

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTRATEGIAS COMPUTACIONALES PARA LA ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA EN LA GENERACIÓN DE MALLAS DE ELEMENTOS FINITOS”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres
Pérez O. Víctor A.
Salcedo H. Fernando R.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTRATEGIAS COMPUTACIONALES PARA LA ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA EN LA GENERACIÓN DE MALLAS DE ELEMENTOS FINITOS”

Tutor Académico: Prof. Antonio Barragán

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres
Pérez O. Víctor A.
Salcedo H. Fernando R.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO



Caracas, 18 de mayo de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

VÍCTOR PÉREZ y FERNANDO SALCEDO

Titulado:

**“ESTRATEGIAS COMPUTACIONALES PARA LA ASIGNACIÓN DE
CONDICIONES DE FRONTERA EN LA GENERACIÓN DE MALLAS DE
ELEMENTOS FINITOS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. Manuel Martínez
Jurado



Prof. Antonio Barragán
Tutor

Prof. Rodolfo Berrios
Jurado

DEDICATORIA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

DEDICATORIA

A mis padres Roberto y Juana

A mi hermano Roberto

A mi tía Herminia

A mi prima Paula

A mi novia Liriagni

A mis amigos

Fernando

A mis padres Victor y Ofelia

A mis hermanos

A Osvaldo y Nora

A mis amigos

Victor

AGRADECIMIENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en primer lugar a Dios, por permitirnos llegar a donde estamos ahora.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por formarnos como Ingenieros.

Al profesor Antonio Barragán por guiarnos durante la elaboración de este Trabajo Especial de Grado y su disposición en todo momento.

Al Lic. Roberto Salcedo por su gran apoyo en la implementación del programa.

Nuestro mas profundo agradecimiento a todas las personas que colaboraron con nosotros durante este trabajo.

RESUMEN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Pérez O., Víctor A. y Salcedo H., Fernando R.

ESTRATEGIAS COMPUTACIONALES PARA LA ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA EN LA GENERACIÓN DE MALLAS DE ELEMENTOS FINITOS

**Tutor Académico: Prof. Antonio Barragán. Caracas, U. C. V. Facultad de
Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009. 131 pág.**

Palabras clave: GENERACIÓN DE MALLA, CONDICIONES DE BORDE, SUPERELEMENTO, SERENDIPITY.

Resumen: En el presente trabajo se llevó a cabo la implementación de dos programas de generación de mallas, uno para el caso bidimensional y otro para el caso tridimensional, en los cuales se realiza de manera automática la asignación de las condiciones de borde ó condiciones de frontera. Esta asignación de condiciones de borde es una parte fundamental en la generación de mallas de elementos finitos. En la mayoría de los trabajos realizados se ha prestado poca atención a este aspecto, con el resultado de que la introducción de las condiciones de borde a la malla deba realizarse de forma manual. Con estos programas se cuenta ahora con un software que permite la conexión directa entre la fase de generación y la fase de análisis. El software desarrollado se basa en el método de los Superelementos y las funciones de interpolación de la familia Serendipity, donde se implementó un esquema de asignación de condiciones de borde automático a partir de una malla inicial de Superelementos mediante la comparación de números enteros. Se implementó también una rutina de generación de nodos intermedios para convertir cuadriláteros de cuatro nodos en cuadriláteros de ocho nodos en el caso bidimensional, así como hexaedros de ocho nodos en hexaedros de veinte nodos para el caso tridimensional. Por último se anexó una rutina que permite el acoplamiento casi directo de los archivos resultado con el programa MEFET. Toda la implementación se llevó a cabo bajo la filosofía de software libre, donde se permite al usuario o a futuros investigadores mejorar y optimizar el funcionamiento del programa.

ABSTRACT

Computational Strategies for the Boundary Conditions Assignment in the Finite Element Mesh Generation

Pérez O., Víctor A. y Salcedo H., Fernando R.

