

Programa de análisis de estructuras reticulares a código abierto: PAERCA 1.0

Dorian L. Linero S., Martín Estrada M. y Maritzabel Molina H.

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia

14 de junio de 2022

Contenido

Introducción	III
1 Generalidades y estructura del programa PAERCA 1.0	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Alcance	2
1.3 Características	4
1.4 Estructura general	5
1.5 Formatos de los archivos de entrada y de salida	6
1.6 Instalación del programa PAERCA 1.0	7
1.7 Lenguaje y compilador GNU-Octave	9
1.7.1 Selección del directorio de trabajo	11
1.7.2 Edición de la función principal y de otras funciones del programa	11
2 Análisis de una armadura bidimensional utilizando el subprograma PARBID	13
2.1 Creación de entidades geométricas de la armadura en GMSH	13
2.2 Creación de entidades físicas de la armadura en GMSH	16
2.3 Generación de la malla de elementos tipo barra de la armadura	19
2.4 Ejecución del subprograma de análisis PARBID	19

2.5	Presentación de los resultados en GMSH	20
3	Análisis de una armadura tridimensional utilizando el subprograma PARTRI	23
3.1	Creación de entidades geométricas de la armadura en GMSH	23
3.2	Creación de entidades físicas de la armadura en GMSH	26
3.3	Generación de la malla de elementos tipo barra de la armadura	29
3.4	Ejecución del subprograma de análisis PARBID	30
3.5	Presentación de los resultados en GMSH	31
4	Análisis de un pórtico tridimensional utilizando el subprograma PORTRI	35
4.1	Creación de entidades geométricas del pórtico en GMSH	37
4.2	Creación de entidades físicas del pórtico en GMSH	39
4.3	Generación de la malla de elementos tipo pórtico	45
4.4	Ejecución del subprograma de análisis PORTRI	47
4.5	Definición de los ejes locales de elementos de pórtico espacial en el subprograma PORTRI	48
4.6	Cálculo de desplazamientos y acciones internas en elementos de pórtico espacial utilizando el subprograma PORTRI	49
4.7	Presentación de los resultados en GMSH	49
4.8	Estrategia para copiar y trasladar entidades geométricas en GMSH . .	53
4.9	Visualización de una parte específica del pórtico en GMSH	58
4.10	Visualizar las entidades geométricas que pertenecen a una misma entidad física	61

Introducción

Las estructuras reticulares como los pórticos y las armaduras que constituyen los edificios, las cubiertas y los puentes en general, se diseñan asegurando su estabilidad bajo acciones externas críticas y de servicio. Para ello simula su comportamiento mecánico bajo tales acciones mediante métodos matriciales (**Weaver1990; Kassimali2012**). Existen programas de computador comerciales que realizan este tipo de análisis de forma eficiente. Sin embargo, en general estos programas no están dirigidos usuarios, que además de analizar una estructura, desean conocer y aprender cuales son los fundamentos que sustentan tal análisis.

El *Programa de análisis de estructuras reticulares a código abierto PAERCA* 1.0, permite obtener el desplazamiento y las reacciones en los nudos, y las acciones internas en los elementos de una estructura reticular, mostrando las rutinas de cada una de las etapas cálculo. Lo anterior tiene como objetivo motivar el aprendizaje y la investigación en el análisis matricial de estructuras reticulares.

En el programa PAERCA 1.0 se considera que la estructura está conformada por elementos prismáticos sometidos a fuerza axial, momento torsor, fuerzas cortantes y momentos flectores, clasificados como armaduras y pórticos. Por otro lado, se considera que las deformaciones son infinitesimales, las acciones externas son estáticas y el material de los elementos estructurales es elástico, lineal e isotrópico. Estas características conducen a un análisis lineal del problema.

El programa está escrito en GNU–Octave (**Eaton2019**), permitiendo que el usuario observe, modifique y amplíe las funciones del mismo, inspirado en el programa PEFiCA 2.0 (**Linero2021**).

Asimismo, PAERCA 1.0 lee la geometría, las condiciones de borde y las cargas impuestas de un archivo generado gráficamente por el entorno de preproceso del programa GMSH (**Geuzaine2019**); mientras que escribe los resultados obtenidos de los desplazamientos, las reacciones y las acciones internas de una estructura, en un archivo compatible con el entorno de postproceso gráfico de GMSH.

Los programas GNU–Octave y GMSH son de libre distribución y pueden ejecutarse en sistemas operativos como Windows, Linux y Mac. Además, las instrucciones utilizadas en el código del programa desarrollado podrán ser compiladas con GNU–Octave o Matlab.

Este libro es un manual para el usuario del programa que desea analizar una estructura reticular y que además quiere comprender el procedimiento de cálculo que lo fundamenta.

Capítulo 1

Generalidades y estructura del programa PAER-CA 1.0

En este capítulo se describe el programa de análisis de estructuras reticulares a código abierto PAERCA 1.0, desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia desde 2020.

El programa PAERCA 1.0 permite obtener los desplazamientos y las reacciones en los nudos, como también las acciones internas de una estructura reticular mediante el método matricial de los desplazamientos, considerando que la deformación es infinitesimal, las acciones externas aplicadas son estáticas y los materiales de los elementos son elásticos, lineales e isotrópicos.

El programa ha sido desarrollado en el lenguaje de programación interpretado GNU-Octave, cuidando su compatibilidad con el Matlab y con los sistemas operativos Windows, MacOS y Linux. Asimismo, puede leer los datos y representar gráficamente los resultados del programa GMSH.

1.1 Objetivo

El programa PAERCA 1.0 tiene como objetivo principal motivar, estimular y facilitar el aprendizaje en el análisis de estructuras reticulares mediante el método matricial de los desplazamientos para armaduras y pórticos, en dos y tres dimensiones, utilizando subrutinas propias y algunas funciones preestablecidas.

PAERCA 1.0 es un programa a código abierto conformado por subrutinas para cada procedimiento escritas en GNU–Octave (**Eaton2019**), que permiten la construcción del proceso principal de cálculo. Esta estructura busca que el usuario participe activamente en su proceso de aprendizaje, proporcionándole las operaciones básicas del análisis matricial de estructuras. La transparencia y la flexibilidad de este tipo de programas permiten que sus algoritmos sean comprendidos, modificados y ampliados.

Este programa también pretende que la construcción de los parámetros del problema sea fácil y que la representación gráfica de los resultados sea clara y versátil. Para ello cuenta con rutinas que permiten leer los datos de entrada y escribir los resultados en la herramienta de preprocessamiento y posprocesamiento gráfico GMSH (**Geuzaine2019**).

1.2 Alcance

PAERCA 1.0 cuenta con subrutinas que, en conjunto, permiten realizar el análisis lineal de una estructura reticular. Por ejemplo, tiene una rutina capaz de numerar los grados de libertad de la estructura, otra que permite construir las matrices características de un elemento tipo pórtico y otra que extrae el vector elemental de desplazamientos a partir de un vector de la estructura. Asimismo, tiene funciones para leer los datos de entrada del problema y escribir en archivos de texto los resultados obtenidos. El código fuente de tales rutinas puede ser observado y modificado por el usuario. Algunas funciones propias del lenguaje interpretado de GNU–Octave son útiles en el análisis matricial como: la suma, la resta y la multiplicación de matrices, el cálculo de la transpuesta, el determinante de una matriz y la solución de un sistema de ecuaciones simultáneas.

Subprog.	Dim.	Problema	GL por nudo	máx. nudos 32-bit	máx. nudos 64-bit
PARBID	2D	Armadura	2	23 170	$1\ 518 \times 10^6$
PARTRI	3D	Armadura	3	15 446	$1\ 012 \times 10^6$
PORTRI	3D	Pórtico	6	7 723	506×10^6

Tabla 1.1. Número máximo de nudos del programa PAERCA 1.0 limitado por su compilación en GNU-Octave, sin considerar las características técnicas del computador y las estrategias de reducción de almacenamiento

El programa PAERCA 1.0 permite obtener las componentes de desplazamiento y de reacción en los nudos, como también la fuerza axial, el momento torsor, las fuerzas cortantes y los momentos flectores en cada elemento de la estructura. Estos resultados se representan gráficamente a través del programa GMSH. Asimismo, es capaz de analizar armaduras planas, armaduras especiales y pórticos espaciales, con procedimientos independientes.

Las acciones externas que pueden ser aplicadas sobre la estructura son cargas puntuales y desplazamientos en los nudos, y cargas distribuidas uniformes y peso propio sobre los elementos.

La capacidad del programa está limitada por el tamaño máximo admisible de una matriz cuadrada en el lenguaje interpretado GNU-Octave. Este último permite construir matrices cuyo número de coeficientes sea menor a $2^{31} - 1 = 2\ 147\ 483\ 647$ cuando ha sido compilado en un interpretador a 32 bits y de $2^{63} - 1 = 9\ 223\ 372\ 036\ 854\ 775\ 807$ para 64 bits. En consecuencia, el tamaño máximo de una matriz cuadrada almacenada será de 46 340 para 32 bits y de 3.037×10^9 para 64 bits.

El arreglo matricial de mayor tamaño en la formulación del método de los desplazamientos aplicado a estructuras reticulares es la matriz de rigidez, la cual se puede almacenar de diferentes formas. Particularmente, el programa PAERCA 1.0 construye dicha matriz sin estrategias que reduzcan su almacenamiento.

De acuerdo con lo anterior, PAERCA 1.0 está limitado a un número máximo de nudos para cada tipo de estructura reticular, como lo indica la tabla 1.1. Sin embargo, el número máximo de nudos se reduce en función del procesador y la memoria RAM que tenga el computador.

1.3 Características

Las principales características del programa PAERCA 1.0 son las siguientes:

- *Funcionalidad.* El programa tiene un conjunto de funciones y subrutinas escritas en el lenguaje interpretado de GNU–Octave que permiten resolver los problemas indicados en el apartado anterior mediante el análisis matricial de estructuras.
- *Estabilidad.* Las subrutinas del programa cuentan con controles y trampas de error que garantizan la estabilidad del mismo durante su ejecución. Asimismo, en los programas a código abierto escritos en GNU–Octave, como este, se pueden capturar los errores utilizando las herramientas de ejecución por paso y de presentación de variables.
- *Usabilidad.* El programa PAERCA 1.0 puede leer los datos de la estructura generados por una interfaz gráfica ágil y potente como GMSH. Además, PAERCA 1.0 produce los archivos de resultados en el formato de postproceso gráfico del mismo GMSH. En general, el uso del programa se acerca a la misma comodidad de una herramienta comercial.
- *Eficiencia.* Debido a sus fines didácticos, el programa guarda en la memoria RAM algunas matrices características de las etapas intermedias del procedimiento. Sin embargo, los usuarios podrán evitar que dichas matrices sean almacenadas. El tiempo de ejecución depende del número de grados de libertad que tenga el problema y de la cantidad de resultados intermedios y finales que se desea presentar.
- *Extendibilidad.* Un programa a código abierto como este, permite con facilidad que se adicionen nuevas subrutinas, las cuales realicen otros tipos de análisis de estructuras reticulares.
- *Portabilidad.* El programa requiere la instalación de GNU–Octave para compilar el proceso de cálculo y el programa GMSH para el preproceso y el posproceso

gráfico. Estas herramientas son programas libres y gratuitos. El programa está conformado por un grupo de archivos planos de extensión .m que contienen la rutina principal de cálculo y las funciones propias. Además, PAERCA 1.0 está diseñado para conservar su compatibilidad con Matlab y con los sistemas operativos Windows, MacOS y Linux.

- *Documentación.* Este libro es un manual de usuario del programa PAERCA 1.0. Asimismo, se describe la construcción del archivo de datos y la representación de sus resultados en el programa GMSH, mediante ejemplos de estructuras reticulares.

1.4 Estructura general

El programa PAERCA 1.0 está conformado por un conjunto de subprogramas que permiten resolver un tipo de estructura reticular específica. Cada subprograma cuenta con un grupo de rutinas ubicadas en diferentes carpetas, como lo ilustra la figura 1.1. En particular:

- La carpeta \PARBID cuenta con las subrutinas necesarias para analizar una armadura bidimensional. En este caso cada elemento estructural está sometido exclusivamente a fuerza axial y cada nudo de la estructura tiene dos grados de libertad, asociados a las componentes de desplazamiento en las direcciones de los ejes coordenados x y y .
- La carpeta \PARTRI contiene las rutinas de solución de una armadura tridimensional. Al igual que en el caso anterior, cada elemento estructural está sometido exclusivamente a fuerza axial, pero ahora cada nudo de la estructura tiene tres grados de libertad, asociados a las componentes de desplazamiento en las direcciones de los ejes coordenados x , y y z .
- El contenido de la carpeta \PORTRI permite analizar pórticos tridimensionales, en los cuales cada elemento está sometido a fuerza axial, momento torsor, fuerzas cortantes y momentos flectores. Asimismo, cada nudo de la estructura

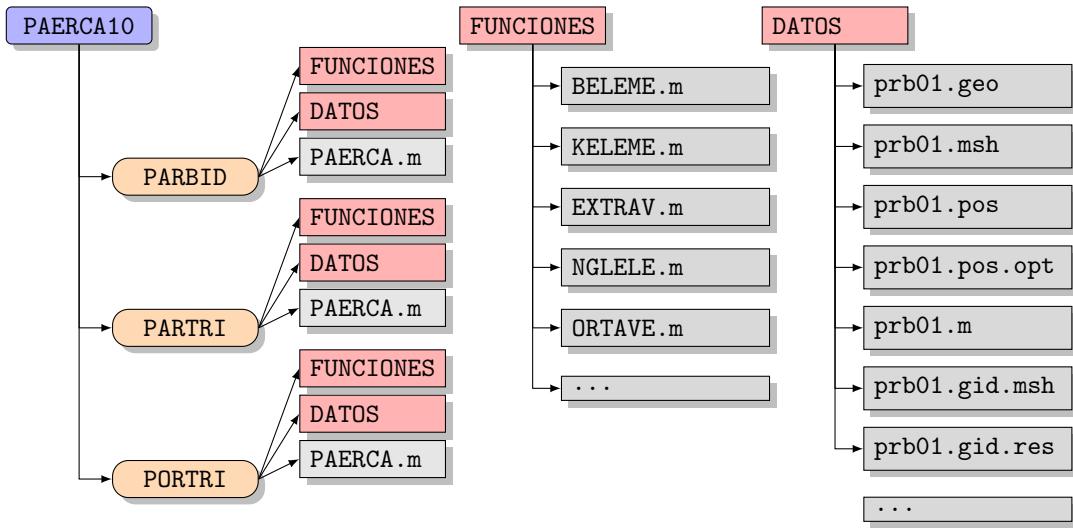


Figura 1.1. Árbol de carpetas y archivos del programa PAERCA 1.0

tiene seis grados de libertad, asociados a los desplazamientos y las rotaciones en las direcciones del sistema coordenado x , y y z .

Tales carpetas contienen su propio archivo **PAERCA.m** y sus propias subcarpetas **\FUNCIONES** y **\DATOS**. La carpeta **\FUNCIONES** contiene archivos de extensión **.m** con cada una de las subrutinas propias escritas en lenguaje GNU-Octave. En cambio, la carpeta **\DATOS** contiene los archivos de entrada de datos y de presentación de resultados de cada problema resuelto. El archivo **PAERCA.m** contiene la rutina principal del programa en lenguaje GNU-Octave, desde donde se llaman a las funciones propias del programa almacenadas en la carpeta **\FUNCIONES** y se leen los datos y se escriben los resultados contenidos en la carpeta **\DATOS**.

1.5 Formatos de los archivos de entrada y de salida

El programa lee los datos de un problema desde un archivo de entrada y escribe los resultados en un archivo de salida. En particular, los archivos de entrada del problema pueden escribirse de dos formas:

- Como *script* de GNU–Octave con extensión `.m` que puede escribirse directamente.
- En el formato de malla con extensión `.msh`, exportada desde GMSH.

Se pueden presentar tablas de resultados directamente en la ventana de comando de GNU–Octave. Asimismo, el programa puede generar los archivos de salida para la representación gráfica de los resultados en formato de GMSH con extensiones `.pos` y `.pos.opt` y `.pos.opt`.

El nombre del archivo de entrada se utiliza para designar los archivos de salida cambiando su extensión. Por ejemplo, si se ejecuta el programa PAERCA 1.0 con los datos del archivo de entrada `prb.msh` en formato GMSH, se obtienen los archivos de salida `prb.pos` y `prb.pos.opt`. La figura 1.2 describe la estructura de PAERCA 1.0 utilizando preprocesso y posproceso con el programa GMSH en la parte (a) y preprocesso escrito directamente en un archivo `.m` y posproceso hecho en GMSH en la parte (b).

1.6 Instalación del programa PAERCA 1.0

La instalación del programa PAERCA 1.0 en los sistemas operativos Windows, Linux o MacOS requiere los siguientes procedimientos:

- Descargar e instalar el programa gratuito GNU–Octave con interfaz gráfica (GUI) desde su página web: <https://www.gnu.org/software/octave/>. El código fuente de PEFiCA 2.0 se puede compilar con este programa. Particularmente, en relación con el sistema operativo MacOS, se recomienda descargar e instalar la versión *Octave 4.0.3 with graphical user interface*, que no depende de emuladores de otro sistema operativo o de la conexión a Internet.
- Descargar e instalar el programa gratuito GMSH desde su página web: <http://gmsh.info/>. El preprocesso de los datos de entrada y el posproceso de los resultados se pueden realizar con este programa.

