



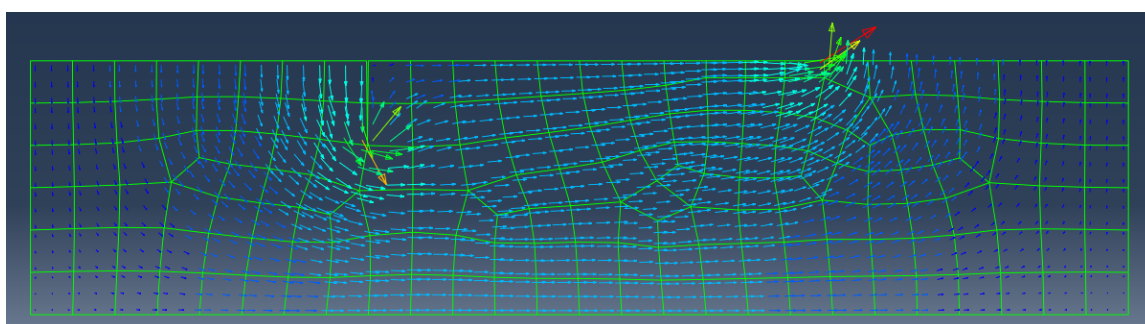
Universidad Politécnica de Madrid

Máster en Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Prácticas Métodos Computacionales en Ingeniería Civil

Tema 2-3. Problemas de difusión estacionarios.

Grupo Mecánica Computacional



Introducción

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

1. Reforzar los conceptos prácticos asociados al análisis numérico por elementos finitos y al uso del programa Abaqus.
2. Revisar el problema de difusión estacionario, su resolución numérica y aplicarlo al problema del flujo de un fluido en un medio poroso.

La práctica consta de tres secciones:

Sección 1. Breve introducción al problema de flujo de un fluido en un medio poroso.

Sección 2. Descripción del procedimiento de análisis por elementos finitos de un problema de difusión estacionario con el programam Abaqus.

Sección 3. Cuatro ejercicios propuestos a resolver por el alumno.



1. Introducción al problema de difusión estacionario

1.1. El problema de flujo estacionario en un medio poroso

A continuación, y a modo de repaso, se resumen los puntos más importantes del problema de flujo estacionario en un medio poroso de un fluido incompresible:

- El flujo de un fluido en medios porosos ocurre cuando hay una diferencia de energía entre dos puntos del fluido. El flujo tiene lugar desde el punto de mayor energía (aguas arriba) al punto de menor energía (aguas abajo).
- El nivel de energía de un fluido incompresible en un punto para un régimen estacionario viene representado por la Ecuación de Bernoulli, que calcula la altura total o piezométrica del fluido h en un punto como la suma de tres componentes: altura de presión, altura de elevación y altura de velocidad:

$$h = h_p + h_e + h_v = p/\gamma_w + z + v^2/(2g) \approx p/\gamma_w + z \quad (1)$$

siendo p la presión de poro del fluido, γ_w su peso específico, z su altura de elevación medida respecto a una línea horizontal seleccionada (los puntos bajo dicha línea tendrán una altura de elevación negativa), y habiéndose despreciado la altura de velocidad por considerar la velocidad del fluido v despreciable frente a los otros términos.

- Cuando el fluido pasa de un punto A con altura total h_A a un punto B con altura total $h_B < h_A$ se produce una pérdida de energía debido a la fricción al flujo que ofrece el suelo. Se define el gradiente hidráulico i_h como la pérdida de altura total por unidad de longitud. Si la distancia entre A y B según su línea de corriente es L_{AB} el gradiente hidráulico medio entre esos dos puntos es:

$$i_h = \frac{h_B - h_A}{L_{AB}} = \frac{(p_B/\gamma_w + z_B) - (p_A/\gamma_w + z_A)}{L_{AB}} \quad (2)$$

y el gradiente hidráulico en un punto es:

$$\mathbf{i}_h = \nabla h \quad (3)$$

- Cuando el flujo a través del suelo es laminar se aplica la ley de Darcy (equivalente a la ley de Fick para el problema de difusión explicado en la página 5 de la presentación de la clase de teoría haciendo $u = h$ y $\mathbf{C} = \mathbf{K}$):

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h \quad (4)$$

siendo \mathbf{q} el vector flujo (sus unidades son volumen de fluido por unidad de área y por unidad de tiempo).

- La ecuación de balance del problema del flujo laminar (estacionario) en un medio poroso de un fluido incompresible es equivalente a la Ecuación de Difusión (estacionaria) descrita en la página 8 de la presentación de la clase de teoría.

1.2. Estrategia de modelización en Abaqus del flujo en un medio poroso usando el problema térmico

En Abaqus el problema de flujo de un fluido en un medio poroso está dentro de una formulación acoplada que resuelve:

- El problema mecánico de deformación del suelo (que podemos considerarlo rígido o deformable)
- El problema de transporte de un fluido dentro del suelo

Abaqus también tiene implementado el problema de conducción de calor, que formalmente tiene la misma formulación que el problema de flujo de un fluido en un medio poroso (ambos problemas se idealizan con la ecuación en derivadas parciales que hemos llamado Ecuación de Difusión en clase de teoría). Estratégicamente podemos usar el módulo de Abaqus de conducción de calor para reproducir el flujo de un fluido en un medio poroso haciendo la siguiente equivalencia:

Parámetros	Conducción de Calor	Flujo medio poroso
h	Temperatura	Altura hidráulica
k	Coefficiente de conductividad	Coefficiente permeabilidad

Cuadro 1: Equivalencia problema térmico - problema flujo en medio poroso

Por lo tanto, en esta práctica resolveremos el problema de transporte de un fluido dentro de un medio poroso usando el módulo de conducción de calor de Abaqus.

★

2. Ejercicio Resuelto

A continuación resolvemos el problema de flujo resumido en la Fig. 1. Se busca reproducir el flujo de agua en un suelo isótropo que tiene un espesor de 9.2 metros, está formado por arena limosa con coeficiente de permeabilidad ($k_x = k_y = k_z = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) y limita en su parte inferior con una capa de arcilla impermeable. En este estrato arenoso se ha clavado 4.6 m de una tablestaca que asumiremos de longitud infinita en la dirección perpendicular al plano del dibujo. A la izquierda de la tablestaca (aguas arriba) se ha acumulado una altura de 3 metros de agua y a la derecha (aguas abajo) la escorrentía hace no haya acumulación de agua. Para el problema así definido y asumiendo un régimen estacionario se pide:

1. Obtener el caudal de agua saliente aguas abajo (por unidad de longitud de la dirección y).
2. Obtener la evolución de la carga total del fluido en el camino BCD y estimar el valor del gradiente hidráulico en el punto D.

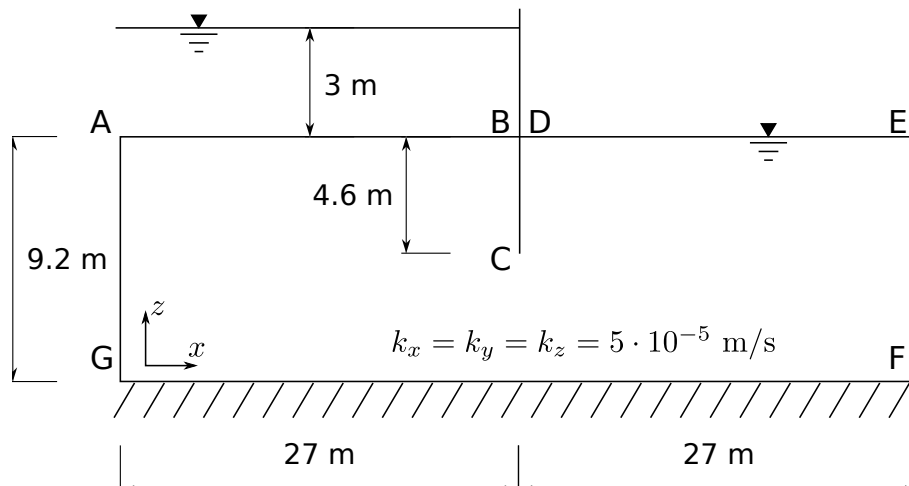


Figura 1: Descripción del modelo

Las unidades que vamos a utilizar se resumen en el Cuadro 2:

Magnitud	Unidades
Longitud	m
Altura total del fluido h	m
Coeficiente permeabilidad k	m/s
Vector flujo \mathbf{q}	$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$
Gradiente hidráulico \mathbf{i}_h	m/m

Cuadro 2: Unidades del problema

Para resolver este problema iniciamos Abaqus como en la práctica del tema 1 y definimos un directorio de trabajo llamado *Practica02*. A continuación se describen las acciones a realizar en cada uno de los módulos para llevar a cabo el análisis.

2.1. Módulo Part. Crear la geometría de los elementos

Activamos el módulo *Part* (ver Fig. 2a) y creamos un nuevo objeto tipo **2D Planar**, **Deformable** y **Shell** (ver Fig. 2b).

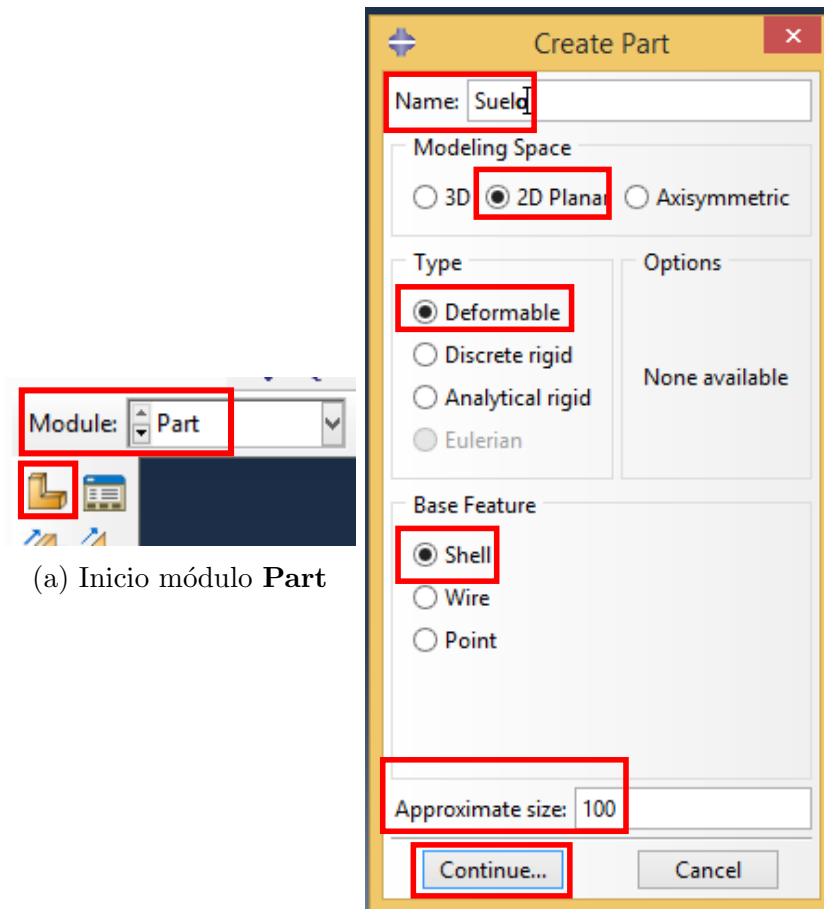


Figura 2: Inicio módulo **Part** y cuadro de diálogo **Create Part**

Con la herramienta *Sketcher* definimos la geometría del problema como indica la Fig. 3a obteniendo finalmente la nueva *part* que muestra la Fig. 3b.

2.2. Modulo Property. Definir materiales y secciones

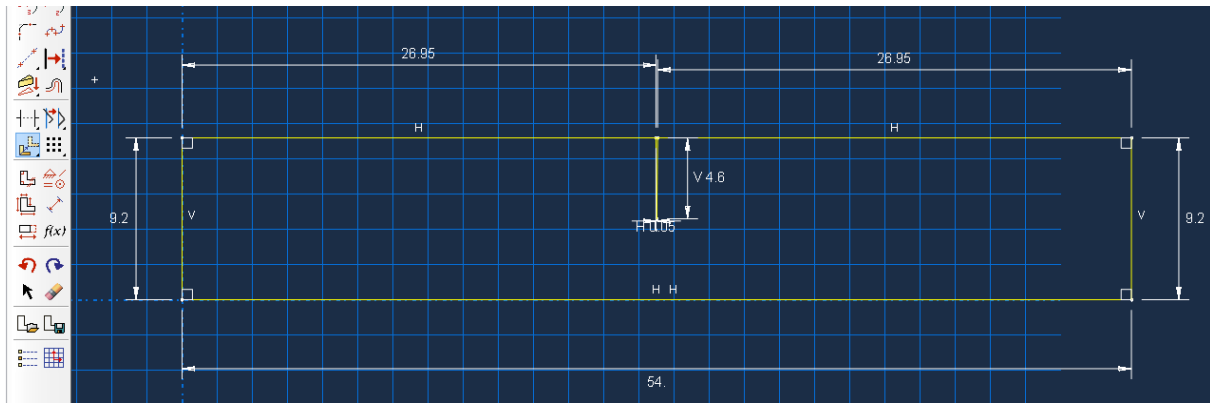
Activamos ahora el módulo **Property** y definimos un nuevo material tipo **Thermal**, **Isotropic** y con una conductividad de $5 \cdot 10^{-5}$ tal como muestras las Figs. 4a a 4c.

Una vez definido el material debemos definir una nueva sección de tipo **Solid** y **Homogeneous** siguiendo los pasos de las Figs. 5a a 5c.

Finalmente asignamos la sección creada a la **part** según se resume en las Figs. 6a a 6c.

2.3. Módulo Assembly. Ensamblar el modelo

En el módulo *Assembly* ensamblamos nuestro modelo haciendo una copia **dependiente** de nuestra *part* tal como indican las Figs. 7a y 7b.