COMPUTATIONAL STRATEGIES FOR THE BOUNDARY CONDITION ASSIGNATION IN THE FINITE ELEMENT MESH GENERATION

**Academic Tutor: Prof. Antonio Barragán. Caracas, U. C. V. Engineering
Faculty, Mechanical Engineering School. 2009. 131 pág.**

Key Words: MESH GENERATION, BOUNDARY CONDITIONS,
SUPERELEMENT, SERENDIPITY.

Abstract: In the present work the implementation of two mesh generation programs take was carried out, one for the two-dimensional case and one for the three-dimensional case. In these programs the assignation of the boundary conditions in carried out in an automatic way. This assignation of boundary conditions is a fundamental part of the mesh generation process. In the majority of the works, very little attention had been paid to this aspect of the mesh generation process, with the result that the assignation of the boundary conditions needed to be done manually. With these programs now we count with software that permits the direct connection between the mesh generation process and the analysis process. The developed software was based on the Superelement method and the interpolation functions of the Serendipity family, where an automatic boundary condition assignation was implemented from an initial mesh of Superelements by the comparison of whole numbers. An intermediate node generation routine was implemented also to convert quadrilaterals of four nodes in quadrilaterals of eight nodes, as well as hexahedrons of eight nodes in hexahedrons of twenty nodes for the three-dimensional case. Finally a routine that permitted the almost direct connection of the output file with the MEFET program was implemented. Al the implementation was carried out under the philosophy of free software, where is permitted to the user or future investigators improve or optimize the operation of the program.

ÍNDICE GENERAL

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I Antecedentes	4
1.1 Antecedentes	4
CAPITULO II Generación de mallas y Superelementos	19
2.1 Generación de mallas	19
2.1.1 Introducción	19
2.1.2 Modelo Geométrico	20
2.1.3 Malla	21
2.1.4 Geometría de la malla	21
2.1.5 Topología de la malla.....	21
2.2 Clases de métodos de generación de malla	22
2.2.1 Métodos manuales o semiautomáticos.....	22
2.2.2 Métodos de parametrización ó mapeo.....	22
2.2.3 Métodos de descomposición de dominio	23
2.2.4 Métodos de intersección de puntos ó creacióm de elementos.....	24
2.2.5 Métodos constructivos	24
2.3 Generadores de mallas estructuradas	24
2.4 Generadores de mallas no estructuradas	25
2.5 Superelementos	26
CAPITULO III Funciones de interpolación (Serendipity)	30
3.1 Funciones de Interpolación	30
3.2 Familia Serendipity	31

ÍNDICE GENERAL

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

3.3 Elementos Isoparamétricos	34
CAPITULO IV Condiciones de borde en la generación de mallas	35
4.1 Condiciones de borde en la simulación.....	35
4.2 El problema de asignación de condiciones de borde	35
4.3 Analogías entre las condicioones de de borde para diferentes tipos de problemas	38
4.4 Tipos de condiciones de borde.....	38
CAPITULO V Desarrollo e implementación del programa	41
5.1 Programas <i>Genera2D</i> y <i>Genera3D</i>	41
5.1.1 Rutina <i>Principal</i>	41
5.1.2 Subrutina <i>LeeDatos</i>	44
5.1.3 Subrutina <i>AsocElemCont</i>	45
5.1.4 Subrutina <i>NodoCentral</i>	47
5.1.5 Subrutina <i>Genera</i>	49
5.1.6 Subrutinas <i>GenLadoCB</i> y <i>GenCaraCBt</i>	54
5.1.7 Subrutina <i>Result</i>	57
CAPITULO VI Ejemplos de aplicación	58
6.1 Ejemplos de aplicación	58
6.1.1 Cuadrilátero con 2 Superelementos	58
6.1.2 Llave 12 y 13mm	60
6.1.3 Excéntrico de escalada	61
CAPITULO VII Conclusiones.....	63
CAPITULO VIII Recomendaciones.....	65
APÉNDICES.....	66
Apéndice A: Consideraciones Generales	67
Apéndice B: Reglas para la numeración de las conectividades para un Superelemento.....	68

