limitaciones en sus rotaciones y desplazamientos horizontales, como se puede observar en la siguiente ilustración:

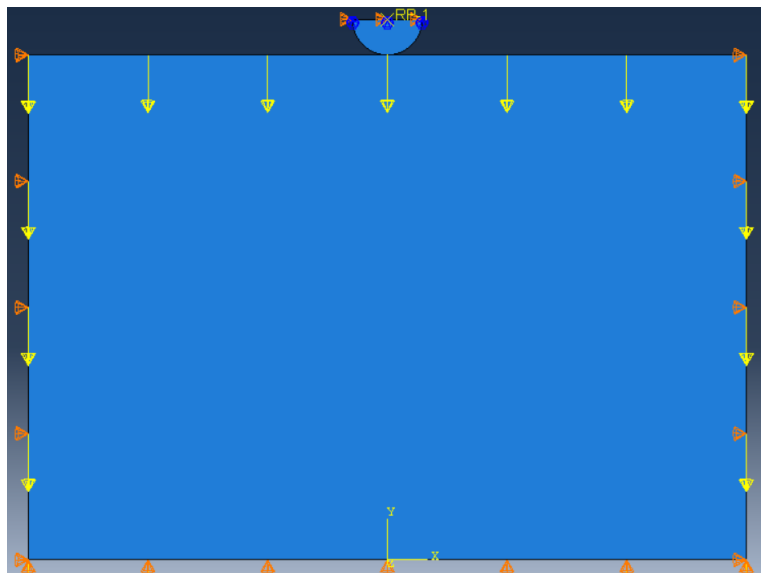


Ilustración 4: Condiciones de borde.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS:

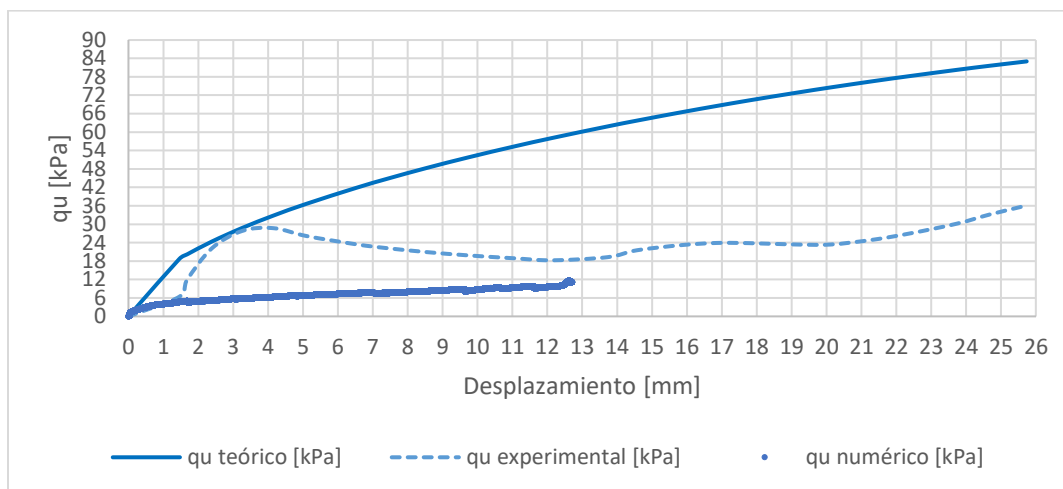


Ilustración 5: Curva esfuerzo-deformación de tres modelos (Gonzalez, S., 2023).

La ilustración 5, nos indica claramente los resultados de esfuerzo-deformación obtenidos para cada modelo, donde los desplazamientos se presentan en el eje horizontal y los esfuerzos en el eje vertical. Se puede ver que hay diferencias en los valores de esfuerzos obtenidos para cada curva, dado que, para el modelo numérico, descrito anteriormente, se usó únicamente un modulo de elasticidad de 1MPa, por lo que los resultados resultaron bastante bajos en comparación con los otros dos modelos. También, hay que tener en cuenta que el modelo teórico sí toma en cuenta las propiedades de la arena y por ello los esfuerzos tienden a reducirse.

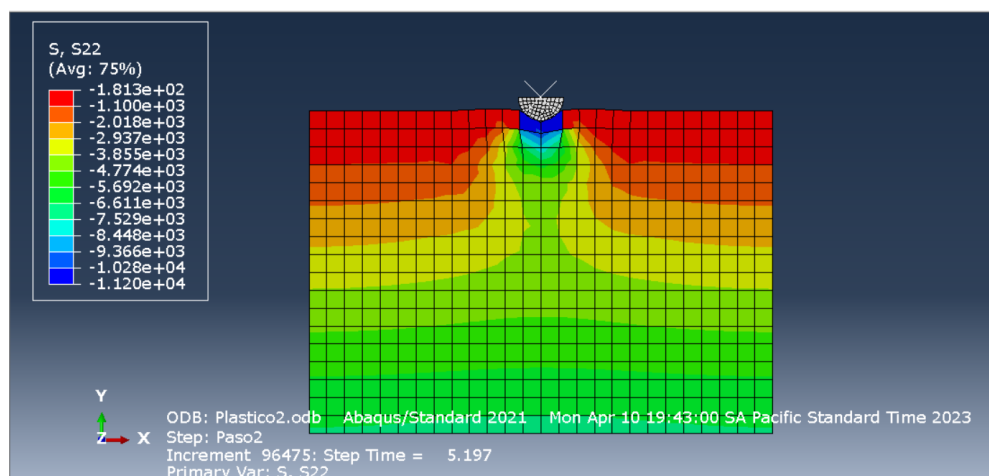


Ilustración 6: Distribución de esfuerzos de modelo numérico.

Y finalmente, para la ilustración 6, se puede ver una clara distribución de esfuerzos, los cuales se vuelven prominentes en el lugar de contacto con la rueda y se van dispersando hacia las paredes laterales de la caja, también hay que notar como los esfuerzos se disipan conforme la profundidad aumenta.

## CONCLUSIONES

La modelación en el software Abaqus busca la posibilidad de encontrar resultados semejantes a aquellos encontrados en modelos tanto experimentales como teóricos, para indentaciones circulares en suelos. Los principales puntos obtenidos a partir de la modelación fueron los siguientes:

- En conclusión, los resultados difieren en función de las propiedades del material.
- En los modelos teórico y experimental se presentan cambios grandes, debido a que el modelo teórico sí toma en cuenta las propiedades del material usado.
- Se busca seguir trabajando en el modelo numérico para obtener resultados mejor comparables con los obtenidos en los otros dos modelos mencionados.

**REFERENCIAS**

Alzamora, D. (2022). Trabajo de titulación. *Por publicar*.

ASTM-D6913/D6913M. (2017). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*.

Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics And Foundations* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Das, B. (2007). *Principles of foundation Engineering* (6th ed.). Thomson Canada Limited.

Gonzalez, S. (2023). Bearing Capacity Analysis for a Circular Indentation. *Por Publicar*.

Taberlet, N., Morris, S., & McElwaine, J. (2007). Washboard Road: The Dynamics of Granular Ripples Formed by Rolling Wheels. *Physical Review Letters*, 5.