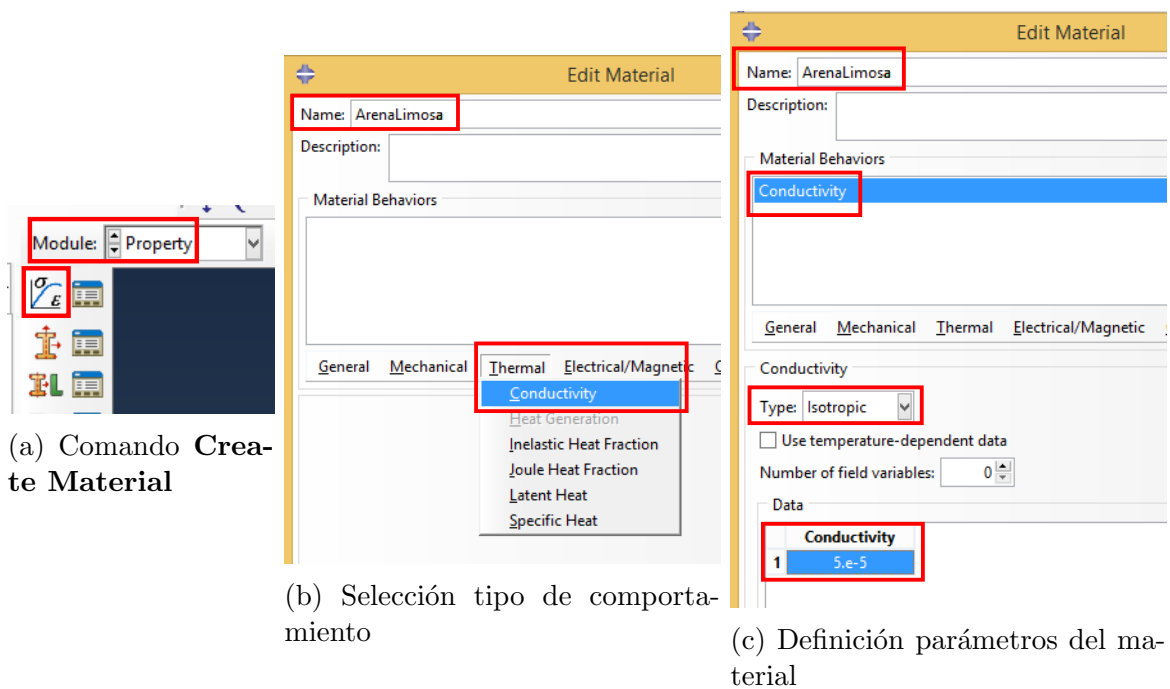


(a) Definición de la geometría



(b) Nueva **Part**

Figura 3: Construcción de una nueva **Part**



(a) Comando **Create Material**

(b) Selección tipo de comportamiento

(c) Definición parámetros del material

Figura 4: Definición de un nuevo material

2.4. Módulo Step. Configurar el procedimiento de análisis

Necesitamos crear un caso de cálculo de tipo **Heat Transfer** indicando que va a ser **estacionario (Steady-state)** (ver Figs. 8a a 8c).

Al haber haber definido un régimen estacionario Abaqus no nos genera un **History Output**. Revisemos entonces los datos que le vamos a pedir que nos guarde para el post-proceso abriendo el **Field Output** que crea por defecto, y asegurándonos que guardamos

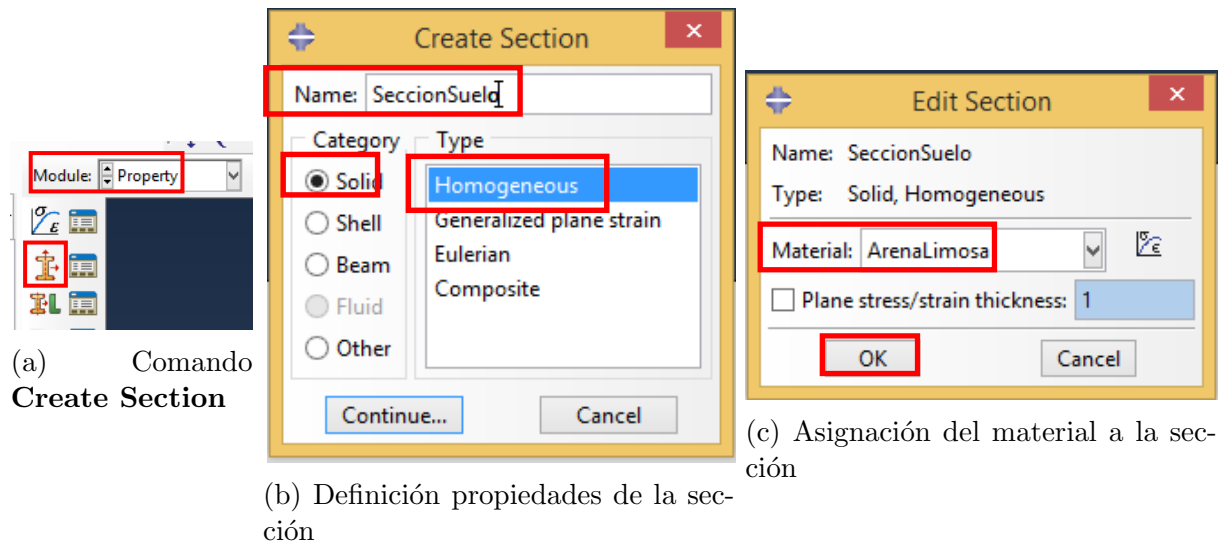
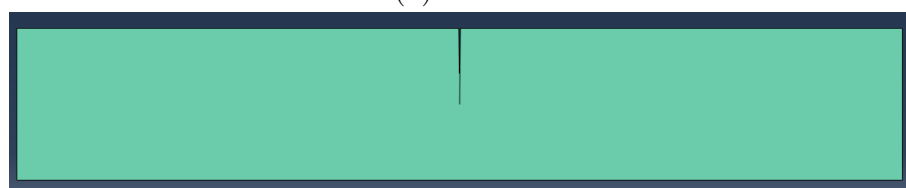
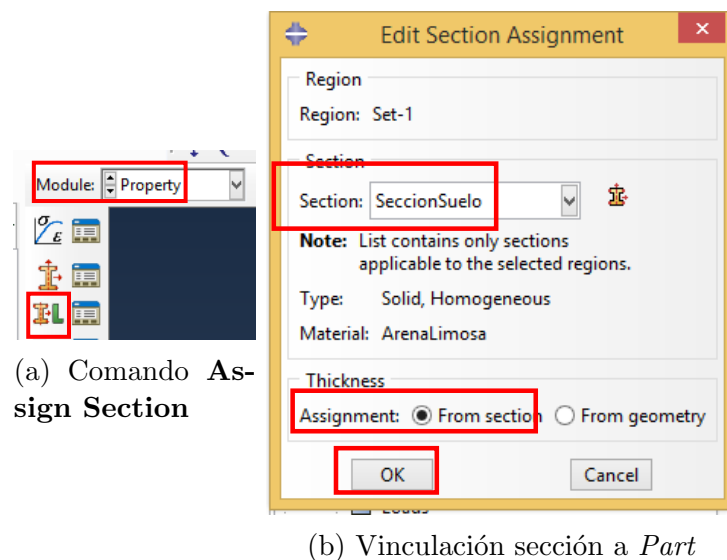


Figura 5: Definición de la sección *SeccionSuelo*



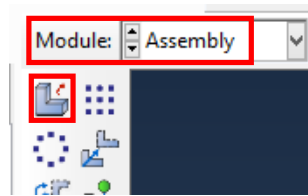
(c) Part con sección asignada

Figura 6: Asignación de la sección a una **Part**

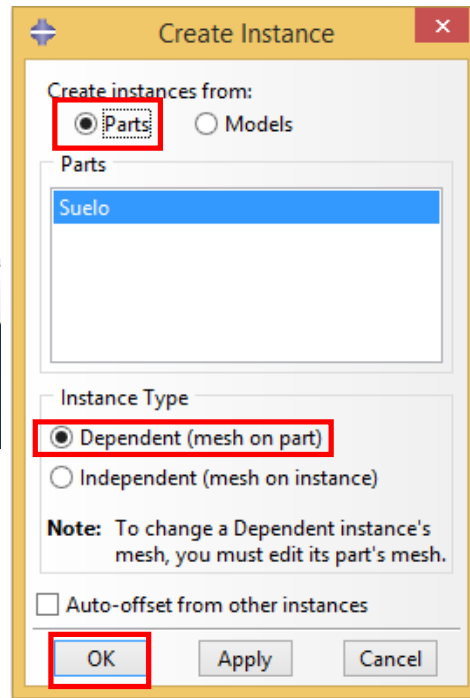
las **temperaturas nodales**, el **vector de flujo de calor** y los **flujos de reacción** (allí donde aplicamos una condición de contorno tipo Dirichlet de temperatura) tal como indican las Figs. 9a y 9b.

2.5. Módulo Load. Aplicar las condiciones de contorno

En el caso de problemas de flujo confinados podemos encontrar las siguientes dos condiciones de contorno (en nuestro problema impondremos un valor constante a las



(a) Comando **Create Instance**



(b) Creación de una copia **Dependiente**

Figura 7: Acción **Create Instance**

condiciones de contorno porque asumimos estamos en un régimen estacionario) :

Tipo esencial Contornos donde imponemos el valor de la carga total del fluido $h = h^*$.

Tipo natural Contorno donde imponemos el valor del flujo $(-\mathbf{k} \cdot \nabla h) \cdot \mathbf{n} = \text{cte}$, siendo \mathbf{n} la normal exterior al contorno donde imponemos el valor del flujo.

Si no imponemos nada en un contorno de nuestro dominio, Abaqus entiende que estamos imponiendo que el flujo a través de esa frontera es nulo (frontera impermeable), lo que se traduce que estamos imponiendo $\nabla h \cdot \mathbf{n} = 0$.

En nuestro caso tenemos que imponer:

1. Dos condiciones de contorno tipo esencial en la parte superior del dominio (asumiendo que el datum está en la línea horizontal AE)

- $h = u_A/\gamma_w + z_A = \frac{\rho_w g}{\rho_w g} 3 + 0 = 3 \text{ m}$ en la equipotencial AB
- $h = u_E/\gamma_w + z_E = \frac{\rho_w g}{\rho_w g} 0 + 0 = 0 \text{ m}$ en la equipotencial DE

Estas condiciones las impondremos en el caso de carga creado he hemos llamado *estacionario*.

2. La condición de contorno tipo natural de frontera impermeable $\nabla h \cdot \mathbf{n} = 0$ en los contornos AGFE y BCD. Esta condición de contorno se mantiene fija en todo el análisis y la podríamos definir en el caso de carga creado por Abaqus *Initial* para que se propague al resto de casos de carga. Sin embargo, como esta condición (frontera impermeable) se define por defecto, no es necesario que definamos nada.

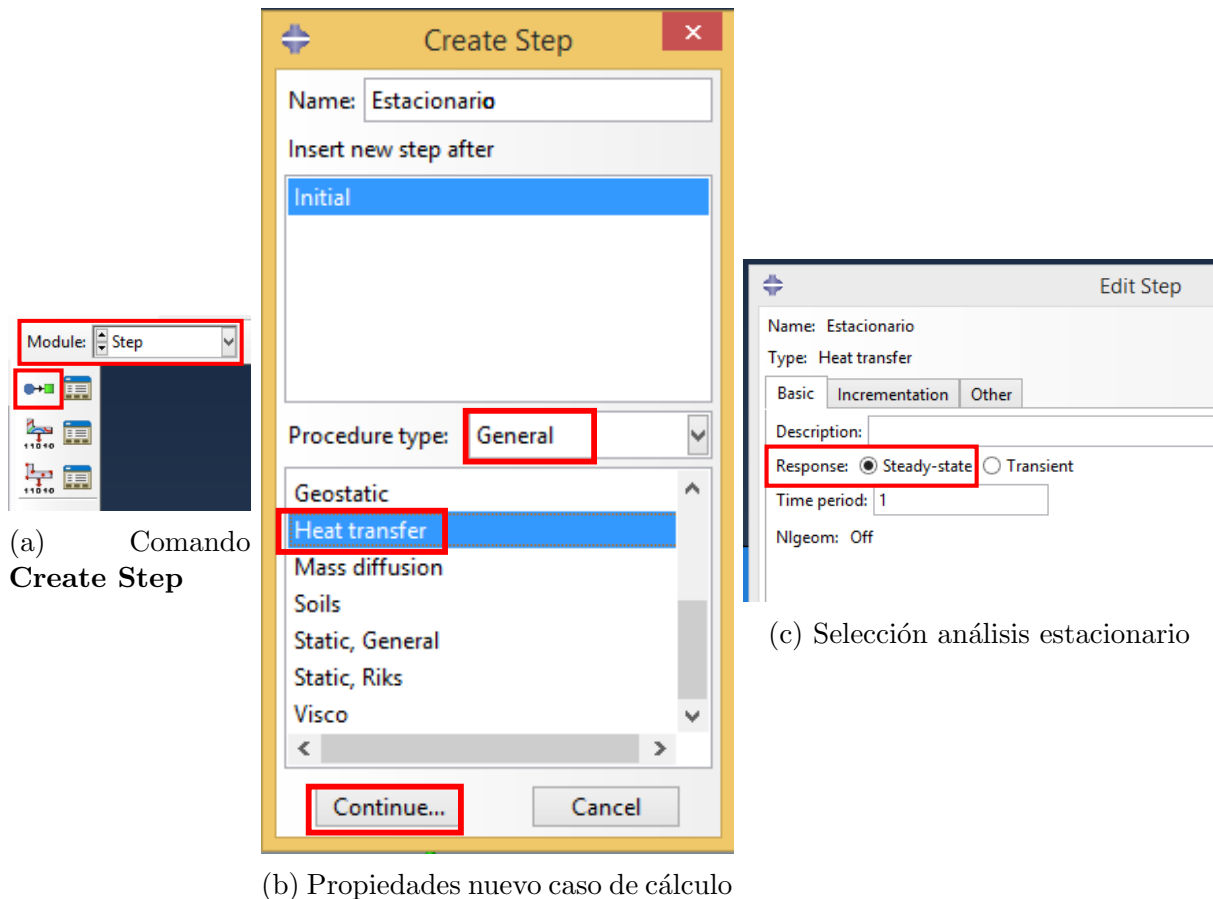


Figura 8: Creación de un nuevo caso de cálculo

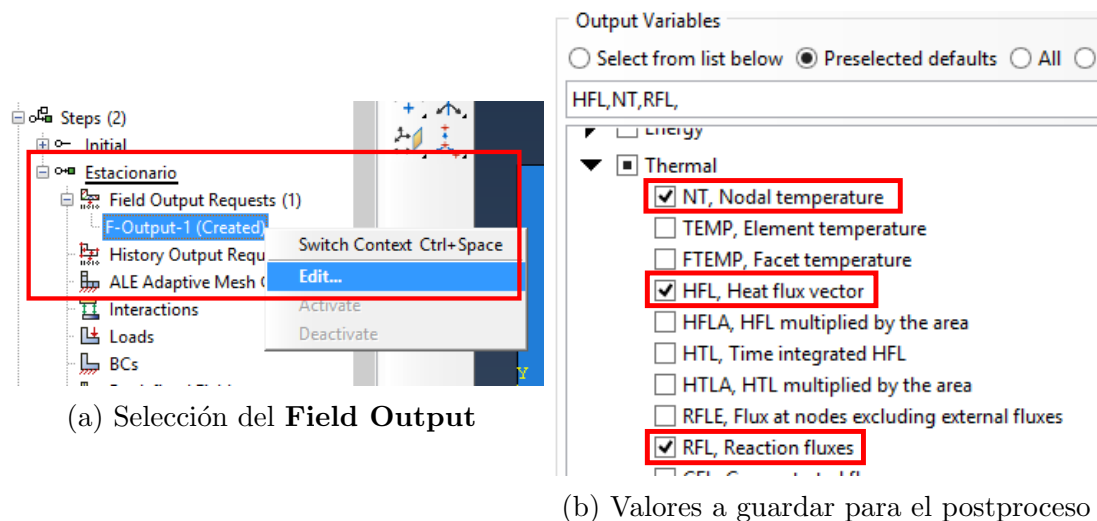
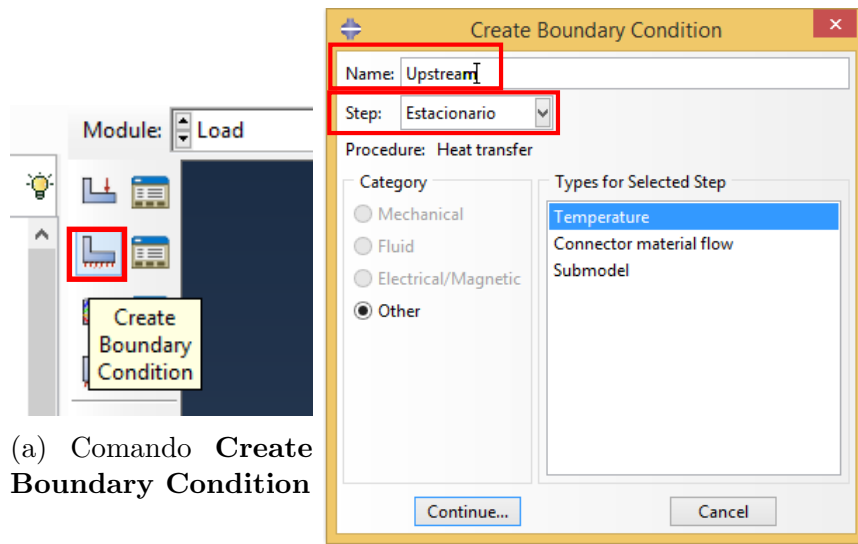