ÍNDICE GENERAL

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

Apéndice C: Realización de un archivo de datos.....	70
Apéndice D: Manual del usuario.....	77
Apéndice E: Ejemplos de programa.....	85
Apéndice F: Generación de cargas nodales	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Generación de Superelementos en un elemento	27
Figura 2.2: Superelementos en elementos tridimensionales.	29
Figura 3.1: Interpolación lineal de un elemento triangular.	30
Figura 3.2: Rectángulo de la familia (Serendipity) de nodos en el contorno cuadrático. [48]	31
Figura 3.3: Prisma rectangular de la familia (Serendipity) de nodos en el contorno cuadrático con los elementos de cara y líneas correspondientes. [48].....	33
Figura 4.1: Conjunto y subconjunto de condiciones de borde	36
Figura 4.2: Malla inicial → Malla generada	36
Figura 5.1: Árbol de llamadas programa <i>Genera2D</i>	42
Figura 5.2: Árbol de llamadas programa <i>Genera3D</i>	43
Figura 5.3: Lados definidos en la estructura <i>Genera2D</i> para un Superelementos.....	46
Figura 5.4: Caras definidas en la estructura <i>Genera3D</i> para un Superelementos.....	47
Figura 5.5: Cuadrilátero de 8 nodos y Hexaedro de 20 nodos	48
Figura 5.6: Arreglo temporal de 8 nodos y 20 nodos en el primer elemento de un Superelementos	51
Figura 5.7: Ubicación de un elemento genérico.....	53
Figura 5.8: Orden de la generación de elementos en un Superelemento 2D con divisiones 2x2	53
Figura 5.9: Orden de la generación de elementos en un Superelemento 3D con divisiones 2x2x2	54
Figura 5.10: Superelemento genérico de 5 filas y 4 columnas	55
Figura 5.11: Lado que no pertenece al contorno.....	56
Figura 6.1: Separación de Superelementos generado en el dibujador <i>dibm2d</i>	58

LISTA DE FIGURAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Figura 6.2: Malla final con Superelementos divididos 2x2 generado en el dibujador <i>dibm2</i>	60
Figura 6.3: Llaves hexagonales de diferentes tamaños	60
Figura 6.4: Separación de Superelementos en la llave de 12 y 13 mm generado en el dibujador <i>Xdibm3d</i>	61
Figura 6.5: Malla final con Superelementos divididos 2x2x2 generado en el dibujador <i>Xdibm3d</i>	61
Figura 6.6: excéntricos de diferentes tamaños y colocación de un excéntricos	61
Figura 6.7: Separación de Superelementos en el excéntrico generado en el dibujador <i>Xdibm3d</i>	62
Figura 6.8: Malla final con Superelementos divididos 2x2x2 generado en el dibujador <i>Xdibm3d</i>	62
Figura B.1: Cuadrilátero de 4 nodos	68
Figura B.2: Hexaedro de 8 nodos	69
Figura C.1: Ejemplo <i>Genera2D</i> para la realización de un archivo de datos	70
Figura C.2: Ejemplo <i>Genera3D</i> para la realización de un archivo de datos	73
Figura D.1:	78
Figura D.2:	78
Figura D.3:	79
Figura D.4:	79
Figura D.5:	80
Figura D.6:	80
Figura D.7:	81
Figura D.8:	82
Figura E.1:	85
Figura E.2:	92

LISTA DE FIGURAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

Figura E.3:.....	103
Figura F.1: <i>Coeficientes para el cuadrilátero de 8 nodos.Caso Bidimensional</i>	109
Figura F.2: <i>Coeficientes para el hexaedro de 20 nodos. Caso Tridimensional.</i>	110

LISTA DE TABLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1: Analogías entre las condiciones de borde.....	38
Tabla 5.1: Arreglo $lnodb$	44
Tabla 5.2: Arreglo $sArisCB$	45
Tabla 5.3: Arreglo $sCaraCB$	45
Tabla C.1: Hoja de datos 2D.....	71
Tabla C.2: Hoja de datos 3D.....	73

INTRODUCCIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

INTRODUCCIÓN

La generación de malla es un paso importante en la aplicación del MEF a la solución de algunos problemas de la física matemática. En este paso, el espacio total continuo es dividido en elementos de formas simples, previamente establecidas, y de tamaño finito. (Elementos Finitos). Una idea de la importancia de la creación de la malla es dada no solo por el muy grande volumen de atención que ha recibido, sino también por la variedad de formulaciones que han aparecido, tocando diferentes aspectos del proceso.

