

Capítulo 3 Descripción de la herramienta numérica

3.1 ABAQUS. Discusión del problema

Para la simulación del estudio de la recuperación elástica en la flexión de tubos se utilizará el software comercial de elementos finitos ABAQUS, que nos permitirá resolver el problema explícito de nuestro modelo.

ABAQUS es un programa de cálculo por elementos finitos de propósito general. Permite resolver problemas de mecánica del sólido, lineales y no lineales, en los rangos estático y dinámico. Incluye modelos de material de tipo elastoplástico y viscoplástico, entre otros. En lo que se refiere a problemas de no linealidad geométrica incluye formulaciones para grandes deformaciones y problemas de contacto. Incluye también formulaciones acopladas sólido-fluido en los que el fluido es un medio independiente con una interfase de contacto con el medio sólido. Además tiene capacidad para resolver problemas de análisis piezoeléctrico, de transmisión de calor, de difusión de masa y de análisis termoeléctrico acoplado.

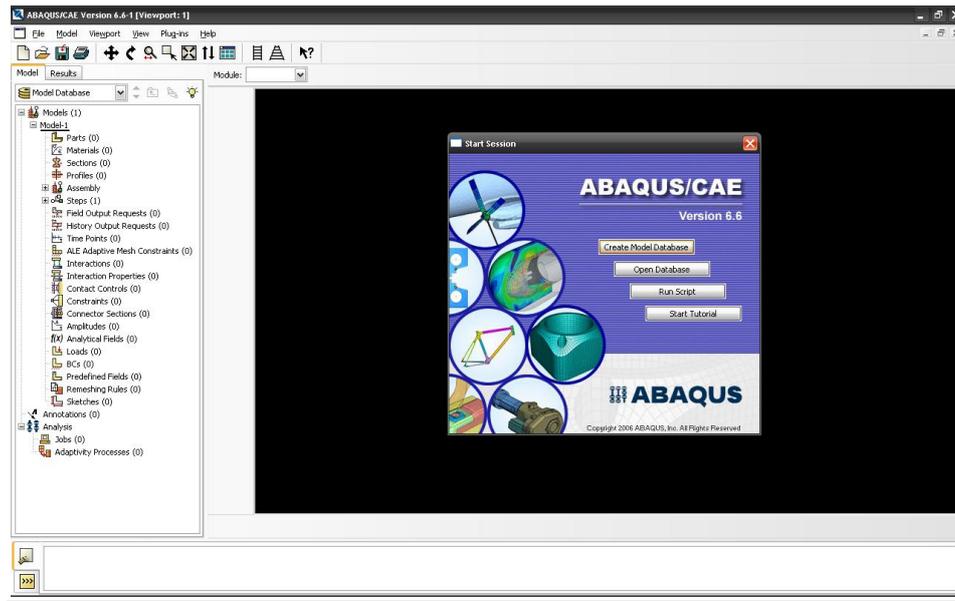


Figura 3.1 Ventana principal de ABAQUS

Nuestro problema podrá ser considerado como un problema cuasiestático, en los que las fuerzas de inercia, de amortiguamiento o cargas variables podrán ser despreciables frente al resto.

La principal característica del análisis es la no linealidad del mismo, debida a diversas causas:

- La geometría sufre grandes desplazamientos y deformaciones, experimentando importantes cambios en la geometría inicial del modelo.
- El material tiene un comportamiento elastoplástico, donde la zona plástica estará modelada mediante una ecuación no lineal.
- El contacto entre el tubo y las diferentes matrices introducen una fuerte no linealidad.

3.2 Problema implícito

Existen dos formas de abordar este análisis, mediante el método explícito o el método implícito. Son métodos numéricos para la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias tiempo-variable y ecuaciones diferenciales parciales.

El método explícito calcula el estado del sistema en un tiempo posterior del estado del sistema al instante actual; mientras que el método implícito lo encuentra resolviendo

una ecuación implicando ambos estados del sistema, tanto el actual como el posterior. Matemáticamente, se puede ver en las siguientes ecuaciones:

Donde x es el estado actual, $x + \Delta x$ es el estado posterior y Δt es un incremento de tiempo infinitesimal.

Es evidente que el método implícito requiere un mayor gasto computacional, y puede ser mucho más difícil de aplicar. El método implícito se utiliza por el hecho de que muchos problemas en la vida real son rígidos, para los cuales el uso del método explícito requiere pequeños pasos de tiempo Δt para mantener limitado el error en el resultado.

Realizaremos el análisis usando el método implícito ya que es el recomendado cuando se estudian problemas cuya respuesta es no lineal. Este tipo de solución es costosa y pueden presentarse problemas de convergencia, sin embargo, las no linealidades son más simples de resolver durante análisis dinámicos que en análisis estáticos. La incrementación de tiempo recomendada es del tipo automática, aunque si se usa la incrementación directa debemos dar incrementos pequeños y un mínimo de dos iteraciones.

3.3 Construcción del modelo

Para la construcción de nuestro modelo seguiremos la estructura del árbol que aparece a la izquierda de la ventana principal. A continuación se desglosarán las distintas secciones hasta alcanzar el modelo final.

3.3.1 Definición de la geometría de los elementos

Para disminuir el tiempo de procesado, se ha optado por definir los elementos como 'shell'. La característica 'shell' es una idealización de un sólido en el que el espesor es considerado pequeño en comparación con la anchura y la profundidad.

Para definir los elementos recurrimos al cuadro 'Create Part' dentro del módulo 'Part'. Una vez en el cuadro de texto elegimos las opciones que más nos interesen.

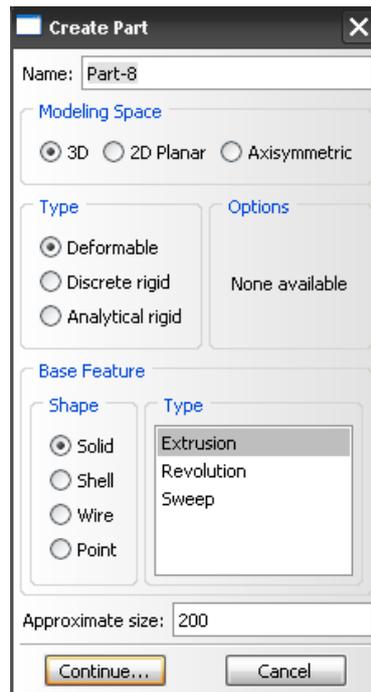


Figura 3.2 Creación de una parte

Tanto las matrices como el mandril los definiremos como ‘3D shell discrete rigid’ ya que todos ellos son elementos indeformables. Sin embargo, para definir el tubo tomaremos ‘3D shell deformable’, ya que será el único elemento deformable del modelo.