Figura 9: Definición del *Field Output*

Para imponer la condición de contorno tipo esencial $h = 3$ en el contorno AB activamos el módulo **Load** y pulsamos la orden **Create Boundary Condition** (ver Fig. 10a). Después sigue las instrucciones indicadas en las Figs. 10b a 10d.

De igual manera, para imponer las condición de contorno tipo esencial $h = 0$ en el contorno DE sigue las instrucciones indicadas en las Figs. 11a a 11c. Al final Abaqus indica las fronteras donde has impuesto las condiciones de contorno tal como muestra la

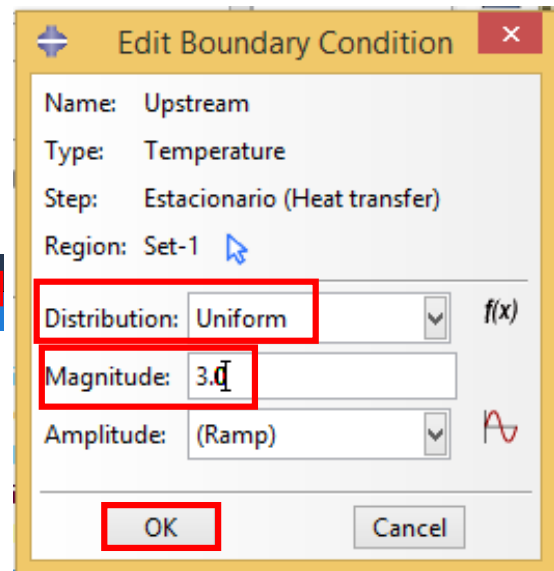


(a) Comando **Create Boundary Condition**

(b) Definición tipo de condición esencial



(c) Selección de la frontera



(d) Definición de la altura total impuesta

Figura 10: Definición de la condición de contorno en la equipotencial AB

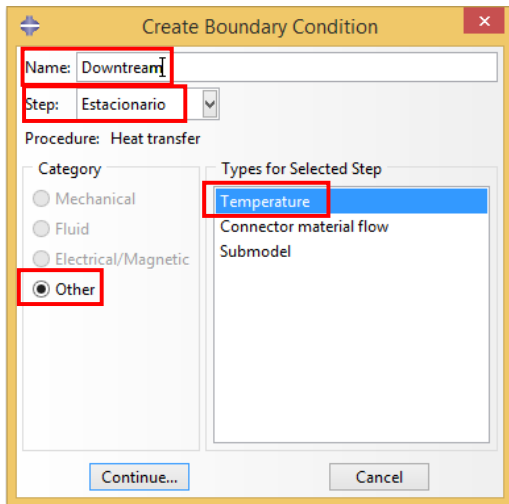
Fig. 11d.

2.6. Módulo Mesh. Crear la malla.

Para construir la malla recordamos los pasos a seguir tal como se indicaron en la práctica 1:

1. Activo el módulo **Mesh** y, dado que hemos ensamblado el modelo con una copia dependiente, impongo que voy a mallar la **part** tal como indica la Fig.12.
2. Defino la forma del elemento (serán cuadriláteros) (ver Fig. 13).
3. Defino el tamaño global del elemento a 1.5 metros (ver Fig. 14)
4. Finalmente defino el tipo de interpolación tal como indica la Fig.15.

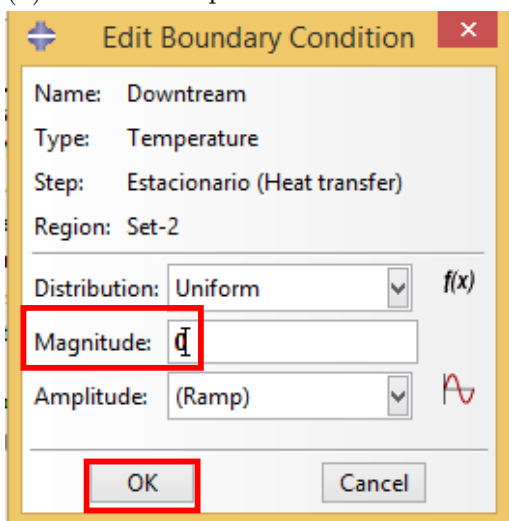




(a) Definición tipo de condición esencial



(b) Selección de la frontera



(c) Definición de la altura total impuesta



(d) Indicación fronteras con condiciones impuestas

Figura 11: Definición de la condición de contorno en la equipotencial DE

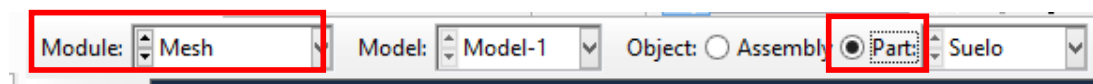


Figura 12: Inicio del módulo **mesh**

La malla final se muestra en la Fig. 16.

2.7. Módulo Job. Crear el trabajo y lanzar el análisis.

Tras definir el modelo sólo nos falta crear y lanzar el trabajo (**job**). Para hacerlo activa el módulo **job**, pulsa el icono **Create job** (ver Fig. 17a) y sigue las instrucciones de las Figs. 17b y 17c.

Finalmente lanza el trabajo y, una vez convergido el análisis numérico, activa el post-proceso (ver Figs. 18a y 18b).

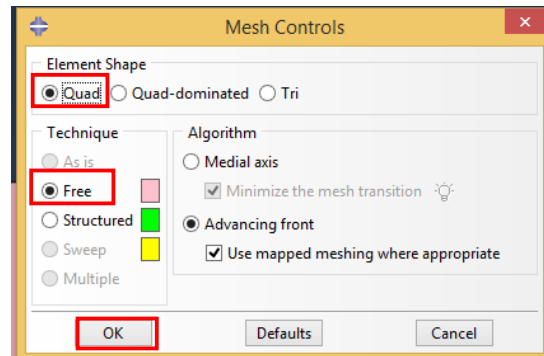


Figura 13: Definición forma del elemento

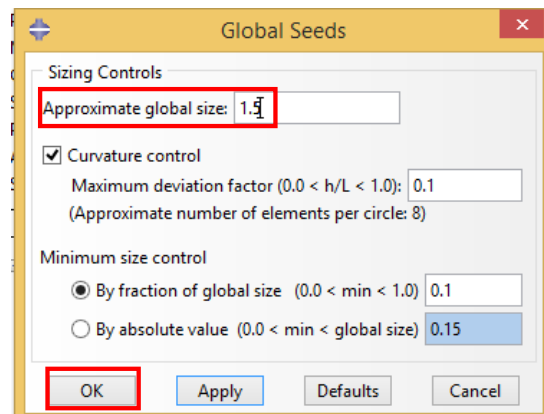


Figura 14: Definición tamaño del elemento

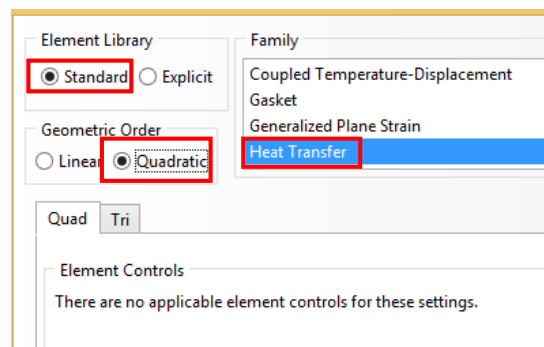


Figura 15: Definición interpolación del elemento

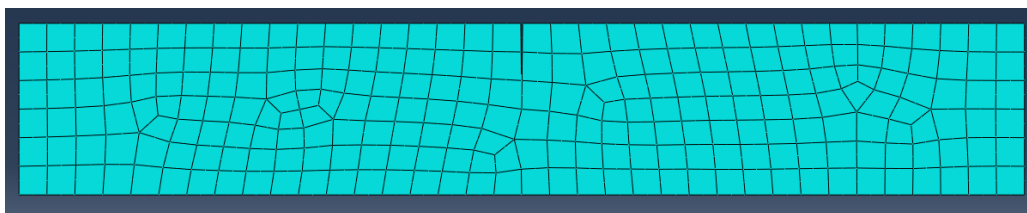


Figura 16: Malla final

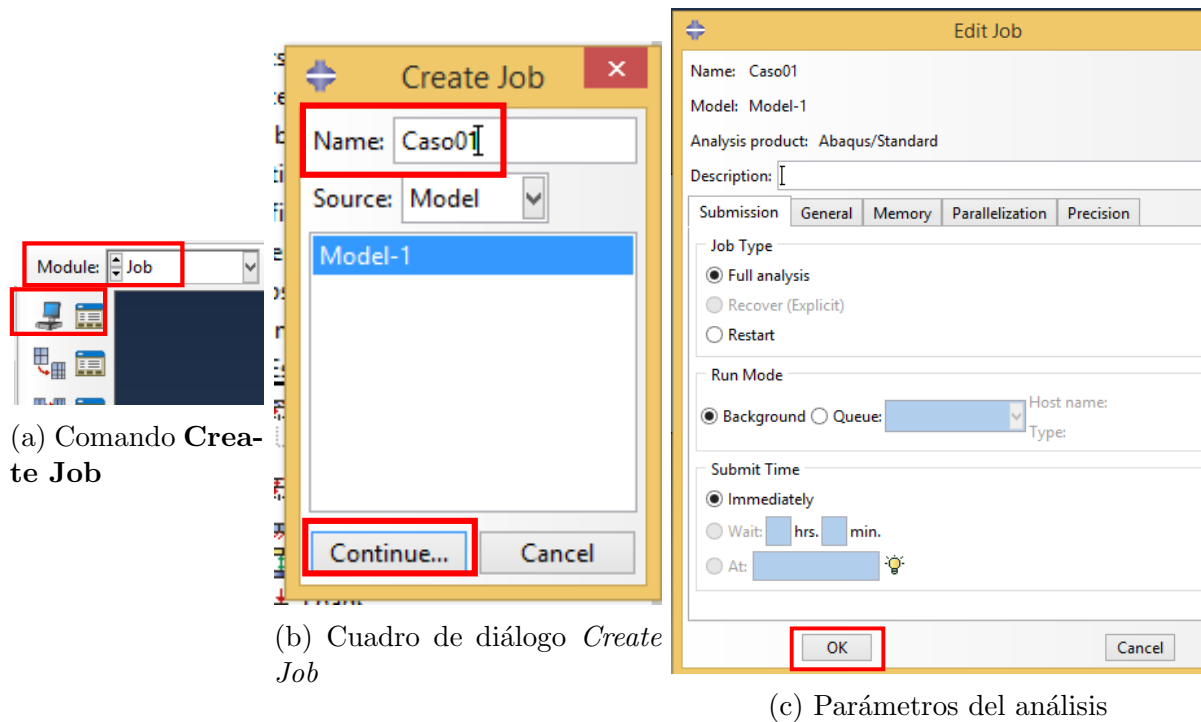


Figura 17: Definición caso de cálculo

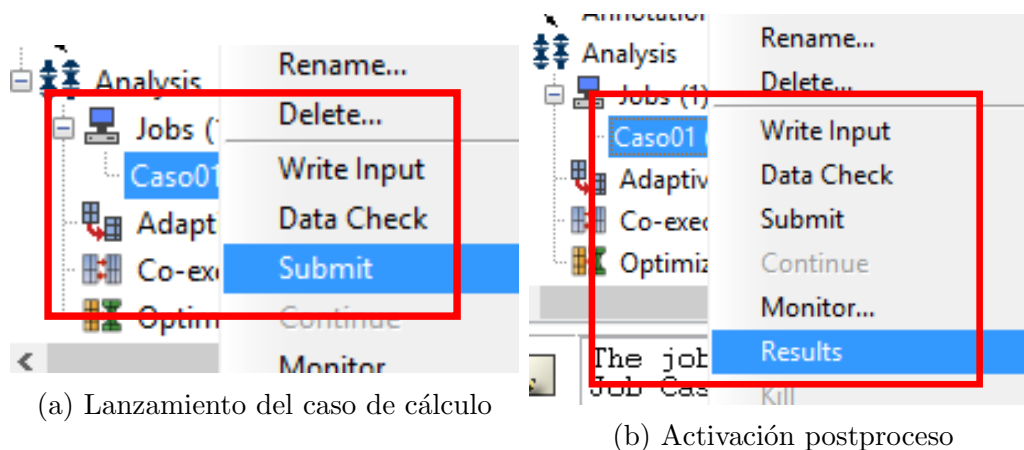


Figura 18: Ejecución del caso de cálculo

2.8. Módulo Visualization. Realizar el post-proceso.

A continuación se resumen las acciones a realizar en el postproceso para responder a las preguntas del enunciado:

- Dibujemos inicialmente el campo de la altura total del fluido en cada punto (ver Figs. 19a y 19b). Si quisiéramos obtener las líneas de equipotenciales, activamos el comando **Contour Plot Options** y seleccionamos que el tipo de *contour* sea **line** como indican las Figs. 19c y 19d.
- Buscamos responder ahora la primera de las preguntas del ejercicio, obtener el flujo saliente aguas abajo. Para hacerlo debemos obtener la distribución del flujo saliente en la recta DE e integrarlo. Definamos primero un **path** en el contorno DE que llamaremos *CorrienteAbajo* tal como muestran las Figs. 19c a 20a.