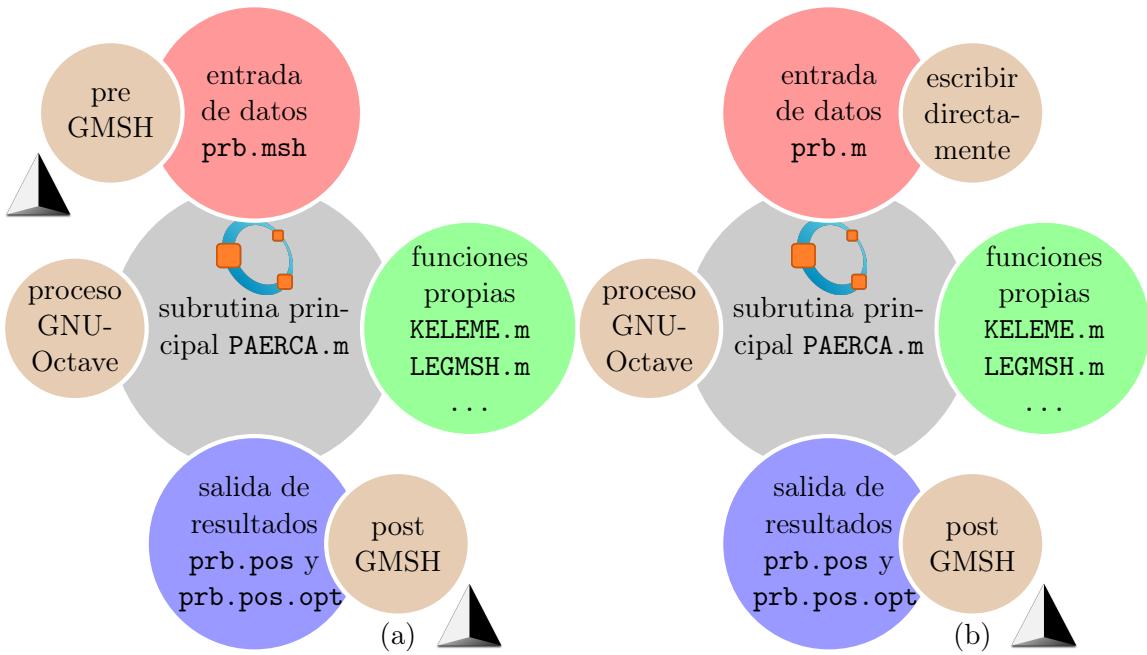


Figura 1.2. Estructura del programa PAERCA 1.0: (a) cuando el preproceso se realiza con GMSH y posproceso con GMSH, (b) cuando el preproceso se escribe directamente y el posproceso se realiza con GMSH

- Descargar el programa PAERCA 1.0 desde el vínculo <https://www.dropbox.com/s/xy3not38hchf1wm/PAERCA10.zip?dl=0>. El archivo PAERCA10.zip descargado se descomprime y se ubica en el disco duro.

Como alternativa al programa GNU-Octave se pueden utilizar los programas Matlab. Es posible descargar e instalar una versión limitada de Matlab en su página web: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

1.7 Lenguaje y compilador GNU–Octave

GNU-Octave es un lenguaje de programación interpretado o de alto nivel, preparado para cálculos numéricos de diferentes tipos (**Eaton2019**). Actualmente, las instrucciones de este programa se pueden ejecutar desde una consola de líneas de comandos (CLI) o utilizando una interfaz gráfica de usuario (GUI), mucho más amigable.

Las rutinas o funciones del programa PAERCA 1.0 han sido escritas en archivos `.m`, en el lenguaje interpretado de GNU–Octave, cuidando su compatibilidad con el lenguaje de Matlab. Por lo tanto, una de estas dos herramientas es necesaria para compilar y ejecutar dichas rutinas.

La interfaz gráfica de usuario (GUI) del programa GNU–Octave contiene un menú superior y varias ventanas distribuidas en la pantalla, como se indica en la figura 1.3. Por defecto, a la izquierda de la pantalla se encuentran las ventanas **Explorador de archivos** (o **File Browser**), **Espacio de trabajo** (o **Workspace**) e **Historial de comandos** (o **Command History**).

El **Explorador de archivos** permite buscar y seleccionar un archivo o una carpeta específica. Esta última está sincronizada con el **Directorio actual** del menú superior.

El **Espacio de trabajo** indica el nombre, el valor y los atributos de las variables definidas directamente en la **Ventana de comandos**. Las funciones y los *scripts* de GNU–Octave mantienen sus variables como internas y no son cargadas al espacio de trabajo. En consecuencia, cuando se ejecuta la función principal, las variables no aparecen en la ventana **Espacio de trabajo**.

El **Historial de comandos** contiene una lista con las instrucciones establecidas previamente desde la **Ventana de comandos** que permite la selección de tales instrucciones.

El área de la pantalla está ocupada en su mayoría por las ventanas **Ventana de comandos** (o **Command Window**), **Editor** (o **Editor**) y **Documentación** (o **Documentation**), que por defecto están superpuestas y se pueden activar haciendo clic en la pestaña con su nombre ubicada en la parte inferior.

La **Ventana de comandos** permite la ejecución de las instrucciones, funciones y *scripts* del programa. Se utiliza de la misma forma que el entorno de CLI.

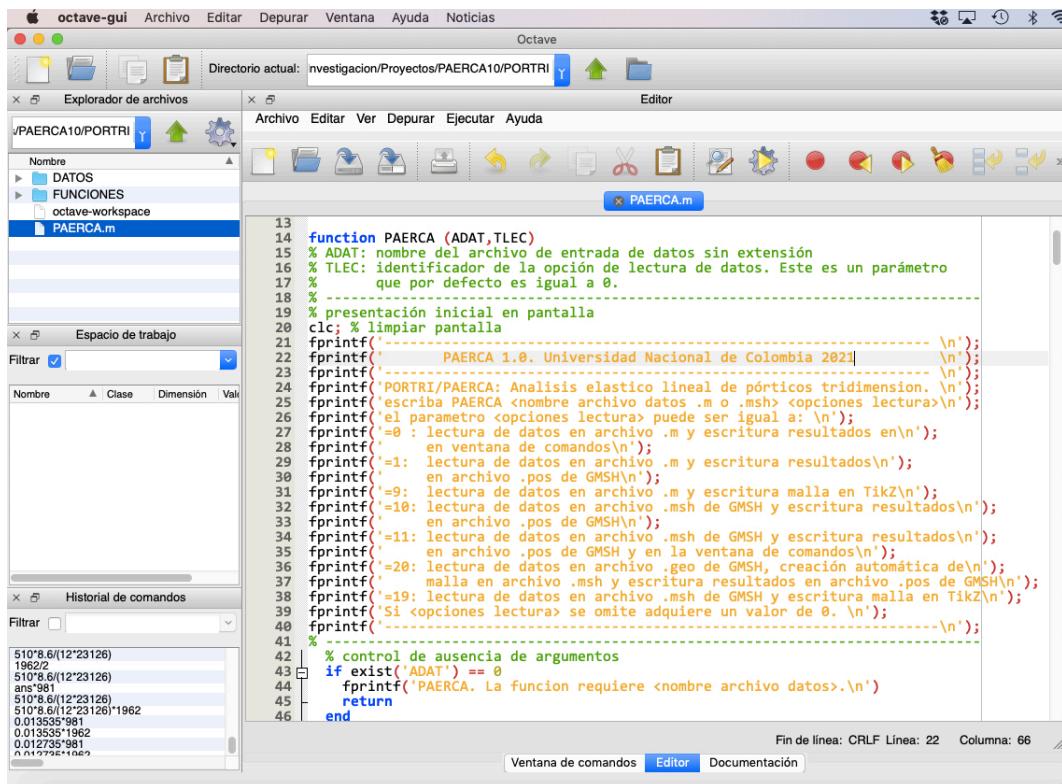


Figura 1.3. Interfaz gráfica de usuario (GUI) de GNU–Octave, mostrando el archivo PAERCA.m

La ventana de Editor permite crear, ver y modificar un archivo de extensión .m, en el cual se escriben funciones o los *scripts* en el lenguaje de GNU–Octave.

La ventana Documentación contiene la ayuda inmediata de las instrucciones propias del programa.

Con el fin de conservar los caracteres del idioma español de los comentarios en los archivos .m, en el programa GNU–Octave para sistema operativo Windows se sugiere seleccionar la pestaña Editor en el menú Editar > Preferencias ... y escoger la opción UTF-8 en la codificación de texto usado para cargar y guardar.

Particularmente, para visualizar correctamente los saltos de línea de los archivos .m, utilizando un editor de texto en sistema operativo MacOS, se sugiere que en el programa GNU–Octave se realice lo siguiente: seleccionar la pestaña Editor en el menú Editar > Preferencias ... y escoger la opción Windows(CRLF) en el identificador de fin de línea por defecto.

1.7.1 Selección del directorio de trabajo

El programa PAERCA 1.0 está conformado por tres subprogramas capaces de analizar diferentes tipos de estructuras, los cuales están ubicados en carpetas distintas. Si se desea analizar una armadura bidimensional, se debe seleccionar la carpeta \PARBID como directorio de trabajo. En cambio, para analizar una armadura tridimensional o un pórtico tridimensional, los directorios de trabajo seleccionados deben ser las carpetas \PARTRI o \PORTRI, respectivamente.

En la interfaz gráfica de usuario de GNU-Octave, el directorio de trabajo se selecciona en la caja de texto Directorio actual del menú superior directamente o escogiendo dicha carpeta en el Explorador de archivos.

1.7.2 Edición de la función principal y de otras funciones del programa

En cada una de las carpetas \PARBID, \PARTRI o \PORTRI se encuentra un archivo llamado PAERCA.m, el cual contiene la función principal de cálculo, que permite analizar el tipo de estructura reticular correspondiente. La función principal utiliza instrucciones intrínsecas de GNU-Octave y funciones propias de PAERCA 1.0 ubicadas en la subcarpeta \FUNCIONES.

La función principal o las demás funciones propias se pueden editar en la ventana Editor. Esto se realiza haciendo doble clic sobre una de ellas en el Explorador de archivos del GUI de GNU-Octave.

En general, después de modificar o crear una función, el archivo que la contiene se guarda seleccionando Archivo > Guardar archivo (o File > Save File) en el menú superior de la ventana Editor.

Capítulo 2

Análisis de una armadura bidimensional utilizando el subprograma PARBID

El programa de elementos finitos PAERCA 1.0 incluye un subprograma de análisis lineal de armaduras bidimensionales en el plano xy , el cual está contenido en la carpeta PARBID. A continuación se presenta tal procedimiento de análisis, indicando algunas instrucciones para un ejemplo en particular.

Una armadura plana de acero apoyada en los extremos de su cordón inferior está sometida a tres cargas puntuales, como se indica en la figura 2.1. Allí mismo se designa la numeración de las barras y los nudos de la armadura. El acero de la estructura tiene un módulo de elasticidad $E = 200 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$. Las barras de los cordones superior e inferior tienen un área de sección transversal igual a $A = 0.002 \text{ m}^2$, mientras que en las barras diagonales el área es $A = 0.001 \text{ m}^2$.

2.1 Creación de entidades geométricas de la armadura en GMSH

En el entorno del programa GMSH se construye la geometría de la armadura a partir de entidades geométricas como puntos y líneas, de la siguiente forma:

- Se crea un archivo nuevo de extensión `.geo` y se activa el núcleo gráfico Build-in.

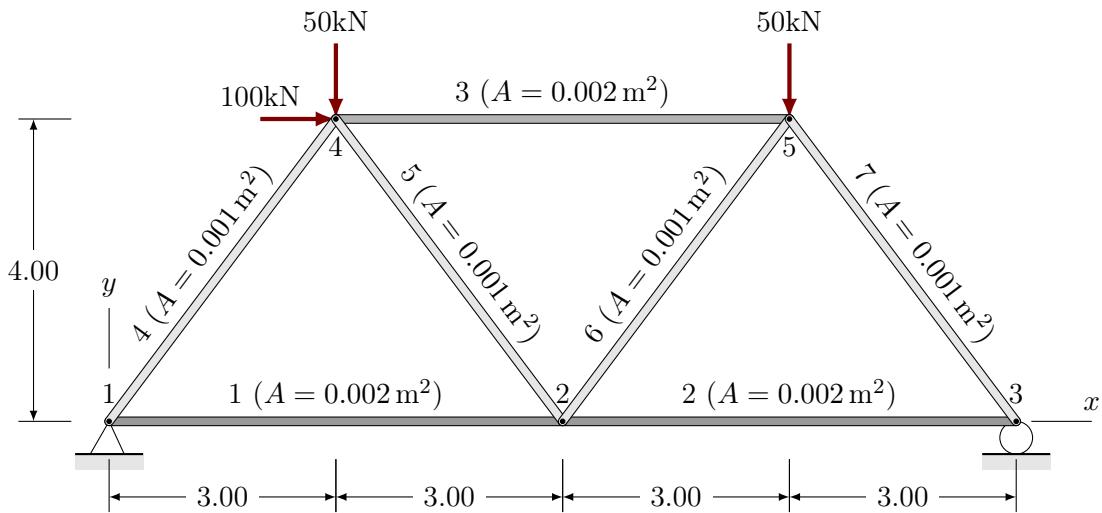


Figura 2.1. Ejemplo de análisis de una armadura plana: geometría, numeración de nudos y elementos, cargas aplicadas y condiciones de borde. Las medidas están dadas en metros.

- Se hace clic en **Modules ▷ Geometry ▷ Elementary entities ▷ Add ▷ Parameter** en el menú lateral, esto activa la pestaña **Parameter** en la ventana **Elementary entities context**. Allí se escribe el nombre del parámetro de tamaño de elemento finito **lc** en la casilla **Name** y su valor en la casilla **Value**. El valor de este parámetro debe ser mayor a la longitud de cualquier barra de la armadura, por ejemplo 100 para una estructura definida en metros. Se termina este procedimiento haciendo clic en **Add** y cerrando la ventana **Elementary entities context**.
- Se selecciona **Tool ▷ Options** del menú superior, esto activa la ventana **Options** donde se escoge la opción **Geometry** a la izquierda y la pestaña **Visibility** a la derecha. Allí se verifican las casillas **Points**, **Point labels**, **Curves** y **Curves labels**, con el fin de indicar los puntos y las líneas que serán creadas a continuación.
- Se hace clic en **Modules ▷ Geometry ▷ Elementary entities ▷ Add ▷ Point** del menú lateral, esto activa la pestaña **Point** en la ventana **Elementary entities context**. Allí se escriben las coordenadas del primer punto de la armadura en las casillas **x** y **y**, conservando un valor de cero en la casilla **z**. Asimismo, se escribe el parámetro **lc** en la casilla que define la dimensión de la malla alrededor del

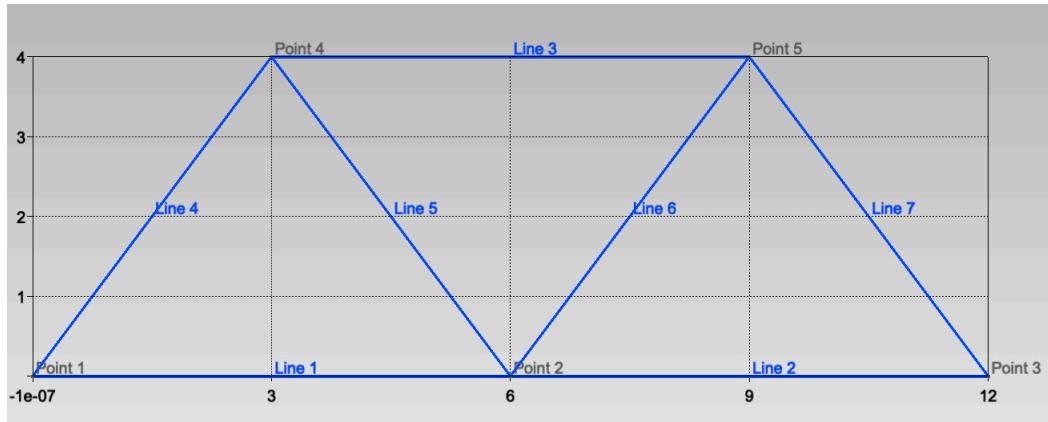


Figura 2.2. Ejemplo de análisis de una armadura plana: puntos y líneas definidas en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

punto **Prescribed mesh size at point**. Se termina el proceso haciendo clic en el botón **Add**. Los siguientes puntos se adicionan mediante el mismo procedimiento y se termina cerrando la ventana **Elementary entities context** y se oprime la tecla **q**. En el proceso de la construcción de la malla se generará un nudo en cada uno de los puntos.

- Se selecciona **Modules >Geometry >Elementary entities >Add >Line** en el menú lateral. A continuación se hace clic sobre los puntos inicial y final que definen una línea. Sucesivamente, se hace clic sobre los puntos de las siguientes líneas. Para terminar este proceso se presiona la tecla **q**.

La figura 2.2 ilustra las entidades geométricas creadas en el entorno gráfico de GMSH para el ejemplo indicado en la figura 2.1. Allí se identifican los puntos y las líneas que conforman la armadura en el plano *xy*.

El archivo de extensión **.geo** se actualiza cada vez que se realiza una de las acciones indicadas anteriormente en el entorno gráfico. Para el ejemplo ilustrado en la figura 2.1, las líneas de comando 1000 a 1013 del Listado 2.1 indican las instrucciones en el archivo **.geo**, correspondientes a la construcción de puntos y líneas.

```
1000 SetFactory("Built-in");
1c = DefineNumber[ 100, Name "Parameters/lc" ];
```

```

1002     Point(1) = {0, 0, 0, 1c};
1004     Point(2) = {6.0, 0, 0, 1c};
1006     Point(3) = {12.0, 0, 0, 1c};
1008     Point(4) = {3.0, 4.0, 0, 1c};
1010     Point(5) = {9.0, 4.0, 0, 1c};
1012     Line(1) = {1, 2};
1014     Physical Curve("CATE EYOU=200E6 AREA=0.002") = {1, 2, 3};
1016     Physical Curve("CATE EYOU=200E6 AREA=0.001") = {4, 5, 6, 7};
1018     Physical Point("DISP UX=0 UY=0", 8) = {1};
     Physical Point("DISP UY=0", 9) = {3};
     Physical Point("LOAD FX=100 FY=-50", 10) = {4};
     Physical Point("LOAD FY=-50", 11) = {5};

```

Listado 2.1. Ejemplo de análisis de una armadura plana: líneas de comando de creación de entidades geométricas y físicas en el archivo .geo. Se han sustraído del archivo las líneas de comentarios indicadas como //.

2.2 Creación de entidades físicas de la armadura en GMSH

Las entidades físicas permiten establecer las condiciones de apoyo, las cargas externas aplicadas y las propiedades de las barras. Cada entidad física se asocia a uno o varios puntos, o a uno o varias líneas existentes.

Para establecer las condiciones de apoyo sobre los puntos se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona Modules >Geometry >Physical groups >Add >Point del menú lateral, esto activa la ventana **Physical group context**.
- En la casilla **Name** de esta ventana se escribe la condición de apoyo de acuerdo con la siguiente sintaxis:

DISP UX=*ux* UY=*uy*

donde ux y uy son los valores del desplazamiento en las direcciones x y y , en la unidad de longitud utilizada en la geometría. Por ejemplo, para definir un apoyo de segundo género se debe escribir DISP UX=0 UY=0.

- Se hace clic sobre el o los puntos a los cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla e.

