

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Manual para la indentación de una rueda mediante el software

ABAQUS

Juan José Escudero Camacho

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Ingeniero Civil

Quito, 28 de marzo de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

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

Manual para la indentación de una rueda mediante el software ABAQUS

Juan José Escudero Camacho

Nombre del profesor, Título académico Juan Pablo Villacreses, Msc, Ing. Vial

Quito, 28 de marzo 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:	Juan José Escudero Camacho
Código:	201229
Cédula de identidad:	0201897018
Lugar y fecha:	Quito, 12 de diciembre del 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UNPUBLISHED DOCUMENT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 graduation 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 washboard effect es un fenómeno que surge en las vías no pavimentadas, esto debido al tránsito vehicular frecuente, lo cual provoca la formación de ondas transversales. Mediante el presente trabajo se busca comprender el fenómeno a través de un software para complementar la relación de contacto que existe entre una rueda vehicular y un estrato de suelo.

Para el trabajo se ha tomado en cuenta el apoyo de varias herramientas digitales, de manera que sea posible generar diagramas de carga con respecto a la deformación en un tiempo para simular el fenómeno y el comportamiento del suelo. Abaqus es un software que nos permite plasmar el modelo experimental en un sketch de manera que se puede simular la carga aplicada y poder observar la indentación de un material sobre otro. Se ha podido asimilar que el problema surge una manera más consecutiva en suelos secos y de igual forma sin importar el trato que se le dé a este para dejarlo plano, si nuevamente existe una carga vehicular que supere su capacidad portante el fenómeno aparecerá nuevamente.

Palabras Clave: Efecto washboard, Indentación, Capacidad portante, Compresión, Estrato, ABAQUS.

ABSTRACT

The washboard effect is a phenomenon that arises on unpaved roads, due to frequent vehicular traffic, which causes the formation of transverse waves. Through the present work It seeks to understand the phenomenon through software to complement the contact relationship that exists between a vehicular wheel and a layer of soil.

For the work, the support of several digital tools has been considered, so that it is possible to generate load diagrams with respect to the deformation in time to simulate the phenomenon and the behavior of the soil. Abaqus is software that allows us to capture the experimental model in a sketch so that the applied load can be simulated and the indentation of one material on another can be observed. It has been possible to assimilate that the problem arises in a more consecutive way in dry soils and in the same way, regardless of the treatment that is given to it to leave it flat, if there is again a vehicular load that exceeds its bearing capacity, the phenomenon will appear again.

Key words: Washboard effect, indentation, Bearing capacity, Compression, Stratum, ABAQUS.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
Tabla de contenido.....	7
INTRODUCCIÓN	8
DESARROLLO	9
ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
ANEXOS	42
Referencias.....	43

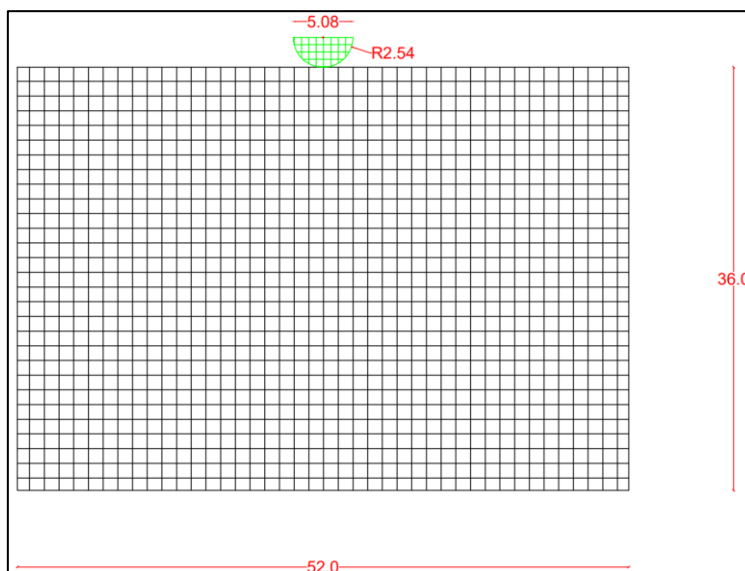
INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un proceso experimental permite ver de una manera real como es el comportamiento del suelo con respecto a una carga que empieza a generar deformaciones al tener contacto con el suelo. En el presente trabajo se plasma el experimento de laboratorio de la indentación de una rueda en un suelo que se encuentra confinado en una caja. El análisis que se lleva a cabo es a través de un software de SIMULIA llamado ABAQUS.

El software permite realizar distintas simulaciones con respecto a muy variados tipos de materiales. Mediante el uso de elementos finitos el programa permite modelar partes referentes a un análisis estructural, geotécnico, entre muchos otros con respecto a la rama de la ingeniería. Abaqus nos permite plasmar nuestro modelo experimental de manera que se comparen los resultados reales con los generados por el software.

DESARROLLO

Ejercicio: Realizar el siguiente modelo con materiales de acero y arena, correspondientes a la rueda y al estrato de suelo, de manera que, se pueda obtener la gráfica de los contornos de manera deformada.



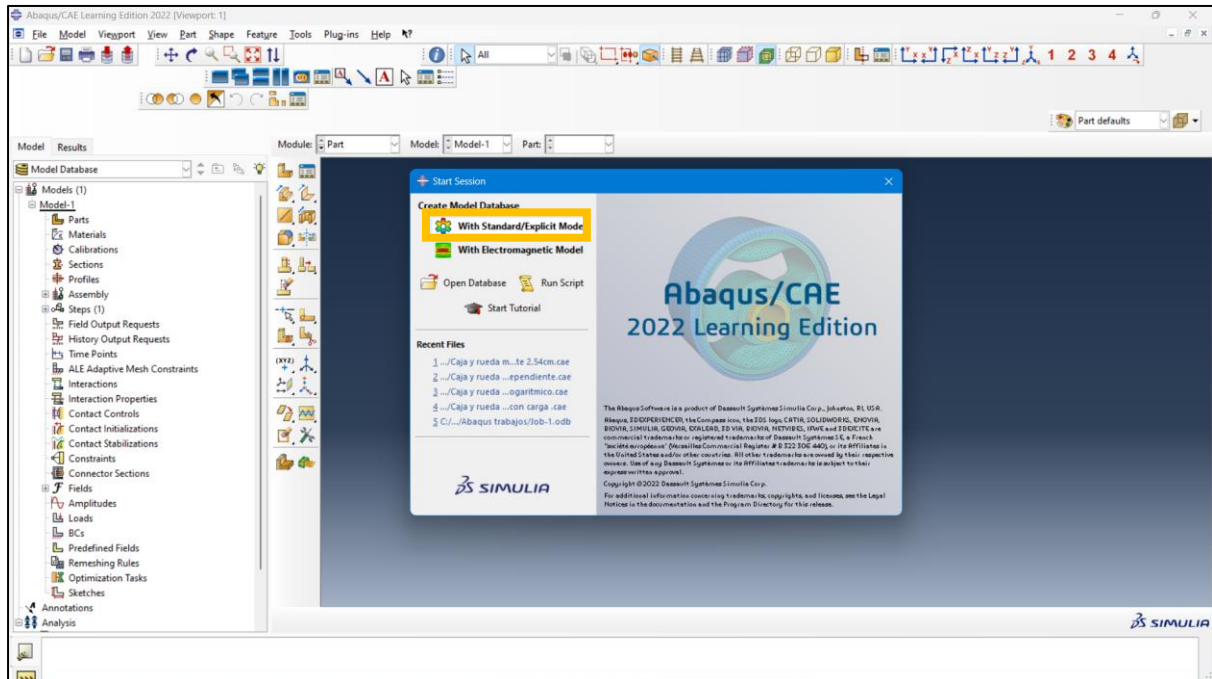
Unidades		
m	Kg/cm	Pa

En el desarrollo del modelo experimental a través del software de ABAQUS las unidades deben ser previamente definidas por el usuario para que sean consistentes, para el caso se han usado las mostradas en la tabla mostrada anteriormente, ya que a diferencia de otros softwares las unidades no se establecen previo al desarrollo del modelo.

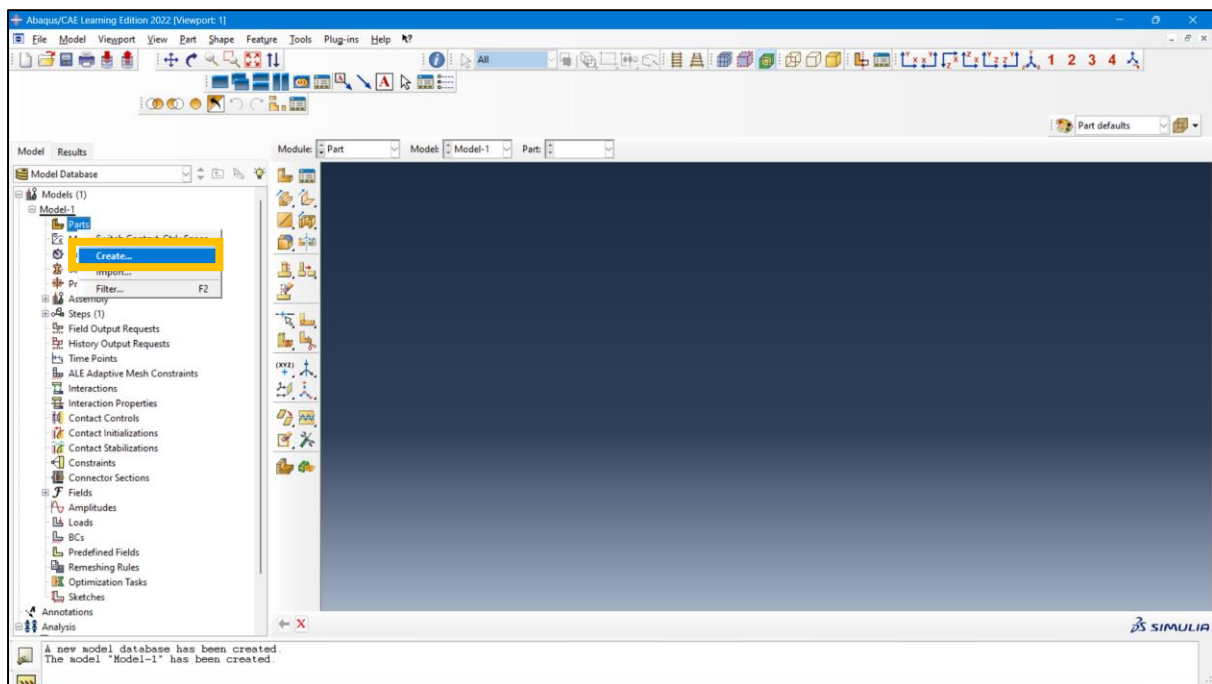
Para el presente ejercicio se han tomado en cuenta las siguientes unidades para los datos a ingresar:

Solución:

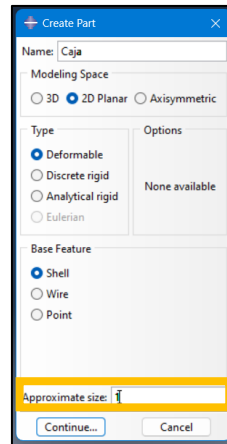
1. Seleccionar el tipo de modelo. Al abrir el software debemos crear un modelo escogiendo la opción **“With standard/Explicit Model”**.



2. Hacemos click derecho en **“Part”** → **“Create”**.

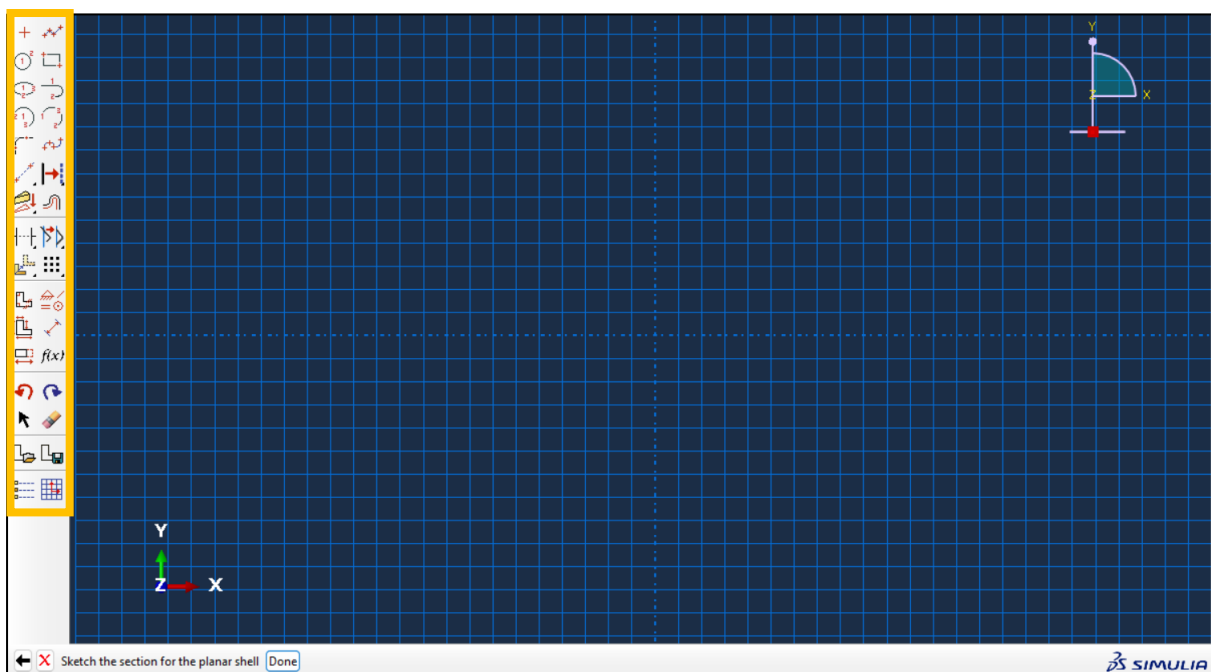


Posteriormente, nos aparecerá una ventana que permite seleccionar el nombre y tipo de dibujo del modelo a realizar. Para el caso será un modelo “**2D Planar**” de tipo “**Deformable**” y con la característica base de “**Shell**”.