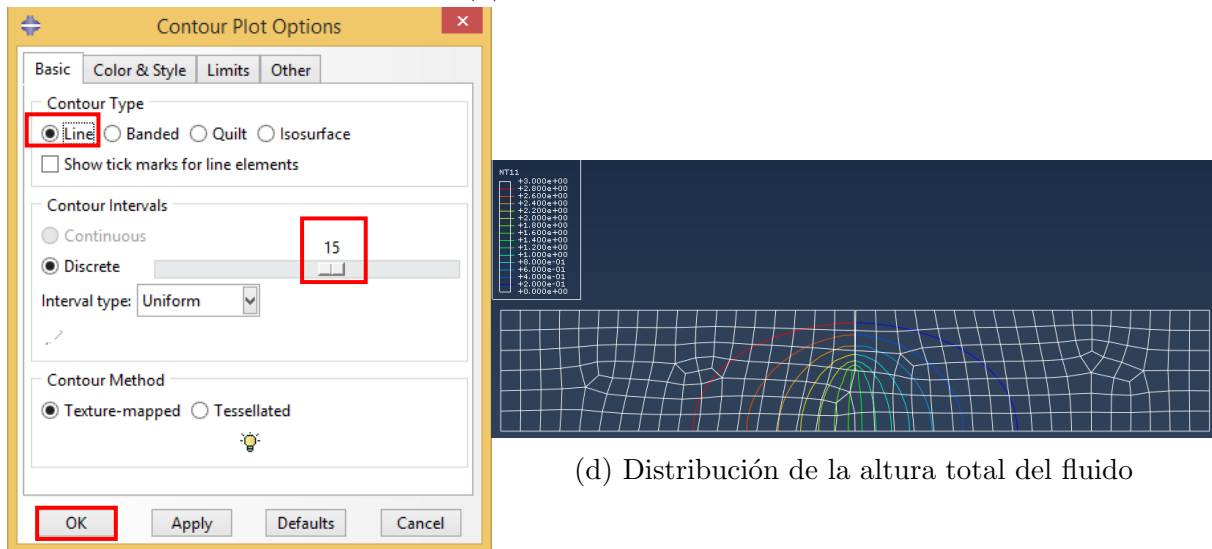
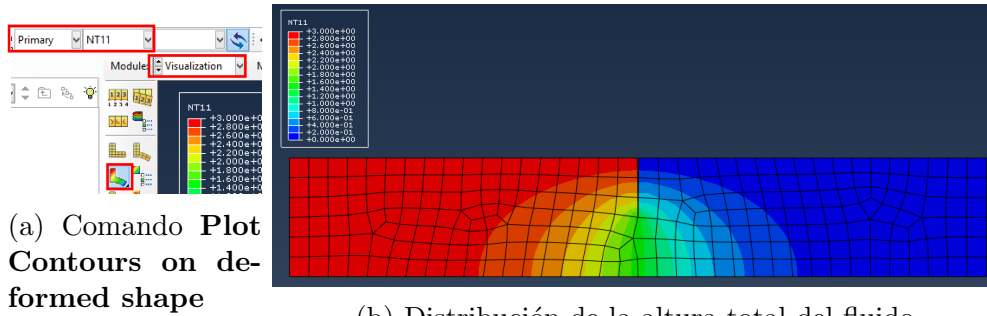


Figura 19: Visualización de la altura total del fluido

- Una vez definido el *path*, buscamos obtener la distribución de la altura total sobre él. Para hacerlo debemos crear un objeto **XY Data** tal como resumen las Figs.21a a 21e.
- La distribución del flujo saliente en el contorno DE se muestra en la Fig. 22a. Para poder exportarlo luego a una hoja excel (e integrarlo) debemos guardarlo tal como muestran las Figs. 22b y 22c.
- A continuación exportamos los datos del objeto XY Data que acabamos de crear tal como indican las Figs. 23a a 23c.
- A continuación se resume cómo importar el fichero de texto que acabamos de guardar en Excel. La información que contiene las Figs. 24a a 24d es válida para Excel2013.
- Con los datos importados, integramos la curva flujo *vs.* distancia usando el método del trapecio obteniendo, finalmente, un valor del caudal saliente de $7,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro en la dirección *y* (ver Fig. 25).

De forma equivalente (y más rápida) podríamos haber integrado la curva de la Fig. 22a usando la consola de **python** que tiene Abaqus. El objeto XY-Data que hemos llamado XYData-HFL2 (ver Fig. 22c) es un objeto que Abaqus guarda y que

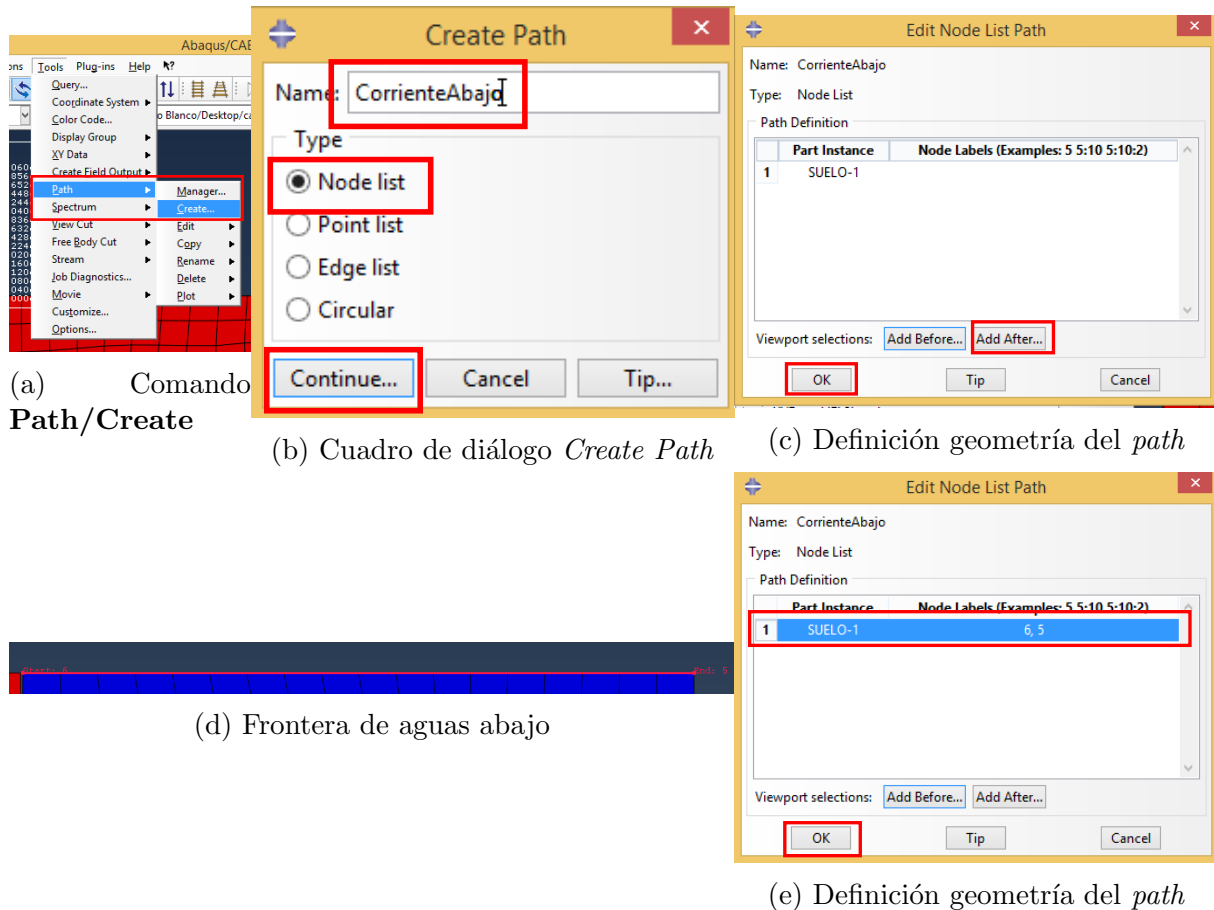


Figura 20: Definición path *AguasAbajo*

podemos acceder a él y con el que podemos operar, tal como muestra la Fig. 26 (intenta como ejercicio entender la lógica del código python mostrado).

Finalmente, hay una tercera forma de integrar esta curva usando los propios comandos de Abaqus, que nos permite operar con objetos *XYData* previamente creados. Pulsamos *Tools/XYData/Create*, pero en vez de crear un objeto nuevo según un *path* eligiéremos la opción *Operate on XYData*, tal como muestra la Fig. 27

De todas las operaciones posibles seleccionamos el comando *integrate(X)* tomando como argumento el objeto *XYData* donde hemos guardado el flujo normal a la superficie como resume la Fig. 28

Por último podemos dibujar el valor del flujo y su integración a lo largo de la curva tal como muestra la Fig. 29 y acceder al valor del flujo total para la ordenada final como muestra la Fig. 30.

- La segunda pregunta del enunciado nos pide obtener la evolución de la carga total del fluido en el camino BCD y estimar el valor del gradiente hidráulico en el punto D. Para ello debemos obtener la distribución de la carga hidráulica total en el camino BCD y estimar su pendiente en el punto D. De forma similar al punto anterior, definamos primero un **path** siguiendo el camino BCD tal como se resume en las Figs. 31a a 31d.
- Una vez definido el path *CaminoBCD* debemos crear el objeto XY Data con la

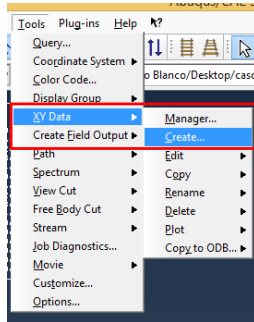
distribución de la carga hidráulica total según el camino BCD tal como resumen las Figs. 32a a 32d. La Fig. 32d es la distribución pedida.

- Podríamos estimar el gradiente hidráulico en la Fig. 32d pero si quisiéramos calcularlo de forma exacta debemos guardar los datos en un objeto XY Data y luego exportarlos a un fichero texto tal como se resume en las Figs.33a a 33c. De la Fig.33c podemos calcular el gradiente pedido como:

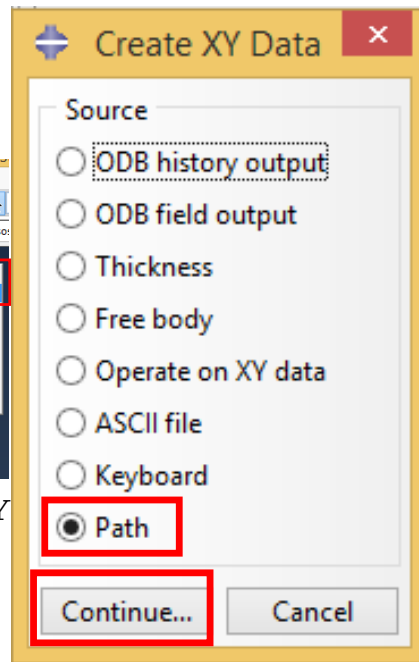
$$i_h = \frac{0,3234 - 0}{9,2 - 7,67} = 0,211 \quad (5)$$

En este caso hubiese sido más sencillo pedir la información sobre el objeto XY Data creado (en el **Model Tree**, ver Figs.34a y 34b) en vez de guardarlo en disco como un fichero texto.