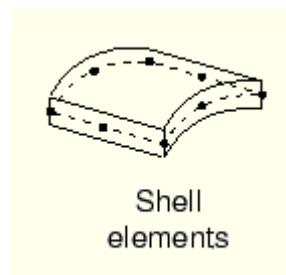


Figura 3.3 Definición de elemento shell

Una vez definidas las características iniciales, pasamos a definir la geometría mediante la herramienta de CAD que posee el software.

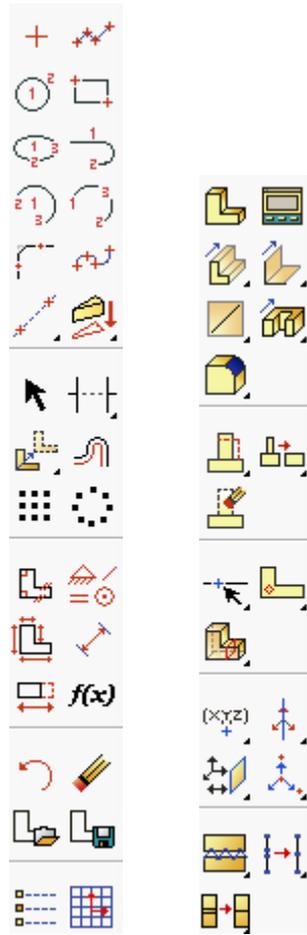


Figura 3.4 Herramientas para crear una parte

De esta forma, obtenemos piezas como las que se muestran en la figura siguiente.

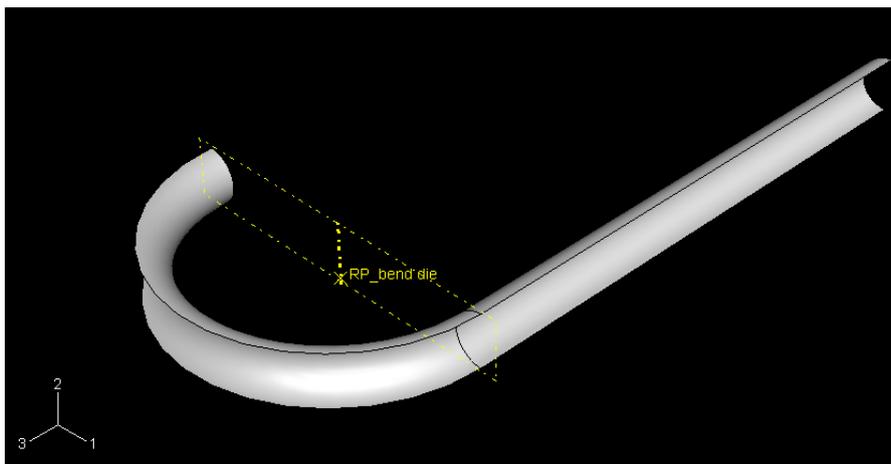


Figura 3.5 Parte creada

3.3.2 Mallado de elementos

Una vez definidos todos los elementos de nuestro modelo, debemos pasar a mallarlos para obtener así una superficie de elementos que nos servirá para el análisis del modelo. Para definir una malla, entramos en el módulo ‘Mesh’, seleccionamos la parte que queremos mallar del árbol de la izquierda y, gracias a los comandos que nos proporciona ABAQUS, mallamos la parte correspondiente siguiendo las indicaciones.

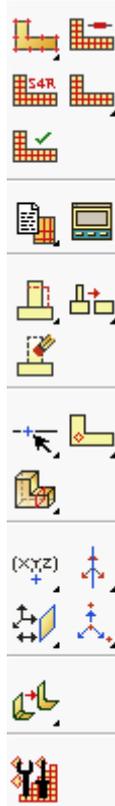


Figura 3.6 Herramientas para el mallado

Debemos tener muy en cuenta el tamaño de estos elementos ya que cuanto más pequeños sean, mayor será el costo computacional. Pero, sin embargo, si los elementos son muy pequeños, nos aseguramos que el problema converja y podamos obtener una solución factible

Se han seguido dos consideraciones importantes a la hora de mallar:

- Los elementos de la malla del tubo siempre serán más pequeños que el resto de partes del modelo. Se ha tomado así para que el contacto entre las partes sea correcto y no existan interferencias de puntos entre las partes.

- En la malla del tubo procuraremos en la medida de lo posible que haya un número par de elementos a lo largo de la longitud de la sección. De esta manera, evitamos un estado de cargas antisimétrico que produzca desplazamientos no deseados del modelo.

Utilizaremos dos tipos de elementos:

- S4R: elementos shell convencionales para esfuerzos o desplazamientos de cuatro nodos y con integración reducida en un punto, como se muestra en la figura. Aplicados al tubo.

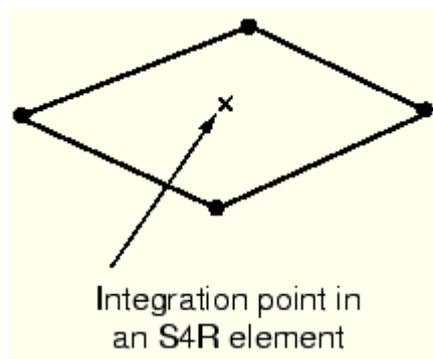


Figura 3.7 Elementos S4R

- R3D4: elementos cuadriláteros de cuatro nodos rígidos tridimensionales. Serán aplicados a todas las matrices y el mandril.

Con lo cual, una vez realizado el mallado, obtenemos una parte mallada como la que aparece en la figura.

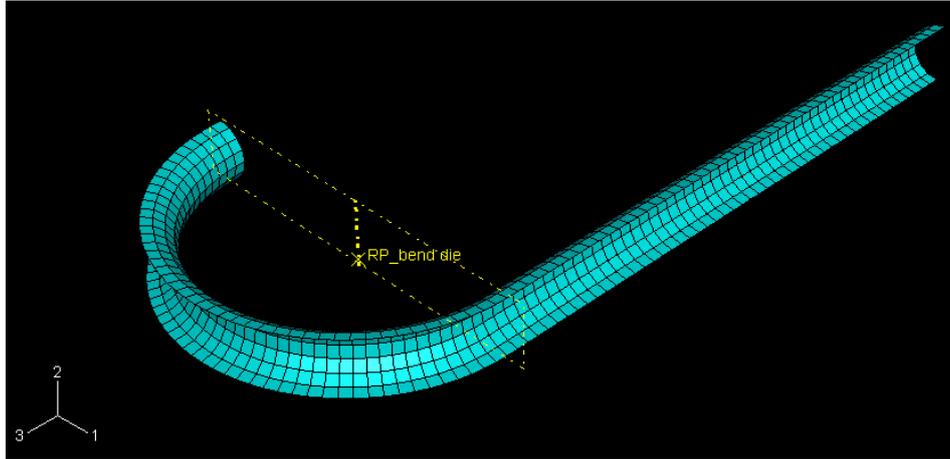


Figura 3.8 Parte mallada

3.3.3 Definición de materiales

Ya tenemos definidas todas las partes que compondrán nuestro modelo, pero ¿de qué materiales están hechos? En este apartado se insertarán los materiales con los que se trabajará.