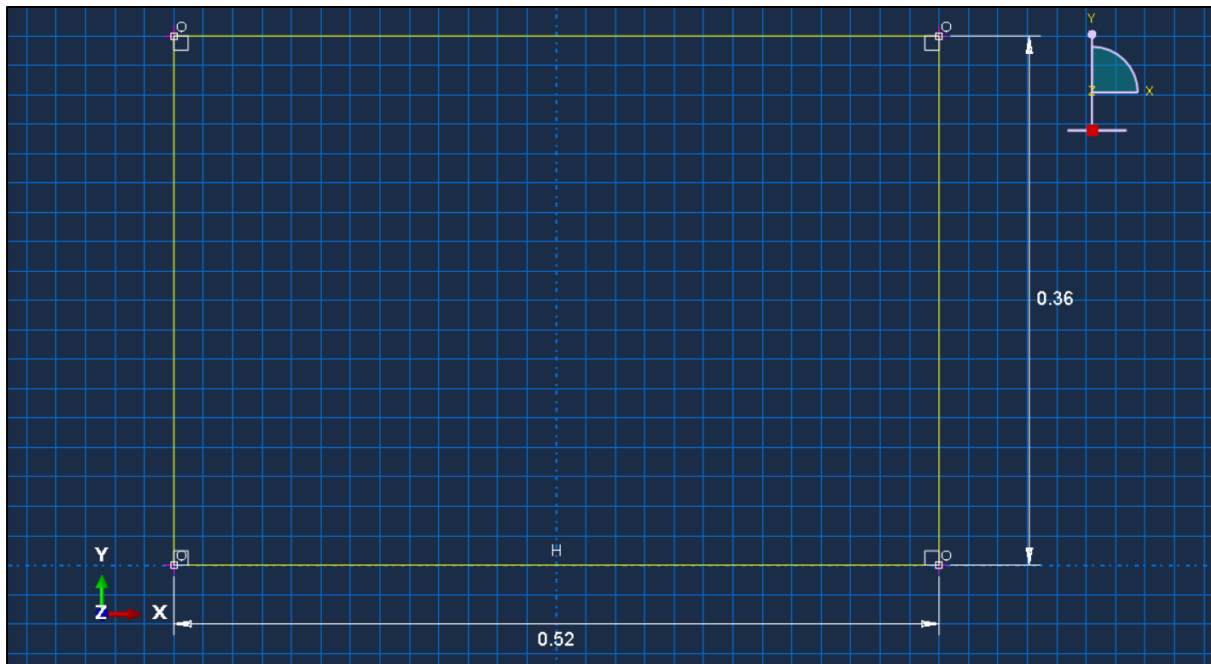
Se define la dimensión de la hoja de dibujo (dependiendo las unidades de trabajo establecidas inicialmente por el usuario).

Se genera la hoja de dibujo en la cual debemos graficar el sketch del ejercicio. Para el caso, se debe tomar en cuenta que al ser dos elementos, cada uno se lo realiza independientemente, es decir, en dos diferentes partes.

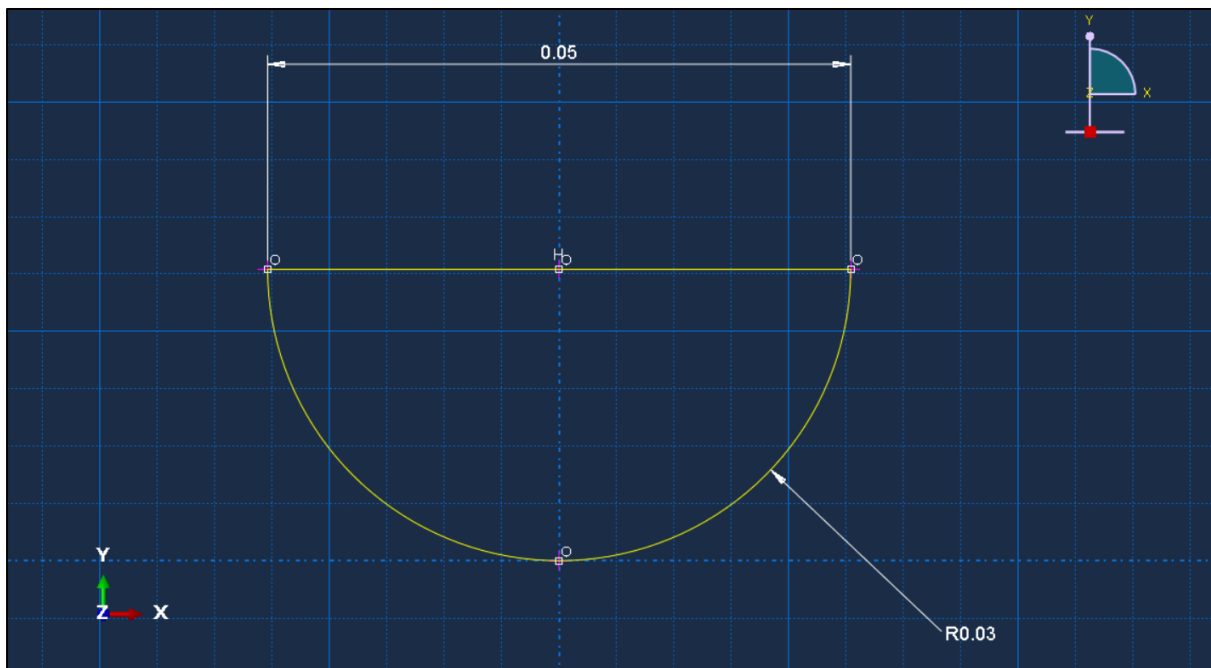


- Utilizando las herramientas de la barra lateral izquierda se genera el sketch de los elementos con las dimensiones dadas.

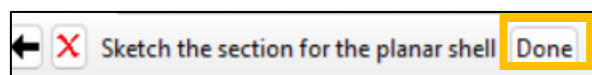
- Caja



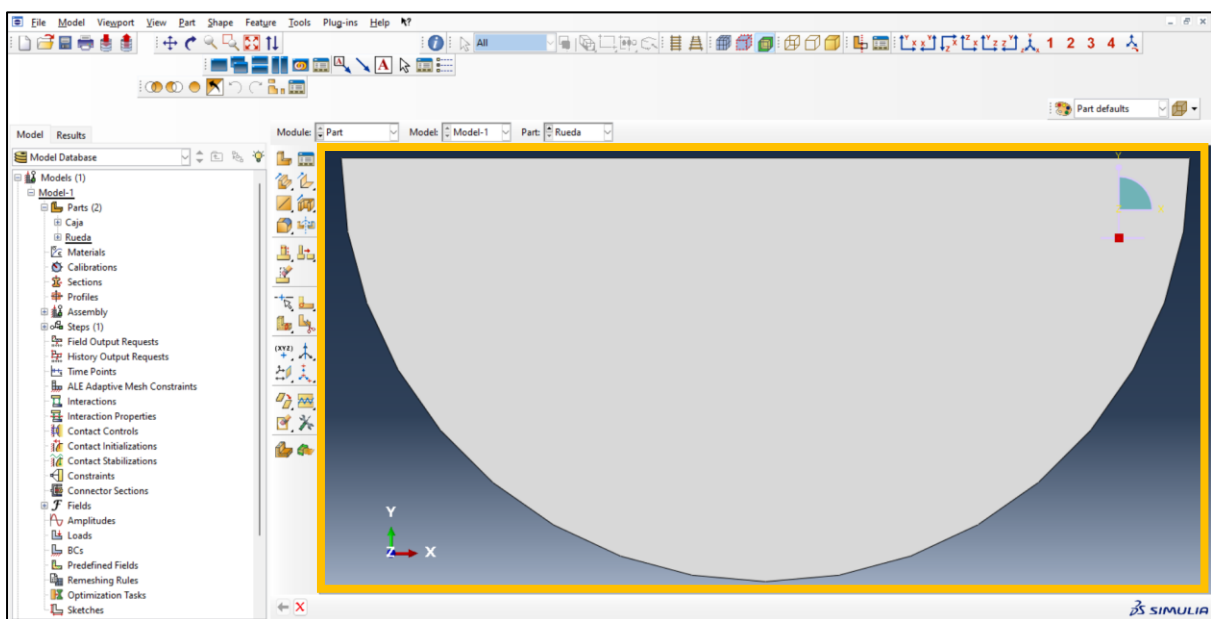
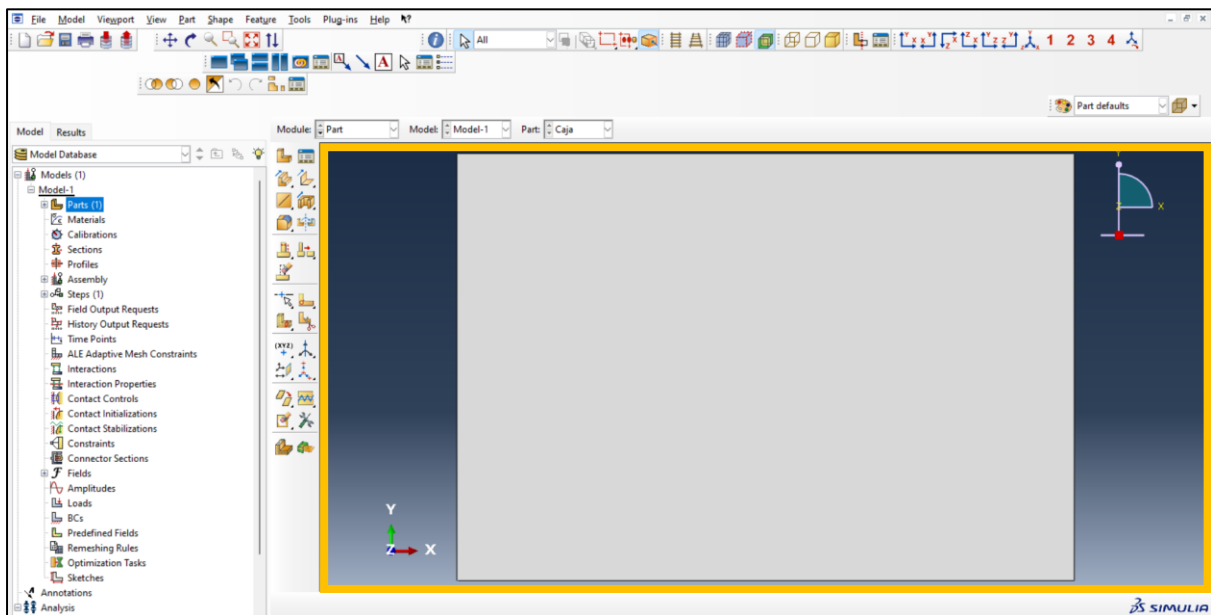
- Rueda



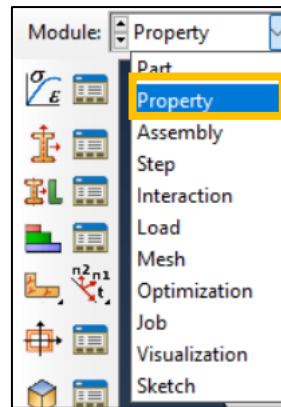
4. Para poder finalizar y generar el modelo del elemento, es importante dar click izquierdo en la opción **“Done”**. De esta manera, se cerrará la hoja de dibujo.



Luego de terminar el dibujo podemos ver generadas cada una de las partes independientemente



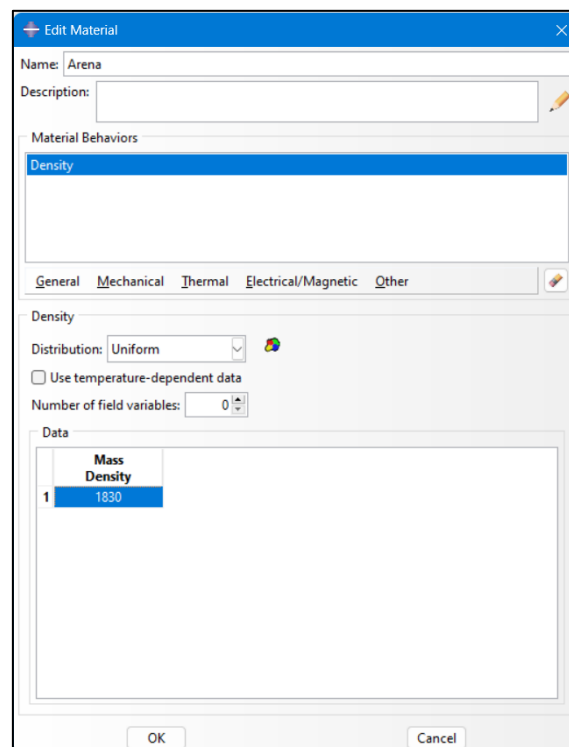
5. Ya generadas las dos partes, en la sección “**Module**”, debemos ir a la opción “**Property**”. Este proceso nos permite definir el material, las secciones y asignar las mismas.