La generación de malla ha recorrido un largo camino desde sus comienzos, y ha evolucionado desde los primeros métodos puramente manuales para introducir datos en programas de elementos finitos, hasta convertirse en parte integral del proceso de solución en el cual el diseño de la malla está relacionado a la a la calidad de la solución de elementos finitos, a través de indicadores de error, en un proceso iterativo llamado adaptabilidad. Hoy en día la generación de malla está también relacionada con métodos sofisticados para representar complejas geometrías en tres dimensiones, en un intento por automatizar completamente el proceso análisis-diseño.

Los primeros trabajos consistían en dividir de forma manual la región de interés en un número reducido de elementos grandes, también llamados Superelementos. Esto generaba un conjunto de datos que era suministrado a un programa que subdividía cada Superelemento de acuerdo a parámetros suministrados por el usuario. Posteriormente se incorporan conceptos provenientes de la geometría en un esfuerzo para automatizar el proceso. Es de

INTRODUCCIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

este punto de donde surgen los primeros generadores automáticos, limitados a regiones de dos dimensiones debidos principalmente a la dificultad de tener modos automáticos de crear y manipular modelos en tres dimensiones. Luego hizo su aparición el conjunto de métodos conocidos como Modelado de Sólidos, en lo que puede ser considerado el punto de partida para automatizar completamente el proceso de generación de malla.

En este punto surge la necesidad de mallas más grandes. Mientras que, por una parte, se puede argumentar que el objetivo de la adaptabilidad es el de refinar una malla sólo donde se requiera, y obtener así una malla “económica”, por otra parte se puede decir que la misma naturaleza del método de los elementos finitos afirma que a medida que el número de elementos aumenta de manera apropiada, el comportamiento del método discreto se aproximará al de la solución exacta. También se puede mencionar que existen geometrías muy complejas, tales como huesos porosos que requieren un nivel de resolución muy alto, lo cual implica grandes números de elementos.

Para que un generador de malla de elementos finitos sea de utilidad, es necesario que se conecte de manera directa con la fase de análisis. Para ellos es necesario proveer la información referente a las condiciones de borde, también llamadas condiciones de frontera. En la mayoría de los trabajos realizados, se ha prestado poca atención a este aspecto de la generación de mallas, con el resultado de que la introducción de condiciones de borde debe ser realizada en forma manual. Este es un método que solamente se aplica en mallas muy pequeñas, ya que a medida que aumenta el tamaño de la malla, se incrementa el trabajo requerido, y también la posibilidad de cometer errores en la construcción de la malla.

INTRODUCCIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

En el presente trabajo se lleva a cabo la implementación de dos programas de generación de mallas, uno para el caso bidimensional y otro para el caso tridimensional, en los cuales se realiza de manera automática la asignación de las condiciones de borde. Con estos programas se cuenta ahora con un software que permite la conexión directa entre la fase de generación y la fase de análisis. El software desarrollado se basa en el método de los Superelementos, donde se implementa un esquema de asignación de condiciones de borde automático a partir de una malla inicial de Superelementos mediante la comparación de números enteros.

1.1.- ANTECEDENTES

Debido a su papel clave en el proceso de elementos finitos, la generación de la malla ha sido tema de investigación por un largo tiempo. Comenzando en los primeros trabajos que requerían intervención del usuario para dividir manualmente la región de interés en elementos, los cuales eran introducidos a un programa, hasta esfuerzos para automatizar completamente el proceso, y más recientemente, a los trabajos destinados a la paralelización del mismo, se puede afirmar que se trata de un tema que todavía motiva investigación en todo el mundo.