Para establecer las cargas aplicadas sobre los puntos se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona Modules >Geometry >Physical groups >Add >Point del menú lateral, esto activa la ventana Physical group context.
- En la casilla Name de esta ventana se escribe la carga aplicada de acuerdo con la siguiente sintaxis:

$$\text{LOAD FX}=\mathit{fx} \quad \text{FY}=\mathit{fy}$$

donde fx y fy son los valores de la fuerza en las direcciones x y y , en la unidad de fuerza utilizada. Por ejemplo, para aplicar una carga de 100 kN en dirección x y de -50 kN en y se debe escribir LOAD FX=100 FY=-50.

- Se hace clic sobre el o los puntos a los cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla e.

Para establecer el módulo de elasticidad del material y el área de la sección transversal de las barras, se definen entidades físicas sobre las líneas de la siguiente forma:

- Se selecciona Modules >Geometry >Physical groups >Add >Curve del menú lateral, esto activa la ventana Physical group context.
- En la casilla Name de esta ventana se escriben las propiedades de las barras de acuerdo con la siguiente sintaxis:

$$\text{CATE EYOU}=\mathit{eyou} \quad \text{AREA}=\mathit{area}$$

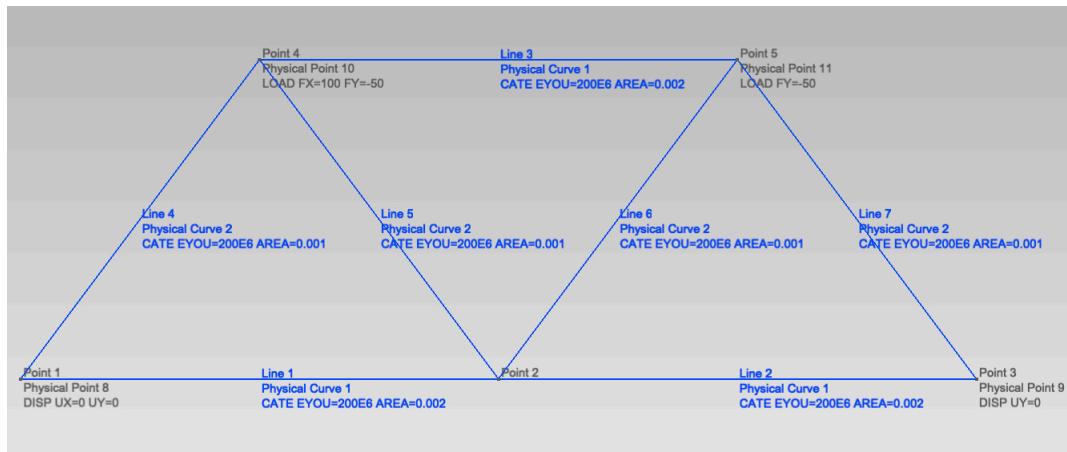


Figura 2.3. Ejemplo de análisis de una armadura plana: entidades físicas definidas en el entorno gráfico de preproceso de GMSH, las cuales identifican las condiciones de borde, las cargas y las propiedades de las barras

donde *eyou* es el valor del módulo de elasticidad del material en la unidad de fuerza dividida en la unidad de longitud al cuadrado utilizada en el modelo. Asimismo, *area* contiene el valor del área de la sección transversal de la barra dada en la unidad de longitud al cuadrado de la geometría del modelo. Por ejemplo, si el módulo de elasticidad es 200×10^6 kN/m² y el área de la sección transversal es 0.002 m², se debe escribir CATE EY0U=200E6 AREA=0.002.

- Se hace clic sobre la o las líneas a las cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla e.

La figura 2.3 ilustra los nombres de las entidades físicas definidas sobre la geometría, los cuales describen los desplazamientos conocidos y las cargas sobre los puntos, y las características de las barras sobre las líneas.

Para el ejemplo ilustrado en la figura 2.1, las líneas de comando 1014 a 1019 del Listado 2.1 indican las instrucciones en el archivo .geo, correspondientes a la construcción de las entidades físicas.

2.3 Generación de la malla de elementos tipo barra de la armadura

Los elementos tipo barra y los respectivos nudos se construyen mediante un proceso de generación de una malla de elementos finitos donde se produce un nudo y una línea en cada punto y línea de la geometría, respectivamente. Esto se logra seleccionando **Modules >Mesh >1D** del menú lateral o oprimiendo la tecla 1.

Para observar la malla generada, se selecciona **Tool >Options** del menú superior, esto activa la ventana **Options** donde se escoge la opción **Geometry** a la izquierda y la pestaña **Visibility** a la derecha. Allí se deshabilitan las casillas **Points**, **Point labels**, **Curves** y **Curves labels**, con el fin de ocultar los puntos y las líneas. A continuación se selecciona la opción **Mesh** a la izquierda de la ventana y la pestaña **Visibility** a la derecha. Allí se habilitan las casillas de verificación **Nodes**, **Node labels**, **1D elements** y **1D element labels**, con el fin de mostrar los nudos y los elementos de la armadura.

GMSH permite exportar un archivo plano que contiene la malla de elementos finitos tipo barra que conforman la armadura. El procedimiento para esto es el siguiente: se selecciona **File >Export** del menú superior, se escribe el nombre del archivo con extensión **.msh**, se ubica en la carpeta **\PARBID\DATOS**, se oprime la tecla **Save**, después se escoge **Version 2 ASCII** en la casilla desplegable **format** de la ventana **MSH Options**, y se finaliza con el botón **ok**.

2.4 Ejecución del subprograma de análisis PARBID

Inicialmente se abre el programa GNU-Octave, se establece **\PARBID** como la carpeta de trabajo y se activa la pestaña **Ventana de comandos**. Desde allí se ejecuta el subprograma de análisis de una armadura bidimensional, escribiendo una línea de comando con la siguiente sintaxis:

```
PAERCA narch oplec
```

El parámetro *narch* corresponde al nombre del archivo de datos de entrada, excluyendo su extensión **.msh**, el cual fue generado por GMSH y está ubicado en la

<i>oplec</i>	tipo de lectura de datos	tipo de escritura de resultados
0	en el archivo .m directamente	en la ventana de comandos
1	en el archivo .m directamente	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
9	en el archivo .m directamente	en el archivo .tex que contiene la geometría del pórtico para LATEX
10	en el archivo .msh de GMSH	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
19	en el archivo .msh de GMSH	en el archivo .tex que contiene la geometría del pórtico para LATEX
20	en el archivo .geo de GMSH y creación automática de malla en archivo .msh	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH

Tabla 2.1. Opciones de lectura y escritura en la ejecución del subprograma de análisis de armaduras bidimensionales PARBID

subcarpeta \PARBID\DATOS. Tal archivo contiene la geometría, las propiedades mecánicas, las condiciones de apoyo y las acciones externas de nudos y elementos de la estructura. El parámetro *oplec* es el código que identifica la opción de lectura de datos y escritura de resultados, mostrada en la tabla 2.1.

Para el ejemplo, se lee el archivo de datos `arma02.msh`, se analiza la armadura y se escriben los resultados en los archivos `arma02.pos` y `arma02.pos.opt`, mediante la ejecución de la siguiente línea de comando:

```
PAERCA arma02 10
```

2.5 Presentación de los resultados en GMSH

Los resultados obtenidos del análisis se pueden visualizar en el programa GMSH de la siguiente manera: se selecciona File ▷ Open del menú superior, se escoge el archivo de extensión `.pos` con los resultados y se finaliza con el botón **Open**.

En el árbol ▷ Post-processing menú lateral se puede escoger una o varias de las siguientes vistas de resultados:

- La vista [0] **Desplaz nod** muestra la norma del vector desplazamiento sobre las barras y la configuración deformada de la armadura.
- La vista [1] **Fuerzas nod** muestra mediante flechas los vectores de fuerza en los nudos de la armadura.
- La vista [2] **Deformación** muestra el valor de la deformación longitudinal en el interior de cada barra.
- La vista [3] **Esfuerzo** muestra el valor del esfuerzo normal en el interior de cada barra.
- La vista [4] **Fuerza axil** muestra el valor de la fuerza axial en el interior de cada barra.

Particularmente en barras sometidas a fuerza axial definidas como elementos unidimensionales lineales, la deformación, el esfuerzo y la fuerza axial exhibe un valor constante en su longitud. Por tal razón, en las respectivas vistas se muestra un solo color de cada barra.

La figura 2.4 ilustra el entorno gráfico de postproceso de GMSH, cuyo menú lateral indica las vistas de resultados. Específicamente se presenta la vista [0] **Desplaz nod** de la armadura del ejemplo, la cual muestra la configuración deformada y la norma del desplazamiento en metros.

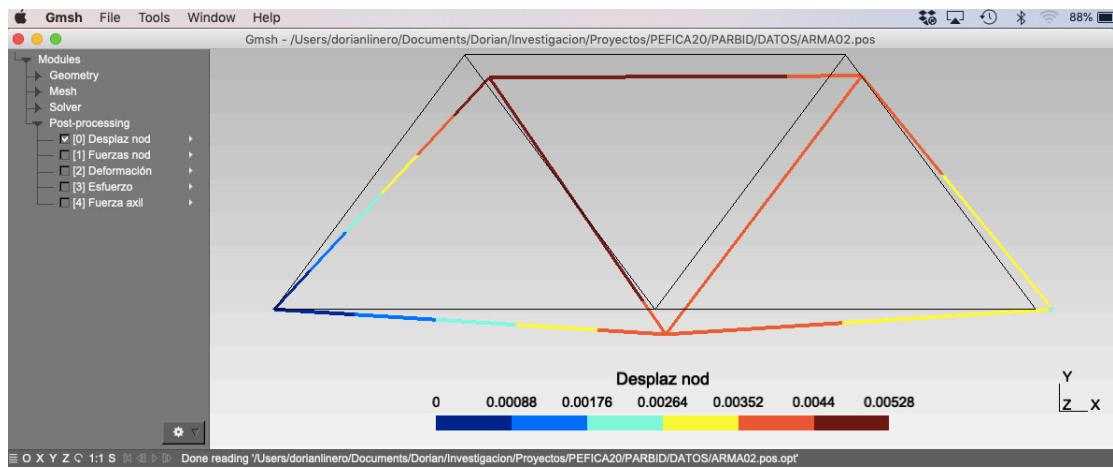


Figura 2.4. Ejemplo de análisis de una armadura plana: configuración deformada y norma del desplazamiento en m presentada en el entorno gráfico de postproceso de GMSH.

Capítulo 3

Análisis de una armadura tridimensional utilizando el subprograma PARTRI

El subprograma de PAERCA 1.0 que permite analizar armaduras tridimensionales está contenido en la carpeta PARTRI. En este capítulo se describe como se utiliza este subprograma a través de un ejemplo.

Una armadura tridimensional conformada por cuatro barras está sometida a dos cargas puntuales en su nudo superior como lo ilustra la . En ese mismo gráfico se indica la numeración de las barras y de los nudos, como también la ubicación de estos últimos con respecto al sistema coordenado global xyz en pulgadas. Todas las barras tienen un área de sección transversal $A = 8.4 \text{ in}^2$ y el material de la estructura tiene un módulo de elasticidad $E = 10\,000 \text{ ksi}$ (**Kassimali2012**).

3.1 Creación de entidades geométricas de la armadura en GMSH

En el entorno del programa GMSH se construye la geometría de la armadura a partir de entidades geométricas como puntos y líneas, de la siguiente forma:

- Se crea un archivo nuevo de extensión `.geo` y se activa el núcleo gráfico Built-in.
- Se hace clic en **Modules** \triangleright **Geometry** \triangleright **Elementary entities** \triangleright **Add** \triangleright **Parameter** en el menú lateral, esto activa la pestaña **Parameter** en la ventana **Elementary entities**

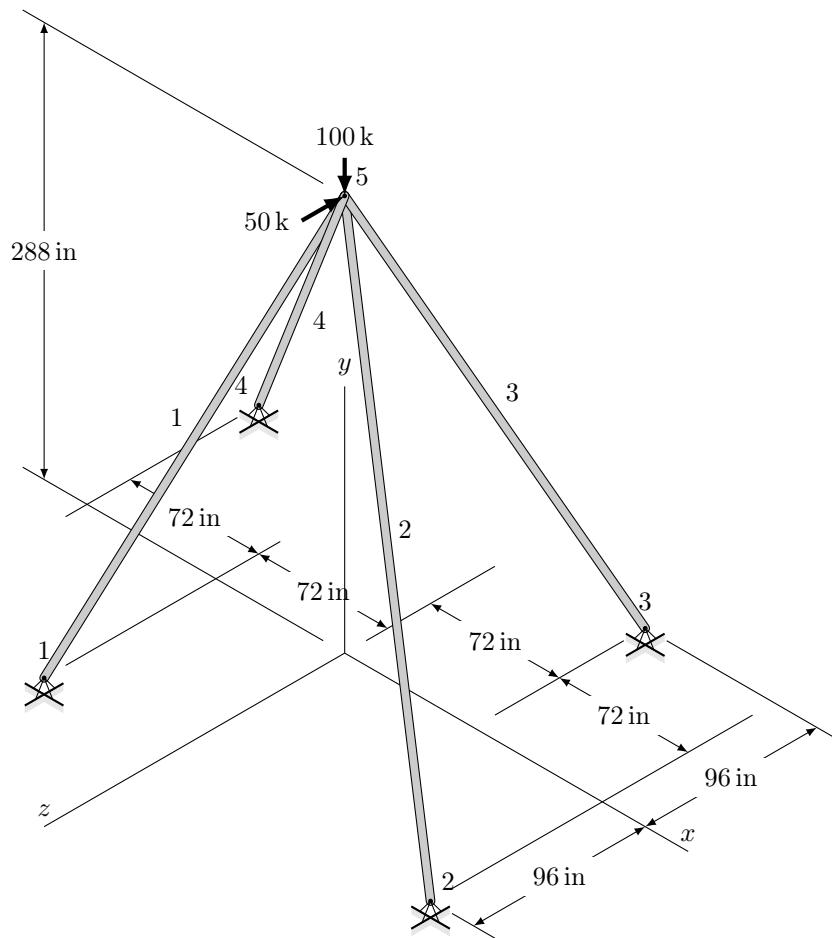


Figura 3.1. Ejemplo de análisis de una armadura tridimensional: geometría, numeración de nudos y elementos, cargas aplicadas y condiciones de borde. Las medidas están dadas en pulgadas.

context. Allí se escribe el nombre del parámetro de tamaño de elemento finito 1c en la casilla Name y su valor en la casilla Value. El valor de este parámetro debe ser mayor a la longitud de cualquier barra de la armadura, por ejemplo 10000 para una estructura definida en pulgadas. Se termina este procedimiento haciendo clic en Add y cerrando la ventana Elementary entities context.

- Se selecciona Tool > Options del menú superior, esto activa la ventana Options donde se escoge la opción Geometry a la izquierda y la pestaña Visibility a la

derecha. Allí se verifican las casillas Points, Point labels, Curves y Curves labels, con el fin de indicar los puntos y las líneas que serán creadas a continuación.

- Se hace clic en Modules >Geometry >Elementary entities >Add >Point del menú lateral, esto activa la pestaña Point en la ventana Elementary entities context. Allí se escriben las coordenadas del primer punto de la armadura en las casillas x, y y z. Asimismo, se escribe el parámetro lc en la casilla que define la dimensión de la malla alrededor del punto Prescribed mesh size at point. Se termina el proceso haciendo clic en el botón Add. Los siguientes puntos se adicionan mediante el mismo procedimiento y se termina cerrando la ventana Elementary entities context y se oprime la tecla q. En el proceso de la construcción de la malla se generará un nudo en cada uno de los puntos.
- Se selecciona Modules >Geometry >Elementary entities >Add >Line en el menú lateral. A continuación se hace clic sobre los puntos inicial y final que definen una línea. Sucesivamente, se hace clic sobre los puntos de las siguientes líneas. Para terminar este proceso se presiona la tecla q.

La figura 3.2 ilustra las entidades geométricas creadas en el entorno gráfico de GMSH para el ejemplo indicado en la figura 3.1. Allí se identifican los puntos y las líneas que conforman la armadura en una vista isométrica en xyz.

El archivo de extensión .geo se actualiza cada vez que se realiza una de las acciones indicadas anteriormente en el entorno gráfico. Para el ejemplo ilustrado en la figura 3.1, las líneas de comando 1000 a 1010 del Listado 3.1 indican las instrucciones en el archivo .geo, correspondientes a la construcción de puntos y líneas.

```

1000 SetFactory("Built-in");
1001 lc = DefineNumber[ 10000, Name "Parameters/lc" ];
1002 Point(1) = {-72, 0, 96, lc};
1003 Point(2) = {144, 0, 96, lc};
1004 Point(3) = {72, 0, -96, lc};
1005 Point(4) = {-144, 0, -96, lc};
1006 Point(5) = {0, 288, 0, lc};
1007 Line(1) = {1, 5};
1008 Line(2) = {2, 5};
1009 Line(3) = {3, 5};
1010 Line(4) = {4, 5};

```

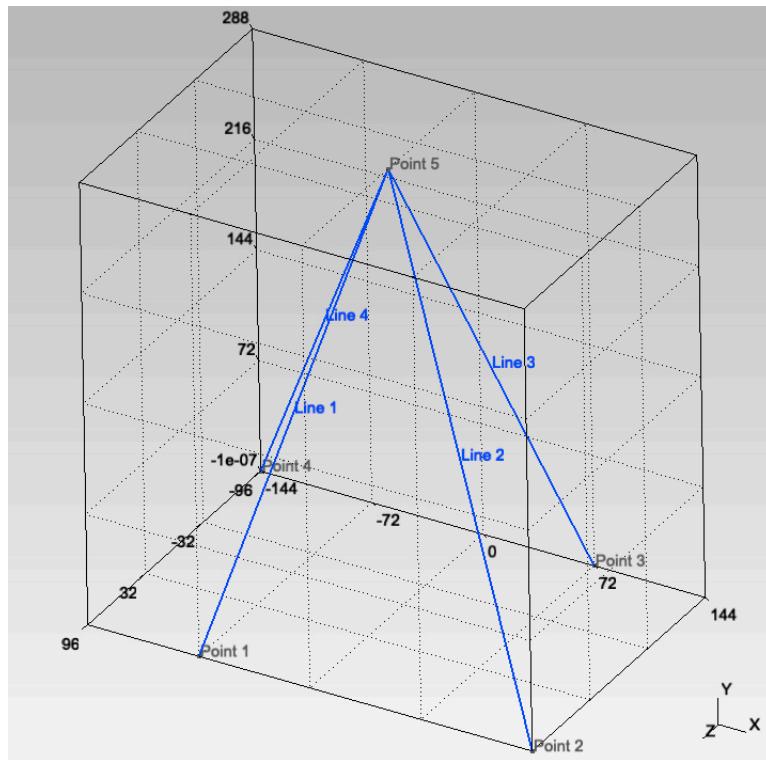


Figura 3.2. Ejemplo de análisis de una armadura tridimensional: puntos y líneas definidas en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

```
1012 Physical Point("DISP UX=0 UY=0 UZ=0") = {4, 1, 2, 3};
Physical Point("LOAD FY=-100 FZ=-50") = {5};
Physical Curve("CATE EY0U=10000 AREA=8.4") = {1, 2, 3, 4};
```

Listado 3.1. Ejemplo de análisis de una armadura tridimensional: líneas de comando de creación de entidades geométricas y físicas en el archivo .geo. Se han sustraído del archivo las líneas de comentarios indicadas como //.