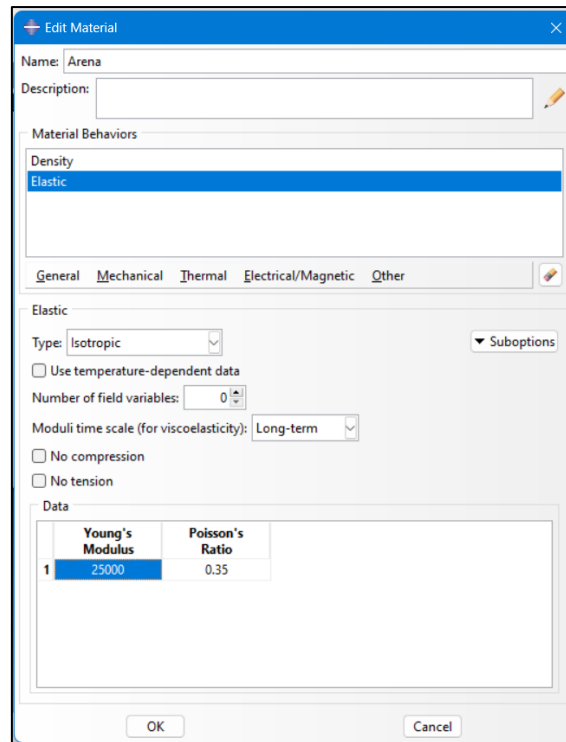
6. En la opción ya seleccionada debemos crear un nuevo material dando click izquierdo

en el ícono .

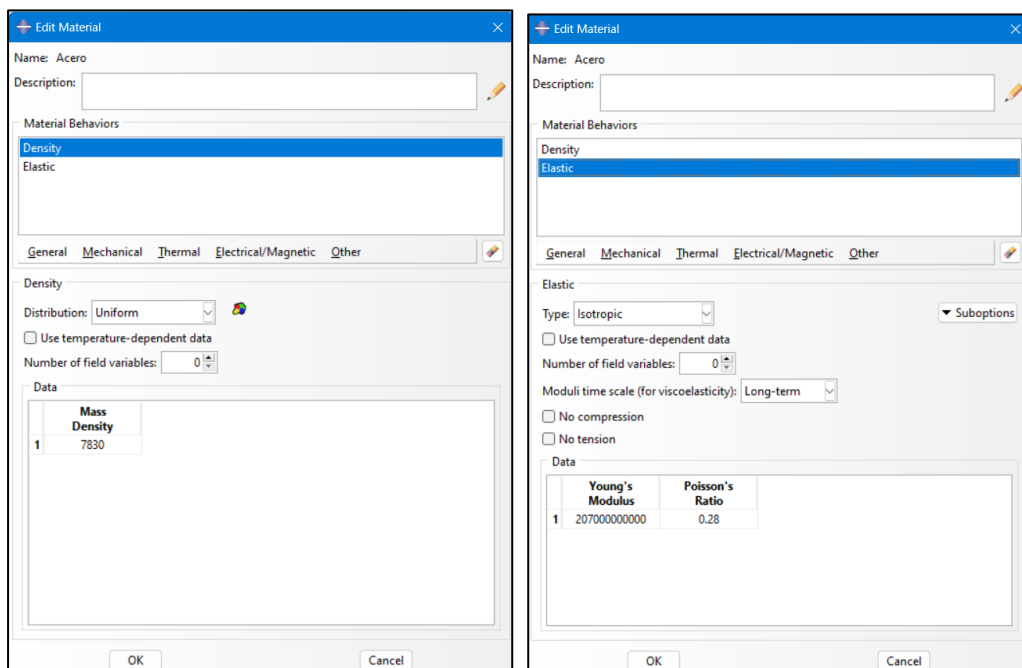
Una vez seleccionada la opción para el material se debe editar el nombre y las propiedades del material, como son la densidad y sus propiedades elásticas con los valores y unidades correspondientes. En el caso de la densidad se da selección **“General”** → **“Density”**.




Paso seguido, seleccionamos el tipo de comportamiento **“Mechanical”** → **“Elasticity”** → **“Elastic”**.

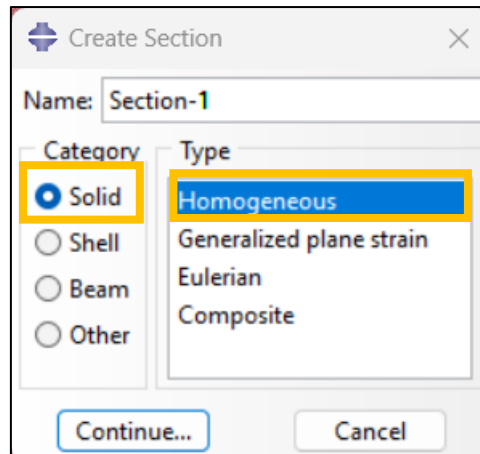


7. Se repite el mismo proceso del paso seis para poder crear el material del acero, tomando en cuenta sus valores de las propiedades que se muestran a continuación:

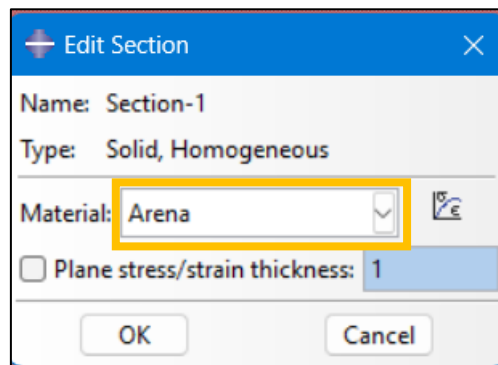


8. Se crea las secciones correspondientes a los elementos dando click en el ícono  "Create Section".

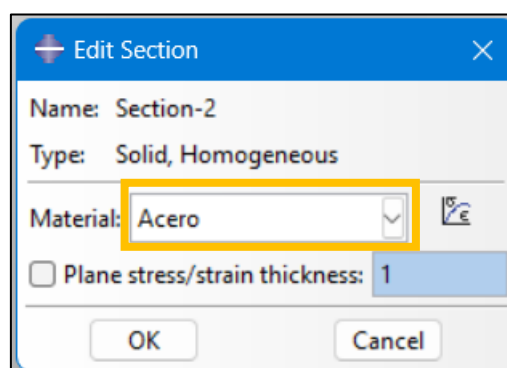
Se crea la sección de tipo "Solid" → "Homogeneous".




La primera sección se debe crear correspondiente al estrato de suelo, por ello, se selecciona el material con el nombre de “**Arena**”.



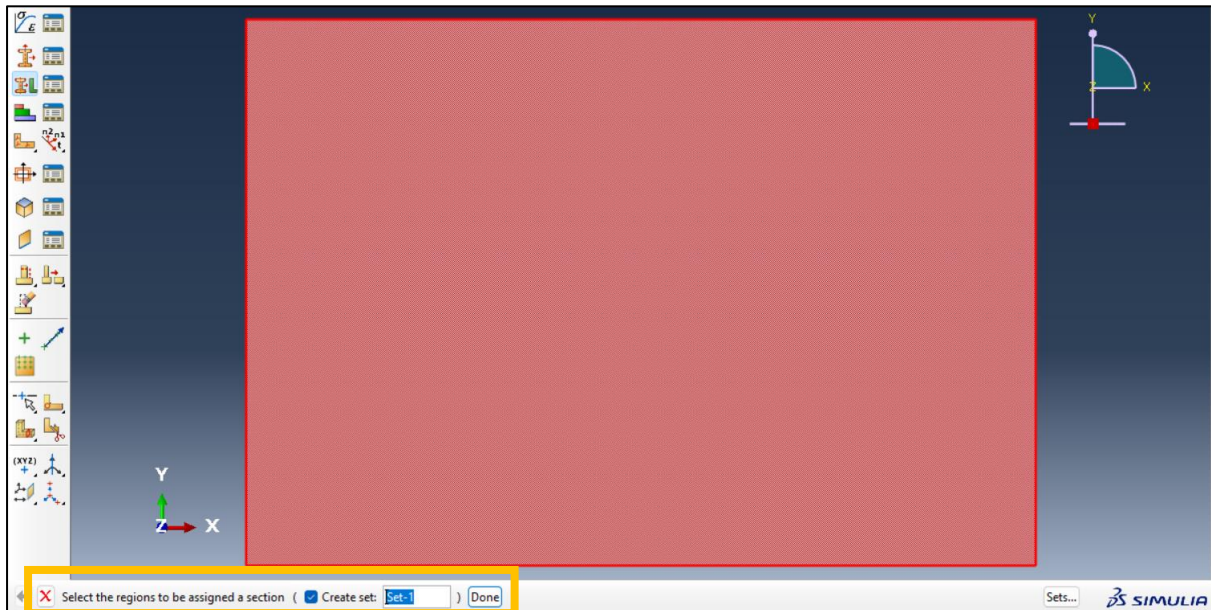
El proceso será el mismo para crear la segunda sección, sin embargo, esta vez se selecciona el material con el nombre de “**Acero**”. Este corresponderá a la rueda.



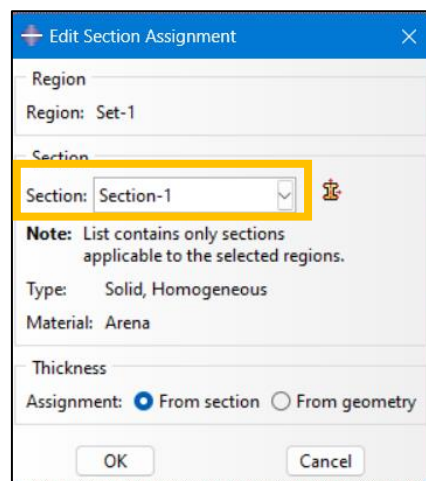
9. Una vez creadas las secciones debemos asignar cada una de ellas en los elementos según el material correspondiente. Este proceso se lo hace dando click izquierdo en

“**Assign Section**” con el ícono .

Seguidamente aparecerá en la parte inferior una ventana indicando que se debe seleccionar el elemento en el cual será asignada la sección.



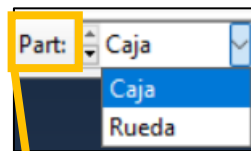
Ya seleccionado el elemento y luego de haber dado click izquierdo en “**Done**”, aparecerá una nueva ventana en la cual debemos seleccionar la sección a asignar en el elemento. Para el caso del estrato se escoge la sección uno, ya que es la sección con el material de arena.



Una vez asignada la sección el elemento cambia de color.

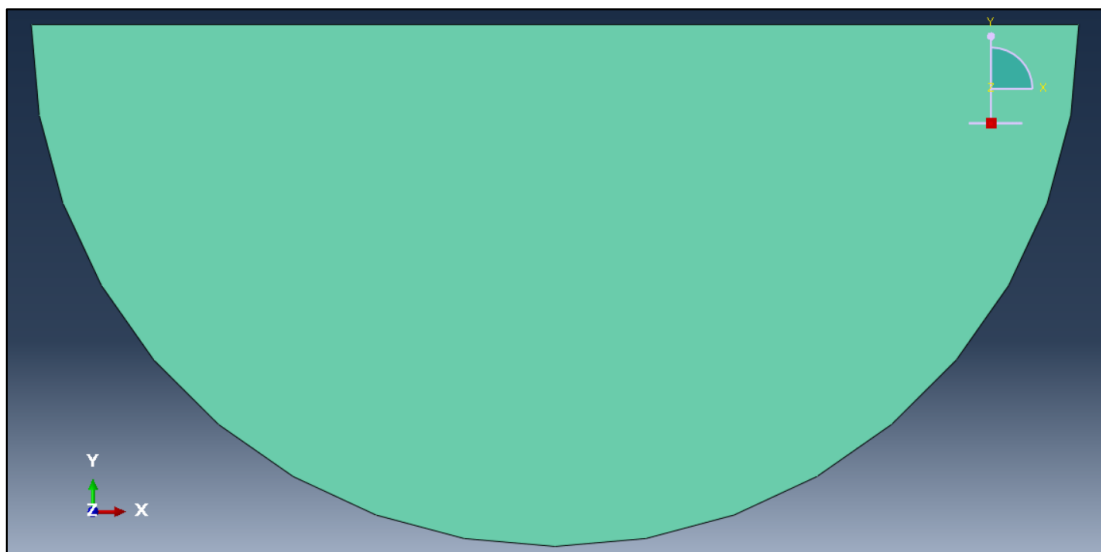


El proceso debe repetirse para el elemento de la rueda, previo a realizarlo en la opción **“Part”** debemos seleccionar el otro elemento para asignar su sección.

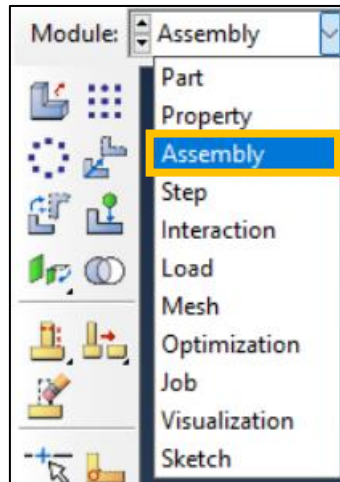



Permite seleccionar el elemento en el cual se esta trabajando en el instante.

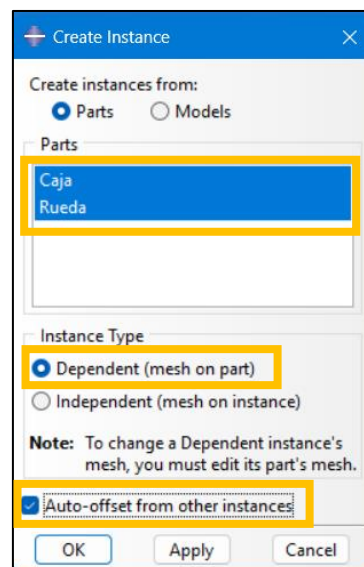
Paso seguido de seleccionar el otro elemento se asigna su sección como se especificó previamente.