Primeramente, se recopilará toda la información necesaria de los materiales a utilizar. Tras obtenerla, podemos pasar a definir los materiales en ABAQUS. Para ello, nos colocamos en el módulo 'Property' y abrimos el cuadro 'Material Manager' para crear y editar los materiales. Las características de los materiales se impondrán en el cuadro 'Edit Material'. En este último cuadro se muestran todas las propiedades elásticas, plásticas y de anisotropía posibles, además de cualquier otra característica del material que sea necesaria. Aquí es donde podremos incluir los valores de la ley de Hooke que consideremos para el tramo elástico y los valores de la ecuación de fluencia para el tramo plástico.

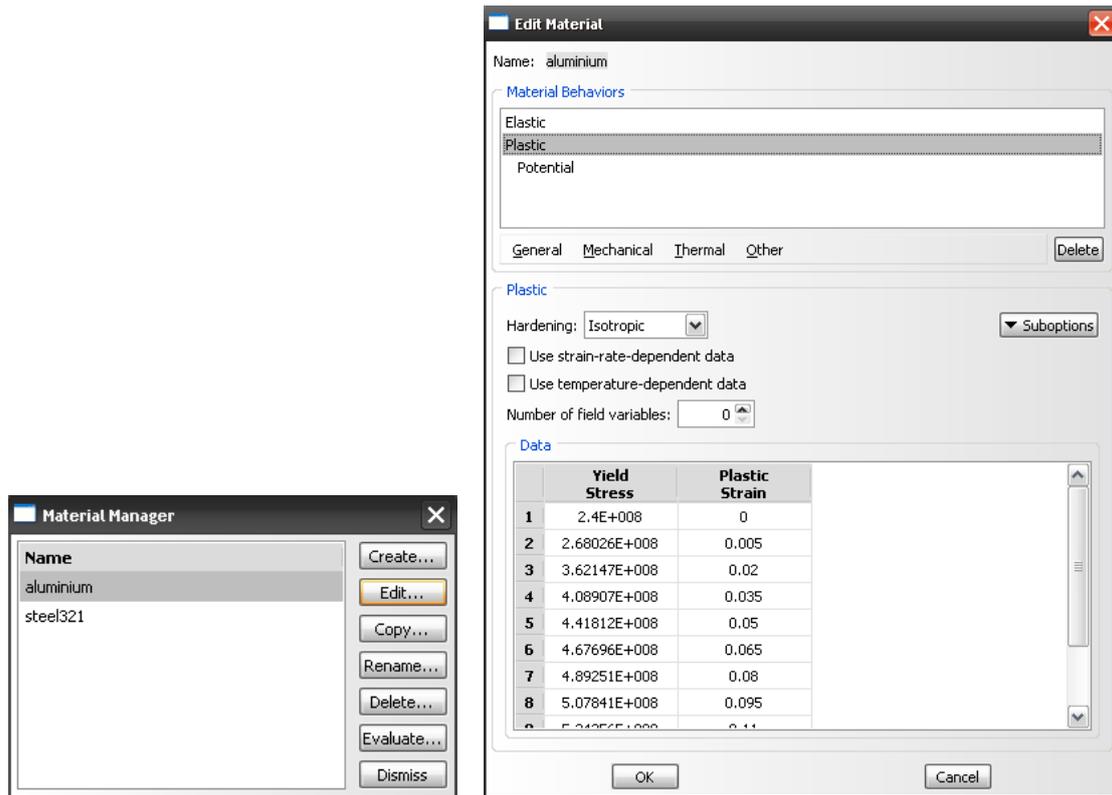


Figura 3.9 Definición de un material

Posteriormente introducimos los coeficientes de plastificación. ABAQUS utiliza la función potencial de Hill para definir la plasticidad anisotrópica de los materiales. Esta función no es más que una simple extensión de la función de Von Mises, y viene dada por la siguiente expresión:

en términos de componentes de tensión cartesianas, donde F, G, H, L, M, N son constantes obtenidas mediante ensayos del material en diferentes orientaciones. Están definidas como:

$$\begin{aligned} & \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \\ & \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \end{aligned}$$

En tercer lugar, definiremos las secciones a las que irán asociados los materiales para, posteriormente, asignar estas secciones a las partes correspondientes (en este caso solo se asignará al tubo al ser la única parte no rígida del modelo).

Para definir estas secciones, sin salirnos del módulo ‘Property’, abrimos el cuadro ‘Section Manager’ para crear la sección, y mediante el siguiente cuadro ‘Edit Section’, especificamos el espesor y material de la sección.

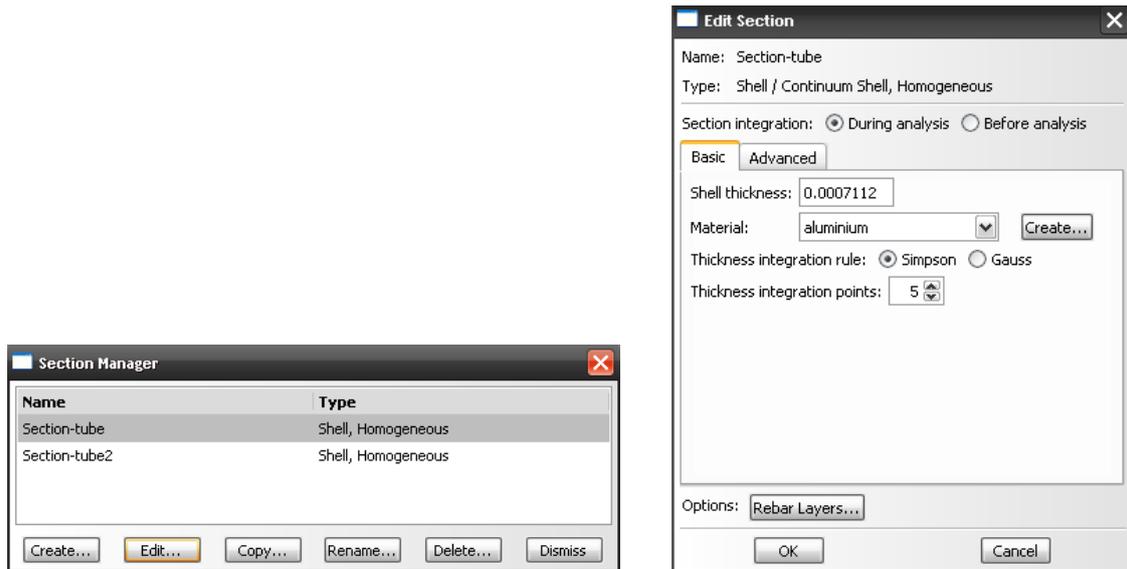


Figura 3.11 Definición de una sección

Tan sólo nos queda asignar la sección al tubo. Para ello, seleccionamos el tubo y abrimos el cuadro ‘Section Assignment Manager’, donde creamos la asignación de sección.