3.2 Creación de entidades físicas de la armadura en GMSH

Las entidades físicas permiten establecer las condiciones de apoyo, las cargas externas aplicadas y las propiedades de las barras. Cada entidad física se asocia a uno o varios puntos, o a uno o varias líneas existentes.

Para establecer las condiciones de apoyo sobre los puntos se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona **Modules >Geometry >Physical groups >Add >Point** del menú lateral, esto activa la ventana **Physical group context**.
- En la casilla **Name** de esta ventana se escribe la condición de apoyo de acuerdo con la siguiente sintaxis:

DISP UX= ux UY= uy UZ= uz

donde ux , uy y uz son los valores del desplazamiento en las direcciones x , y y z en la unidad de longitud utilizada en la geometría. Por ejemplo, para definir un apoyo articulado en el espacio se debe escribir **DISP UX=0 UY=0 UZ=0**.

- Se hace clic sobre el o los puntos a los cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla **e**.

Para establecer las cargas aplicadas sobre los puntos se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona **Modules >Geometry >Physical groups >Add >Point** del menú lateral, esto activa la ventana **Physical group context**.
- En la casilla **Name** de esta ventana se escribe la carga aplicada de acuerdo con la siguiente sintaxis:

LOAD FX= fx FY= fy FZ= fz

donde fx , fy y fz son los valores de la fuerza en las direcciones x , y y z , en la unidad de fuerza utilizada. Por ejemplo, para aplicar una carga de -100 kN en dirección y y de -50 kN en z se debe escribir **LOAD FY=-100 FZ=-50**.

- Se hace clic sobre el o los puntos a los cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla **e**.

Para establecer el módulo de elasticidad del material y el área de la sección transversal de las barras, se definen entidades físicas sobre las líneas de la siguiente forma:

- Se selecciona **Modules >Geometry >Physical groups >Add >Curve** del menú lateral, esto activa la ventana **Physical group context**.
- En la casilla **Name** de esta ventana se escriben las propiedades de las barras de acuerdo con la siguiente sintaxis:

CATE EYOU=*eyou* AREA=*area*

donde *eyou* es el valor del módulo de elasticidad del material en la unidad de fuerza dividida en la unidad de longitud al cuadrado utilizada en el modelo. Asimismo, *area* contiene el valor del área de la sección transversal de la barra dada en la unidad de longitud al cuadrado de la geometría del modelo. Por ejemplo, si el módulo de elasticidad es 10 000 ksi y el área de la sección transversal es 8.4 in², se debe escribir **CATE EYOU=10000 AREA=8.4**.

- Se hace clic sobre la o las líneas a las cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla e.

La figura 3.3 ilustra los nombres de las entidades físicas definidas sobre la geometría, los cuales describen los desplazamientos conocidos y las cargas sobre los puntos, y las características de las barras sobre las líneas.

Para el ejemplo ilustrado en la figura 3.1, las líneas de comando 1011 a 1013 del Listado 3.1 indican las instrucciones en el archivo .geo, correspondientes a la construcción de las entidades físicas.

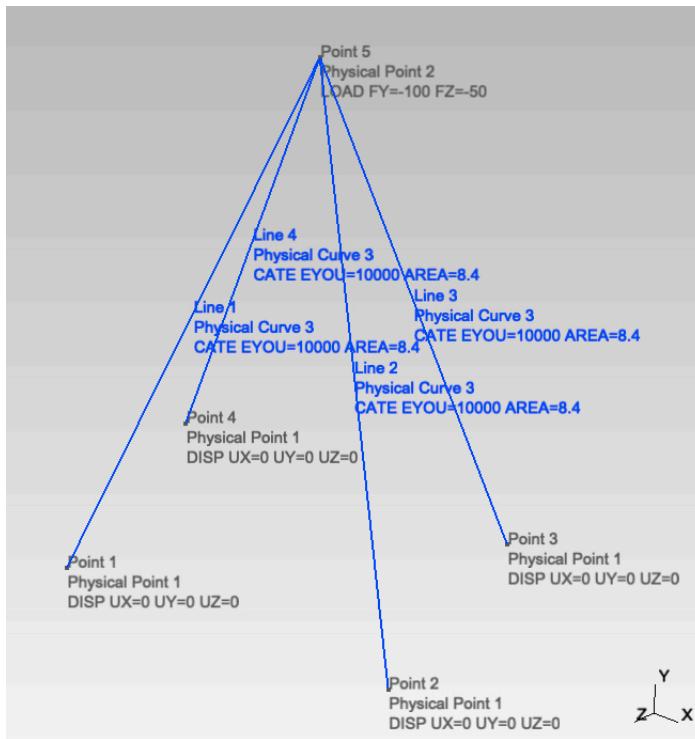


Figura 3.3. Ejemplo de análisis de una armadura tridimensional: entidades físicas definidas en el entorno gráfico de preproceso de GMSH, las cuales identifican las condiciones de borde, las cargas y las propiedades de las barras

3.3 Generación de la malla de elementos tipo barra de la armadura

Los elementos tipo barra y los respectivos nudos se construyen mediante un proceso de generación de una malla de elementos finitos donde se produce un nudo y una línea en cada punto y línea de la geometría, respectivamente. Esto se logra seleccionando Modules > Mesh > 1D del menú lateral o oprimiendo la tecla 1.

Para observar la malla generada, se selecciona Tool > Options del menú superior, esto activa la ventana Options donde se escoge la opción Geometry a la izquierda y la pestaña Visibility a la derecha. Allí se deshabilitan las casillas Points, Point labels, Curves y Curves labels, con el fin de ocultar los puntos y las líneas. A continuación se selecciona la opción Mesh a la izquierda de la ventana y la pestaña Visibility a la

derecha. Allí se habilitan las casillas de verificación **Nodes**, **Node labels**, **1D elements** y **1D element labels**, con el fin de mostrar los nudos y los elementos de la armadura.

GMSH permite exportar un archivo plano que contiene la malla de elementos finitos tipo barra que conforman la armadura. El procedimiento para esto es el siguiente: se selecciona **File > Export** del menú superior, se escribe el nombre del archivo con extensión **.msh**, se ubica en la carpeta **\PARTRI\DATOS**, se oprime la tecla **Save**, después se escoge **Version 2 ASCII** en la casilla desplegable **format** de la ventana **MSH Options**, y se finaliza con el botón **ok**.

3.4 Ejecución del subprograma de análisis PARBID

Inicialmente se abre el programa GNU–Octave, se establece **\PARTRI** como la carpeta de trabajo y se activa la pestaña **Ventana de comandos**. Desde allí se ejecuta el subprograma de análisis de una armadura bidimensional, escribiendo una línea de comando con la siguiente sintaxis:

```
PAERCA narch oplec
```

El parámetro *narch* corresponde al nombre del archivo de datos de entrada, excluyendo su extensión **.msh**, el cual fue generado por GMSH y está ubicado en la subcarpeta **\PARTRI\DATOS**. Tal archivo contiene la geometría, las propiedades mecánicas, las condiciones de apoyo y las acciones externas de nudos y elementos de la estructura. El parámetro *oplec* es el código que identifica la opción de lectura de datos y escritura de resultados, mostrada en la tabla 3.1.

Para el ejemplo, se lee el archivo de datos **kassimali01.msh**, se analiza la armadura y se escriben los resultados en los archivos **kassimali01.pos** y **kassimali01.pos.opt**, mediante la ejecución de la siguiente línea de comando:

```
PAERCA kassimali01 10
```

<i>oplec</i>	tipo de lectura de datos	tipo de escritura de resultados
0	en el archivo .m directamente	en la ventana de comandos
1	en el archivo .m directamente	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
9	en el archivo .m directamente	en el archivo .tex que contiene la geometría del pórtico para LATEX
10	en el archivo .msh de GMSH	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
11	en el archivo .msh de GMSH	en la ventana de comandos y en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
19	en el archivo .msh de GMSH	en el archivo .tex que contiene la geometría del pórtico para LATEX
20	en el archivo .geo de GMSH y creación automática de malla en archivo .msh	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH

Tabla 3.1. Opciones de lectura y escritura en la ejecución del subprograma de análisis de armaduras tridimensionales PARTRI

3.5 Presentación de los resultados en GMSH

Los resultados obtenidos del análisis se pueden visualizar en el programa GMSH de la siguiente manera: se selecciona File >Open del menú superior, se escoge el archivo de extensión .pos con los resultados y se finaliza con el botón Open.

En el árbol >Post-processing menú lateral se puede escoger una o varias de las siguientes vistas de resultados:

- La vista [0] Desplaz nod muestra la norma del vector desplazamiento sobre las barras y la configuración deformada de la armadura.
- La vista [1] Fuerzas nod muestra mediante flechas los vectores de fuerza en los nudos de la armadura.
- La vista [2] Deformación muestra el valor de la deformación longitudinal en el interior de cada barra.

- La vista [3] **Esfuerzo** muestra el valor del esfuerzo normal en el interior de cada barra.
- La vista [4] **Fuerza axial** muestra el valor de la fuerza axial en el interior de cada barra.

Particularmente en barras sometidas a fuerza axial definidas como elementos unidimensionales lineales, la deformación, el esfuerzo y la fuerza axial exhibe un valor constante en su longitud. Por tal razón, en las respectivas vistas se muestra un solo color de cada barra.

La figura 3.4 ilustra el entorno gráfico de postproceso de GMSH, cuyo menú lateral indica las vistas de resultados. Específicamente se presenta la vista [0] **Desplaz nod** de la armadura del ejemplo, la cual muestra la configuración deformada y la norma del desplazamiento en pulgadas. Asimismo, la fuerza axial en cada barra se representa de forma gráfica con la vista [4] **Fuerza axial** en el entorno de GMSH, como se ilustra en la figura 3.5.

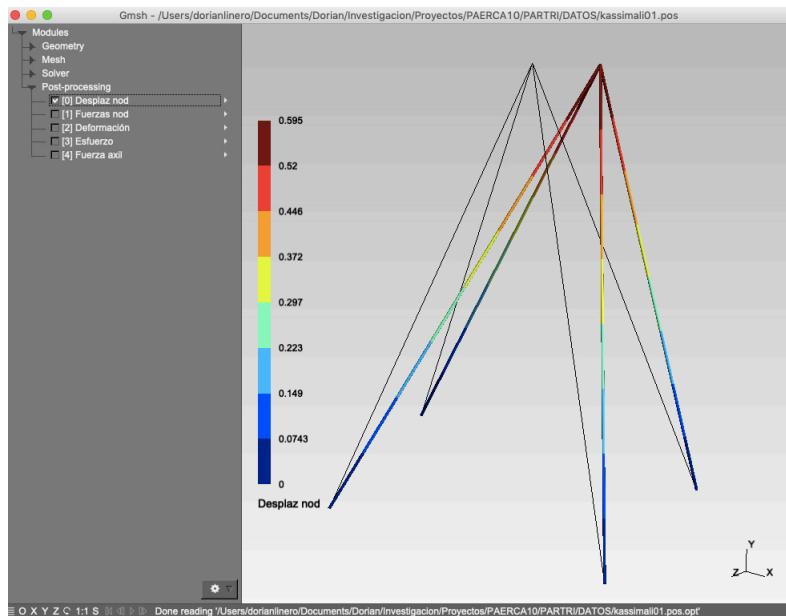


Figura 3.4. Ejemplo de análisis de una armadura tridimensional: configuración deformada y norma del desplazamiento en in presentada en el entorno gráfico de postproceso de GMSH.

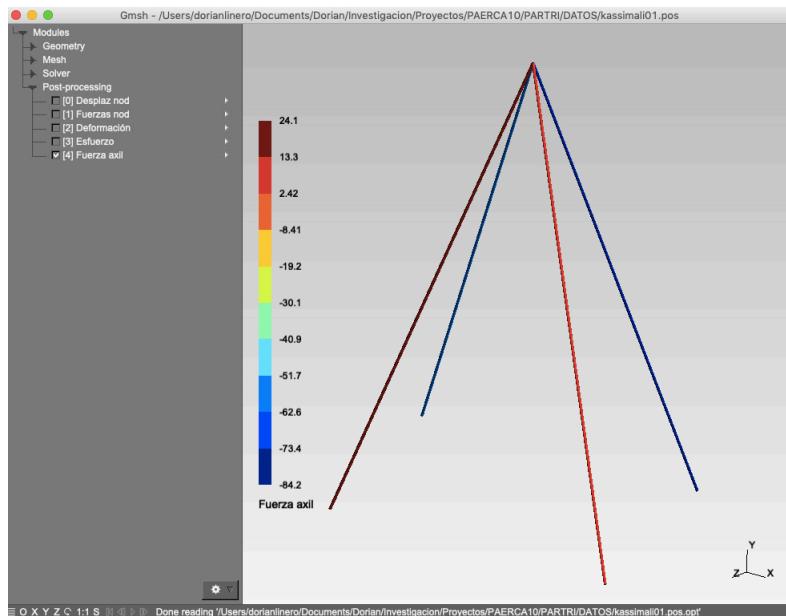


Figura 3.5. Ejemplo de análisis de una armadura tridimensional: fuerza axial de cada barra en k , presentada en el entorno gráfico de postproceso de GMSH.

Capítulo 4

Análisis de un pórtico tridimensional utilizando el subprograma PORTRI

PAERCA 1.0 tiene un subprograma de análisis lineal de pórticos en el espacio xyz , el cual está contenido en la carpeta PORTRI. A continuación se presenta tal procedimiento de análisis, indicando algunas instrucciones para un ejemplo en particular.

Un pórtico espacial de concreto conformado por dos vigas y una columna, está empotrado en tres de sus nudos y soporta una carga puntual de 90 kN y dos cargas distribuidas uniformes de 34 kN/m y 42 kN/m aplicada sobre las vigas, como se ilustra en la figura 4.1. El concreto del pórtico tiene un módulo de elasticidad $E = 20 \times 10^6$ kN/m² y una relación de Poisson $\nu = 0.3$. Los elementos estructurales tienen sección transversal rectangular, cuyas dimensiones y propiedades geométricas en las direcciones locales \bar{y} y \bar{z} se indican en la misma figura y en la tabla 4.1.

elem.	nudo i	nudo j	$d_{\bar{z}}$ (m)	$d_{\bar{y}}$ (m)	A (m ²)	$I_{\bar{y}} (\times 10^{-3} \text{ m}^4)$	$I_{\bar{z}} (\times 10^{-3} \text{ m}^4)$	$J (\times 10^{-3} \text{ m}^4)$
1	1	2	0.30	0.40	0.120	0.9000	1.6000	1.9439
2	4	1	0.30	0.50	0.150	1.1250	3.1250	2.8174
3	3	1	0.30	0.45	0.135	1.0125	2.2781	2.3770

Tabla 4.1. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: características geométricas de la sección transversal de los elementos, correspondientes a las dimensiones d_y y d_z en las direcciones \bar{y} y \bar{z} , al área A , los momentos de inercia con respecto a los ejes locales centroidales $I_{\bar{y}}$ y $I_{\bar{z}}$, y la constante torsional J .

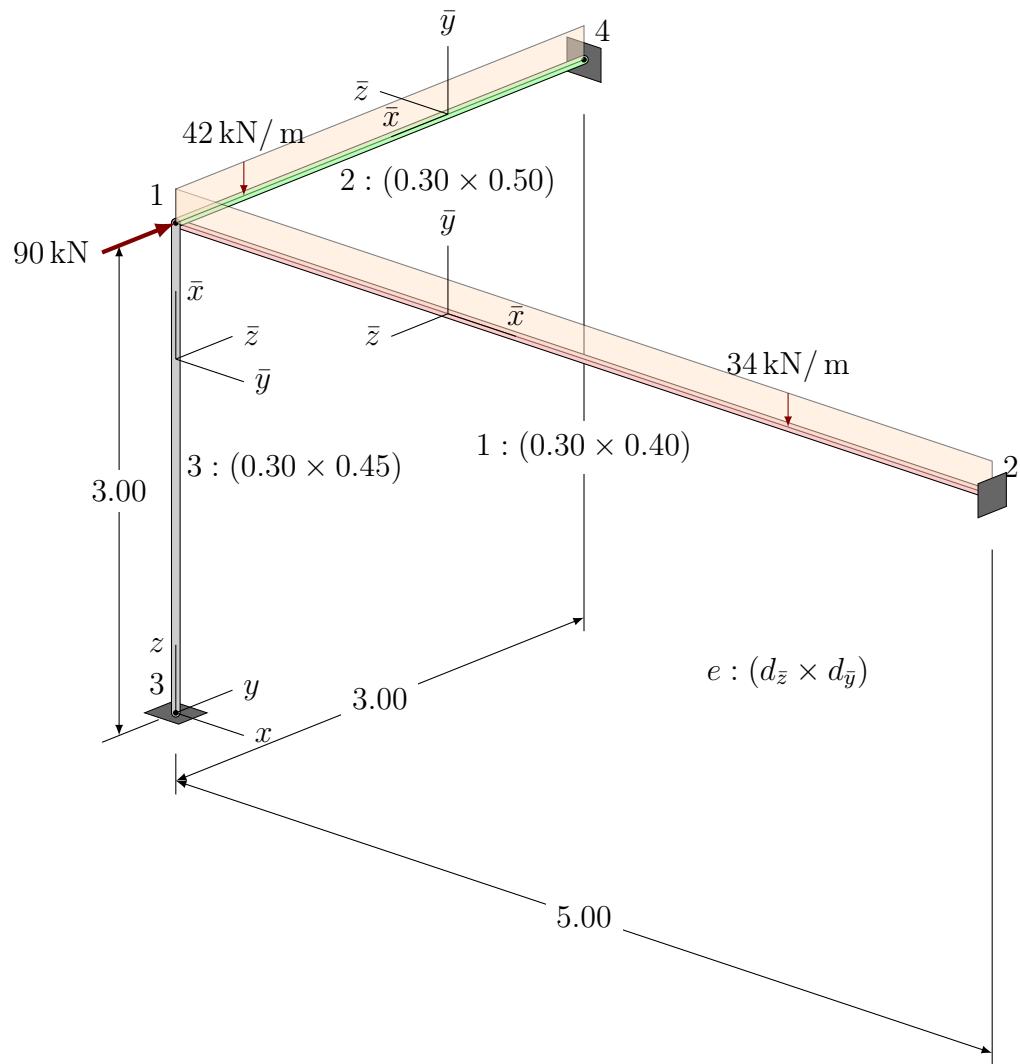


Figura 4.1. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: geometría, ejes locales, numeración de nudos y elementos, cargas aplicadas y condiciones de borde. Las medidas están dadas en metros.