10. Luego de establecer las secciones debemos ir a la opción de “**Module**” → “**Assembly**”.

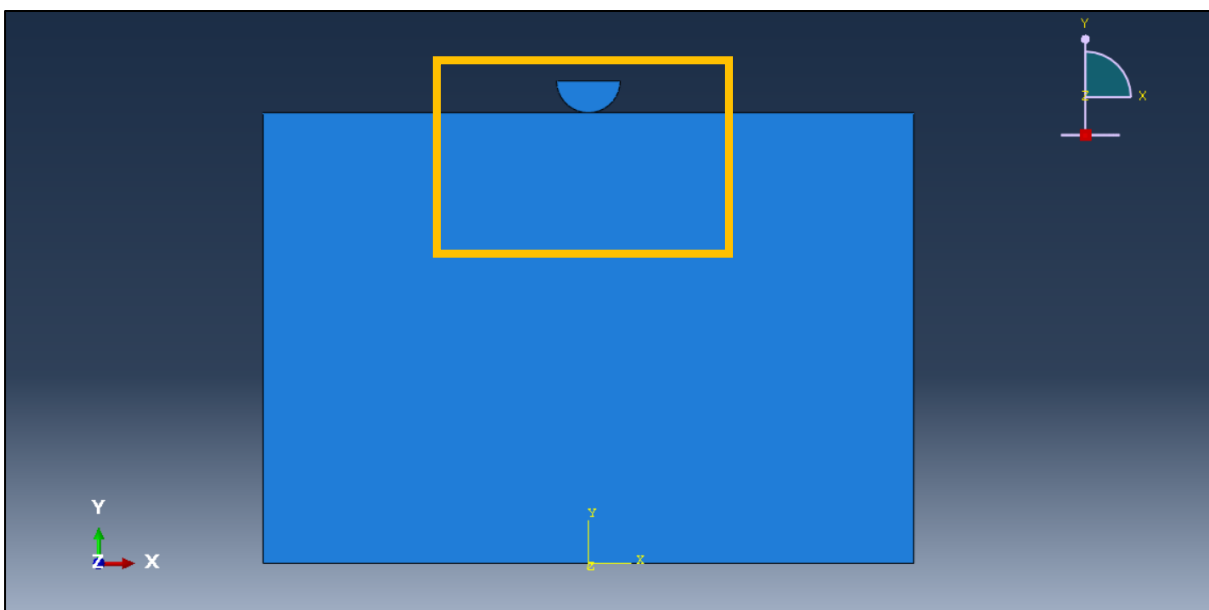


Se da click en el botón  para “**Create Instance**”, seguidamente debemos seleccionar las dos partes creadas para que sean dependientes, y seleccionar “**Auto-offset from other instances**” para separar las partes.

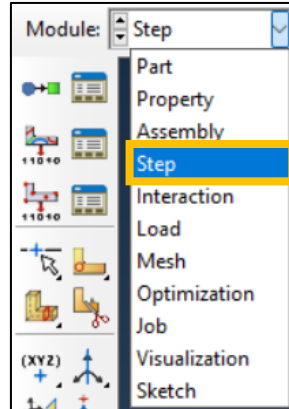





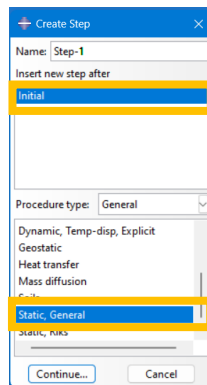
11. Luego de haber creado las partes se mueve la rueda sobre el estrato dando click en el botón  → **“Select the instance”** para lo que debemos seleccionar la rueda ya que es el elemento que debemos moverlo → **“Select the start point”** que son las coordenadas a ingresar desde lugar de inicio o de donde parte el elemento a moverse → **“Select the end point”** en donde tendrá la ubicación final el elemento y se quedará colocado → **“Ok”** → **“Done”**.



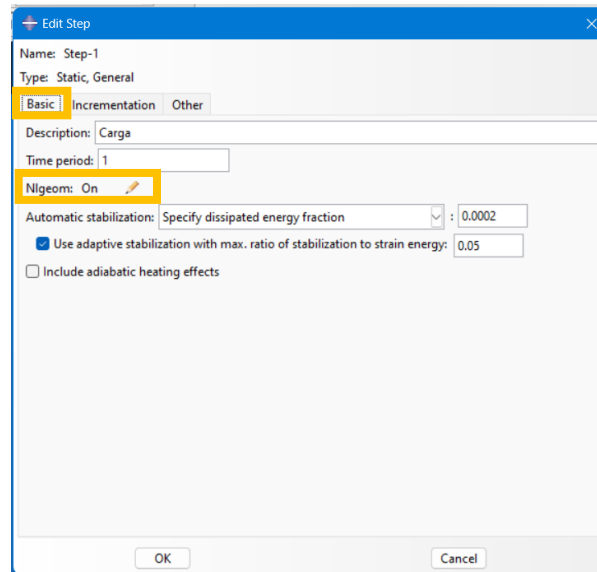
12. Debemos dirigirnos a “Module” → “Step”. Se definen dos steps, uno con periodo de tiempo con un valor de 1 y otro con un periodo de 100.



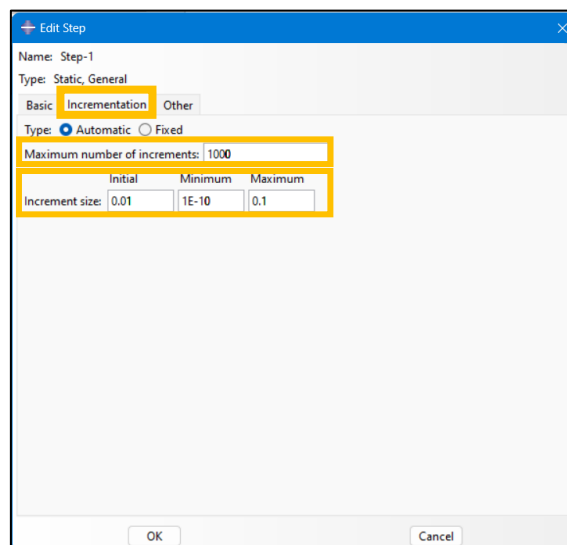
Damos click en el ícono  de “Create step” → “Initial” → “Static/General”.

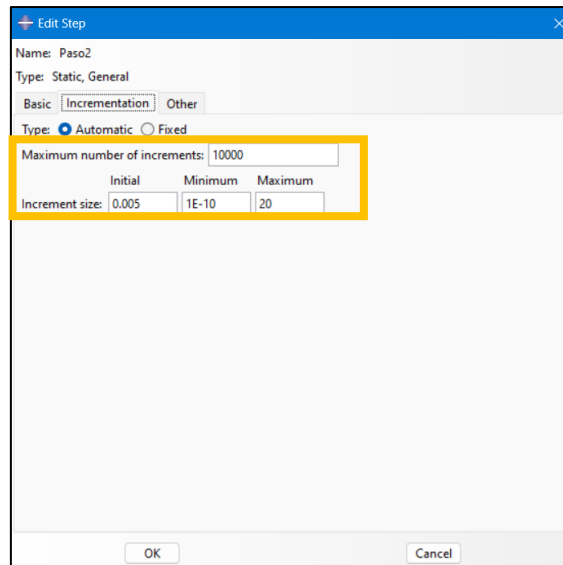


Se modifica el step en la ventana de “Basic” → “Nlgeom-ON” → “Specify dissipated energy fraction” con los valores preestablecidos.



Paso seguido se modifica la ventana **“Incrementation”** → **“Maximum number of increments”** de 1000 → **“Increment Size”** con un valor inicial de 0.01, un mínimo de 1E-10 y un máximo de 0.1 para el primer paso y para el segundo (con un Time period de 100) serán los valores correspondientes en la gráfica.

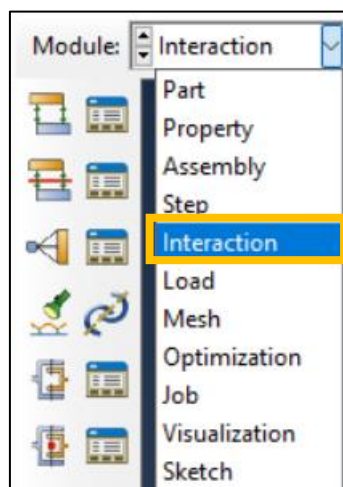




Un step ya viene previamente definido con el programa, debemos crear dos step más que nos permitan definir la indentación de la rueda y la carga al estrato.

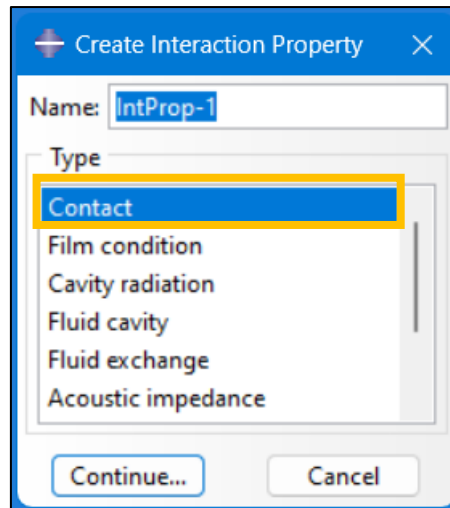
13. Para generar una interacción y las condiciones de borde vamos a **“Module”** →

“Interaction”

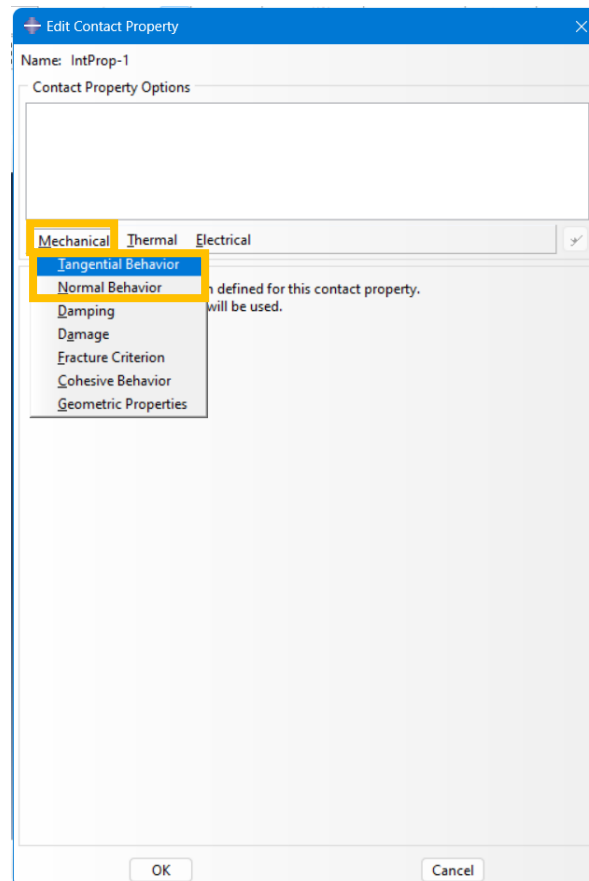


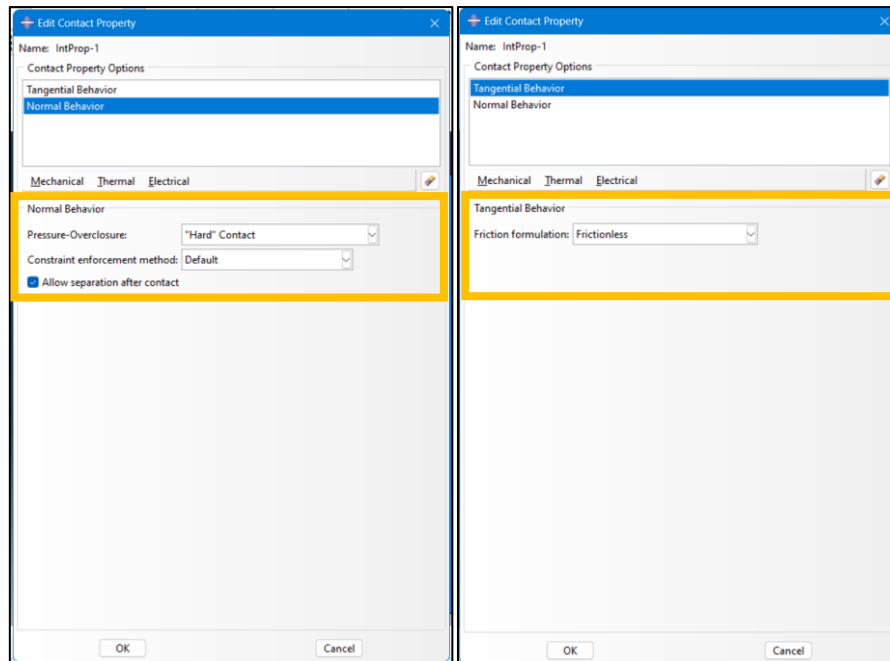
En este paso, inicialmente debemos crear una **“Interaction property”** → **“Contact”** con el

ícono




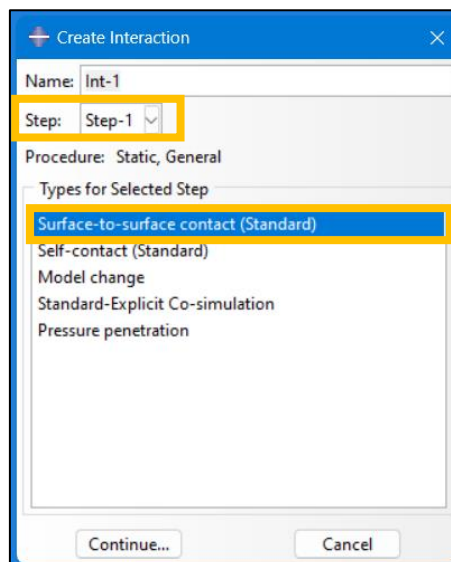
Se definen las propiedades de contacto como **“Mechanical”** → **“Tangential Behavior”** y **“Normal Behavior”** con las opciones predeterminadas.