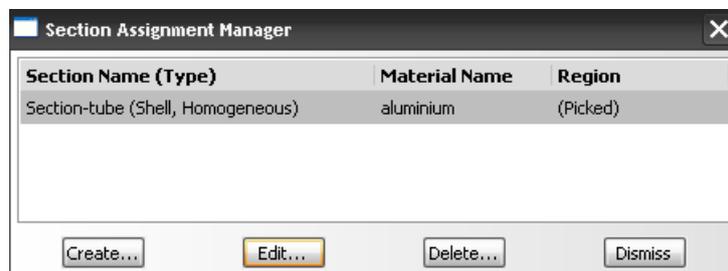


Figura 3.12 Definición de una asignación de sección

3.3.4 Ensamblado de elementos

Para conseguir el modelo final sobre el que haremos el análisis tenemos que ensamblar todas las partes que ya se han definido anteriormente. El ensamblado consiste básicamente en colocar todas las partes en el sitio correspondiente de manera que simule la máquina dobladora.

Para ensamblar usaremos el módulo ‘Assembly’ en el cual tendremos una serie de comandos con los que podemos girar, trasladar, colocar e introducir restricciones a las partes del modelo.

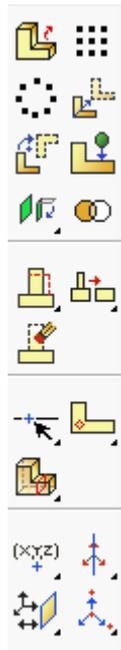


Figura 3.13 Herramientas para el ensamblado

Así, con todas las partes colocadas en su lugar, llegamos al modelo inicial con el que empezaremos el análisis y que se asemeja al diseño real.

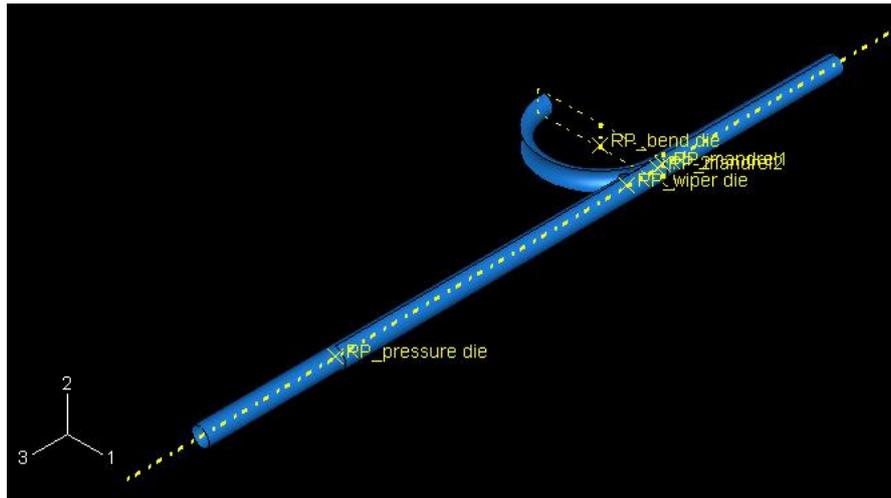


Figura 3.14 Modelo ensamblado

3.4 Definición de superficies de contacto

El contacto entre superficies es la fase más delicada e importante de la simulación o análisis del modelo.

El contacto se especificará dentro del módulo 'Interaction', donde abriremos el cuadro 'Interaction Manager' para ir creando las distintas regiones de contacto. Una vez que hemos creado los contactos, tenemos que editarlos gracias al cuadro 'Edit Interaction', en el que iremos especificando tres conceptos claves: entidades en contacto, tipo de contacto y parámetros de la fricción.

Cabe destacar también la opción 'Tie adjusted surfaces' en el cuadro 'Edit Interaction'. Con esta opción unimos dos superficies en contacto durante toda la simulación de manera que cada nodo de la superficie esclava tenga los mismos desplazamientos que la superficie maestra (en el apartado 'Entidades en contacto' se describen ambas superficies). Esta opción la usaremos para unir la matriz de flexión con el tubo. Así evitamos la inclusión de una nueva parte (que sería la matriz de anclaje), disminuyendo el costo computacional que supondría.

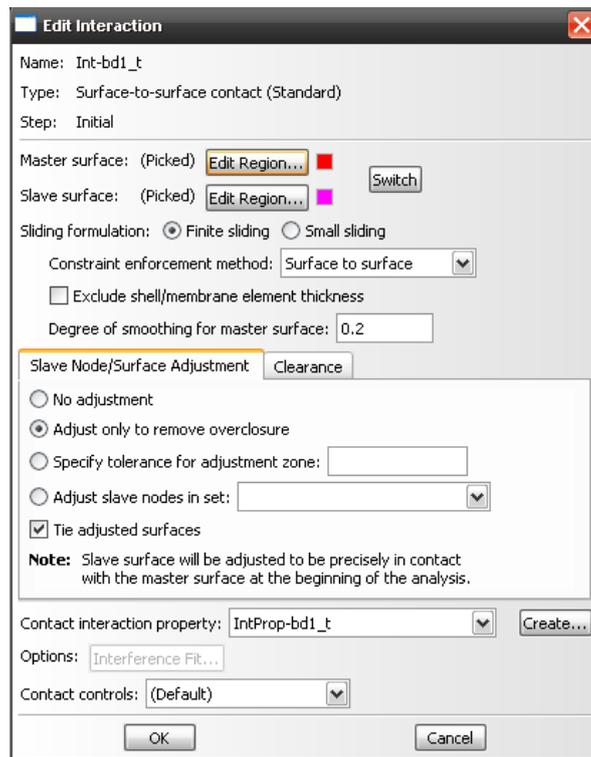
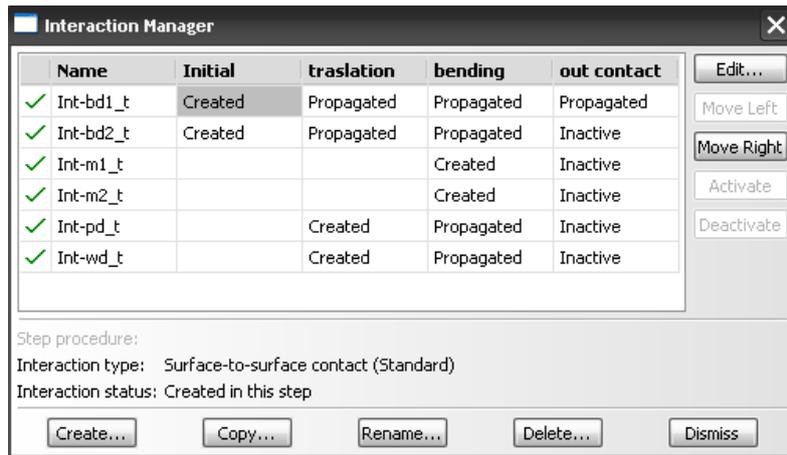