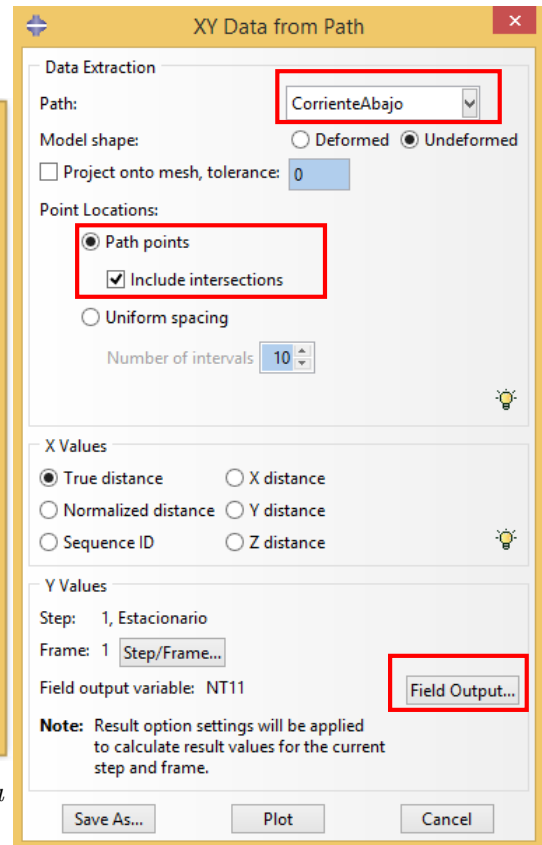
★



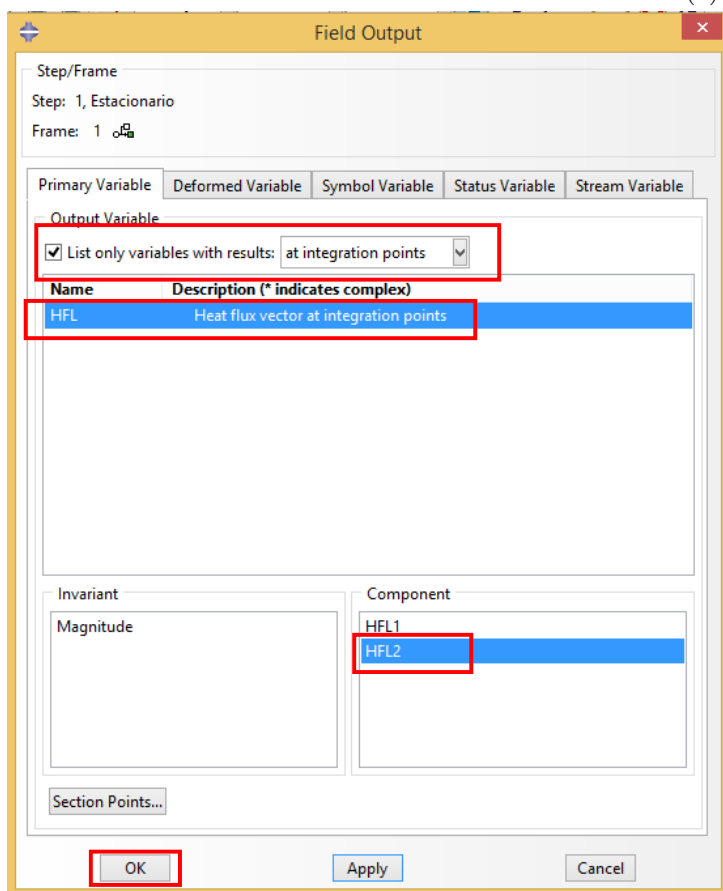
(a) Comando XY Data/Create



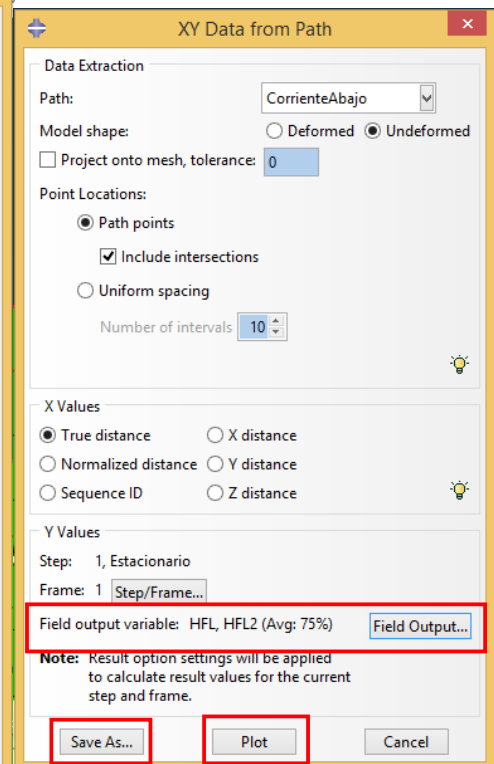
(b) Cuadro de diálogo XY Data



(c) Cuadro de diálogo XY Data from path

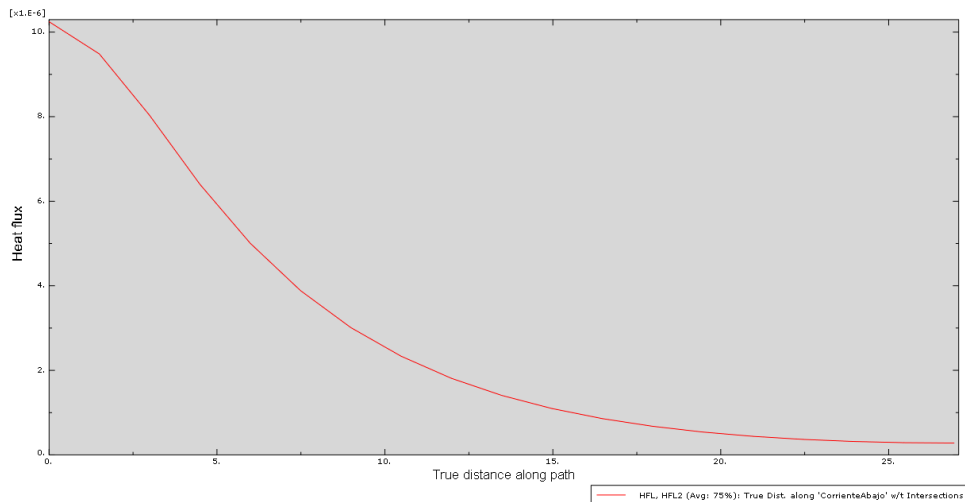


(d) Selección de la variable a dibujar en el path

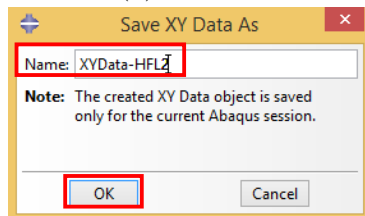


(e) Cuadro de diálogo XY Data from path

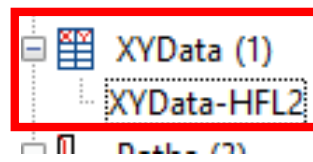




(a) Distribución flujo saliente en recta DE

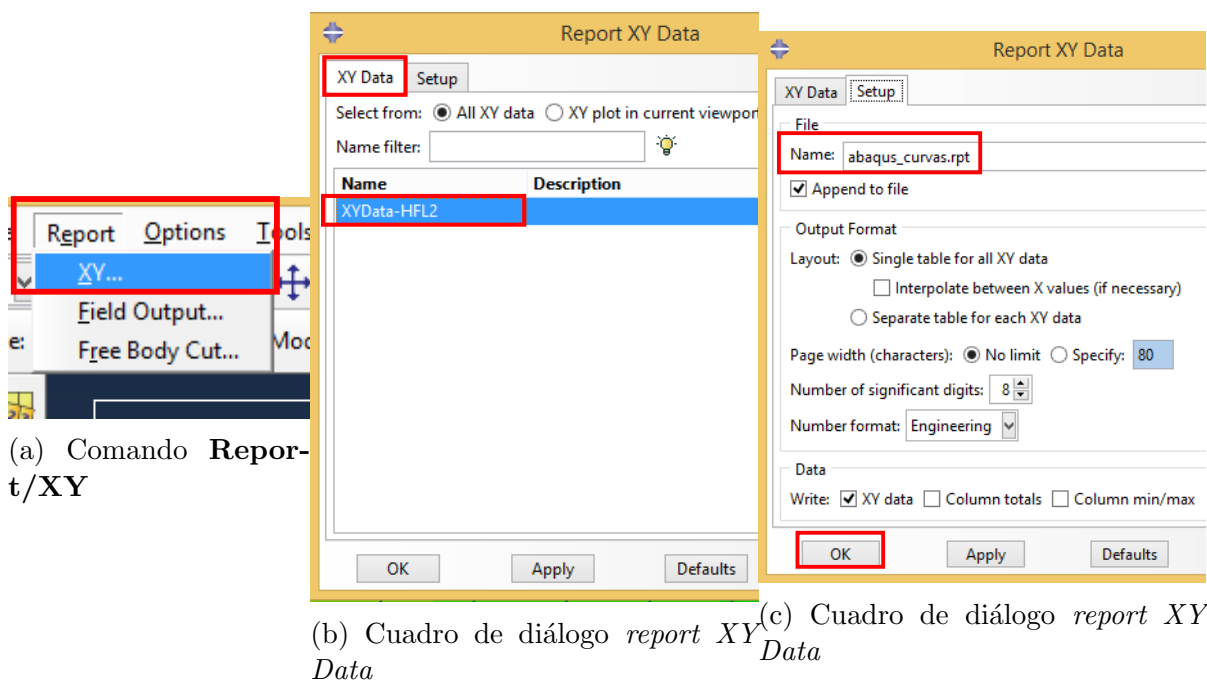


(b) Cuadro de diálogo *Save XY Data As*



(c) Objetos XY Data en el *Model Tree*

Figura 22: Objeto XY Data del flujo saliente en recta DE

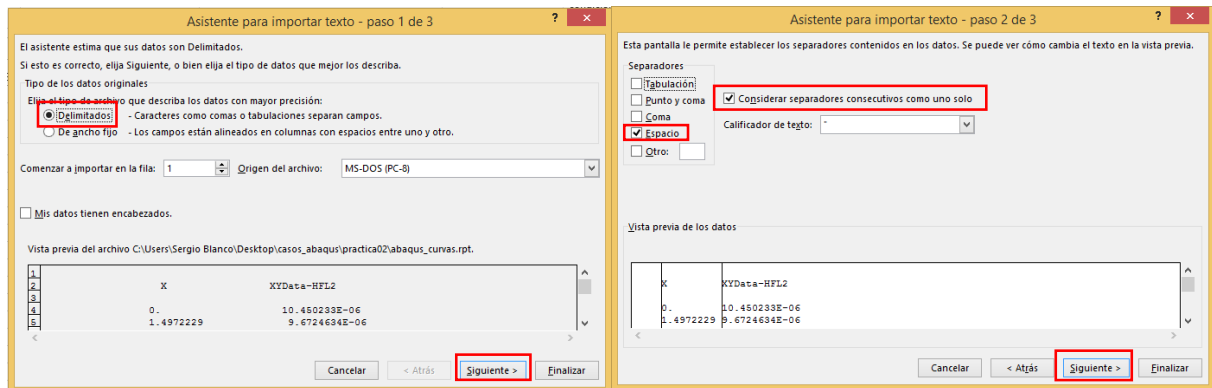


(a) Comando *Report/XY*

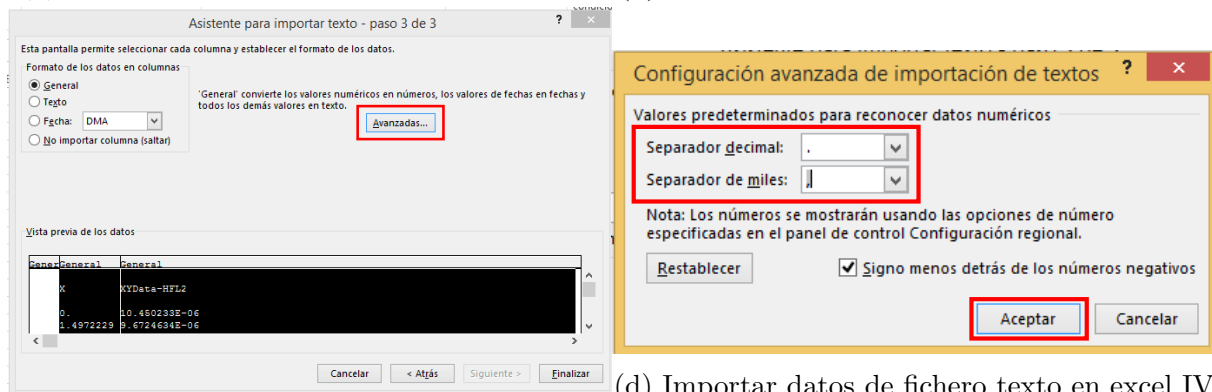
(b) Cuadro de diálogo *report XY Data*

(c) Cuadro de diálogo *report XY Data*

Figura 23: Guardar en fichero tipo texto los datos del objeto XY Data



(a) Importar datos de fichero texto en excel I (b) Importar datos de fichero texto en excel II



(c) Importar datos de fichero texto en excel III (d) Importar datos de fichero texto en excel IV