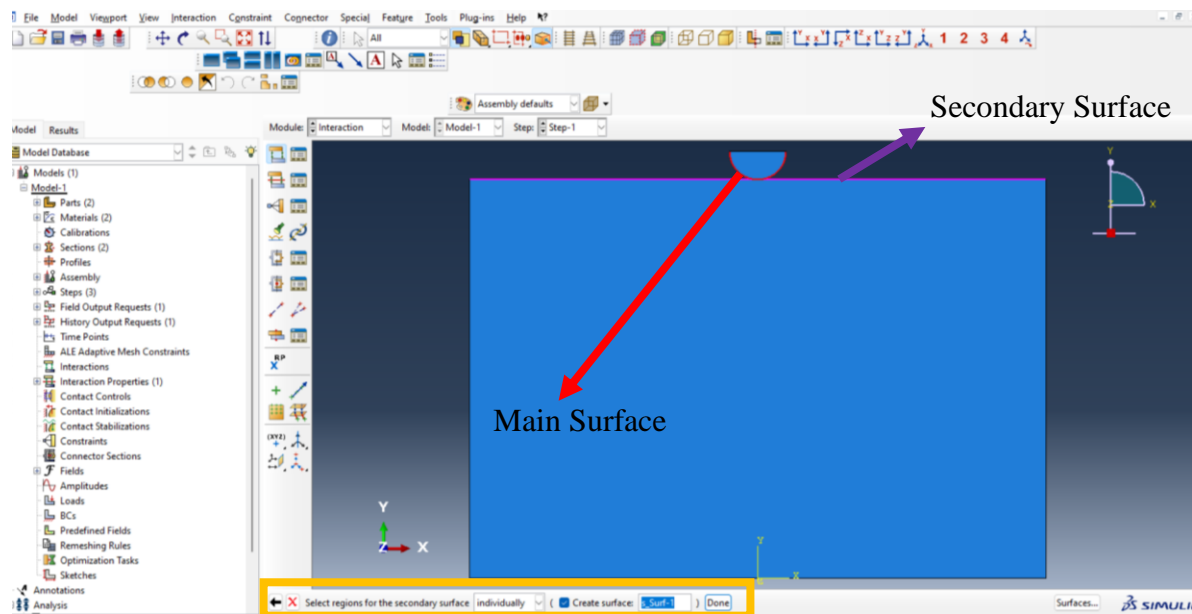
Ya creada la “**Interaction property**”, debemos crear la “**Interaction**” → “**Step1**” →


“**Surface to Surface contact**” con el ícono , ya que para crear una interacción debemos tener previamente una propiedad de interacción.

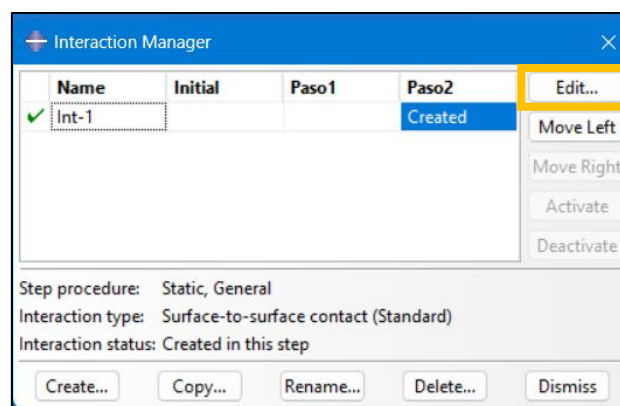


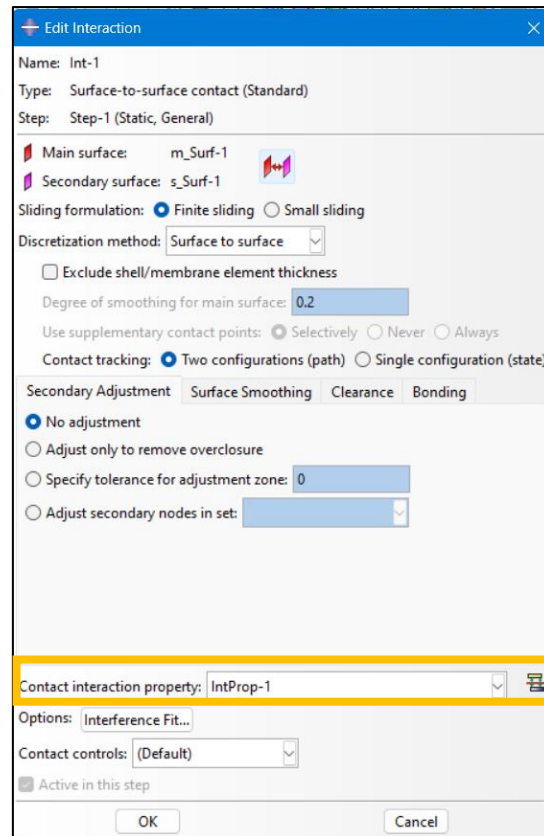
Posteriormente, luego de haber realizado el proceso previo, consecuentemente en la parte inferior de la página principal aparece la opción para seleccionar las superficies de contacto, la principal como la secundaria tal y como se muestra a continuación. En la imagen se puede

observar de un color rojo la superficie de contacto principal y de color morado la superficie de contacto secundaria.

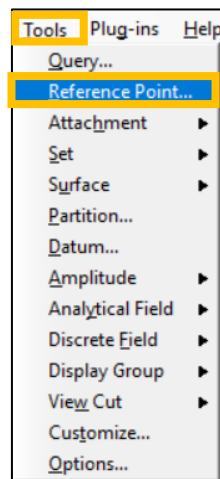


Ya definidas las superficies de contacto, se edita la interacción, en donde se verifica a través del ícono junto a crear la interacción , seleccionando la interacción “Int-1” ya creada y poniendo editar para así ver que la propiedad de interacción de contacto sea la “**Interaction property**” definida inicialmente.

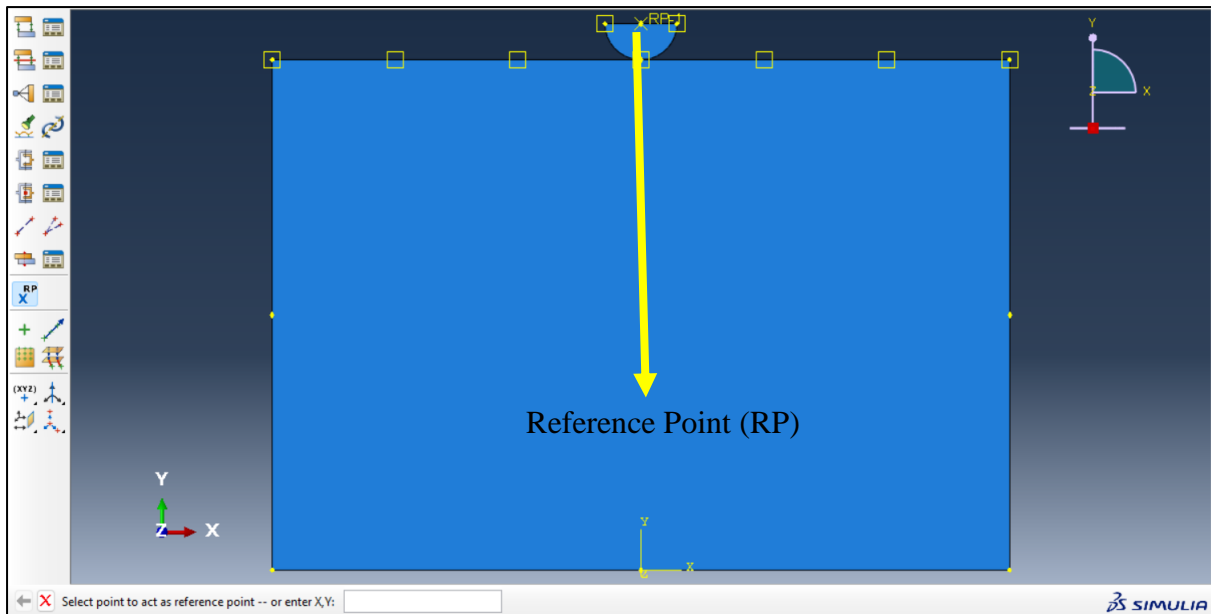





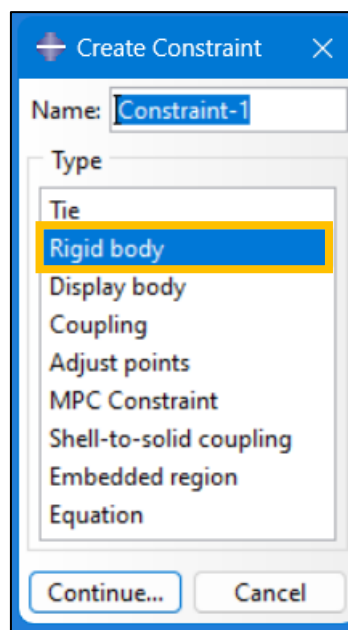
Previo a generar nuestras restricciones es necesario definir un punto de referencia, a través de **“Tools”** → **“Reference Point”**.



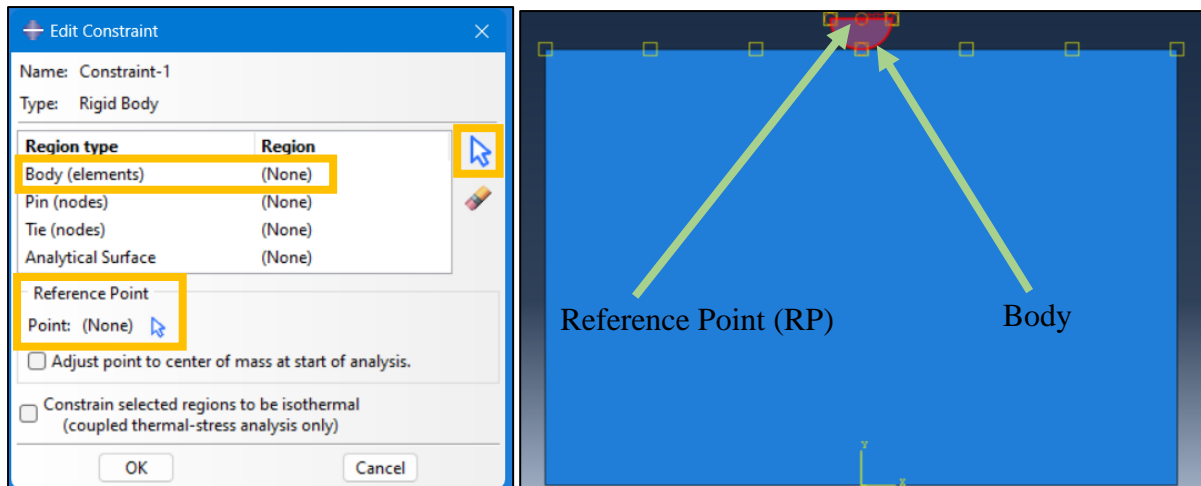
Seleccionamos el punto de referencia en la rueda.



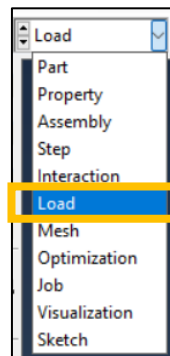
Para generar la interacción nuestro modelo debe constar de restricciones, mismas que deben ser definidas en el modelo, a través del comando **“Create Constraint”** →  → **“Rigid Body”**.




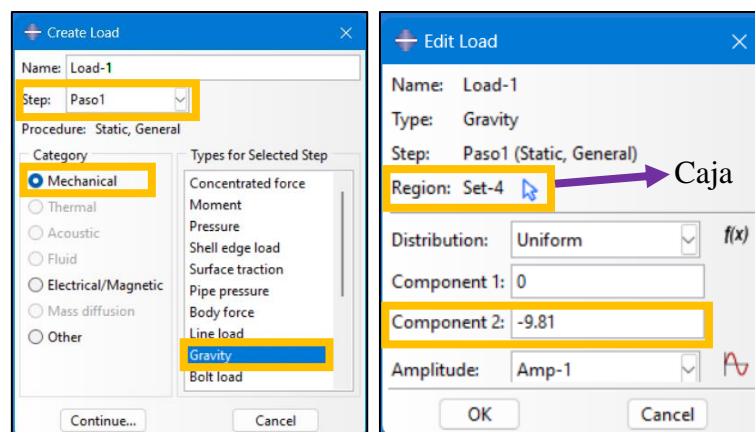
Una vez definida la restricción de tipo rígida, debemos seleccionar la región que será rígida, en este caso la rueda. Así mismo, debemos seleccionar nuestro punto de referencia previamente establecido.




14. En la sección “**Load**” es en donde se asignará la carga, misma que será de la gravedad, así como también las condiciones de borde.

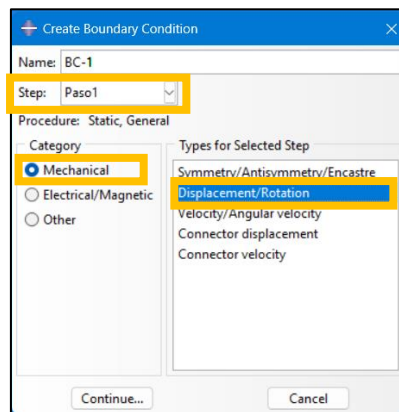


Mediante el icono  se aplica la carga gravitacional de 9.81 con respecto al paso 1.