A través de los años, se han establecido una variedad de esquemas de generación de mallas, cada uno con sus correspondientes ventajas y limitaciones. En los siguientes párrafos, se presenta una recopilación más amplia que profunda, en la que se han hecho grandes esfuerzos para seleccionar los trabajos más representativos entre un enorme volumen de trabajos existentes. A este fin, se puede intentar una clasificación, según el método empleado en la generación. Así, los siguientes métodos se pueden considerar como los más difundidos:

- Las técnicas de los Superelementos.
- Triangulación Delaunay, y su equivalente 3D.
- Descomposición del dominio, seguida de triangulación.
- División jerárquica del espacio, 2D o 3D.

El concepto de Superelemento se basa en el uso de las mismas funciones de interpolación del elemento finito, para dividir un conjunto de elementos

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

iniciales que constituyen los datos iniciales. Es decir, la región de interés es dividida en cuadriláteros o triángulos y esta información es suministrada a un programa, junto con algunos parámetros de subdivisión. De allí en adelante, el programa subdividirá los Superelementos en elementos finitos. El uso de esta técnica (que puede considerarse relacionada con la interpolación en retazos superficiales) fue aplicado para el uso en elementos finitos inicialmente por Zienkiewicz, O. C. y Phillips, D. V., [1] y fue publicada en forma de un programa FORTRAN por Durocher, L. L. y Gasper, A., [2] para la generación de mallas en regiones bidimensionales. El programa usa como datos elementos de cuatro lados y parámetros de división a lo largo de lados opuestos y aplica los métodos de interpolaciones para dividir el Superelemento, dicho programa tiene requisito previo una división manual de la región en elementos cuadriláteros, y permite la generación de elementos finitos de cuatro y tres lados.

Otra versión de esta técnica, para generación de elementos exclusivamente triangulares fue desarrollada posteriormente por Ghassemi, F., [3] quien aplicó el concepto de funciones de interpolación de orden cuadrático en superelementos triangulares para la creación de mallas formadas por triángulos de tres a seis nodos. Posteriormente, Liu, Y. y Chen, K., [4] desarrollaron una variación del programa de Durocher y Gasper, que consistía en la generación de elementos triangulares y cuadriláteros con número variable de nodos. También incorporaron un algoritmo para la eliminación de nodos coincidentes tan pronto como aparecen, dando como resultado una implementación eficiente.

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Las implementaciones arriba mencionadas del concepto isoparamétrico requerían que el espaciamiento de los nodos a lo largo de lados opuestos de un Superelemento fuera uniforme. Imafuku, I., et al, [5] eliminaron esta limitante en un método que era capaz de generar elementos triangulares, cuadriláteros y pentaédricos. La generación de los Superelementos era igualmente manual a ser posteriormente subdividida por el programa.

El concepto de elemento isoparamétrico fue extendido a regiones tridimensionales, como lo demostraron Martins, P. A. F. y Barata M. J. M., [6], quienes presentaron un programa FORTRAN basado también en el concepto del Superelemento, para generar mallas 3D. En este caso, los Superelementos son hexaedros que resultan de la división manual del dominio de interés. Su implementación requiere la asignación de memoria para almacenar los nodos repetidos que son posteriormente eliminados. Este hecho impone una limitación del programa en lo que respecta a la generación de mallas grandes.

El uso de un conjunto de puntos para generar un conjunto de regiones de tipo simplex, i.e. triángulos o tetraedros ha tenido una amplia difusión, dado que por una parte, se basa en las triangulaciones de Delaunay, y además, ha tenido amplia aplicación en problemas que involucran flujo de fluidos. Basándose en estos métodos, Thacker, W. C., et al, [7] desarrollaron un método para la generación de mallas irregulares de elementos triangulares, el cual se desarrolla en dos etapas: En primer lugar se construye una malla curvilínea, cuyo contorno coincide con el contorno de la región. Luego se construye una malla irregular, eliminando puntos de la malla curvilínea. La información acerca de la profundidad se toma en cuenta en el espaciamiento entre nodos. El

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

procedimiento está dirigido a la generación de mallas en reservorios de poca profundidad.