Figura 3.15 Creación de un contacto

En la figura siguiente se muestra cómo se va determinando el contacto entre dos superficies. Se indica de color rojo la superficie maestra y de color rosa la superficie esclava.

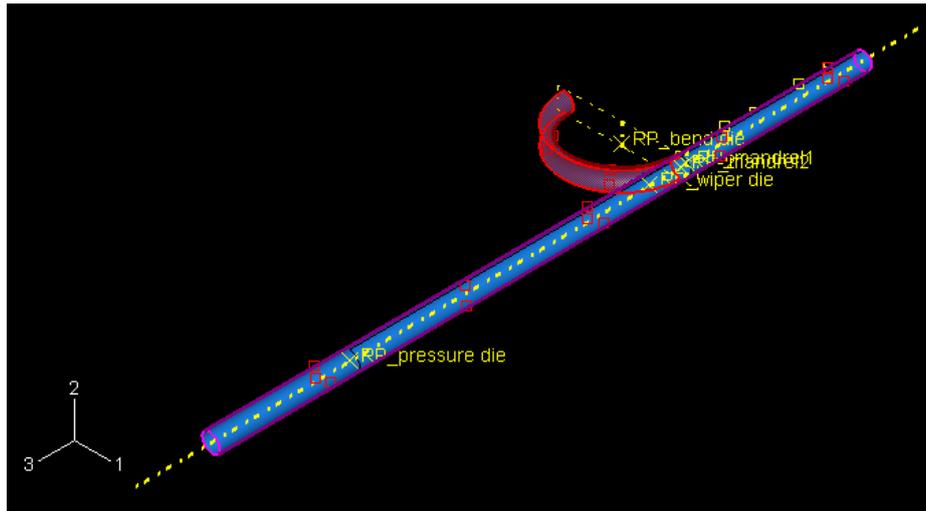


Figura 3.16 Contacto creado

En este último caso, para especificar los parámetros de la fricción debemos abrir el cuadro correspondiente a ‘Interaction Property Manager’ para crear las propiedades de contacto de cada parte, y el cuadro ‘Edit Contact Property’ donde colocamos los parámetros correspondientes al contacto.

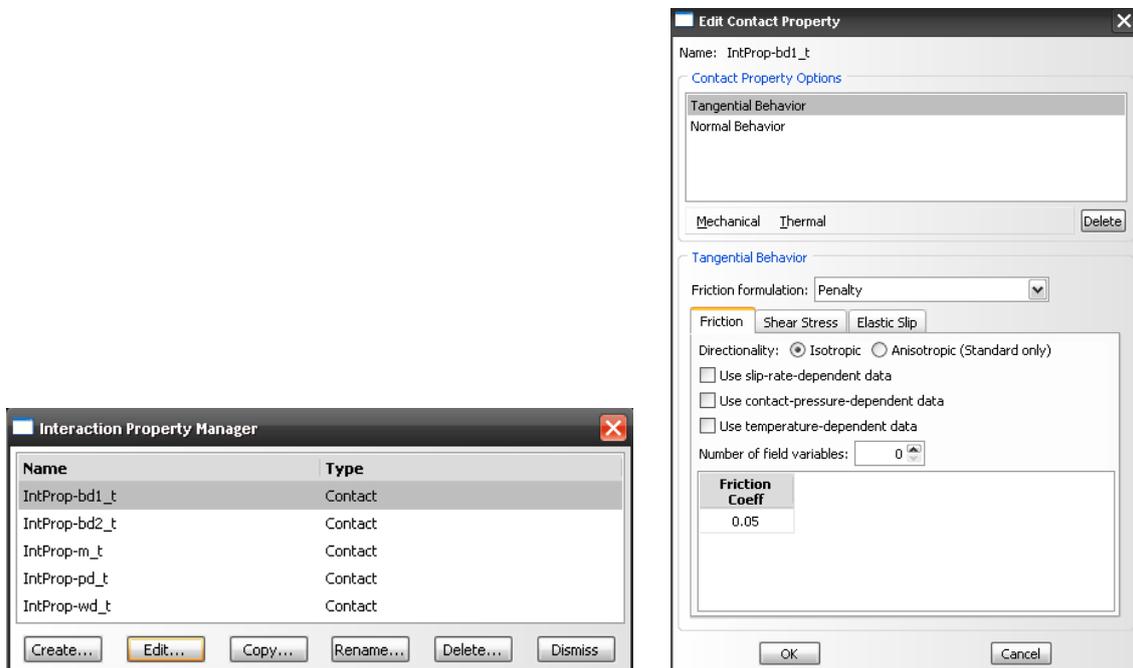


Figura 3.17 Creación de propiedades del contacto

3.4.1 Entidades en contacto

Un contacto siempre requiere dos partes. Estas dos partes son: *maestro (master)* y *esclavo (slave)*.

Definiremos cada superficie teniendo en cuenta que los nodos de la superficie esclavo nunca podrán penetrar dentro de la superficie maestro, pero sí al contrario, es decir, los nodos de la superficie maestro podrán penetrar en la superficie esclavo entre dos nodos de éste. De lo anterior se pueden sacar consideraciones:

- El mallado de la superficie esclavo siempre debe ser más fino que el de la superficie maestro.
- Si las densidades del mallado son similares, el material de la superficie esclavo debe ser el más blando.