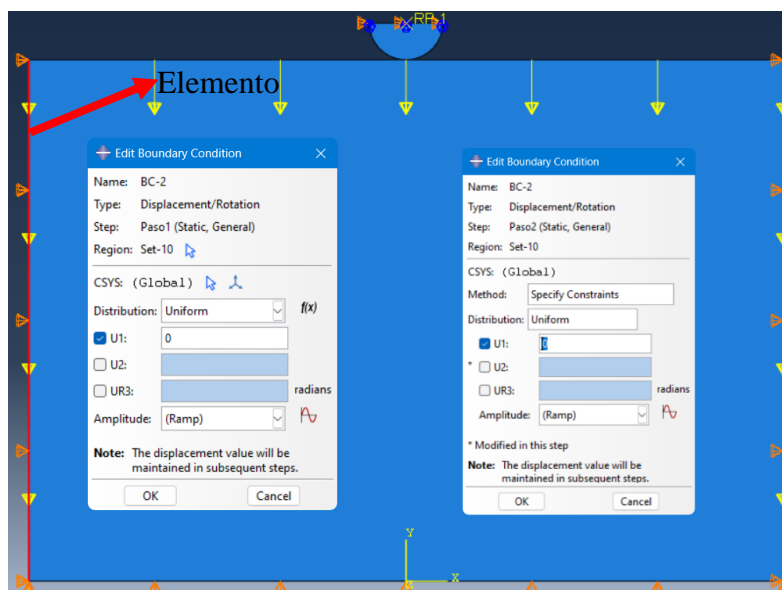
Se aplican las condiciones de borde mediante el símbolo . Para el modelo se consideran cuatro condiciones de borde en cada uno de los pasos previamente creados, es decir, con

respecto al paso 1 y 2. La configuración para las condiciones de borde son “**Mechanical**” de tipo “**Displacement/Rotation**”.

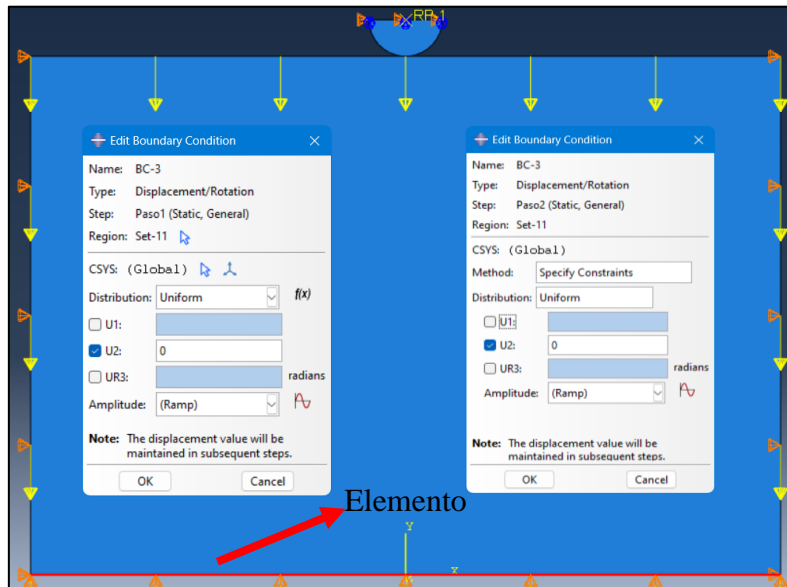


Se debe seleccionar el elemento con respecto al cual se va a asignar la condición de borde y luego se restringen los ejes según corresponda.

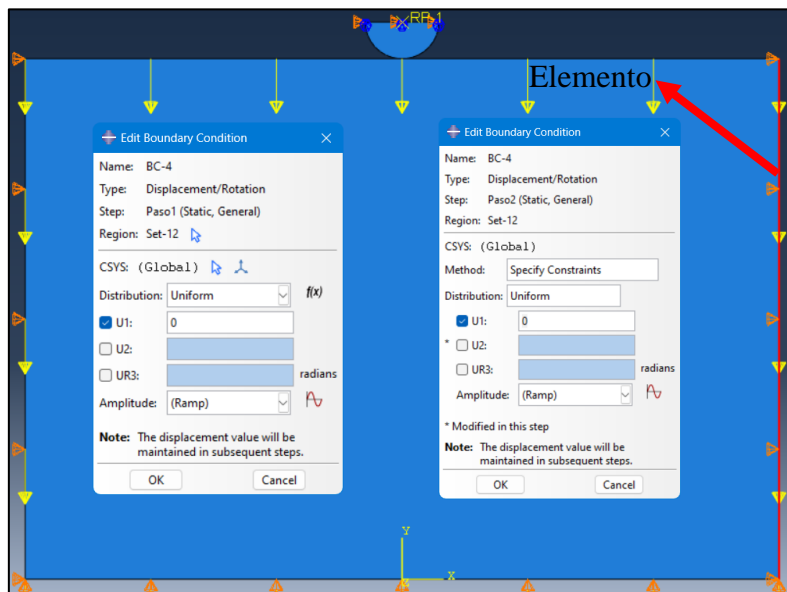
Condición de borde 1



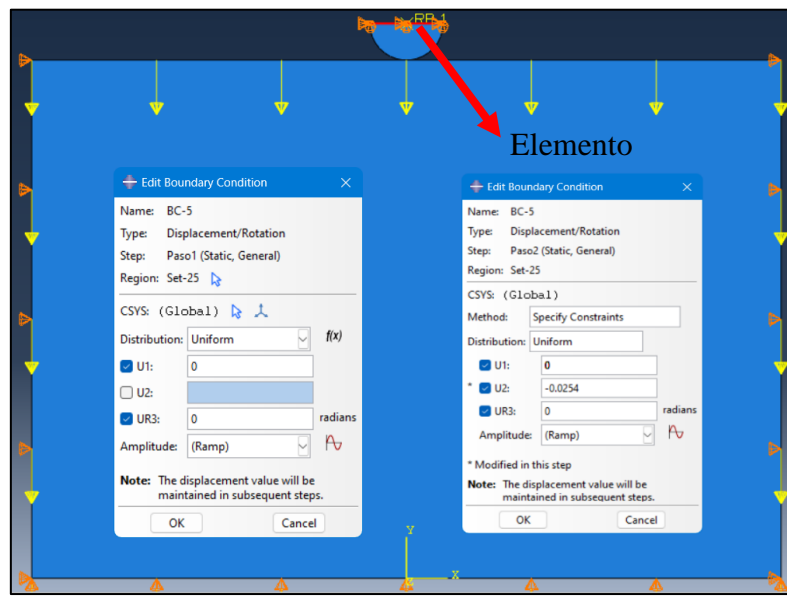
Condición de borde 2



Condición de borde 3

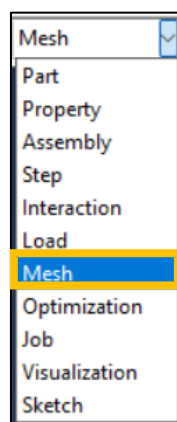


Condición de borde 4

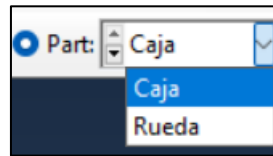



Es importante tomar en cuenta que el proceso es el mismo para el paso 1 y paso 2, sin embargo, cada proceso se lo hace individualmente primero definiendo las condiciones de frontera primero con respecto al paso 1 y seguidamente se repite todo el proceso pero esta vez definiendo las condiciones con respecto al paso 2, mismas que se pueden ver como deben ir definidas en cada una de las imágenes presentadas previamente.

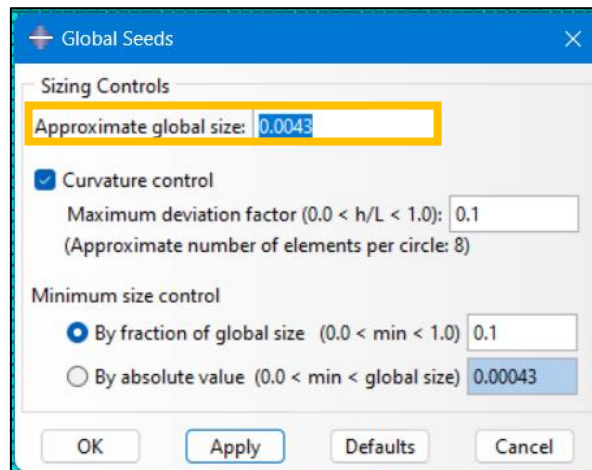
15. El mallado de los elementos es importante al momento de correr el programa, para ello debemos ir a la sección de **“Mesh”**.




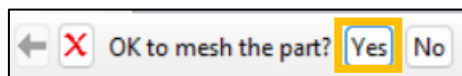
Se debe seleccionar la sección a la cual se va a asignar el mallado mediante **“Object”** → **“Part”**.




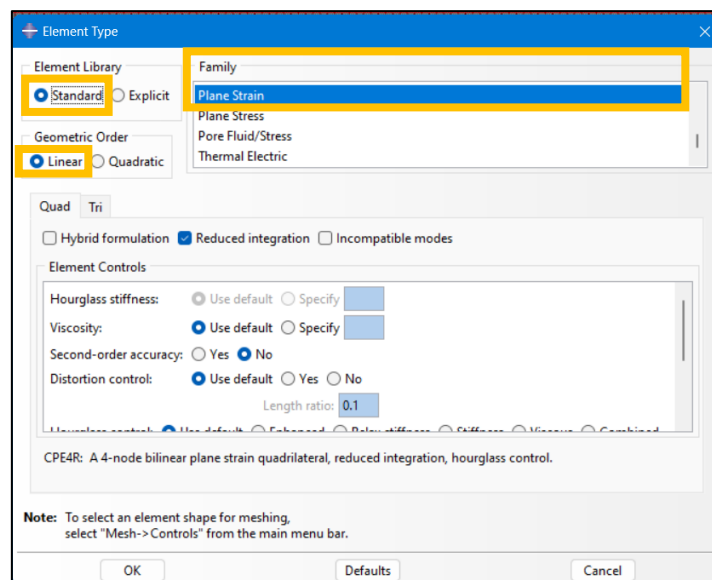
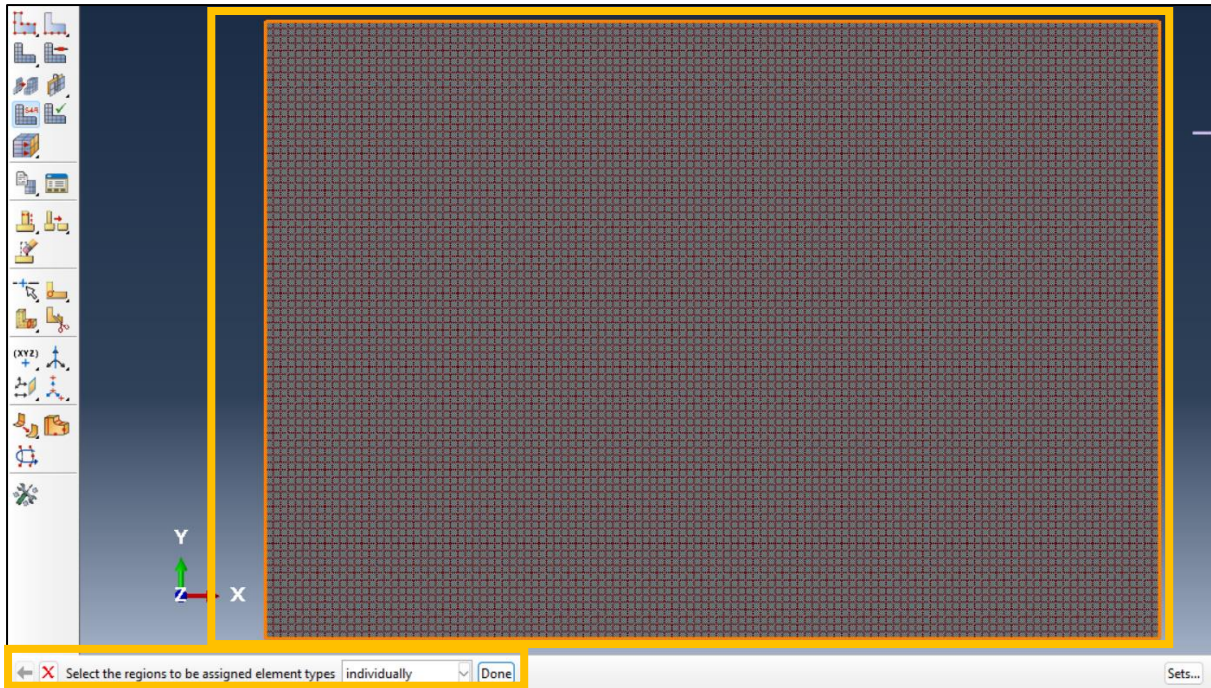
Mediante el botón  se modifica el mallado de la caja, para el caso con un valor de 0.0043, que aproximadamente corresponde a unos 10000 elementos.



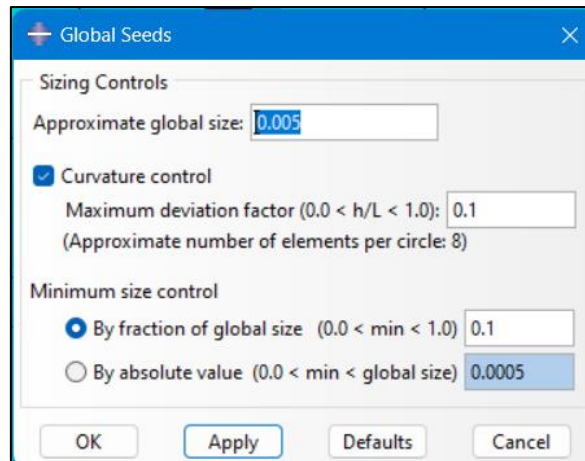
Para activar el mesh de la caja se debe seleccionar  y paso siguiente confirmar el mallado de la parte.



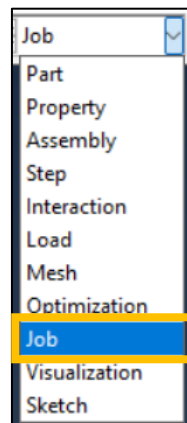
Para finalizar el asignado de mallado mediante  se asigna el tipo de elemento, para ello se selecciona la parte, seguidamente **“Done”** y en la familia **“Plane Strain”**.