Posteriormente, Cavendish, J., et al, [8] utilizaron la información de un sistema de modelado de sólidos para representar el dominio a discretizar. El procedimiento se desarrolla en dos etapas: primeramente se ubican nodos en una serie de secciones transversales del modelo. Luego, se usa una versión 3D de la triangulación Delaunay para conectar los nodos, formando así una malla de tetraedros.

Frey, W., [9] desarrolló una versión modificada de la técnica de Delaunay, utilizando una triangulación inicial para crear un conjunto inicial de nodos, los cuales eran posteriormente refinados por medio de técnicas Delaunay. En esta versión, la graduación de la malla se logra por el medio de una función que controla la distribución espacial de los nodos, requiriendo intervención del usuario para ubicar esos nodos.

En una versión más refinada, Sloan, S. W., [10] presenta un algoritmo y un programa FORTRAN 77 para la discretización de una región en triángulos, basado en la triangulación Delaunay. La ventaja de su método es que la calidad de la triangulación es “optima” (equiangular).

Una limitación importante de la triangulación Delaunay es que el conjunto de puntos utilizados como vértices de la triangulación debe estar encerrado dentro de una primitiva convexa, bien sea polígono o poliedro. Esto impone una limitación al tipo de formas que pueden ser manejadas con esta técnica. Para resolver esta limitación, se han desarrollado varias

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

aproximaciones, la mayoría de las cuales requieren una descomposición previa de la región (que puede ser no-convexa), en un conjunto de sub regiones convexas.

Esto fue iniciado por Bykat, A., [11] quien describe un algoritmo para generación de mallas triangulares en regiones 2D, en lo que puede ser considerado un proceso de dos etapas: En una primera etapa, el dominio de interés es dividido en dos polígonos convexos y luego cada polígono es dividido en triángulos.

Posteriormente, el mismo autor, presenta un algoritmo de naturaleza jerárquica en el cual el polígono es dividido inicialmente en dos polígonos, y luego este mismo procedimiento es aplicado a cada polígono, hasta que solamente quedan triángulos. Según el autor, este método produce una numeración de los nodos que reduce el ancho de banda en la matriz de rigidez correspondiente.

Lewis, B. A. y Robinson J. S., [12] presentaron también una versión recursiva de este procedimiento en forma de un algoritmo para la triangulación de regiones planas, en modo similar a Bykat. El procedimiento puede ser descrito en la siguiente manera: - División de la región inicial en dos subregiones R1 y R2. – El mismo procedimiento se aplica de manera recursiva a cada una de esas regiones, hasta que solo quedan regiones triangulares, sin vértices internos. Una técnica similar fue presentada por Schoofs, A. J. G., et al, [13] en el desarrollo del sistema TRIQUAMESH que se basa en la descomposición del dominio en regiones convexas, seguido por la creación de elementos en cada una de las regiones. El programa es capaz de manejar

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

regiones convexas y no convexas, y genera elementos triangulares y cuadriláteros.

Una descripción detallada de la descomposición de polígonos no convexos se debe a Joe, B., [14], quien desarrollo algoritmos para descomponer un polígono convexo en triángulos. Posteriormente Joe, B. y Simpson, K. B., [15], usan este procedimiento en combinación con la descomposición de un polígono general en polígonos convexas, produciendo un procedimiento de dos etapas. A diferencia de Bykat, la región puede ser descompuesta en cualquier número de polígonos convexas. En trabajos posteriores, esos procedimientos fueron mejorados por Joe, B., para producir mallas de cuadriláteros [16] y tetraédricos, basándose en las descomposiciones de poliedros convexas [17]