4.1 Creación de entidades geométricas del pórtico en GMSH

El programa GMSH es capaz de crear varios elementos tipo barra en el interior de una línea de acuerdo con el valor del parámetro de tamaño de elemento finito. Particularmente, para esta aplicación se desea que cada línea construida de forma gráfica represente un solo elemento tipo barra. Para alcanzar esto, se debe especificar el parámetro de tamaño de elemento finito a un valor mayor que la máxima longitud de una barra de la armadura o un tramo de viga o columna del pórtico.

En el entorno de GMSH se construye la geometría del pórtico a partir de entidades geométricas como puntos y líneas, de la siguiente forma:

- Se crea un archivo nuevo de extensión `.geo` y se activa el núcleo gráfico `Built-in`, dado que este último cuenta con una instrucción que duplica y traslada adecuadamente las entidades geométricas.
- Se hace clic en `Modules > Geometry > Elementary entities > Add > Parameter` en el menú lateral, esto activa la pestaña `Parameter` en la ventana `Elementary entities context`. Allí se escribe el nombre del parámetro de tamaño de elemento finito `1c` en la casilla `Name` y su valor en la casilla `Value`. El valor de este parámetro debe ser mayor a la longitud de cualquier barra de la armadura, por ejemplo 100 para una estructura definida en metros. Se termina este procedimiento haciendo clic en `Add` y cerrando la ventana `Elementary entities context`.
- Se selecciona `Tool > Options` del menú superior, esto activa la ventana `Options` donde se escoge la opción `Geometry` a la izquierda y la pestaña `Visibility` a la derecha. Allí se verifican las casillas `Points`, `Point labels`, `Curves` y `Curves labels`, con el fin de indicar los puntos y las líneas que serán creadas a continuación.
- Se hace clic en `Modules > Geometry > Elementary entities > Add > Point` del menú lateral, esto activa la pestaña `Point` en la ventana `Elementary entities context`. Allí se escriben las coordenadas del primer punto del pórtico en las casillas `x`, `y` y `z`. Asimismo, se escribe el parámetro `1c` en la casilla que define la dimensión de la malla alrededor del punto `Prescribed mesh size at point`. Se termina el proceso

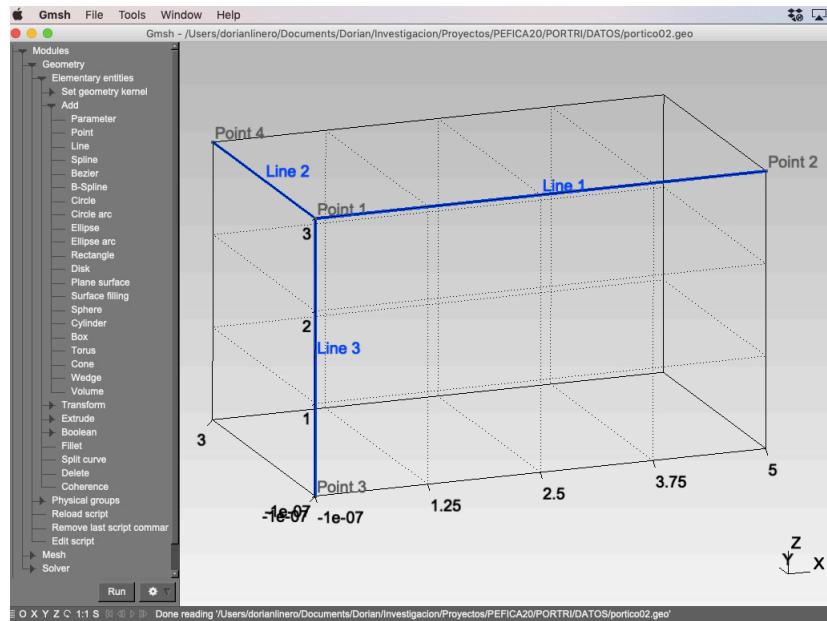


Figura 4.2. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: puntos y líneas definidas en el entorno gráfico de GMSH.

haciendo clic en el botón **Add**. Los siguientes puntos se adicionan mediante el mismo procedimiento y se termina cerrando la ventana **Elementary entities context** y se oprime la tecla **q**. En el proceso de la construcción de la malla se generará un nudo en cada uno de los puntos.

- Se selecciona **Modules** \triangleright **Geometry** \triangleright **Elementary entities** \triangleright **Add** \triangleright **Line** en el menú lateral. A continuación se hace clic sobre los puntos inicial y final que definen una línea. Sucesivamente, se hace clic sobre los puntos de las siguientes líneas. Para terminar este proceso se presiona la tecla **q**.

La figura 4.2 ilustra las entidades geométricas creadas en el entorno gráfico de GMSH para el ejemplo indicado en la figura 4.1. Allí la cuadrícula permite identificar la ubicación de los puntos en las direcciones *x*, *y* y *z*.

El archivo de extensión **.geo** se actualiza cada vez que se realiza una de las acciones indicadas anteriormente en el entorno gráfico. Para el ejemplo ilustrado en la

figura 4.1, las líneas de comando 1000 a 1008 del Listado 4.1 indican las instrucciones en el archivo .geo, correspondientes a la construcción de puntos y líneas.

```

1000 SetFactory("Build-in");
1002 lc = DefineNumber[ 100, Name "Parameters/lc" ];
1002 Point(1) = {0,0, 3.00, lc};
1004 Point(2) = {5.00,0, 3.00, lc};
1004 Point(3) = {0,0,0, lc};
1006 Point(4) = {0, 3.00, 3.00, lc};
1006 Line(1) = {1, 2};
1008 Line(2) = {4, 1};
1008 Line(3) = {3, 1};
Physical Point("DISP UX=0 UY=0 UZ=0 RX=0 RY=0 RZ=0") = {2, 3, 4};
1010 Physical Point("LOAD FY=90") = {1};
Physical Curve("CATE EYOU=22E6 POIS=0.30 RECZ=0.30 RECY=0.40 WYLO=-34") = {1};
1012 Physical Curve("CATE EYOU=22E6 POIS=0.30 RECZ=0.30 RECY=0.50 WYLO=-42") = {2};
Physical Curve("CATE EYOU=22E6 POIS=0.30 RECZ=0.30 RECY=0.45") = {3};

```

Listado 4.1. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: líneas de comando de creación de entidades geométricas y físicas en el archivo .geo. Se han sustraído del archivo las líneas de comentarios indicadas como //.

4.2 Creación de entidades físicas del pórtico en GMSH

Las entidades físicas de GMSH permiten establecer: los desplazamientos y rotaciones conocidas, las cargas y momentos puntuales, las cargas distribuidas en los elementos, las propiedades mecánicas del material y las características geométricas de la sección transversal de los elementos.

Para establecer los desplazamientos y rotaciones conocidos sobre los puntos se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona Modules \triangleright Geometry \triangleright Physical groups \triangleright Add \triangleright Point del menú lateral, esto activa la ventana Physical group context.
- En la casilla Name de esta ventana se escribe la condición de apoyo de acuerdo con la siguiente sintaxis:

DISP UX= ux UY= uy UZ= uz RX= rx RY= ry RZ= rz

donde ux , uy y uz son los valores del desplazamiento en las direcciones globales x , y y z en la unidad de longitud utilizada en la geometría. Asimismo, rx , ry y rz son los valores de la rotación alrededor de las direcciones globales x , y y z , medidos en radianes. Algunos ejemplos son:

- Para definir un apoyo articulado se debe escribir `DISP UX=0 UY=0 UZ=0`.
- Para establecer un empotramiento el nombre de la entidad física debe ser `DISP UX=0 UY=0 UZ=0 RX=0 RY=0 RZ=0`.
- Para aplicar un asentamiento de 0.001 m en la dirección z sobre un apoyo articulado se escribe `DISP UX=0 UY=0 UZ=-0.001`.
- Se hace clic sobre el o los puntos a los cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla **e**.

Para establecer las cargas aplicadas sobre los puntos se realiza el siguiente procedimiento:

- Se selecciona **Modules >Geometry >Physical groups >Add >Point** del menú lateral, esto activa la ventana **Physical group context**.
- En la casilla **Name** de esta ventana se escribe la carga aplicada de acuerdo con la siguiente sintaxis:

$$\text{LOAD FX}=\mathit{fx} \quad \text{FY}=\mathit{fy} \quad \text{FZ}=\mathit{fz} \quad \text{MX}=\mathit{mx} \quad \text{MY}=\mathit{my} \quad \text{MZ}=\mathit{mz}$$

donde fx , fy y fz son los valores de la fuerza en las direcciones globales x , y y z en la unidad de fuerza utilizada. Asimismo, mx , my y mz son los valores de momentos alrededor de las direcciones globales x , y y z , medidos en la unidad de fuerza por longitud utilizada. Por ejemplo, para aplicar una carga puntual de 90 kN en dirección x y un momento alrededor del eje y de $-130 \text{ kN} \cdot \text{m}$ se debe escribir `LOAD FX=90 MY=-130`.

- Se hace clic sobre el o los puntos a los cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla **e**.

Las propiedades mecánicas de los materiales, las características geométricas de la sección transversal de las barras del pórtico y las cargas distribuidas en su longitud, se definen mediante entidades físicas de GMSH sobre líneas, de la siguiente forma:

- Se selecciona **Modules** \triangleright **Geometry** \triangleright **Physical groups** \triangleright **Add** \triangleright **Curve** del menú lateral, esto activa la ventana **Physical group context**.
- En la casilla **Name** de esta ventana se escriben las propiedades de las barras de sección transversal general, de acuerdo con la siguientes sintaxis:

```
CATE EYOU=eyou  POIS=pois  AREA=area  INEY=iney  INEZ=inez  JTOR=jtor
      ALSH=alsh  WYLO=wylo  WZLO=wzlo  VELX=velx  VELY=vely  VELZ=velz
```

Cada uno de los parámetros incluidos en el nombre de la entidad física están descritos en la tabla 4.2.

- Los parámetros *velx*, *vely* y *velz* corresponden a las componentes del vector auxiliar $\mathbf{v} = (velx)\mathbf{i} + (vely)\mathbf{j} + (velz)\mathbf{k}$ que define el plano local $\bar{x}\bar{y}$. Si estos parámetros se omiten, el programa establece por defecto que el vector auxiliar es $\mathbf{v} = \mathbf{k}$, excepto cuando el eje longitudinal \bar{x} coincide con la dirección global z , en cuyo caso el vector auxiliar es $\mathbf{v} = -\mathbf{i}$.
- Para sección transversal rectangular maciza, se puede simplificar el nombre de la entidad física escrito en la casilla **Name**, de la forma:

```
CATE EYOU=eyou  POIS=pois  RECZ=recz  RECY=recy  WYLO=wylo  WZLO=wzlo
      VELX=velx  VELY=vely  VELZ=velz
```

Los parámetros *recz* y *recy* corresponden a las dimensiones de la sección transversal rectangular $d_{\bar{z}}$ y $d_{\bar{y}}$, dadas en la unidad de longitud y en las direcciones \bar{z} y \bar{y} , respectivamente (figura 4.3(a)). En este caso el subprograma PORTRI calcula internamente el área A de la sección transversal, los momentos de inercia $I_{\bar{y}}$ y $I_{\bar{z}}$ alrededor de los ejes \bar{y} y \bar{z} , el factor de forma que considera las

deformaciones por cortante α_{sh} , de la forma:

$$A = d_{\bar{y}}d_{\bar{z}}, \quad I_{\bar{y}} = \frac{1}{12}d_{\bar{y}}d_{\bar{z}}^3, \quad I_{\bar{z}} = \frac{1}{12}d_{\bar{z}}d_{\bar{y}}^3, \quad \alpha_{sh} = 1.2 \quad (4.1)$$

Siendo d_{\min} y d_{\max} las dimensiones mínima y máxima de la sección transversal rectangular, se calcula la constante torsional J como:

$$J = d_{\max} d_{\min}^3 \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \left[1 - \frac{d_{\min}^4}{12d_{\max}^4} \right] \right] \quad (4.2)$$

- Para sección transversal rectangular tubular de pared delgada, se puede simplificar el nombre de la entidad física escrito en la casilla **Name**, así:

```
CATE EYOU=eyou POIS=pois RECZ=recz RECY=recy RECT=rect WYLO=wyl0
WZLO=wzlo VELX=velx VELY=vely VELZ=velz
```

Los parámetros $recz$ y $recy$ corresponden a las dimensiones medias de la sección transversal rectangular $d_{\bar{z}}$ y $d_{\bar{y}}$, dadas en la unidad de longitud y en las direcciones \bar{z} y \bar{y} , respectivamente (figura 4.3(b)). Asimismo, $rect$ es el espesor de la pared t en unidades de longitud.

- Para sección transversal circular maciza, se puede simplificar el nombre de la entidad física escrito en la casilla **Name**, así:

```
CATE EYOU=eyou POIS=pois CIRD=cird WYLO=wyl0 WZLO=wzlo VELX=velx
VELY=vely VELZ=velz
```

El parámetro $cird$ contiene el diámetro d de la sección transversal en la unidad de longitud utilizada (figura 4.3(d)).

- Para sección transversal circular tubular de pared delgada, se puede simplificar el nombre de la entidad física escrito en la casilla **Name**, así:

```
CATE EYOU=eyou POIS=pois CIRD=cird CIRT=cird WYLO=wyl0 WZLO=wzlo
VELX=velx VELY=vely VELZ=velz
```

Los parámetros *cird* y *cirt* corresponden al diámetro medio *d* y al espesor de la pared *t* de la sección transversal en unidades de longitud (figura 4.3(e)).

- Para sección transversal tipo perfil I, se puede simplificar el nombre de la entidad física escrito en la casilla **Name**, así:

```
CATE EYOU=eyou  POIS=pois  PIBZ=pibz  PIHY=pihy  PITW=pitw  PITF=pitf
      WYLO=wylo  WZLO=wzlo  VELX=velx  VELY=vely  VELZ=velz
```

Allí *pibz* es el ancho de la aleta *b* considerado paralelo al eje local \bar{z} , *pihy* es la altura de la sección *h* considerada paralela al eje local \bar{y} . Asimismo, *pitf* y *pitw* corresponden a los espesores de la aleta *t_f* y del alma *t_w*, respectivamente (figura 4.3(c)). Todas estas dimensiones están dadas en la unidad de longitud utilizada.

- Cuando se introducen los parámetros se secciones transversales particulares, el programa calcula internamente sus propiedades geométricas.
- Se hace clic sobre la o las líneas a las cuales se asocia la entidad física y se finaliza con la tecla **e**.

La figura 4.4 ilustra los nombres de las entidades físicas definidas sobre la geometría, los cuales describen los desplazamientos conocidos y las cargas sobre los puntos, y las características de las barras sobre las líneas.

Para el ejemplo ilustrado en la figura 4.1, las líneas de comando 1009 a 1013 del Listado 4.1 indican las instrucciones en el archivo **.geo**, correspondientes a la construcción de las entidades físicas.

propiedad	tipo	valor	unidades
módulo de Young	propiedades de material	<i>eyou</i>	[F][L] ²
relación de Poisson	propiedades de material	<i>pois</i>	[−]
área	geometría de la sección transversal	<i>area</i>	[L] ²
inerzia respecto al eje local \bar{y}	geometría de la sección transversal	<i>iney</i>	[L] ⁴
inerzia respecto al eje local \bar{z}	geometría de la sección transversal	<i>inez</i>	[L] ⁴
constante torsional	geometría de la sección transversal	<i>jtor</i>	[L] ⁴
factor de forma asociado a deformaciones por cortante	geometría de la sección transversal	<i>alsh</i>	[−]
carga distribuida uniforme en dirección \bar{y} (positiva en el sentido positivo del eje)	carga distribuida	<i>wylo</i>	[F]/[L]
carga distribuida uniforme en dirección \bar{z} (positiva en el sentido positivo del eje)	carga distribuida	<i>wzlo</i>	[F]/[L]
componente en dirección x global del vector auxiliar que define el plano local del elemento $\bar{x}\bar{y}$	vector auxiliar para definir ejes locales	<i>velx</i>	[−]
componente en dirección y global del vector auxiliar que define el plano local del elemento $\bar{x}\bar{y}$	vector auxiliar para definir ejes locales	<i>vely</i>	[−]
componente en dirección z global del vector auxiliar que define el plano local del elemento $\bar{x}\bar{y}$	vector auxiliar para definir ejes locales	<i>velz</i>	[−]

Tabla 4.2. Sintaxis del nombre de las entidades físicas que permiten designar las propiedades mecánicas, geométricas y las cargas distribuidas en las barras.