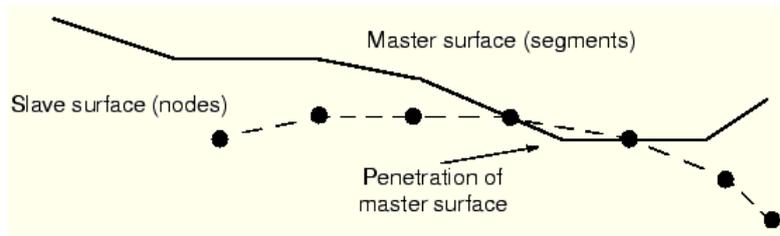


Figura 3.18 Recreación del contacto

Con lo cual, parece claro que la superficie esclavo será el tubo, mientras que las superficies maestro serán las matrices y el mandril.

3.4.2 Tipo de contacto

El tipo de contacto por el que optaremos será un tipo ‘surface-to-surface’, contacto superficie a superficie. Este tipo de contacto considera la forma de ambas superficies en la zona de contacto cuando la superficie maestro penetra la superficie esclavo.

El contacto ‘surface-to-surface’ involucra normalmente a muchos nodos e incrementa enormemente el costo computacional. Este costo computacional se produce por el método de integración empleado. Se trata de un método predictor/corrector usado en una formulación del contacto cinemática. Este método asume que el contacto no se produce en el primer incremento. Sin embargo, si vamos aumentando los incrementos y se produce una penetración, el método disminuirá la aceleración asegurando las restricciones del contacto hasta que se produce la configuración correcta.

3.4.3 Parámetros de la fricción

Si existe fricción debemos especificarla según los materiales que estemos tomando.

ABAQUS usa el modelo de fricción de Coulomb. Este modelo se basa en la ecuación:

Donde μ es el coeficiente de fricción y P es la presión de contacto entre las dos superficies. Para la mayoría de los materiales μ normalmente es menor que la unidad.

En los casos en que la tensión de la presión de contacto puede llegar a ser muy grande (como puede ocurrir en algunos procesos de fabricación), la teoría de Coulomb puede dar un esfuerzo de corte crítico en la interfaz entre las superficies que excede el límite de elasticidad del material, pudiéndose llegar incluso a la rotura. Por lo que podemos hacer una estimación razonable tomando $\bar{\tau}_{max}$, siendo σ_y el límite de fluencia del material adyacente a la superficie. En la siguiente figura se muestra este nuevo valor.

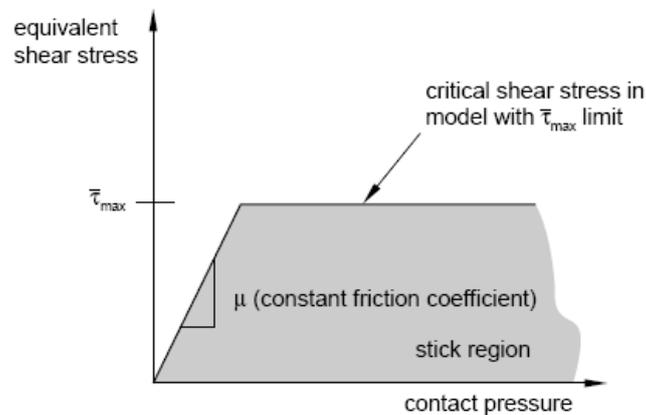


Figura 3.19 Teoría de Coulomb según Von Mises

La fricción que consideraremos será mínima debido al lubricante utilizado. El valor del coeficiente de fricción utilizado es $\mu=0.05$ para todos los contactos.

Cuando tengamos todos los contactos definidos entre todas las matrices y el tubo, nos aparecerá la figura siguiente, en la que podemos confirmar que los contactos están bien definidos.

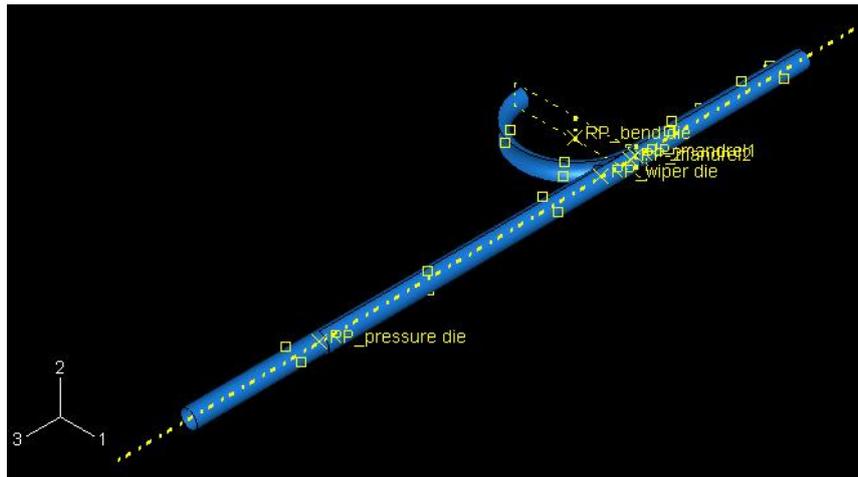


Figura 3.20 Modelo con todos los contactos creados

3.5 Aplicación de cargas y condiciones de contorno

Para tener el modelo ya completamente definido tan sólo faltaría introducirle las condiciones de carga y desplazamiento que tenga aplicadas. En nuestro caso, no aparecen cargas externas, pero sí tenemos condiciones de contorno en desplazamientos. Para la inclusión de todas estas condiciones de contorno usaremos el módulo ‘Load’, en el que nos aparecerán las opciones de introducción de cargas y condiciones de contorno. Como hemos dicho anteriormente, no tenemos cargas aplicadas por lo que abriremos el cuadro ‘Boundary Condition Manager’. En este cuadro podremos crear todas las condiciones de contorno que nos hagan falta. Tan sólo debemos especificar la superficie donde se aplicará y el valor correspondiente.