Figura 24: Importar datos de fichero texto en excel

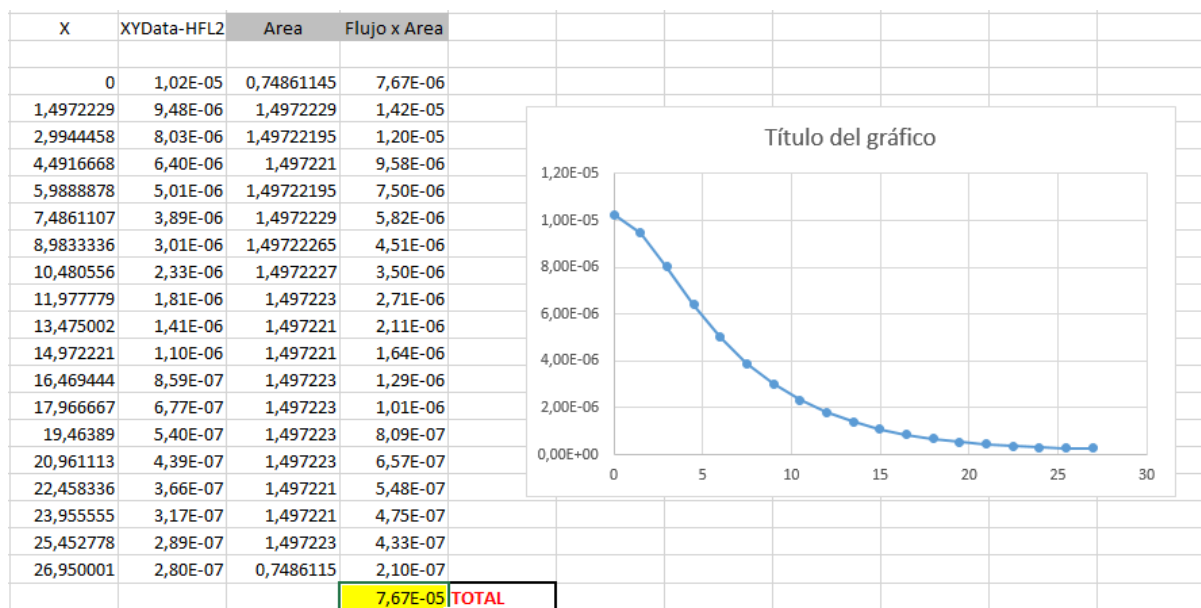


Figura 25: Integración del flujo total por el método del trapecio

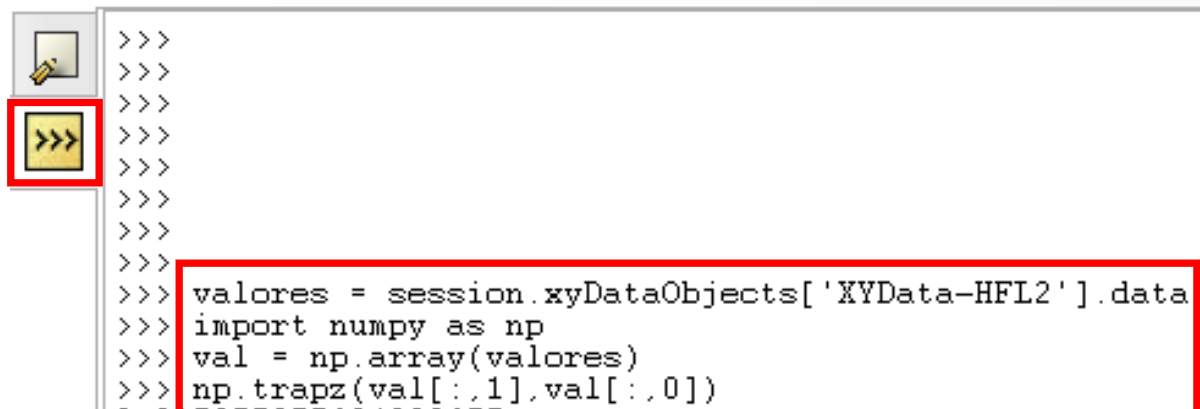


Figura 26: Integración del flujo total por el método del trapecio usando python

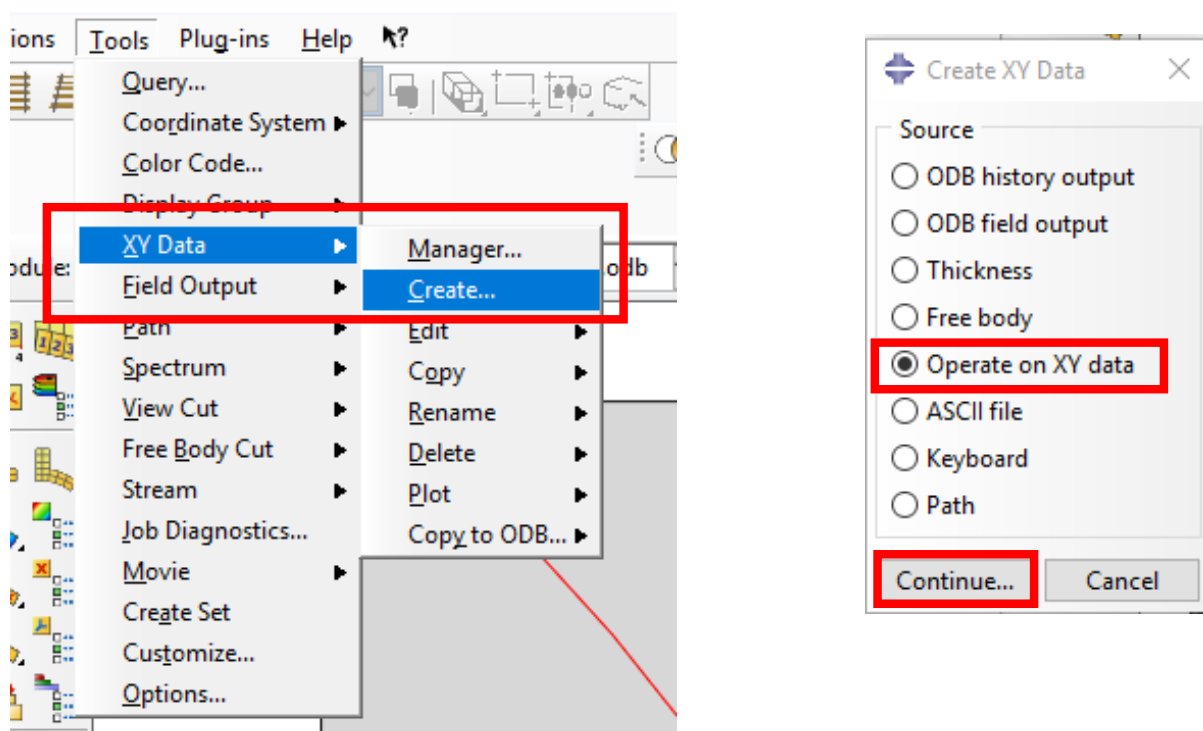


Figura 27: Selección de la herramienta *Operate on XYData*

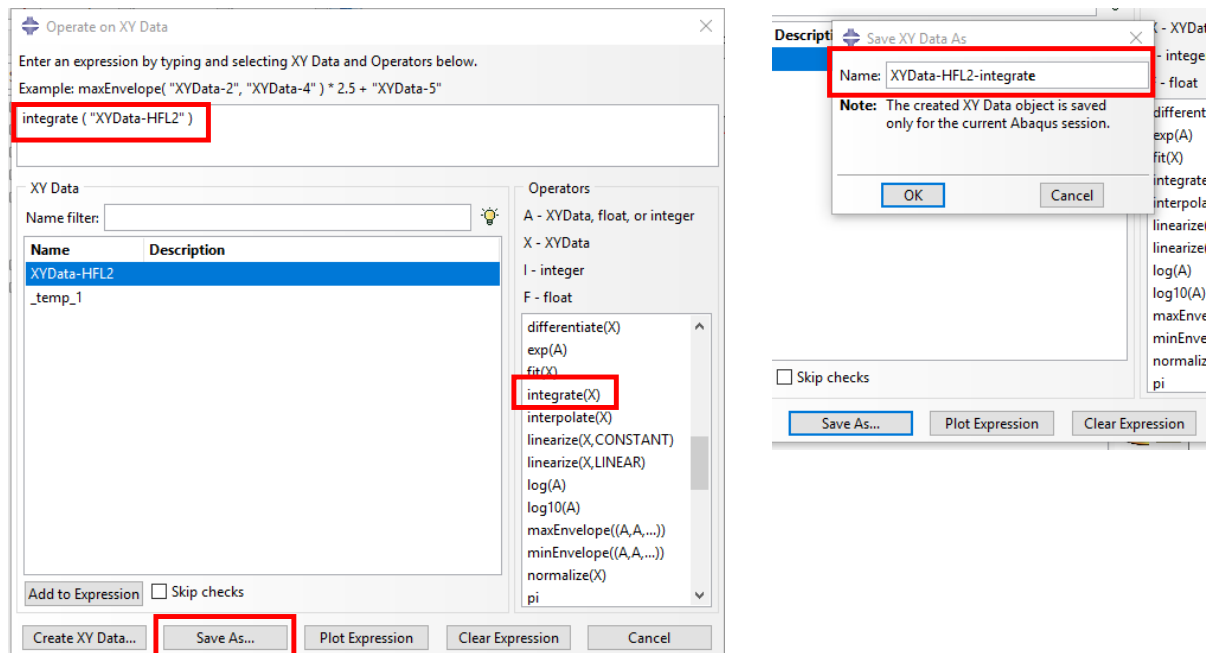


Figura 28: Integración del objeto *XYData*

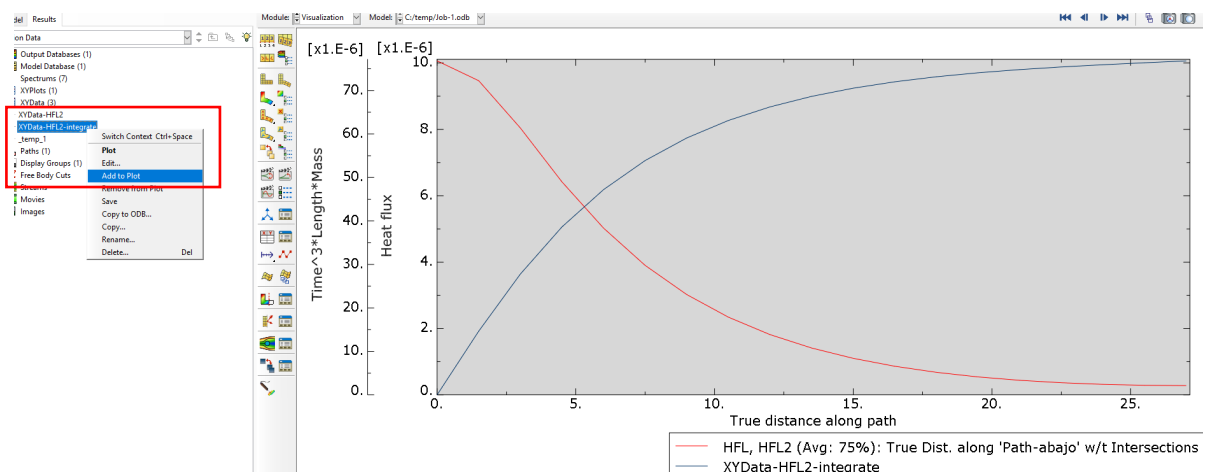


Figura 29: Variación del flujo y su integración a lo largo del *path*

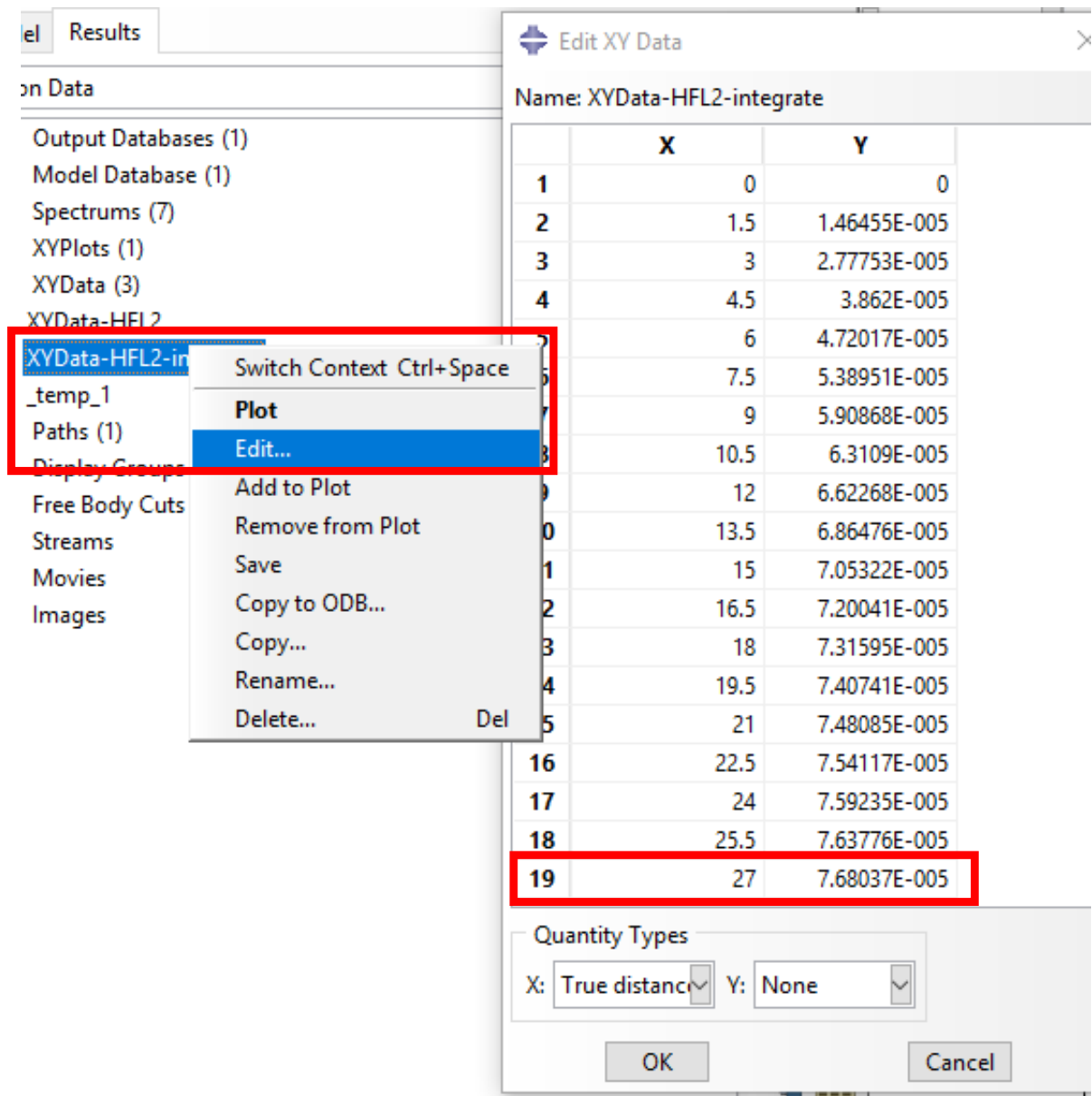
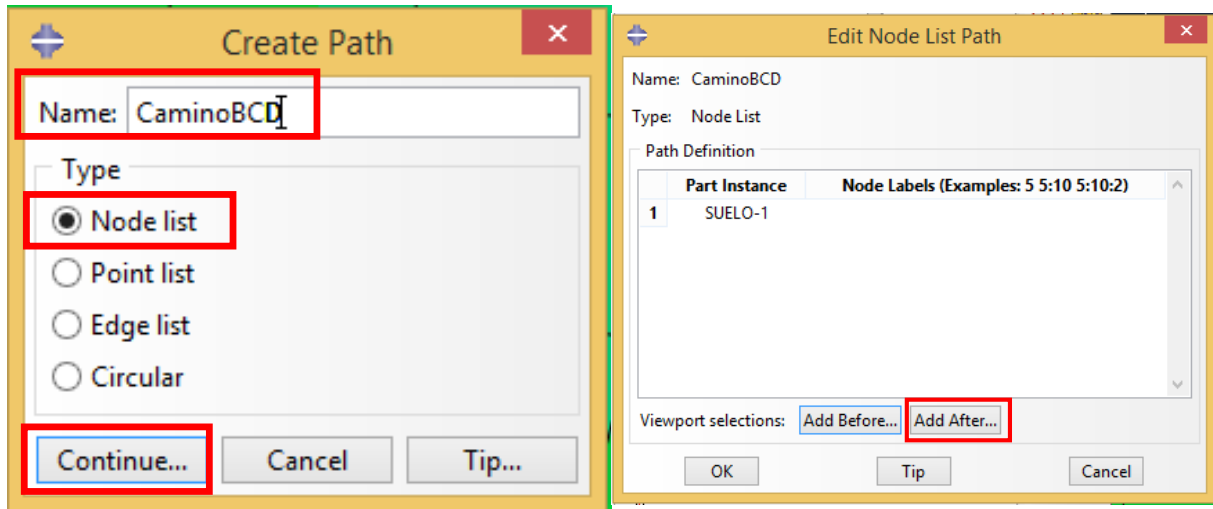