Una familia de métodos completamente diferente, se basa en la división jerárquica del espacio. Yerry, M. A. y Shephard M. S., [18] fueron los primeros en la aplicación de esta técnica a la generación de mallas de elementos finitos. Ellos desarrollan un generador de mallas bidimensionales basado en la división jerárquica del espacio, que llamaron “árbol cuaternario modificado”. Ellos tomaron la técnica de representación de imágenes mediante arboles y realizaron modificaciones para transformar los cuadrantes en elementos finitos. Posteriormente, los mismo autores [19], [20] desarrollaron el equivalente tridimensional de esta técnica, Así, el concepto fue extendido a tres dimensiones, y recibió el nombre de “árbol octal modificado”.

Kela. A., et al, [21], presentan un desarrollo similar, aunque más formal, en base al cual desarrollan un sistema que, según los autores, integra el modelado geométrico con la generación de mallas tridimensionales. También

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

describen la implementación de indicadores de error para asistir en el proceso de refinamiento de la malla, se mencionan las características que hacen que la técnica de descomposición recursiva del espacio (DRE) sea apropiada para la realización de procesos adaptativos. Esta presentación formal del problema fue mejorada posteriormente por Perucchio, R., et al, [22], quienes presentan detalles de un generador de mallas 3D basado en la DRE, cuyos datos de entrada son una descripción geométrica del modelo, obtenida de un sistema de modelado de sólidos. En una primera etapa, se crea un árbol octal, y luego en cada octante se crean los elementos finitos. Se hace énfasis especial en las ambigüedades geométricas que se presentan durante la creación del árbol, y que deben ser manejadas de manera apropiada para así poder generar elementos finitos validos.

En una continuación de este trabajo, Shephard, M. S., et al, [23] mejoraron la técnica de arboles mediante la adición de procedimientos que permiten refinamiento de la malla, tanto a priori, como a posteriori. Baehmann, P. L., et al, [24], también presentan modificaciones al generador bidimensional de Yerry, M. A. y Shephard M. S, [18]. Dichas modificaciones incluyen el uso de un solo árbol para regiones con varios materiales y el almacenamiento explícito de la información geométrica, es decir, las coordenadas tanto de las esquinas de los cuadrantes como de las intersecciones de la región con los cuadrantes. Se presentan procedimientos para la generación de mallas de cuadriláteros, de triángulos y mixtas, y se presentan comentarios acerca de los problemas geométricos que se presentan durante la transformación del árbol en la malla.

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Una de las ventajas principales de los métodos basados en árboles es que, siendo estructuras jerárquicas, se prestan para la aplicación de procesos de refinamiento selectivo, y en consecuencia, para procesos adaptables. Carey, G. F., et al, [25] presentan esta discusión. Ellos usan el concepto de arboles, al igual que Yerry, M. A. y Shephard, M. S, [18]. La propiedad básica consiste en que cuando un elemento es refinado mediante subdivisión jerárquica, la relación entre “padre e hijo” permite que los elementos resultantes puedan heredar directamente las propiedades (materiales, geometría) del elemento padre.

Siguiendo una orientación similar, se presentan algunos detalles y la aplicación de un generador 3D basado en el árbol octal modificado para la generación de mallas de tetraedros en un modelo de un molde para productos plásticos. Se mencionan los problemas geométricos que se presentan al construir la malla a partir del árbol, lo que con frecuencia produce elementos de forma inadecuada, lo que se considera uno de los puntos débiles de la técnica, como fue previamente señalado por Yerry, M. A. y Shepard, M. S., [19], [20].

En un intento por resolver esta limitación, Schroeder, W. J. y Shephard, M. S., [26], [27] usan una versión 3D de la técnica de Delaunay en combinación con la DRE de la siguiente manera: En primer lugar, se utiliza DRE para crear los vértices. Luego la técnica Delaunay se usa para conectar los vértices formando tetraedros. Este método combinado trata de evitar elementos de forma pobre, pero solamente produce tetraedros.