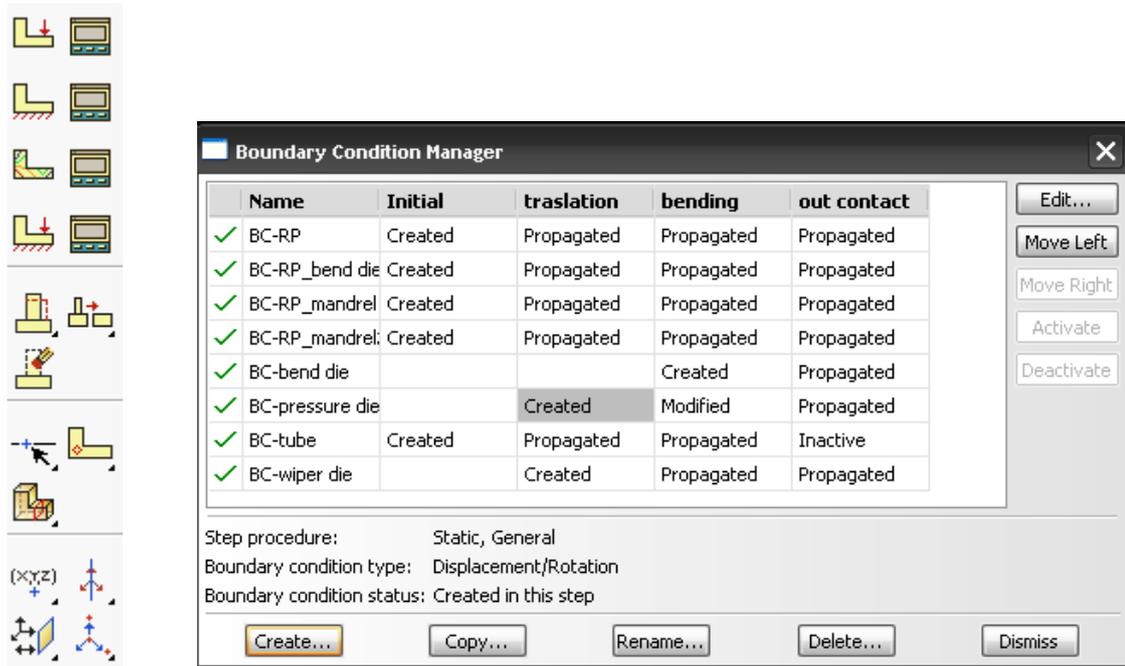


Figura 3.21 Herramientas para la aplicación de cargas y creación de condiciones de contorno

Una vez que todas las condiciones de contorno son especificadas nos quedarán representadas sobre el modelo como aparece en la figura.

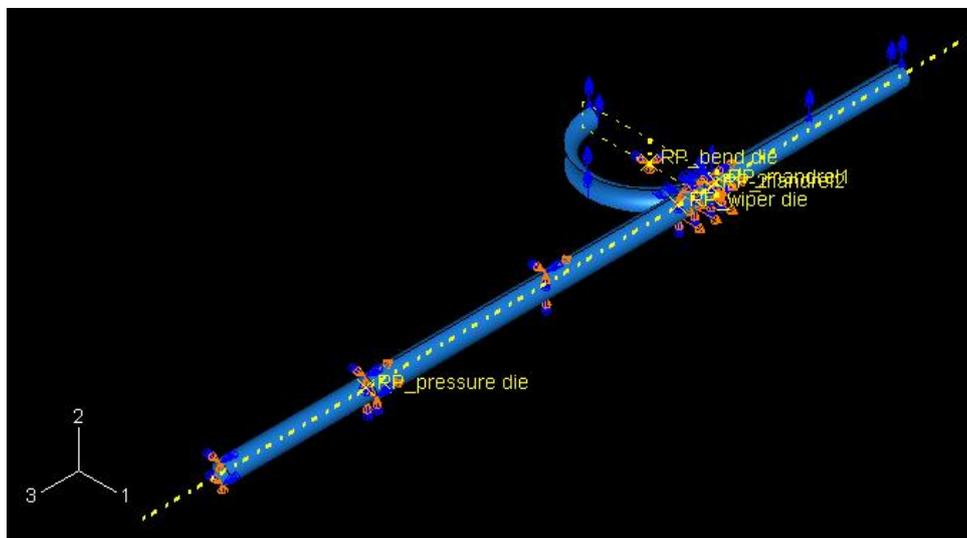


Figura 3.22 Modelo con condiciones de contorno aplicadas

ABAQUS tiene una forma de trabajar por pasos o steps. Es decir, estructura la simulación por partes. En cada uno de estos steps se le pueden aplicar al modelo contactos y condiciones de contorno distintas.

Con lo cual debemos calcular en cuántos steps dividimos nuestra simulación que crearemos en el módulo ‘Step’ mediante el cuadro ‘Step Manager’. Una vez creado el step, hay cuatro características importantes que completar:

- No linealidades geométricas (Nlgeom), si queremos que ABAQUS las considere en la simulación.
- Duración del step (time period). Es suficiente para nuestra simulación tomar una duración de 0.5 segundos.
- Máximo número de incrementos (maximum number of increments). Los suficientes para que la simulación se complete.
- Tamaño de los incrementos (increment size). Cada integración requiere un incremento de tiempo, que tendrá que ser siempre menor que la duración del step.