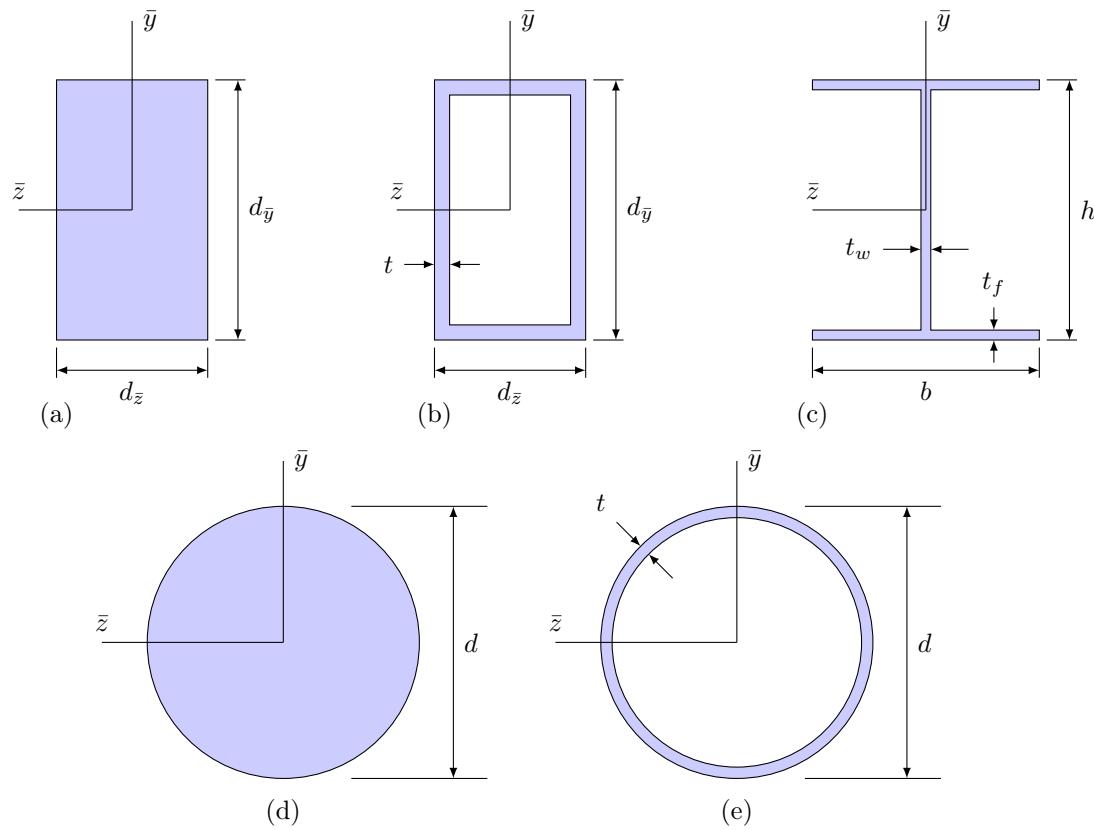


Figura 4.3. Secciones transversales particulares incluidas en el subprograma PORTRI: (a) rectangular maciza, (b) rectangular tubular, (c) I, (d) circular maciza, y (e) circular tubular

4.3 Generación de la malla de elementos tipo pórtico

Los elementos tipo barra y los respectivos nudos se construyen mediante un proceso de generación de una malla de elementos finitos donde se produce un nudo y una línea en cada punto y línea de la geometría, respectivamente. Esto se logra seleccionando **Modules > Mesh > 1D** del menú lateral o oprimiendo la tecla 1.

Para observar la malla generada, se selecciona **Tool > Options** del menú superior, esto activa la ventana **Options** donde se escoge la opción **Geometry** a la izquierda y la pestaña **Visibility** a la derecha. Allí se deshabilitan las casillas **Points**, **Point labels**, **Curves** y **Curves labels**, con el fin de ocultar los puntos y las líneas. A continuación se selecciona la opción **Mesh** a la izquierda de la ventana y la pestaña **Visibility** a la

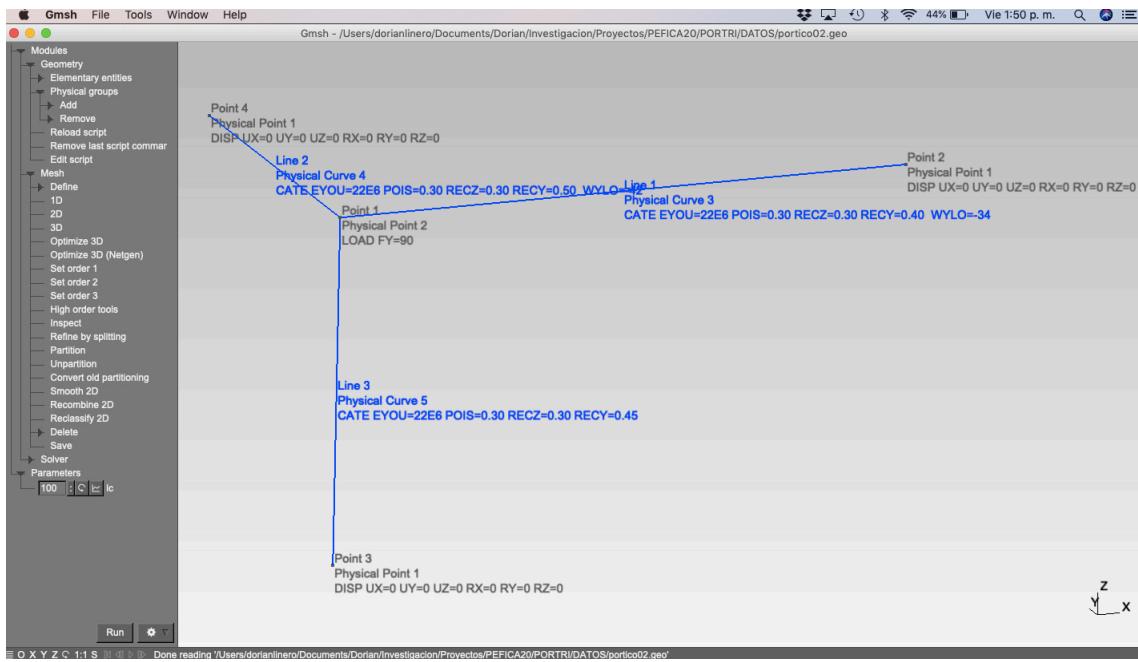


Figura 4.4. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: entidades físicas definidas en el entorno gráfico de GMSH, las cuales identifican las condiciones de borde, las cargas y las propiedades de las barras.

derecha. Allí se habilitan las casillas de verificación Nodes, Node labels, 1D elements y 1D element labels, con el fin de mostrar los nudos y los elementos de la armadura.

GMSH permite exportar un archivo plano que contiene la malla de elementos finitos tipo barra que conforman el pórtico. El procedimiento para esto es el siguiente: se selecciona File > Export del menú superior, se escribe el nombre del archivo con extensión .msh, se ubica en la carpeta \PORTRI\DATOS, se oprime la tecla Save, después se escoge Version 2 ASCII en la casilla desplegable format de la ventana MSH Options, y se finaliza con el botón ok.

<i>oplec</i>	tipo de lectura de datos	tipo de escritura de resultados
10	en el archivo .msh de GMSH	en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
11	en el archivo .msh de GMSH	en la ventana de comandos y en los archivos .pos y .pos.opt de GMSH
19	en el archivo .msh de GMSH	en el archivo .tex que contiene la geometría del pórtico para LATEX

Tabla 4.3. Opciones de lectura y escritura en la ejecución del subprograma de análisis de pórticos tridimensionales PORTRI

4.4 Ejecución del subprograma de análisis PORTRI

Inicialmente se abre el programa GNU–Octave, se establece \PORTRI como la carpeta de trabajo y se activa la pestaña **Ventana de comandos**. Desde allí se ejecuta el subprograma de análisis de pórticos tridimensionales, escribiendo una línea de comando con la siguiente sintaxis:

PAERCA *narch oplec*

El parámetro *narch* corresponde al nombre del archivo de datos de entrada, excluyendo su extensión .msh, el cual fue generado por GMSH y está ubicado en la subcarpeta \PORTRI\DATOS. Tal archivo contiene la geometría, las propiedades mecánicas, las condiciones de apoyo y las acciones externas de nudos y elementos de la estructura. El parámetro *oplec* es el código que identifica la opción de lectura de datos y escritura de resultados, mostrada en la tabla 4.3.

Para el ejemplo, se lee el archivo de datos portico02.msh, se analiza el pórtico y se escriben los resultados en los archivos portico02.pos y portico02.pos.opt, mediante la ejecución de la siguiente línea de comando:

PAERCA portico02 10

4.5 Definición de los ejes locales de elementos de pórtico espacial en el subprograma PORTRI

Los ejes locales de cada barra se definen por el subprograma PORTRI, a partir de las coordenadas de sus nudos y el vector auxiliar \mathbf{v} que define el plano local $\bar{x}\bar{y}$. El procedimiento realizado en el programa es el siguiente:

- Se calcula la longitud de la barra a partir de las coordenadas de su nudo inicial (x_r, y_r, z_r) y de su nudo final (x_s, y_s, z_s) , así:

$$L = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2} \quad (4.3)$$

- Se calcula el vector unitario en la dirección longitudinal de la barra $\bar{\mathbf{i}}$, entre sus nudos inicial y final.

$$\bar{\mathbf{i}} = \frac{(x_s - x_r)}{L} \mathbf{i} + \frac{(y_s - y_r)}{L} \mathbf{j} + \frac{(z_s - z_r)}{L} \mathbf{k} \quad (4.4)$$

- Se define un vector \mathbf{v} a partir del cual se puede obtener la dirección local \bar{z} la barra. Se calcula el vector unitario direccional del elemento $\bar{\mathbf{k}}$ en la dirección \bar{z} así:

$$\bar{\mathbf{k}}^* = \bar{\mathbf{i}} \times \mathbf{v} \quad \bar{\mathbf{k}} = \frac{\bar{\mathbf{k}}^*}{\|\bar{\mathbf{k}}^*\|} \quad (4.5)$$

- Por defecto se establece que \mathbf{v} es el vector unitario en dirección z global positivo, es decir $\mathbf{v} = \mathbf{k}$. De esta forma, en todas las vigas el momento flector alrededor del eje local \bar{z} será aquel producido por las cargas en la orientación de la gravedad. Esta última se establece como la dirección del semi-eje $-z$.
- Si el vector $\bar{\mathbf{k}} = \mathbf{0}$, se define un nuevo vector \mathbf{v} unitario \mathbf{i} en la dirección positiva del eje x global. Se determina el vector unitario direccional del elemento $\bar{\mathbf{k}}$ en la dirección \bar{z} , como:

$$\bar{\mathbf{k}}^* = \bar{\mathbf{i}} \times \mathbf{i} \quad \bar{\mathbf{k}} = \frac{\bar{\mathbf{k}}^*}{\|\bar{\mathbf{k}}^*\|} \quad (4.6)$$

- Se define el vector unitario en la dirección local \bar{y} del elemento en términos de los vectores unitarios ortogonales \bar{k} y \bar{i} , así:

$$\bar{j} = \bar{k} \times \bar{i} \quad (4.7)$$

4.6 Cálculo de desplazamientos y acciones internas en elementos de pórtico espacial utilizando el subprograma PORTRI

El análisis matricial del pórtico permite obtener los desplazamientos y rotaciones en los nudos u_i , v_i y w_i en sistema coordenado global; como también las fuerzas y los momentos con respecto al sistema coordenado local en el extremo inicial del elemento $f_{\bar{x}i}$, $f_{\bar{y}i}$, $f_{\bar{z}i}$, $m_{\bar{x}i}$, $m_{\bar{y}i}$ y $m_{\bar{z}i}$, y en el extremo final del elemento $f_{\bar{x}j}$, $f_{\bar{y}j}$, $f_{\bar{z}j}$, $m_{\bar{x}j}$, $m_{\bar{y}j}$ y $m_{\bar{z}j}$.

A partir de los resultados anteriores, se calculan las componentes de desplazamiento en sistema coordenado local $\bar{u}(\bar{x}_l)$, $\bar{v}(\bar{x}_l)$ y $\bar{w}(\bar{x}_l)$, la fuerza axial $N(\bar{x}_l)$, el momento torsor $T(\bar{x}_l)$, las fuerzas cortantes $V_{\bar{y}}(\bar{x}_l)$ y $V_{\bar{z}}(\bar{x}_l)$, y los momentos flectores $M_{\bar{y}}(\bar{x}_l)$ y $M_{\bar{z}}(\bar{x}_l)$ en las direcciones \bar{y} y \bar{z} , en posiciones \bar{x}_l en el interior de cada elemento.

El subprograma PORTRI divide cada barra de pórtico en n_t sub-elementos conectados por $n_t + 1$ sub-nudos, con el fin de presentar de forma gráfica desplazamientos y acciones internas a lo largo de cada elemento. En consecuencia, el archivo de resultados generado por el programa corresponde a una malla de $n_e \cdot n_t$ sub-elementos y $n_n + n_e \cdot (n_t - 1)$ sub-nudos, siendo n_e y n_n la cantidad de barras y de nudos del pórtico.

4.7 Presentación de los resultados en GMSH

Los resultados obtenidos del análisis se pueden visualizar en el programa GMSH de la siguiente manera: se selecciona **File >Open** del menú superior, se escoge el archivo de extensión **.pos** con los resultados y se finaliza con el botón **Open**.

En el árbol **>Post-processing** menú lateral se puede escoger una o varias de las siguientes vistas de resultados:

- La vista [0] Desplaz nod muestra la norma del vector desplazamiento sobre las barras y la configuración deformada del pórtico.
- La vista [1] Eje local x muestra mediante una flecha roja, el vector unitario de la dirección \bar{x} del eje local longitudinal de cada elemento.
- La vista [2] Eje local y muestra mediante una flecha verde, el vector unitario de la dirección \bar{y} de uno de los ejes locales transversales en cada elemento.
- La vista [3] Eje local z muestra mediante una flecha azul, el vector unitario de la dirección \bar{z} del otro eje local transversal en cada elemento.
- La vista [4] Axial en x-local muestra en escala de colores, el valor de la fuerza axial en el interior de cada barra.
- La vista [5] Cortante en y-local muestra en escala de colores, el valor de la fuerza cortante en la dirección \bar{y} en el interior de cada barra.
- La vista [6] Cortante en z-local muestra en escala de colores, el valor de la fuerza cortante en la dirección \bar{z} en el interior de cada barra.
- La vista [7] Torsión en x-local muestra en escala de colores, el valor del momento torsor en el interior de cada barra.
- La vista [8] Momento en y-local muestra en escala de colores, el valor del momento flector en la dirección \bar{y} en el interior de cada barra.
- La vista [9] Momento en z-local muestra en escala de colores, el valor del momento flector en la dirección \bar{z} en el interior de cada barra.
- La vista [10] Fuerzas en nudos muestra mediante flechas, el vector resultante de la fuerza en cada nudo.
- La vista [11] Momentos en nudos muestra mediante pirámides, el vector resultante del momento en cada nudo.

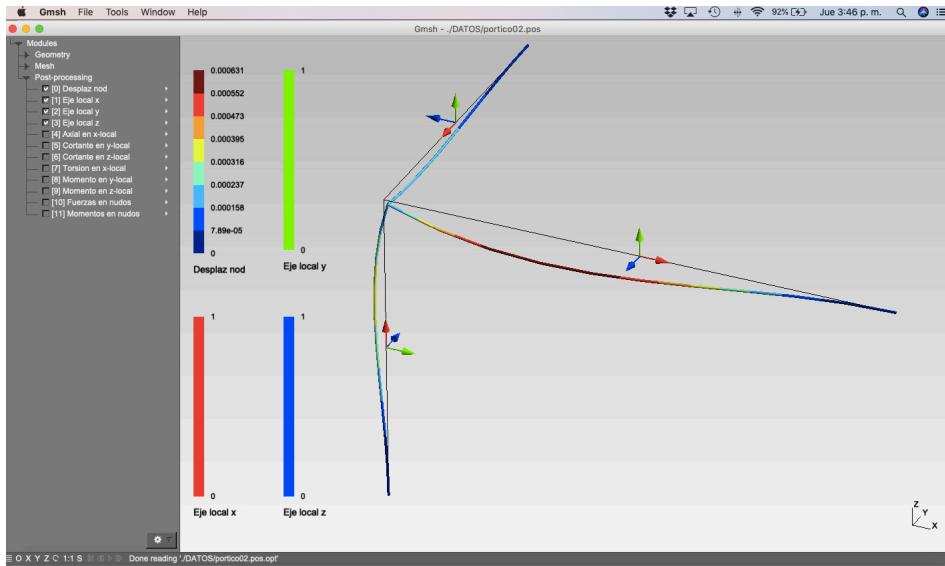


Figura 4.5. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: configuración deformada, norma del desplazamiento en m y direcciones de los ejes locales, presentada en el entorno gráfico de postproceso de GMSH.

La figura 4.5 ilustra el entorno gráfico de postproceso de GMSH, cuyo menú lateral indica las vistas de resultados. Específicamente se presenta simultáneamente las vistas [0] Desplaz nod, [1] Eje local x, [1] Eje local y y [1] Eje local z del pórtico del ejemplo. Allí se observa la configuración deformada, la norma del desplazamiento en metros y la dirección de los ejes locales de cada barra. Asimismo, la figura 4.6(a) presenta el momento flector en dirección \bar{z} de cada barra en escala de colores.

Para presentar los valores de una acción interna en los puntos internos de cada barra se selecciona Tools > Options del menú superior, después se hace clic sobre la vista correspondiente y se selecciona la pestaña General. Allí se hace clic en la caja desplegable Intervals type, se escoge Numerical Values. Para mostrar la malla de sub-elementos y sub-nudos, en la misma ventana de opciones se selecciona Mesh y la pestaña Visibility. Finalmente se marcan las cajas de verificación de Nodes y 1D elements. Por ejemplo, la figura 4.6(b) ilustra el momento flector en dirección \bar{z} dada en $\text{kN} \cdot \text{m}$ en los sub-nudos de cada barra.

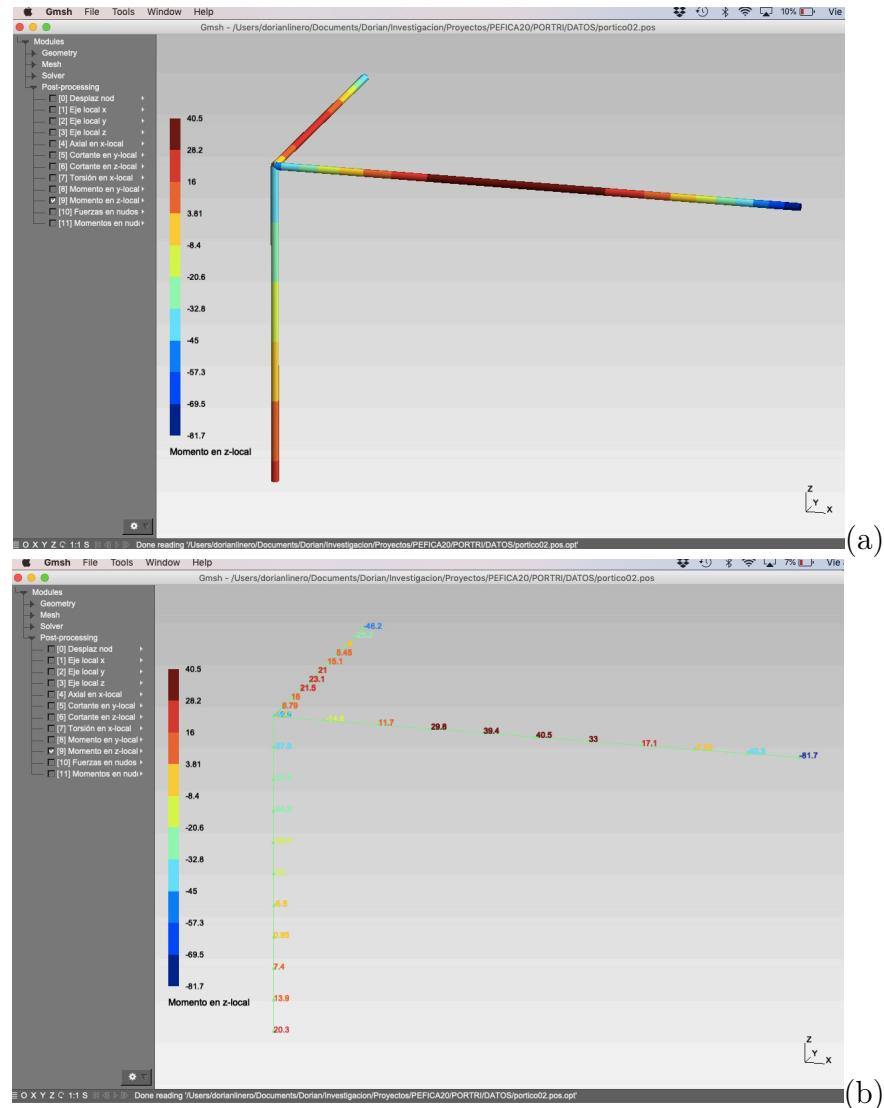


Figura 4.6. Ejemplo de análisis de un pórtico espacial: momento flector en dirección \bar{z} dada en $\text{kN} \cdot \text{m}$, presentada en GMSH como: (a) mapa de colores y (b) valores numéricos.