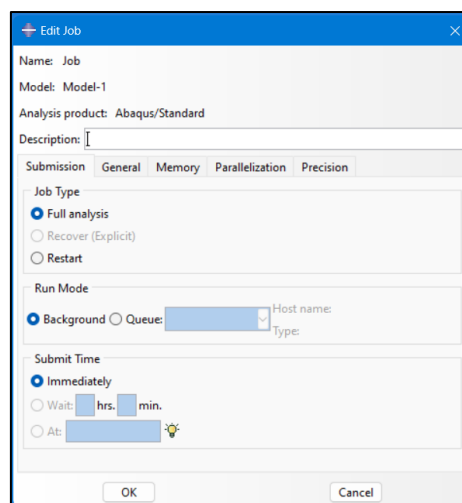
En el caso de la rueda se sigue el mismo proceso, pero con el siguiente inicio de mallado:



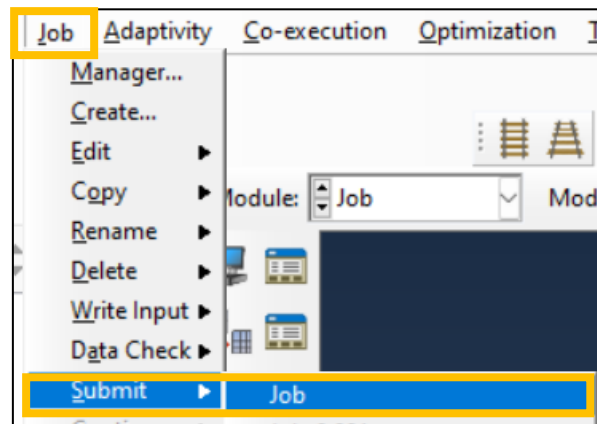
16. Finalmente, para correr el programa se debe crear un “Job”



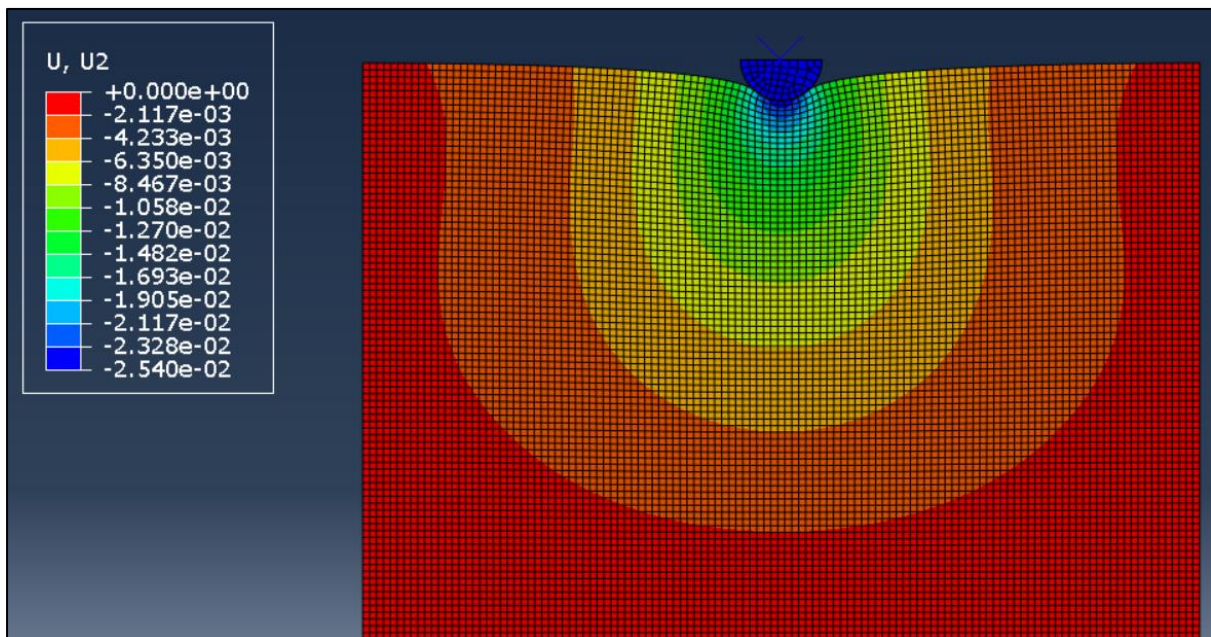
El job se lo crea mediante , se asigna un nombre y se lo deja establecido con las opciones por defecto.



Para que se generen los resultados se debe procesar el trabajo creado mediante “**Job**” → “**Submit**”




17. Resultados

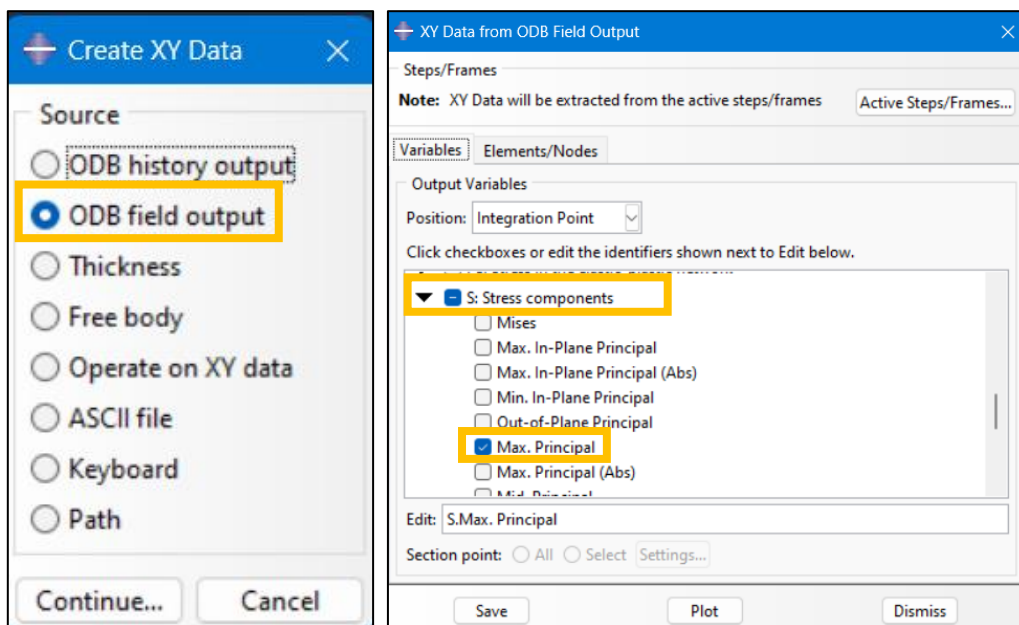


ANÁLISIS DE RESULTADOS

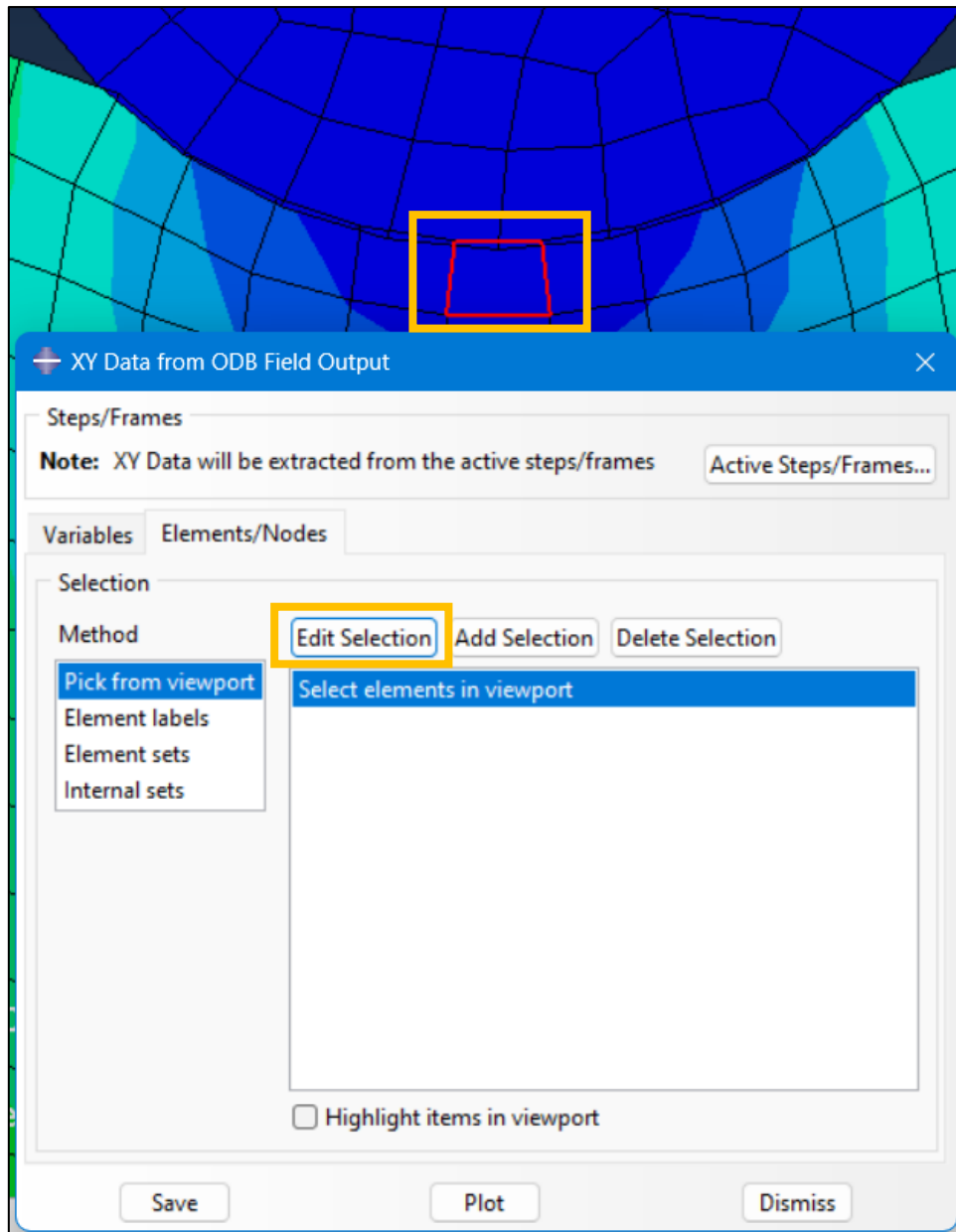
Mediante los resultados del software Abaqus se procedió a generar una gráfica con respecto al esfuerzo máximo principal de un elemento central integrado y otra del desplazamiento con respecto a un nodo cualquiera.

Para poder obtener la gráfica una vez obtenidos los resultados es necesario dirigirnos al icono

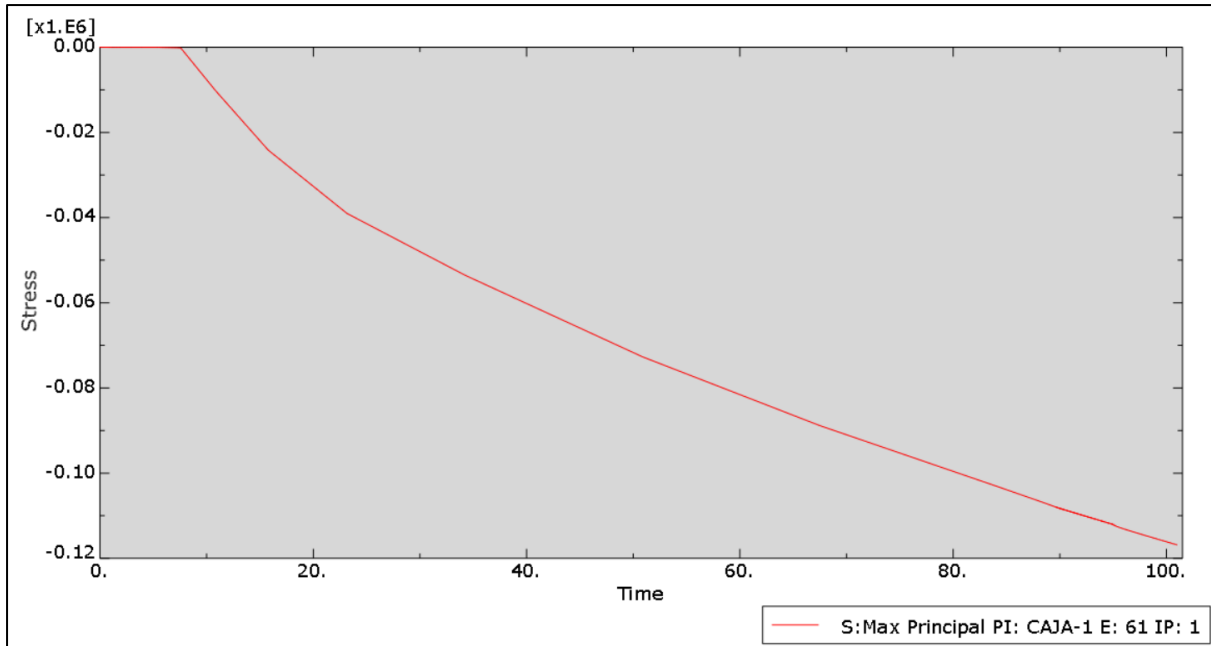
de datos en X y Y . A través del cual podemos seleccionar los valores a graficarse y con respecto a que nodo. Primero debemos seleccionar un tipo de dato “ODB field output”.