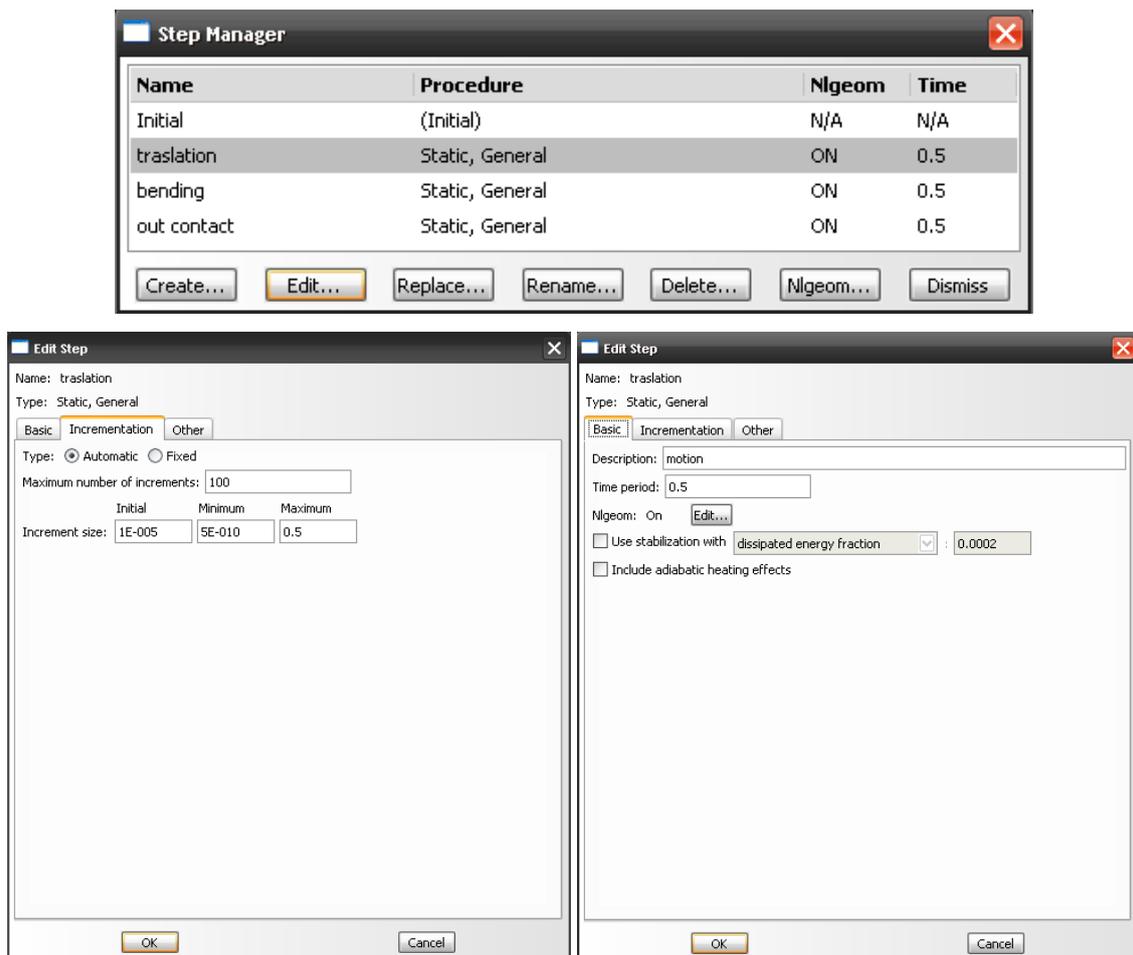


Figura 3.23 Creación de steps

3.6 Post-procesador

Antes de comenzar la simulación del modelo, podemos seleccionar los datos que queremos obtener mediante el cuadro ‘Edit Field Output Request’ del módulo ‘Step’. Los datos de salida también podemos ir seleccionándolos por steps.

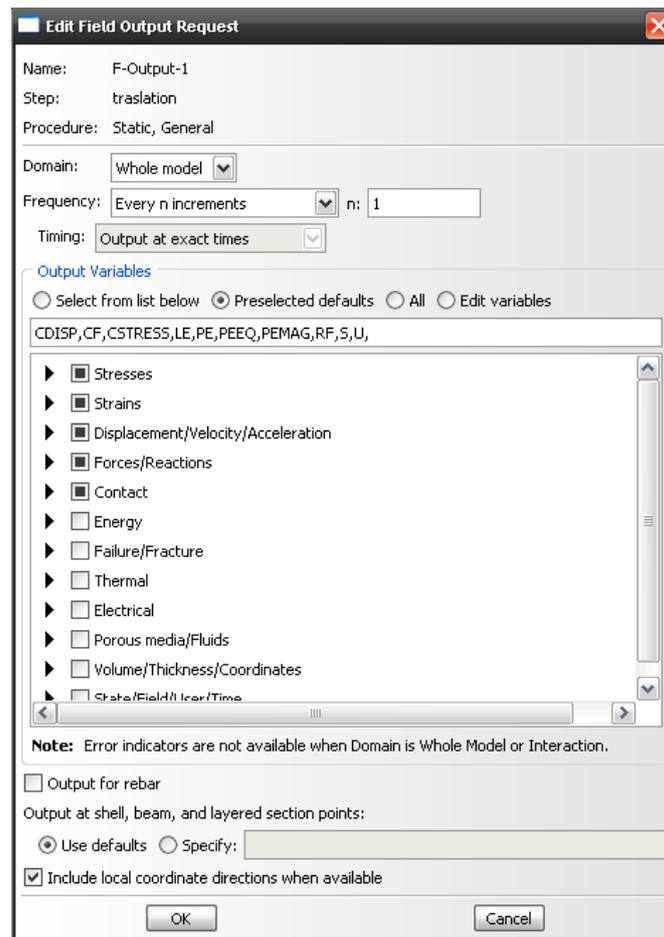


Figura 3.24 Creación de output

Tras finalizar la simulación del modelo podemos trabajar con los datos seleccionados anteriormente. Si tomamos el módulo ‘Visualization’ podemos coger de la barra de herramientas la opción ‘Result’ → ‘Field Output’, y escogemos aquellos datos que deseamos representar. Éstos se representan sobre el modelo deformado mediante diagramas de colores como se puede ver en la figura siguiente.

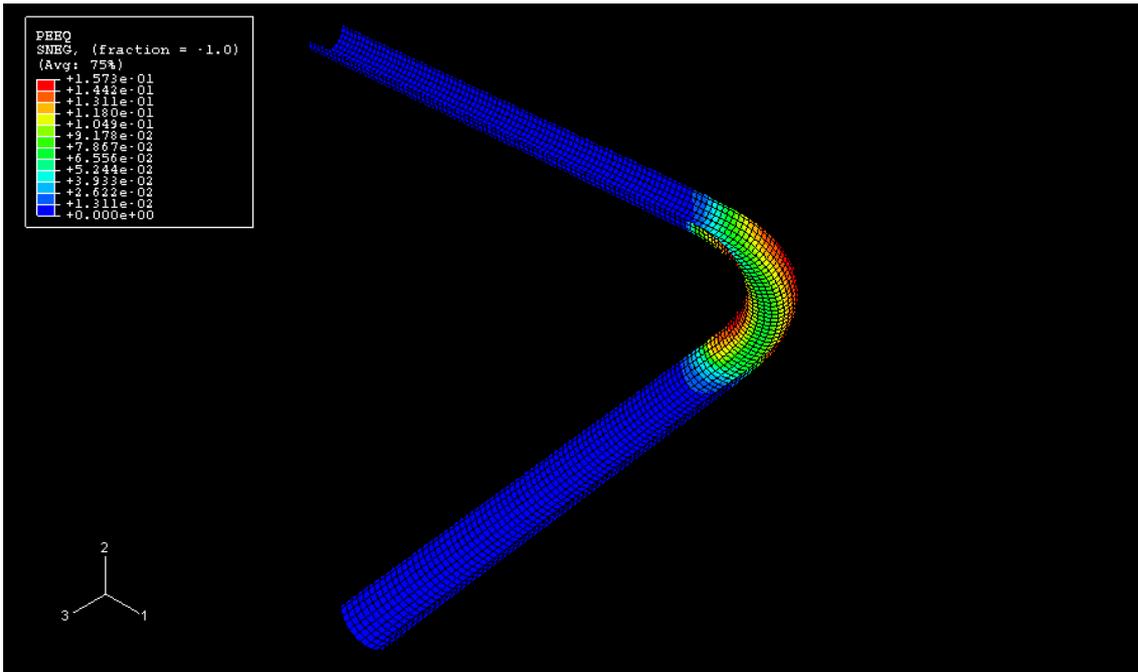


Figura 3.25 Representación de datos sobre el modelo