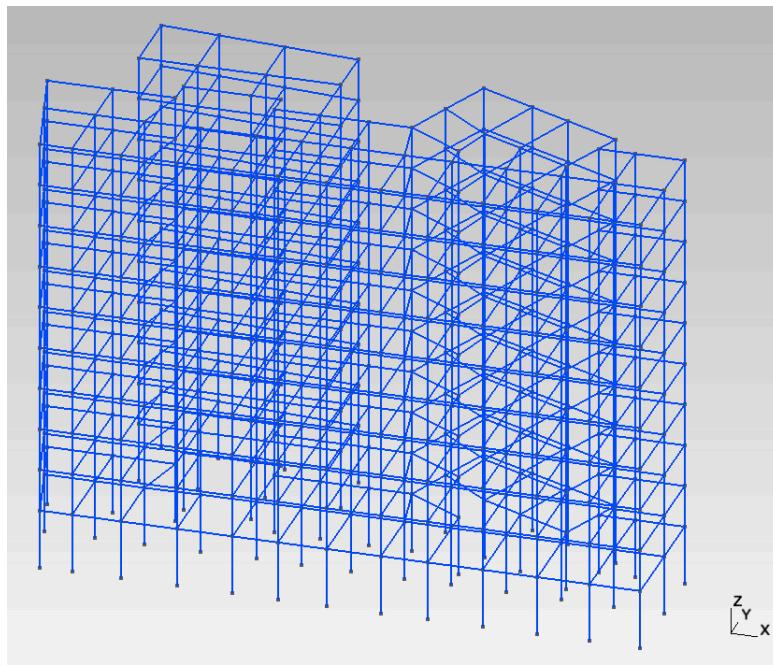


Figura 4.7. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: elementos y nudos presentados en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

4.8 Estrategia para copiar y trasladar entidades geométricas en GMSH

Para pórticos con muchas entidades geométricas como el de una estructura real, es útil crear las entidades físicas de una parte y después replicarla.

El ejemplo usado para explicar la estrategia para copiar y trasladar entidades físicas es un pórtico tridimensional con 1 419 elementos y 615 nudos, que representa la estructura de un edificio de diez pisos y doce luces ubicado en Italia (**Scalvenzi2021**). La estructura está sometida a carga distribuida uniformemente en la dirección de la gravedad $-z$, aplicada sobre las vigas de acuerdo a su área aferente. Las figuras 4.7 y 4.8 ilustra los elementos y los nudos de la estructura en el entorno de preproceso de GMSH, en una vista isométrica y en planta, respectivamente.

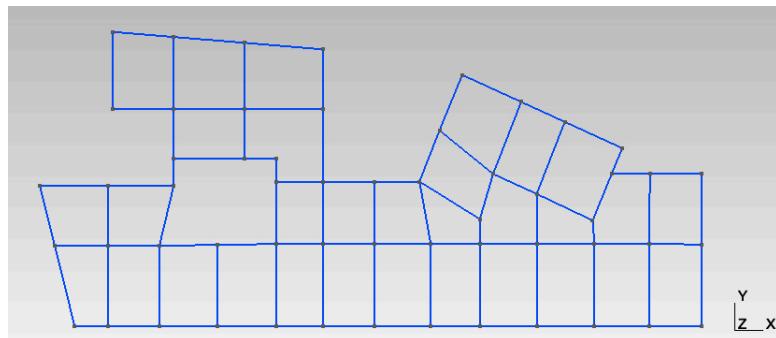


Figura 4.8. Vista en planta del pórtico tridimensional de un edificio real: elementos y nudos presentados en el entorno gráfico de preprocesso de GMSH.

El programa GMSH permite copiar y trasladar un conjunto de puntos y líneas existentes. Después de crear los puntos del nivel $z = 0$ del pórtico del ejemplo (figura 4.9), se pueden generar los puntos del primer piso, es decir en $z = 4.2$ m, mediante la copia y translación de los puntos en $z = 0$, así:

- Se selecciona **Modules** \triangleright **Geometry** \triangleright **Elementary entities** \triangleright **Set geometry kernel** \triangleright **Built-in**
- Se activa la vista en planta del pórtico haciendo clic en el botón Z del extremo inferior izquierdo del entorno gráfico.
- Se escoge **Modules** \triangleright **Geometry** \triangleright **Elementary entities** \triangleright **Transform** \triangleright **Translate** del menú lateral, lo cual activa la pestaña **Translate**. Allí se escribe 4.2 en la casilla **DZ** y se hace clic en la caja de verificación **Apply translation on copy**.
- Se seleccionan los puntos en $z = 0$, encerrándolos en un rectángulo, después de oprimir simultáneamente la tecla **ctrl** y hacer clic izquierdo de ratón como se ilustra en la figura 4.10. Se confirma la instrucción oprimiendo la tecla **e** y se finaliza con la tecla **q**.
- Se cambia a una vista isométrica con el ratón y se observa que se han creado nuevos puntos con coordenada $z = 4.2$ m, en la misma ubicación x, y de los puntos iniciales en $z = 0$, como lo ilustra la figura 4.11.

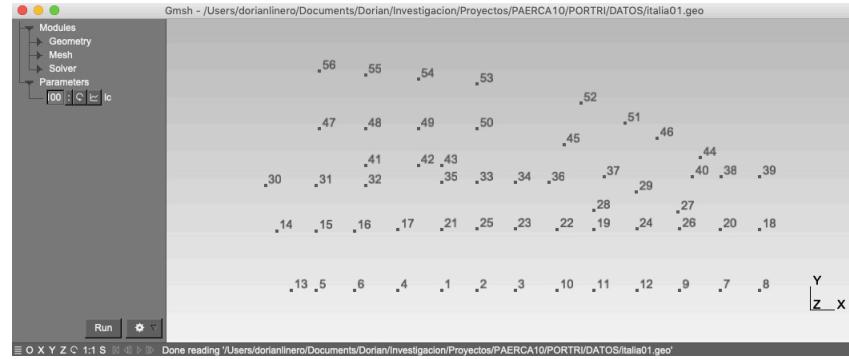


Figura 4.9. Vista en planta del pórtico tridimensional de un edificio real: puntos del nivel $z = 0$ en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

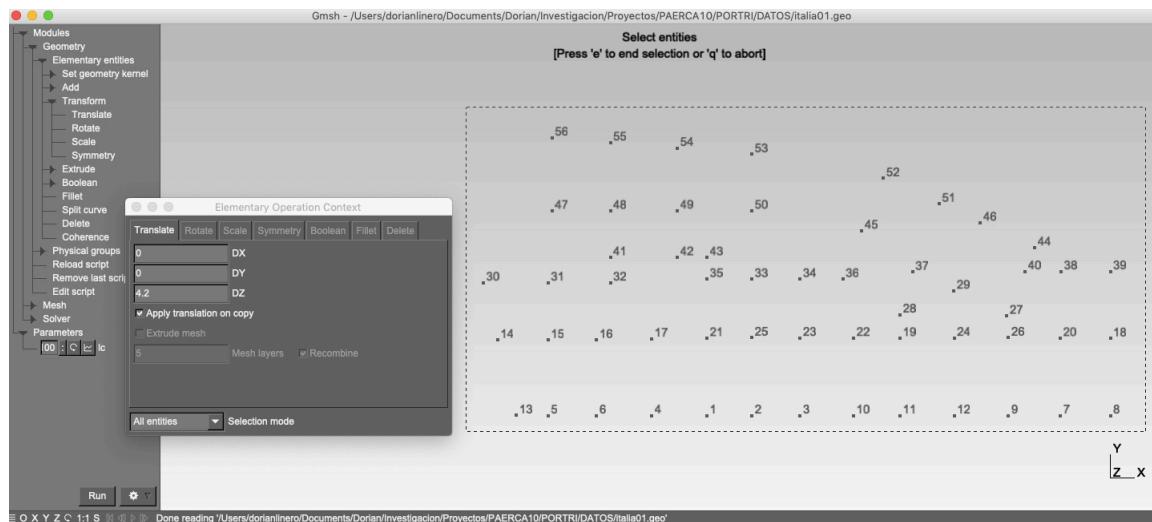


Figura 4.10. Vista en planta del pórtico tridimensional de un edificio real: selección de los puntos del nivel $z = 0$, cuando se utiliza la instrucción **Translate** en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

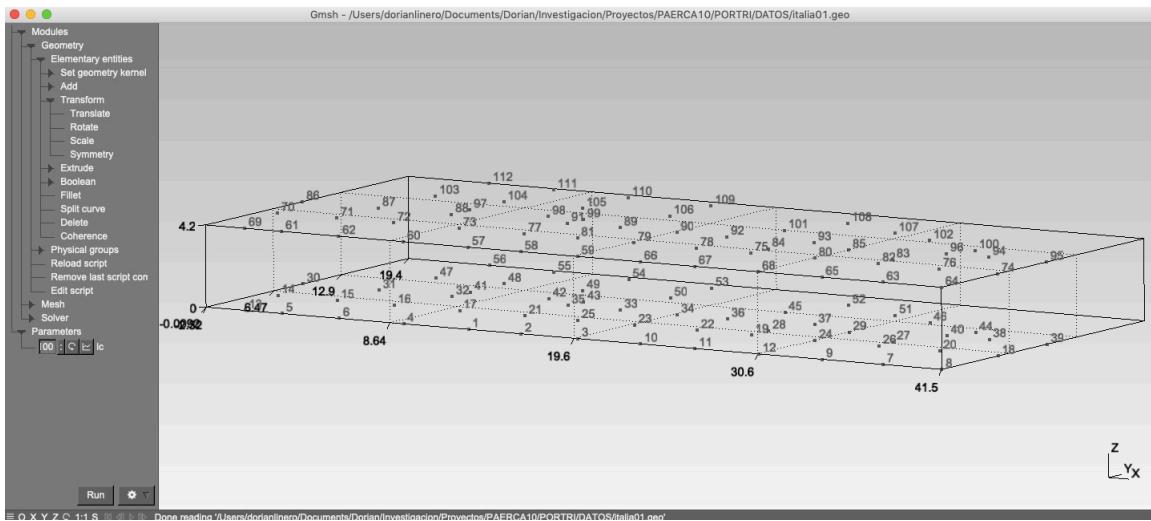


Figura 4.11. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: puntos de los niveles $z = 0$ y $z = 4.2$ m, después de utilizada la instrucción `Translate` en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

Los puntos del pórtico que pertenecen al segundo piso del edificio, es decir en $z = 7.2$ m, se crean de la siguiente forma:

- Se activa la vista lateral del pórtico haciendo clic en el botón X del extremo inferior izquierdo del entorno gráfico.
- Se escoge **Modules** > **Geometry** > **Elementary entities** > **Transform** > **Translate** del menú lateral, lo cual activa la pestaña **Translate**. Allí se escribe 3.0 en la casilla **DZ** y se hace clic en la caja de verificación **Apply translation on copy**.
- Se seleccionan los puntos en $z = 4.2$ m, encerrándolos en un rectángulo, después de oprimir simultáneamente la tecla **ctrl** y hacer clic izquierdo de ratón como se ilustra en la figura 4.12. Se confirma la instrucción oprimiendo la tecla **e** y se finaliza con la tecla **q**.
- Se cambia a una vista isométrica con el ratón y se observa que se han creado nuevos puntos con coordenada $z = 7.2$ m, en la misma ubicación x, y de los puntos iniciales en $z = 4.2$ m, como lo ilustra la figura 4.13.

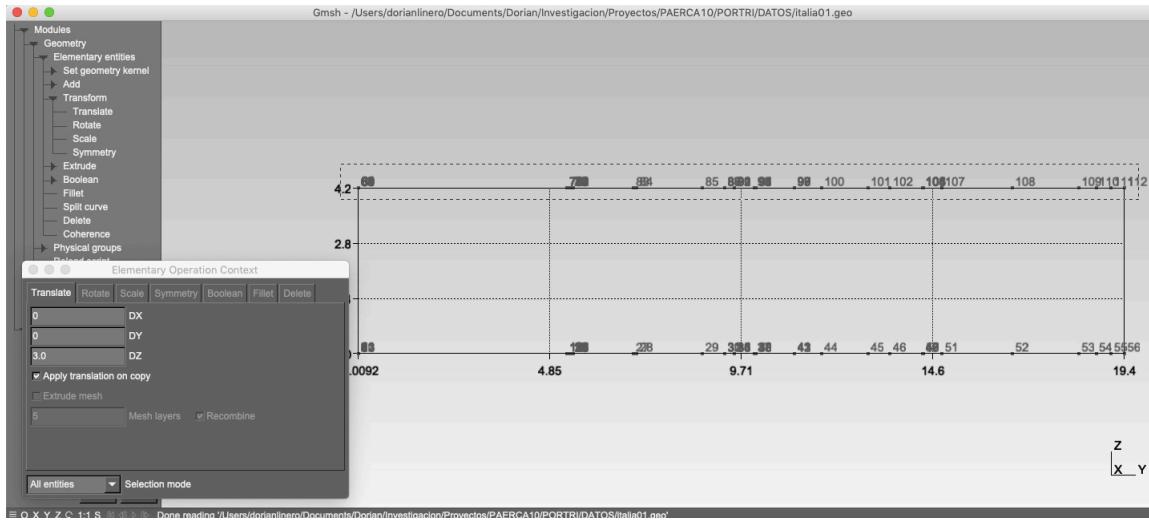


Figura 4.12. Vista lateral del pórtico tridimensional de un edificio real: selección de los puntos del nivel $z = 4.2$ m, cuando se utiliza la instrucción `Translate` en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

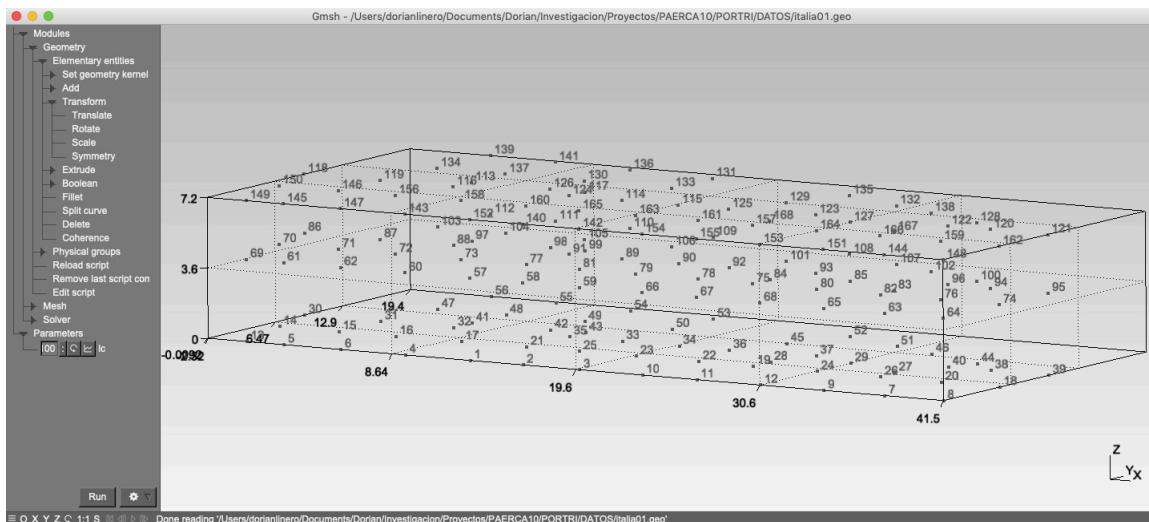


Figura 4.13. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: puntos de los niveles $z = 0$, $z = 4.2$ m y $z = 7.2$ m, después de utilizada la instrucción `Translate` en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

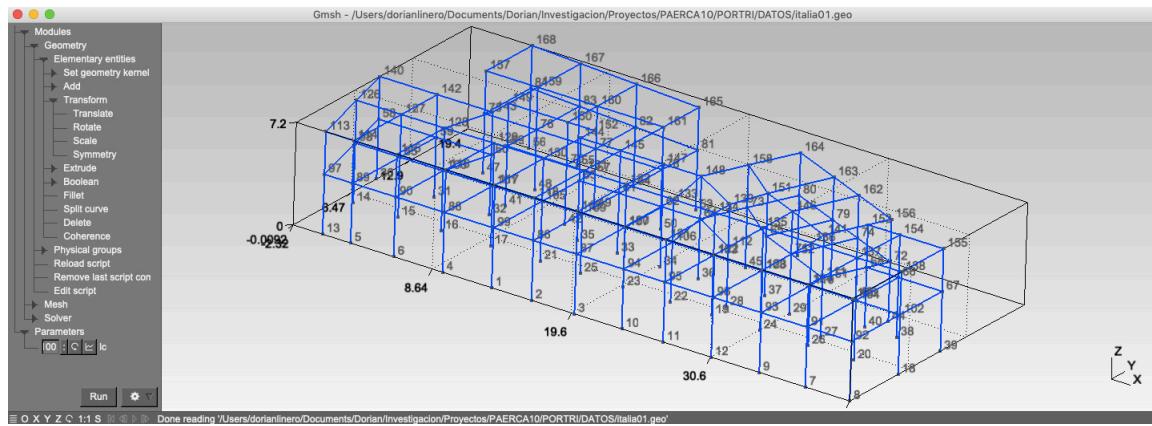


Figura 4.14. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: puntos y líneas de los niveles $z = 0$, $z = 4.2$ m y $z = 7.2$ m en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

Las vigas y columnas de los dos primeros pisos del pórtico se crean seleccionando Modules >Geometry >Elementary entities >Add >Line en el menú lateral, y haciendo clic sobre los puntos inicial y final que definen cada elemento. Para terminar este proceso se presiona la tecla q. La figura 4.14 ilustra el resultado después de ejecutada esta instrucción.