Figura 30: Integración del flujo a lo largo del *path*

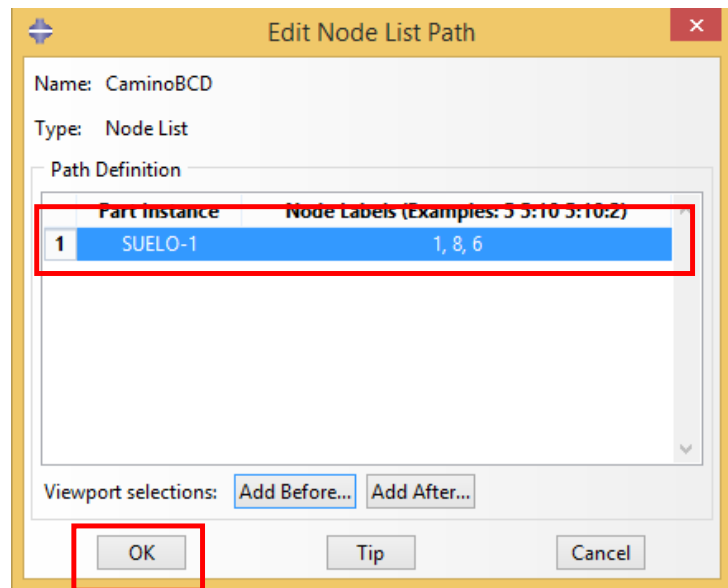


(a) Cuadro de diálogo *Create Path*

(b) Definición geometría del *Path*

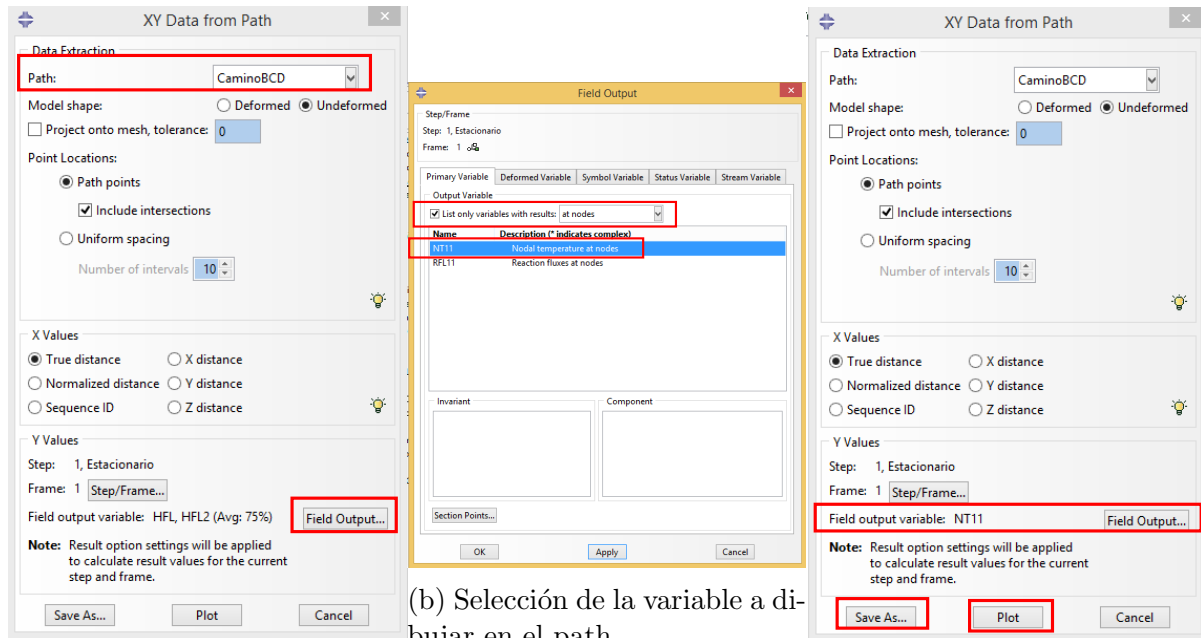


(c)
Fron-
tera
BCD



(d) Definición geometría del *Path*

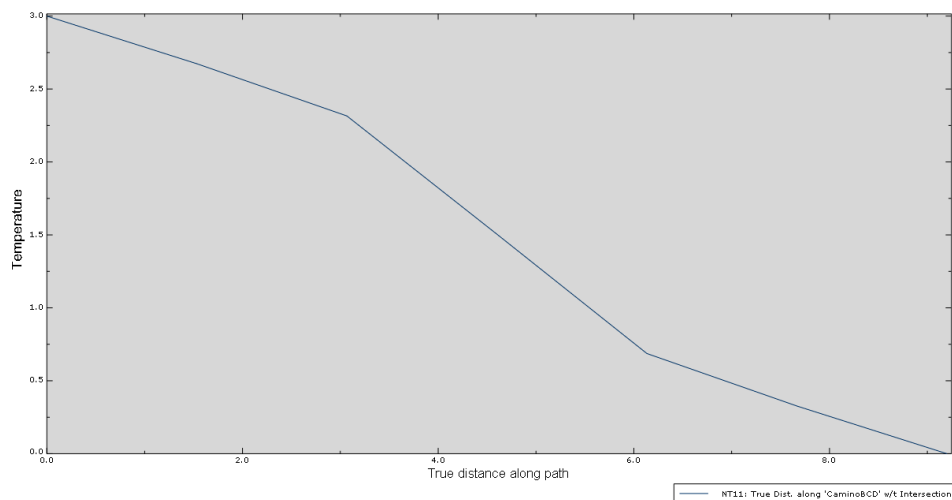
Figura 31: Definición path *CaminoBCD*



(b) Selección de la variable a dibujar en el path

(a) Cuadro de diálogo *XY Data from path*

(c) Cuadro de diálogo *XY Data from path*



(d) Distribución carga total hidráulica en BCD

Figura 32: Objeto XY Data de la carga total en el camino BCD

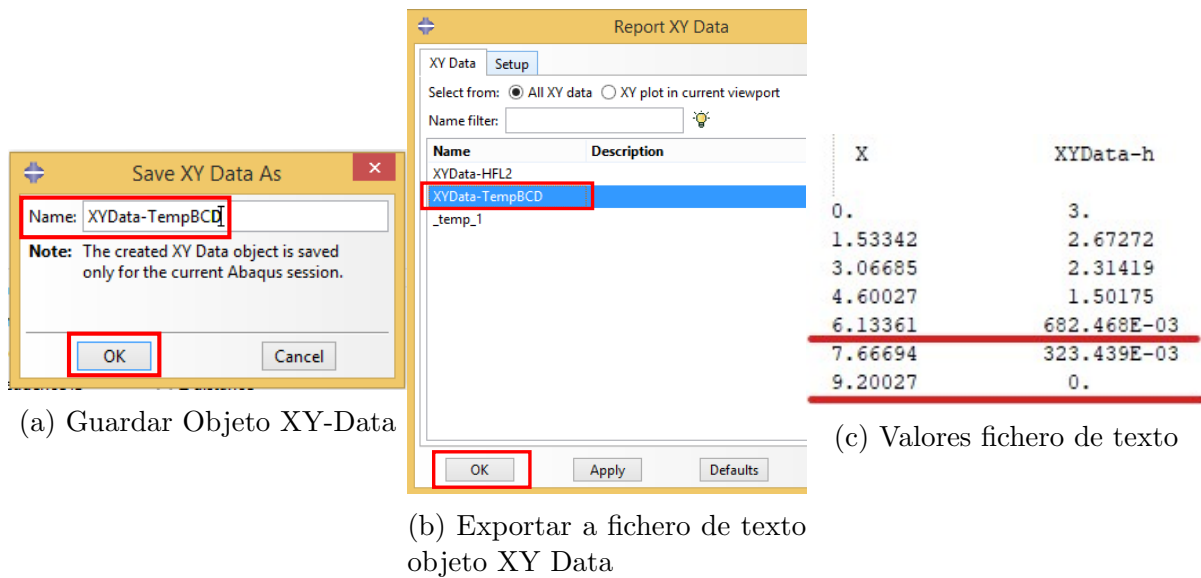


Figura 33: Guardar objeto XY Data como fichero de texto

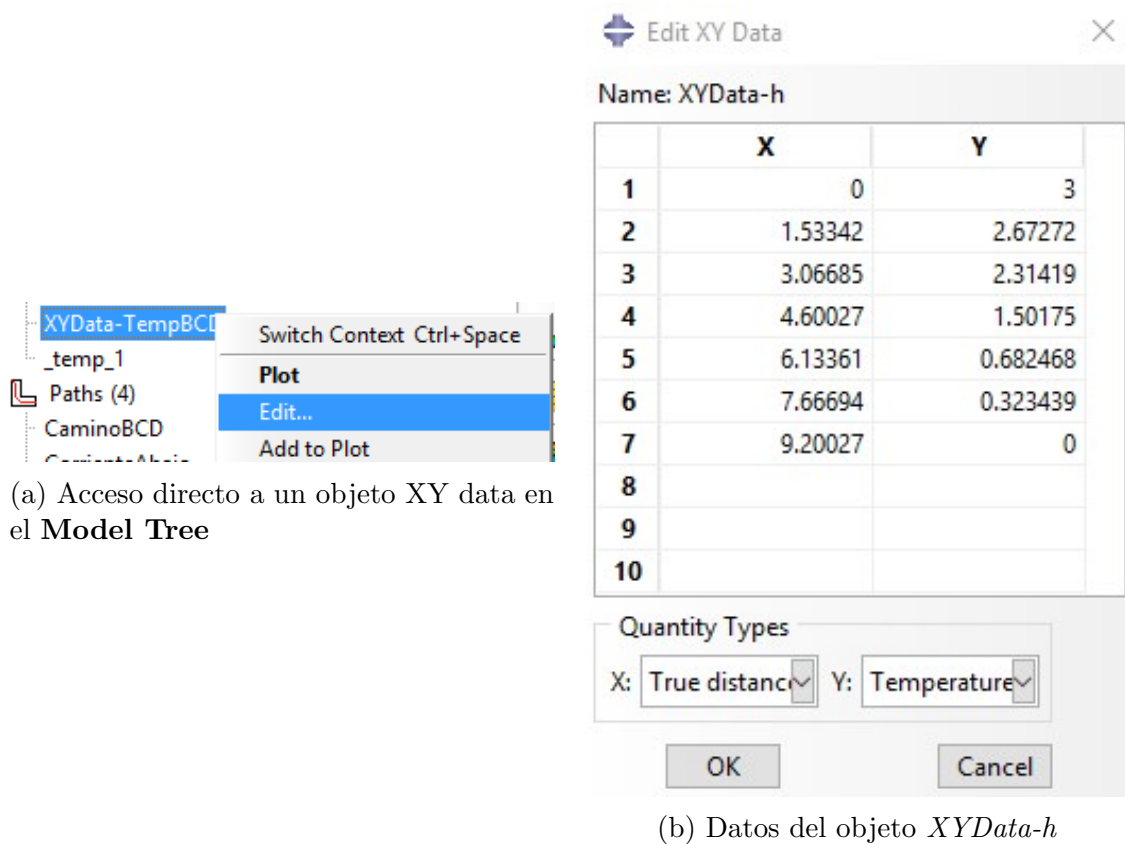


Figura 34: Información guardada en objeto XY Data

3. Ejercicios propuestos.

3.1. Ejercicio Propuesto 1

Sea un estrato homogéneo e isótropo formado por arenas que tiene un espesor de 5.2 m y coeficiente de permeabilidad $k_x = k_y = k_z = 1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Debajo de él hay otro estrato homogéneo e isótropo formado por arenas limosas con un espesor de 4 metros y con coeficiente de permeabilidad $k_x = k_y = k_z = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Bajo las arenas limosas hay un estrato de arcillas que se asume son impermeables. Para reducir la filtración debida al primer estrato se ha clavado una tablestaca (de longitud infinita en la dirección perpendicular al plano del dibujo) que, por error de ejecución, sólo ha penetrado 4.6 m. A la izquierda de la tablestaca (aguas arriba) se ha acumulado una altura de 3 metros de agua y a la derecha (aguas abajo) la escorrentía hace no haya acumulación de agua. Para el problema así definido (ver Fig. 35) y asumiendo un régimen estacionario responde a la pregunta que te harán en clase.

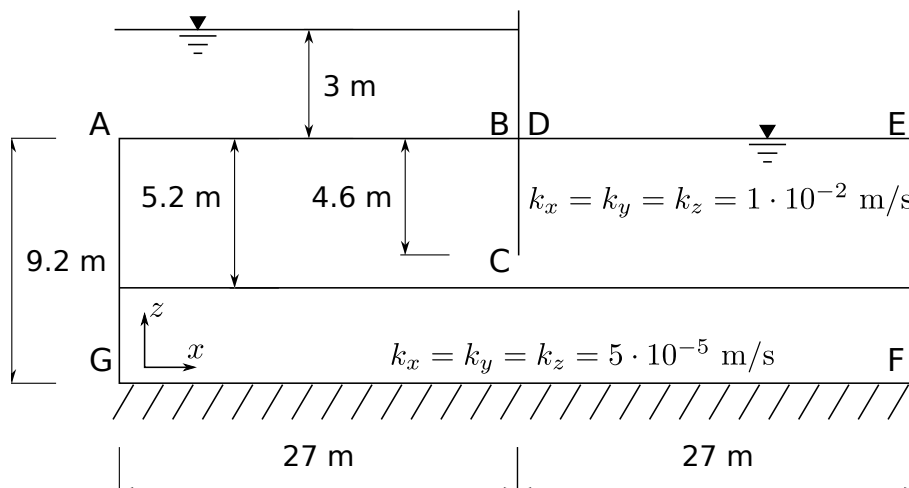


Figura 35: Descripción del modelo

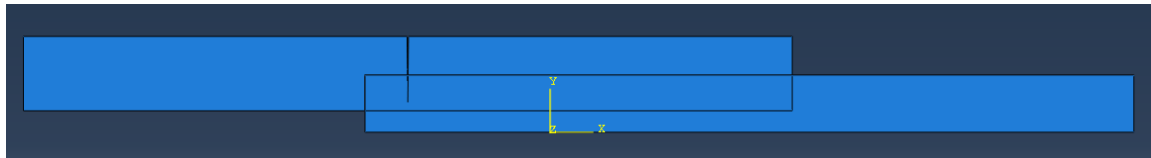
NOTA: Usa el mismo tipo de elementos que en el ejercicio resuelto y un tamaño global de malla de 1.4 metros.

AYUDA: En este ejercicio hay dos materiales diferentes que comparten una frontera común. Para reproducirlo en Abaqus sigue los siguientes pasos:

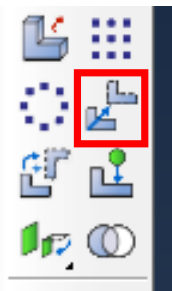
- Crea una *part* diferente para cada estrato y asígnales el material correspondiente. Cuando estés en el módulo **Property** y vayas a asignar una sección a una *part* (comando **Assign Section**) recuerda no crear un *set*, tal como indica la Fig. 36 (es para evitar problemas en la operación **Merge** posterior).
- En el módulo **Assemble** ensambla un modelo con una copia dependiente de cada parte como indica la Fig.37a. Posteriormente pulsa el comando **Translate Instance** (ver Fig. 37b) hasta dejarlas en su posición definitiva (ver Fig. 37c).
- Finalmente buscamos crear una nueva *part* como la unión de las dos anteriores pero conservando la frontera común entre ellas. Para hacerlo pulsa **Merge/Cut** (ver



Figura 36: *Prompt* asociado a **Assign Section**



(a) Posición inicial de las copias de las *parts*



(b) Comando
Translate
Instance



(c) Posición final de las copias de las *parts*

Figura 37: Ensamblar un modelo con dos *parts* I

Fig. 38a) asegurándote que activas la opción **Retain Boundary** (ver Fig. 38b).
Revisa que en el nodo de las *Assembly/Instances* del **Model Tree** se ha creado la nueva copia (ver Fig. 38c)

- Recuerda que cuando vayas a mallar deber hacerlo sobre la nueva **Part** creada tal como indica la Fig. 39.