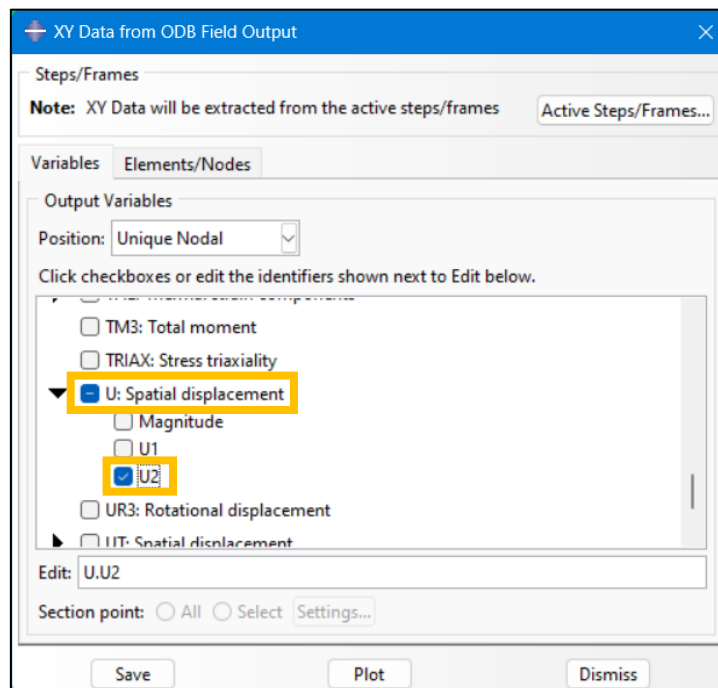
Debemos seleccionar los esfuerzos máximos principales en una posición de “Integration Point”, de manera que esto nos permitirá seleccionar el elemento de malla en el cual se va a trabajar y generar la gráfica, tal y como seguidamente podemos observar.

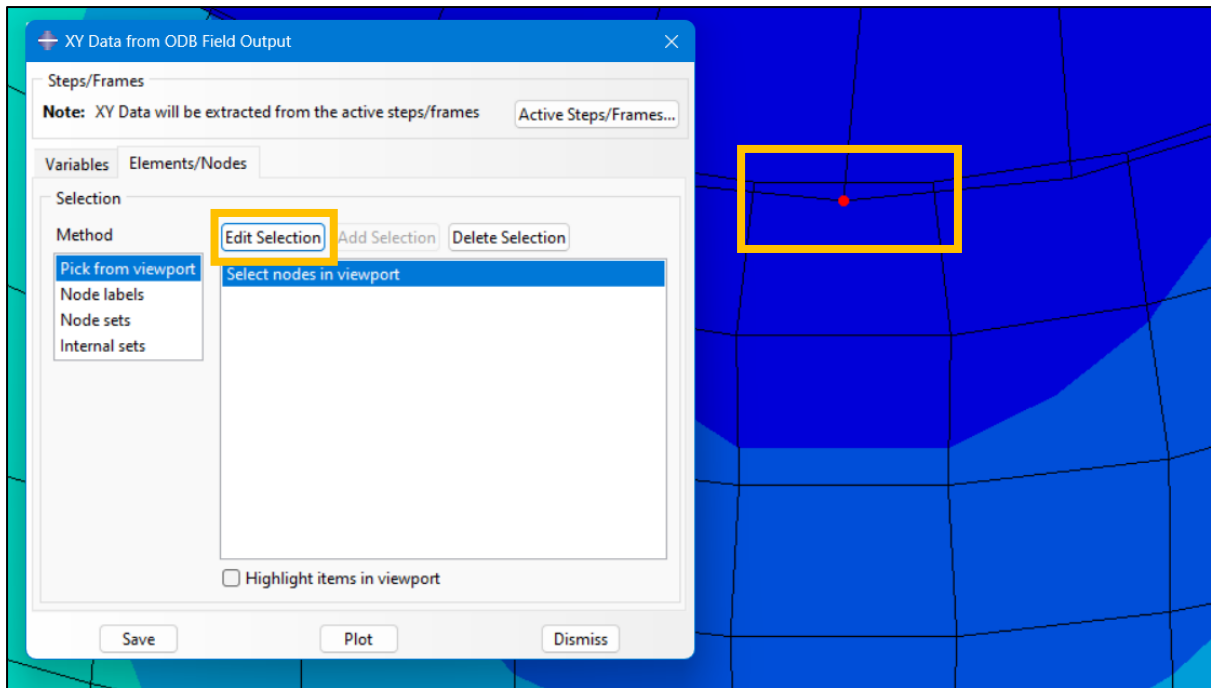


Una vez seleccionado el nodo sobre el cual deseamos obtener la gráfica de resultados seleccionamos el botón de “Plot”, de manera que nos genera la siguiente gráfica de resultado.

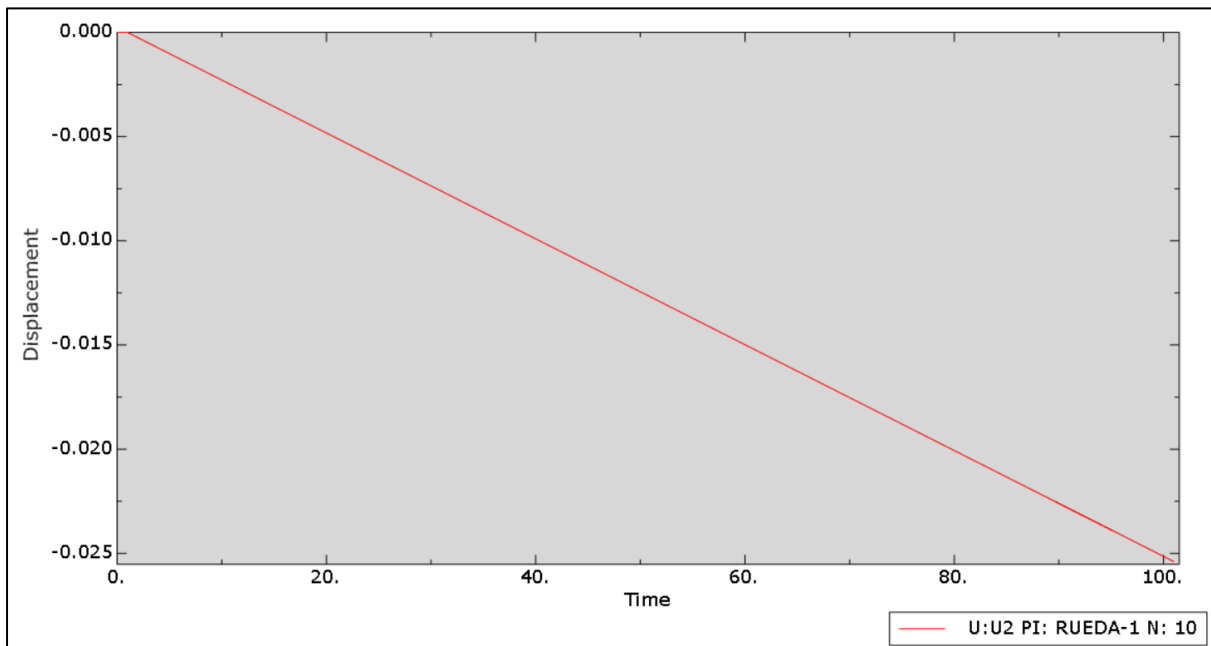


Para obtener la grafica con respecto a los desplazamientos realizamos el mismo proceso con respecto a la gráfica mostrada anteriormente, con excepción de que esta vez debemos seleccionar que nuestra gráfica sea con respecto a un desplazamiento “U2”, pero con respecto a un nodo de la rueda.



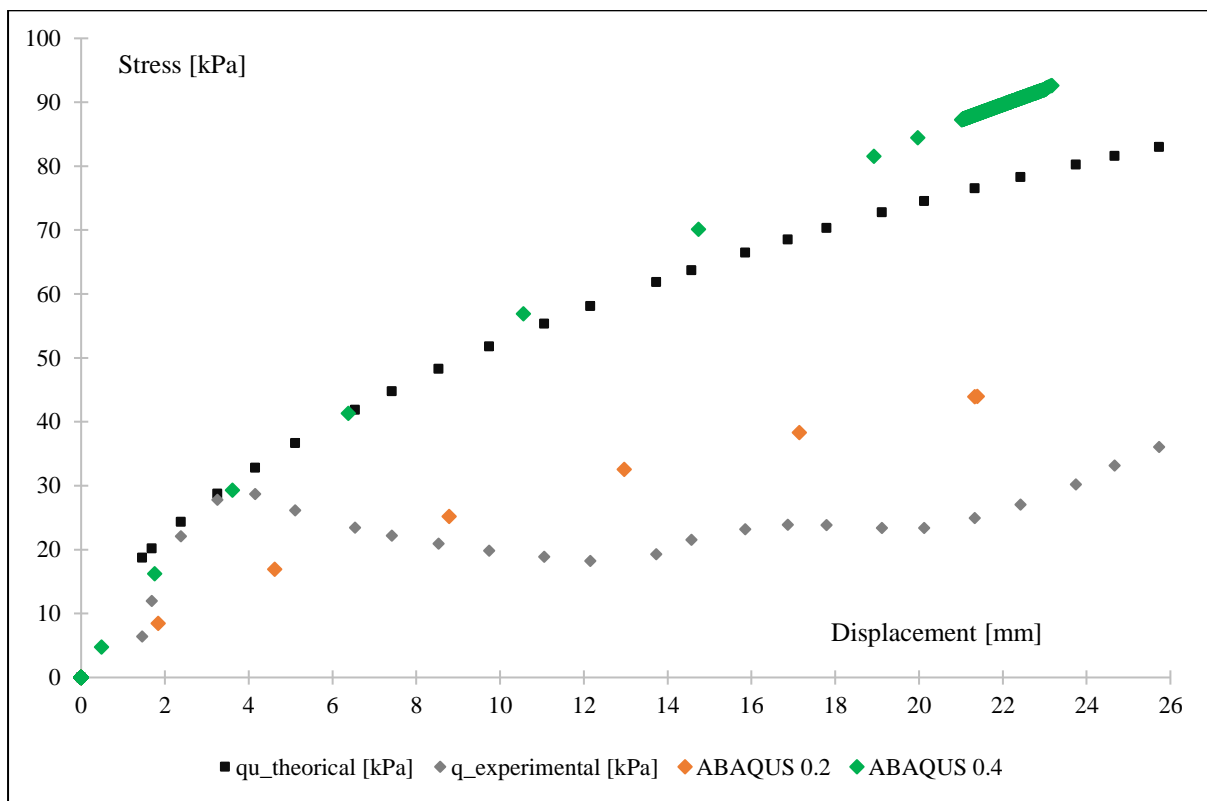


Al igual que el proceso anterior, finalmente seleccionamos “Plot” y graficamos los resultados obteniendo como respuesta la gráfica de desplazamientos.



De los gráficos generados se exportaron los datos a Excel, de manera que los datos se los transformo en valor absoluto y mediante un análisis de datos se los modificaron permitiendo que la gráfica se genere partiendo de 0 y su orden de magnitud se igual al de las gráficas de la

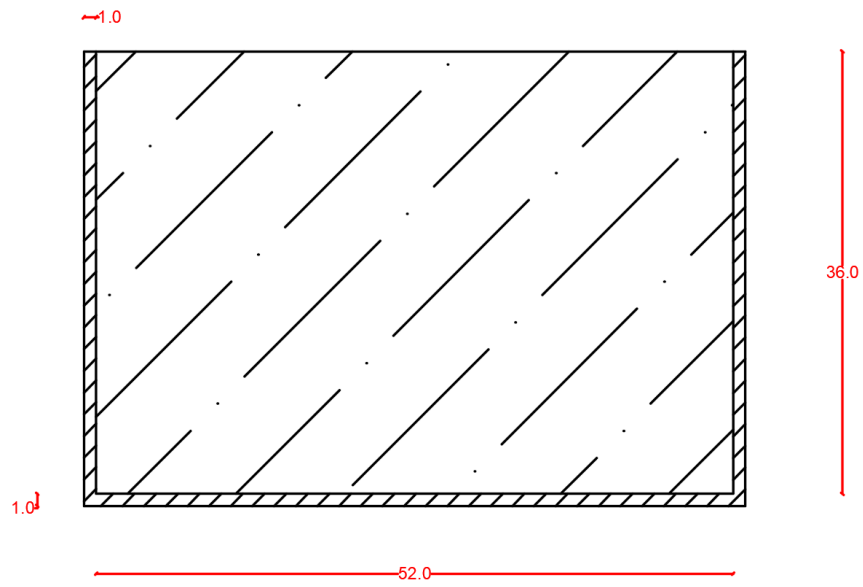
capacidad portante teórica y experimental, para así poder tener un análisis gráfico correspondiente al esfuerzo vs el desplazamiento.



En la gráfica es posible observar que el desarrollo mediante datos teóricos y experimentales se los puede corroborar mediante el uso del software, ya que los resultados arrojados resultados según los datos ingresados se obtuvieron con el mismo orden de magnitud, por lo cual son comparables a los valores reales.

ANEXOS

CAJA EXPERIMENTAL - VISTA FRONTAL



REFERENCIAS

- Arizaga, M. (1988). *La vialidad y su importancia para el desarrollo y la seguridad nacional*.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2020). *Análisis de inversiones en el sector transporte terrestre interurbano latinoamericano a 2040*. CAF.
- Bitbol, A., Taberlet, N., Morris, S., & McElwaine, J. (2009). Scaling and dynamics of washboard roads. *American Physical Society*, 6-308.
doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.061308>
- Dunning, B. (2022, Marzo 8). *On Washboard Roads*. Retrieved from Skeptoid:
<https://skeptoid.com/episodes/4822>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2014). *Asistencia Técnica al Programa de Infraestructura y Conservación Vial (EC-LI065)*.
- Riley, J. (1971). *The road corrugation phenomenon: a simulation and experimental evaluation*. Cornell University.
- South Dakota Local Transportation Assistance Program. (2000). In K. Skorseth, & A. Selim, *Gravel Roads - Maintenance and Design Manual* (pp. 1-20).