Los puntos y líneas que representan los siguientes pisos de la estructura se pueden crear, repitiendo el proceso de sección, copiado y traslación de puntos y líneas del piso anterior. Al final se obtiene la geometría completa del pórtico como se ilustra en la figura 4.7.

4.9 Visualización de una parte específica del pórtico en GMSH

En el archivo de datos .geo, las entidades físicas sobre cada línea representan las características mecánicas y las cargas distribuidas sobre ella. La selección de un conjunto de líneas a las cuales se les quiere asignar una entidad física común, requiere en muchas ocasiones que se visualice solo una parte del pórtico. Por ejemplo, si se desea visualizar y seleccionar solamente las líneas que representan un conjunto específico de columnas, se hace lo siguiente:

- Se selecciona Tools >Clipping del menú superior, activando la ventana del mismo nombre.
- Se selecciona la opción Geometry y la pestaña Box. Las casillas allí encontradas permiten visualizar la intersección entre tres tajadas paralelas a los ejes coordenados.
- En las casillas Cx y Wx se escriben los valores C_x y W_x , que definen una rebanada entre los planos $x = C_x - W_x/2$ y $x = C_x + W_x/2$.
- En las casillas Cy y Wy se escriben los valores C_y y W_y , que definen una rebanada entre los planos $y = C_y - W_y/2$ y $y = C_y + W_y/2$.
- En las casillas Cz y Wz se escriben los valores C_z y W_z , que definen una rebanada entre los planos $z = C_z - W_z/2$ y $z = C_z + W_z/2$.
- Se visualizan las líneas y puntos del pórtico en la intersección entre las rebanadas, como lo ilustra la figura 4.15. En este momento se pueden seleccionar con facilidad las líneas para asignarle entidades físicas como lo describe la sección 4.2.
- Para volver a visualizar todas las líneas y puntos del pórtico, se hace clic en el botón Reset de la ventana Clipping.

En el archivo de postproceso .pos, algunas veces la densidad de elementos del pórtico no permite ver claramente el resultado en un lugar particular. Por ejemplo, las figuras 4.16 y 4.17 ilustran la configuración deformada y la norma del vector desplazamiento del pórtico planteado, y el momento flector en la dirección z local de los elementos; sin embargo, allí no es fácil identificar algunos resultados puntuales. Para superar lo anterior, se puede realizar lo siguiente:

- Se selecciona Tools >Clipping del menú superior, activando la ventana del mismo nombre.

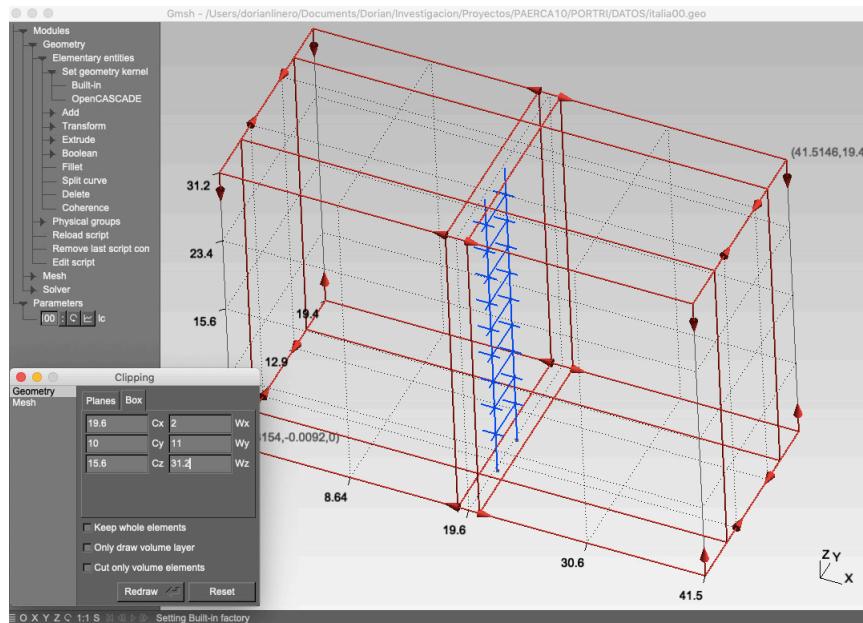


Figura 4.15. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: visualización de las líneas y puntos en la intersección entre los planos $x = 19.6 - 2.0/2$, $x = 19.6 + 2.0/2$, $y = 10.0 - 11/2$, $y = 10.0 + 11/2$, $z = 15.6 - 31.2/2$ y $z = 15.6 + 31.2/2$, en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

- Se selecciona la vista de resultados que se desea recortar de la lista a la izquierda y la pestaña **Box** a la derecha. Las casillas allí encontradas permiten visualizar la intersección entre tres tajadas paralelas a los ejes coordinados.
- En las casillas **Cx** y **Wx** se escriben los valores C_x y W_x , que definen una rebanada entre los planos $x = C_x - W_x/2$ y $x = C_x + W_x/2$.
- En las casillas **Cy** y **Wy** se escriben los valores C_y y W_y , que definen una rebanada entre los planos $y = C_y - W_y/2$ y $y = C_y + W_y/2$.
- En las casillas **Cz** y **Wz** se escriben los valores C_z y W_z , que definen una rebanada entre los planos $z = C_z - W_z/2$ y $z = C_z + W_z/2$.
- Se visualizan el resultado sobre los elementos del pórtico en la intersección entre las rebanadas, como lo ilustra la figura 4.18. Adicionalmente, se acerca la región visible del pórtico con la rueda del ratón, como se indica en la figura 4.19.

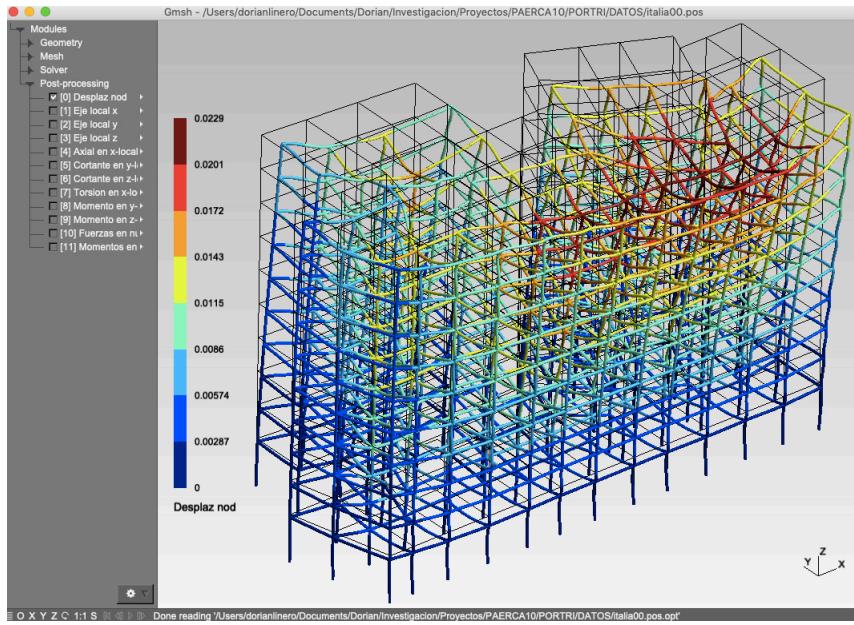


Figura 4.16. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: configuración deformada y norma del vector desplazamiento, en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

- Para volver a visualizar todas las líneas y puntos del pórtico, se hace clic en el botón Reset de la ventana Clipping.

4.10 Visualizar las entidades geométricas que pertenecen a una misma entidad física

Para visualizar las entidades geométricas como puntos y líneas, que se han asignado a una misma entidad física se procede así:

- Se selecciona Tools > Visibility del menú superior, activando la ventana del mismo nombre.
- Se selecciona la pestaña List browser y dentro de ella se escoge Physical groups en la caja desplegable ubicada en la parte inferior. En esta pestaña se puede

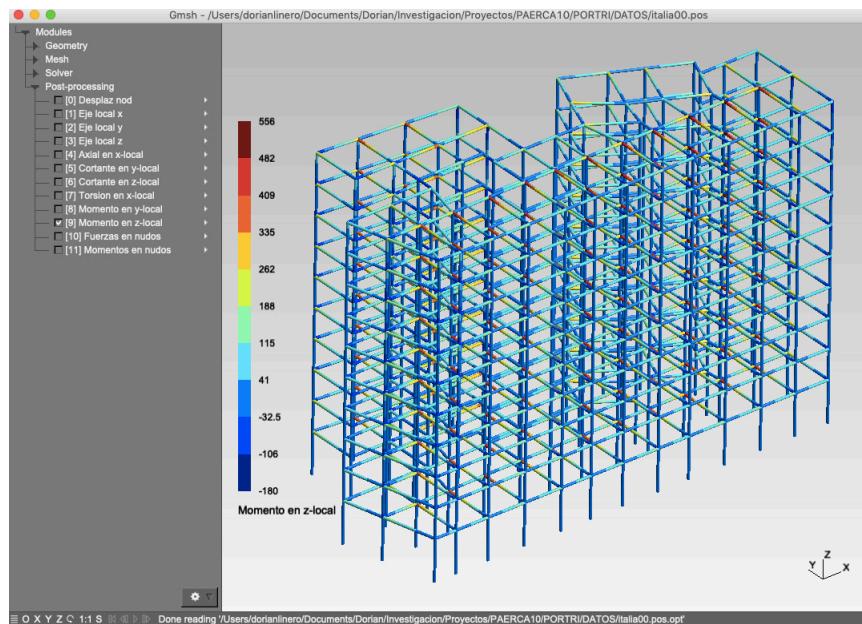


Figura 4.17. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: momento flector en dirección \bar{z} de cada elemento, en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

observar el listado de todas las entidades físicas. Inicialmente, tales entidades están seleccionadas.

- Se seleccionan las entidades físicas que se desean visualizar, haciendo clic con el ratón o utilizando las flechas del teclado. Para escoger varias entidades físicas que no están consecutivas en el listado, se hace clic en la primera, se mantiene oprimido el botón **cmd** (en equipos Mac) y se hace clic en las siguientes.
- Se hace clic en el botón **Apply**. Se visualizarán las líneas y puntos que pertenecen a las entidades físicas seleccionadas. En la figura 4.20, se observan las líneas del pórtico del ejemplo, que pertenecen a la entidad física número 2, cuyo nombre es **CATE EYOU=20000000 POIS=0.2 RECZ=0.30 RECY=0.60** y representan las columnas de $0.30 \text{ m} \times 0.60 \text{ m}$ de la estructura. La figura 4.21 muestra las vigas de la estructura que tienen sección transversal de $0.30 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ y una carga distribuida uniformemente 26.62 kN/m , representadas por las líneas

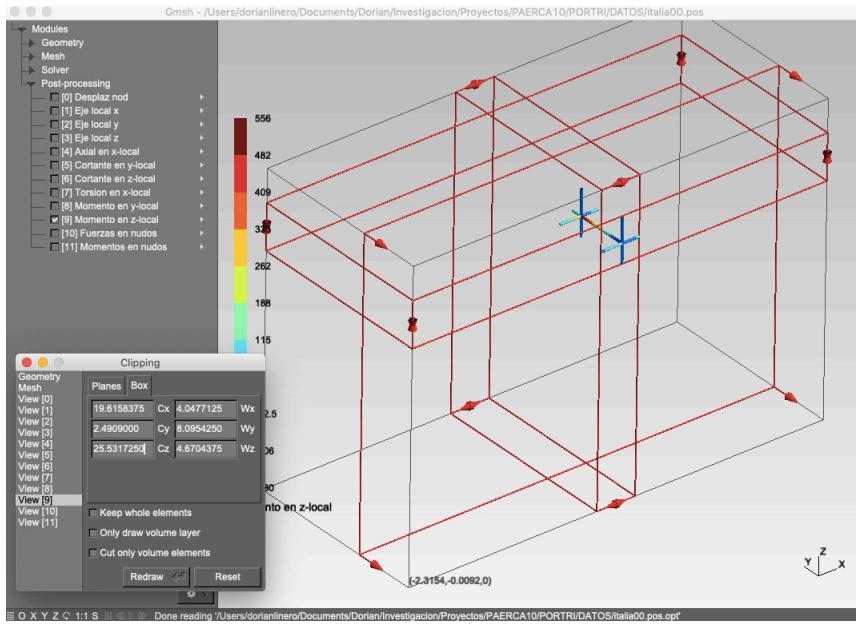


Figura 4.18. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: momento flector en dirección \bar{z} de los elementos de la intersección entre los planos $x = 19.6 - 4.04/2$, $x = 19.6 + 4.04/2$, $y = 2.49 - 8.09/2$, $y = 2.49 + 8.09/2$, $z = 25.53 - 4.67/2$ y $z = 25.53 + 4.67/2$, usando la instrucción Clipping en el entorno gráfico de preproceso de GMSH.

que pertenecen a la entidad física número 25 y de nombre CATE EY0U=20000000
POIS=0.30 RECZ=0.50 RECY=0.60 WYLO=-26.62.

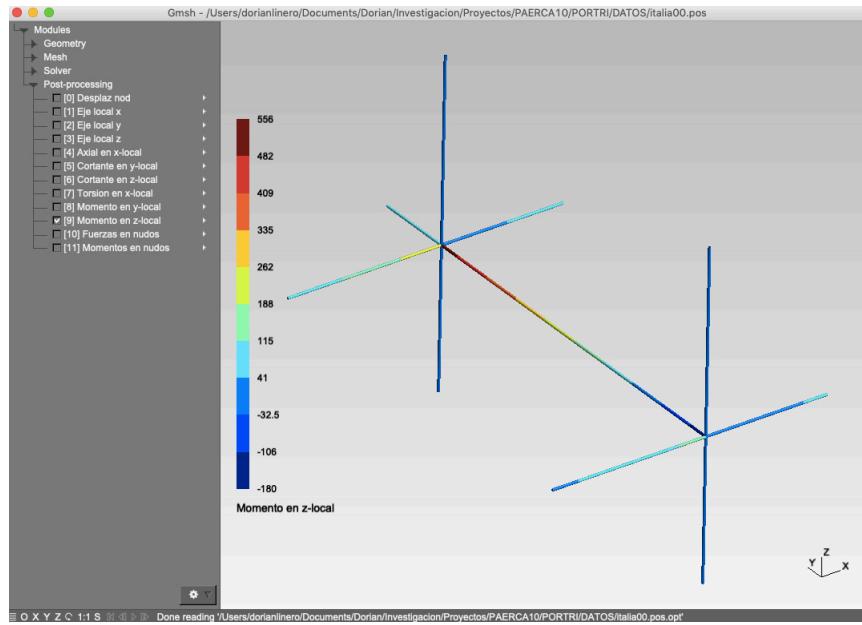


Figura 4.19. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: acercamiento del momento flector en dirección \bar{z} de los elementos de la intersección entre los planos de la figura 4.18

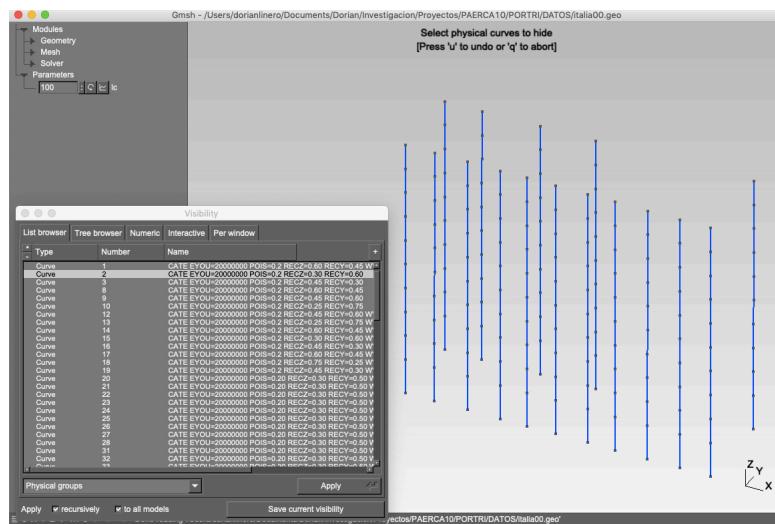


Figura 4.20. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: líneas que pertenecen a la entidad física número 2 y representan las columnas de $0.30 \text{ m} \times 0.60 \text{ m}$ de la estructura.

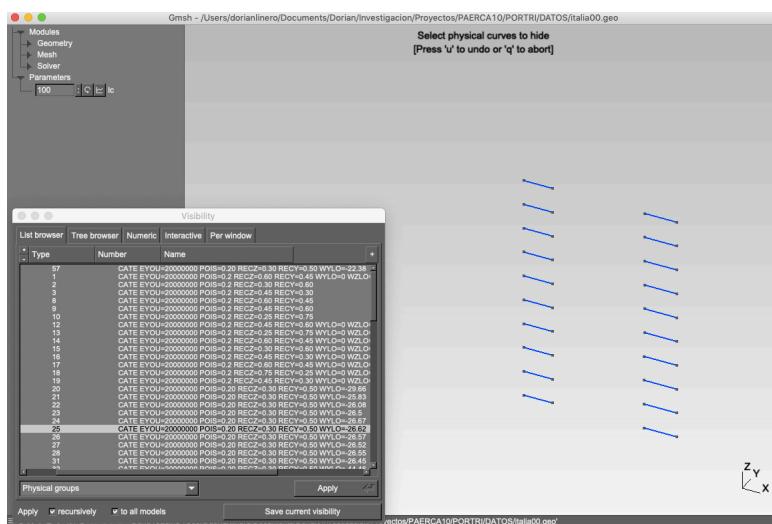


Figura 4.21. Vista isométrica del pórtico tridimensional de un edificio real: líneas que pertenecen a la entidad física número 25 y representan las vigas de la estructura que tienen sección transversal de $0.30 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ y una carga distribuida uniformemente 26.62 kN/m .