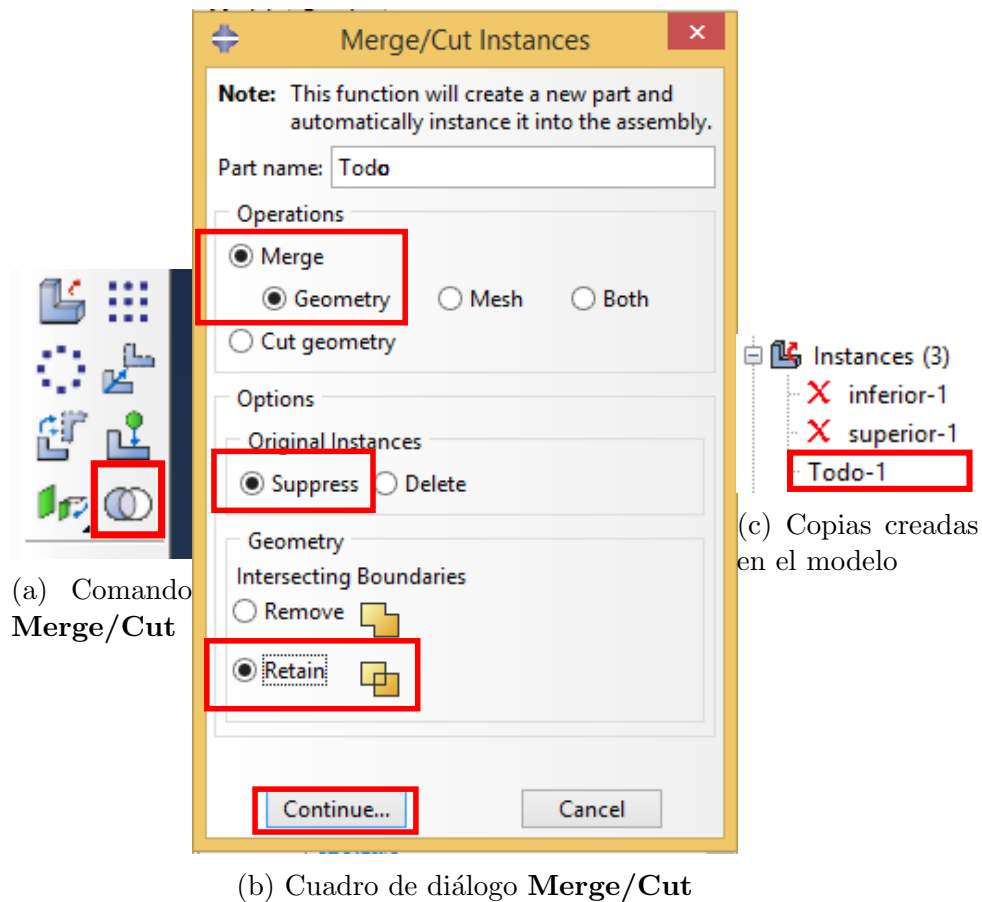


Figura 38: Ensamblar un modelo con dos *parts* II

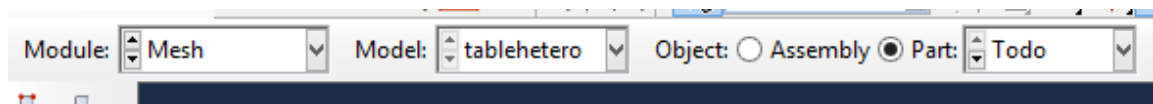


Figura 39: Mallado de la nueva *part*

3.2. Ejercicio Propuesto 2

Sea una presa cuya base tiene 27 metros construida en hormigón (que asumiremos es impermeable) de longitud infinita en la dirección perpendicular al plano del dibujo. Bajo la base hay un estrato homogéneo e isotrópico de arena limosa con una permeabilidad $k_x = k_y = k_z = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s y un espesor de 15 m. Bajo este estrato hay un paquete de arcillas que asumiremos son impermeables.

Se dispone, para evitar la filtración, de una pantalla de 5 metros de altura en el extremo de aguas arriba de la presa y, para evitar la subpresión, de un dren de escollera de 7 m de largo y 1 m de alto con una permeabilidad de $k_x = k_y = k_z = 1 \cdot 10^{-1}$ m/s.

Aguas arriba de la presa se acumula una altura de 10 metros de agua y aguas abajo la escorrentía hace no haya acumulación de agua. Para el problema así definido (ver Fig. 40) y asumiendo un régimen estacionario se pide:

1. Obtener el caudal de agua saliente aguas abajo (por unidad de longitud de la dirección y).
2. Obtener la resultante de la subpresión (fuerza vertical) en la recta DE por unidad de longitud de la dirección y .

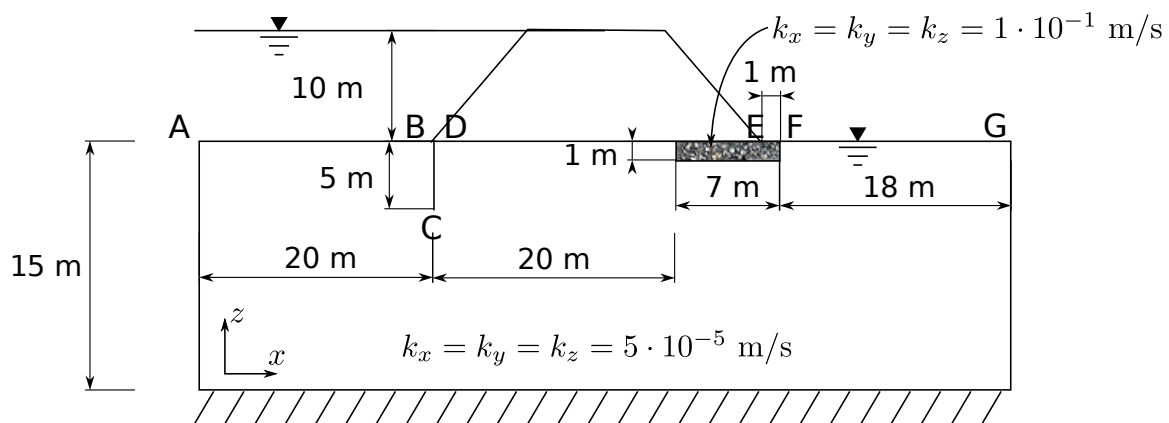


Figura 40: Descripción del modelo

NOTA: Usa el mismo tipo de elementos que en el ejercicio resuelto y un tamaño global de malla de 2.5 metros. La solución a la pregunta 1 es $1.942 \cdot 10^{-4}$ m³/s por metro en la dirección y . La solución a la pregunta 2 es 699.8 kN por metro en la dirección y .

AYUDA: En este ejercicio hay dos materiales diferentes que comparten una frontera común. Para reproducir esto en Abaqus sigue los pasos indicados en la ayuda del Ejercicio 1.

3.3. Ejercicio Propuesto 3

Sea una presa construida en hormigón (que consideraremos impermeable) de longitud infinita en la dirección perpendicular al plano del dibujo. Bajo la base hay un estrato formado por dos materiales homogéneos e isotrópicos de arena limosa y bajo ese estrato hay un paquete de arcillas que asumiremos son impermeables. Se construye, para reducir la filtración, una pantalla en el extremo de aguas arriba de la presa (considerar la pantalla de espesor 0.05 m.). La geometría y las propiedades de permeabilidad de los materiales se describen en la Fig. 41. Asumiremos que las fronteras verticales del estrato en los extremos están tan alejadas de la presa como para considerarlas impermeables. En el punto D queremos simular el efecto de una bomba que extrae un caudal de $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ por metro lineal en la dirección z . Para hacerlo, consulta en la ayuda de Abaqus el comando **Concentrated heat flux** (piensa el signo que debes poner para simular que estamos extrayendo caudal).

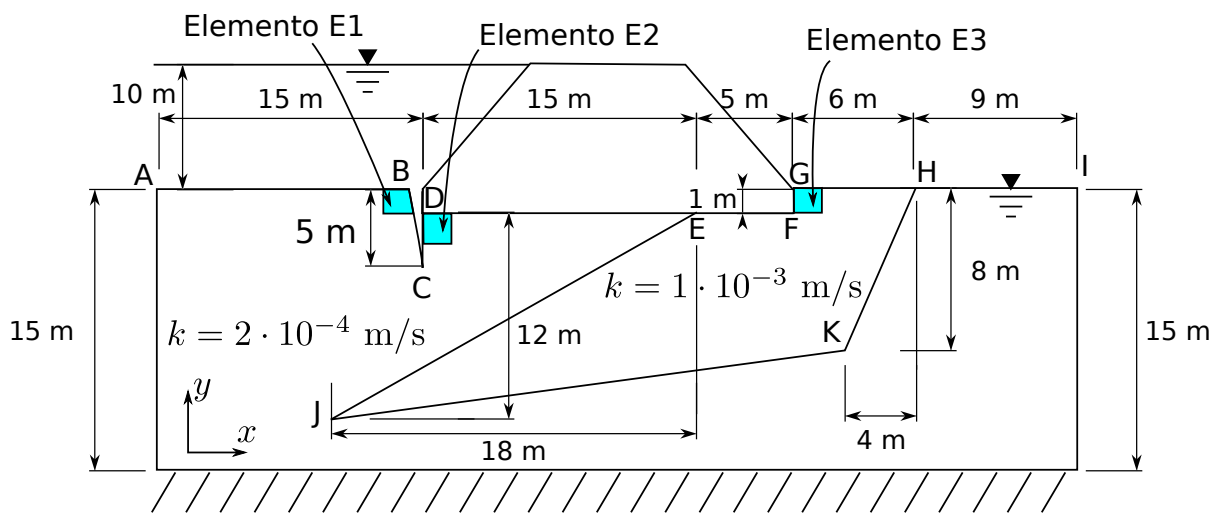


Figura 41: Descripción del problema

Responde las preguntas que vienen a continuación con las siguientes consideraciones:

- usa al definir la malla elementos cuadriláteros, técnica de mallado *Free*, con tamaño global de malla 1.8 metros e interpolación cuadrática (elemento *DC2D8*). No subdividas las parts para obtener una malla más regular.
- considera el fluido es agua dulce con densidad $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ y que la aceleración de la gravedad vale $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- Para facilitar el cálculo de la subpresión, considera que el origen de las alturas ($z=0 \text{ m.}$) está en la base de la presa DF.

Para el problema así definido calcula el caudal saliente en la recta GH por unidad de metro en la dirección z (la solución es $0.00108 \text{ m}^3/\text{s/ml}$) y la fuerza vertical de subpresión bajo la presa (la solución es 613.37 kN/ml).

★

3.4. Ejercicio Propuesto 4

Sea un terreno en el que hemos clavado las dos tablestacas de la figura (que consideraremos impermeables y de espesor 0.05 m) de longitud infinita en la dirección z . Este estrato está formado por tres materiales homogéneos e isotrópicos de arena limosa. Bajo ese estrato hay un paquete de arcillas que asumiremos son impermeables. La geometría y las propiedades de permeabilidad de los materiales se describen en la Fig. 42. A la izquierda de la tablestaca 1 se acumula un volumen de agua con una altura sobre el punto H de 15 m. constante. Entre las tablestacas 1 y 2 construimos una placa de hormigón que hace impermeable el contorno CD. A la derecha de la tablestaca 2 dispone una red de inyectores que aplican flujo entrante de valor $q = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ en el contorno EF. Finalmente en el tramo FG la escorrentía hace que no se acumule agua por encima del terreno. Asumiremos que las fronteras verticales del estrato en los extremos están tan alejadas de las tablestacas como para considerarlas impermeables.

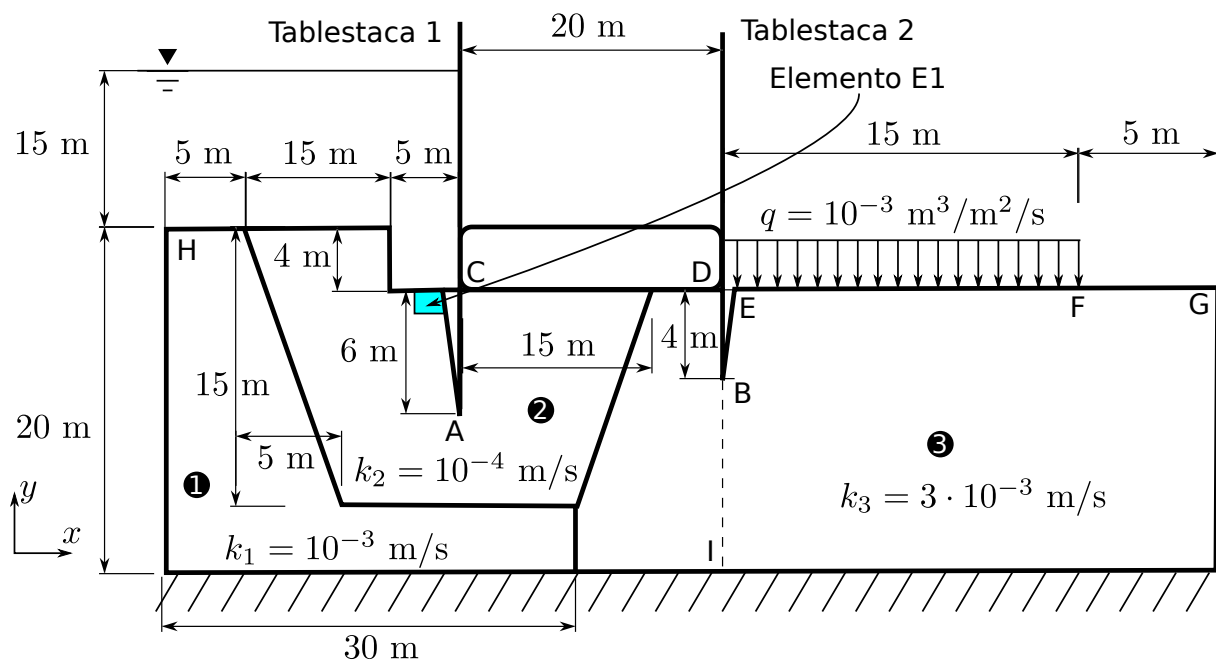


Figura 42: Descripción del problema

Usa las siguientes consideraciones (al ser un problema plano, tomaremos un espesor unidad y los valores de caudal y fuerza serán por por metro en la dirección z):

- Usa al definir la malla elementos cuadriláteros, técnica de mallado *Free*, con tamaño global de malla 1.3 metros e interpolación lineal (el tipo de elemento deberá ser *DC2D4*). No subdividas las parts para obtener una malla más regular.
- Considera el fluido es agua dulce con densidad $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ y que la aceleración de la gravedad vale $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- Las recta que separa los materiales 1 y 3 es vertical.
- Utiliza como origen de las alturas geométricas la recta horizontal que pasa por H.

Para el problema así descrito calcula la fuerza vertical de subpresión bajo el bloque CD (1454.8 kN), la presión de poro del fluido en el punto A (170.6 kPa), la altura total del

punto B (2.67 m), el módulo del vector flujo en el centroide del elemento E1 ($9,62 \cdot 10^{-5}$ m³/m²/s) y el caudal que atraviesa la recta BI (0.00275 m³/s) .