En lo que puede ser considerado una combinación de técnicas 2D y 3D, Yuen, M. M. F., et al, [28] aplican la DRE en la generación de mallas sobre

superficies curvas, estableciendo una proyección de la superficie curva a una región plana sobre la cual se genera un árbol de cuarto orden. Otra variación de esta técnica se debe a Jung, Y. H. y Lee, K., [29] quienes presentan una variación orientada a la creación de elementos tetraédricos. En lugar de encerrar la región en un cubo, ellos usan un tetraedro, el cual es dividido recursivamente en tetraedros. Como ventaja principal, se dice que el conjunto resultante de tetraedros forma en si una malla de elementos finitos.

Yan, H. y Hoeltzel, D. A., [30] presentan un método de generación de mallas en ensamblajes mecánicos, cuyos componentes pueden tener movimientos de cuerpo rígido entre sí. En este trabajo, se realiza primero una triangulación de las caras de contorno, seguido de una generación de tetraedros partiendo de los triángulos, y hacia el interior del volumen encerrado. El sistema resultante es capaz de manejar regiones múltiplemente conexas, y también puede realizar un refinamiento adaptable de los tetraedros.

La aparición de técnicas más accesibles de computación paralela ha dejado su impacto en la generación de mallas, en el sentido de que promete salvar las limitaciones que existen en cuanto a la generación de mallas grandes. En otras palabras al contar con las herramientas apropiadas de hardware y software, la generación de mallas grandes puede ser considerada una posibilidad practica, y sus beneficios pueden ser aprovechados. A este respecto, Saxena, M. y Perucchio, R., [31] presentan definiciones de paralelismo algorítmico en el contexto de la generación de malla. Ellos afirman que las propiedades de organización jerárquica y direccionabilidad espacial pueden ser aprovechadas en el diseño de un algoritmo de generación de mallas funcionando en un ambiente de procesamiento paralelo. Presentan una

definición de un “operador de mallado” para ser aplicado en procesamiento paralelo, así como también presentan algoritmos para diferentes etapas del mallado automático.

Por su parte, Löhner, R., et al, [32] desarrollaron un sistema paralelo para la generación de mallas no estructuradas, basado en el concepto de la malla de fondo (background mesh). Esta malla de fondo es una malla relativamente gruesa, generada como paso inicial, cuyos elementos son repartidos entre los procesadores donde serán subdivididos. La información de entrada para la creación de la malla de fondo incluye medidas de los elementos a crear, y el esfuerzo acumulativo requerido en cada subdominio. Posteriormente, Shostko, A. y Löhner, R., [33] extendieron esta técnica a problemas tridimensionales.

La adaptabilidad conlleva una carga considerable en los cálculos de elementos finitos. Posteriormente se presentan algunas técnicas requeridas para apoyar el análisis adaptable basado en mallas no estructurales en sistemas de computación de tipo MIMD (Multiple Instruction, Multiple Data). El problema tratado por ellos es el apoyo a cálculos en paralelo para mallas cambiantes (durante el proceso de cálculo) no estructuradas. Partiendo de una definición de la malla en términos de una jerarquía topológica, ellos presentan técnicas destinadas a soportar la distribución y redistribución de entidades de la malla entre los procesadores, así como la comunicación entre dichas entidades.

En una línea similar, Özturan, C., et al, [34] desarrollan procedimientos y estructuras de datos para apoyar en un modo paralelo la refinación y redistribución de mallas de elementos finitos en computadores de memoria distribuida, en cálculos adaptables de elementos finitos. Sus procedimientos

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

utilizan la información relativa y adyacente, la cual es tomada de la jerarquía topológica básica de la malla. Su filosofía de balanceo de cargas se basa en el envío de elementos, desde los procesadores más cargados, hacia los procesadores menos cargados.

Después que los conceptos de paralelismo fueran aplicados a los cálculos de elementos finitos, el paso siguiente fue su aplicación a la creación de la malla misma. De Cougny, H., et al, [35] [36] presentan algunos detalles del desarrollo de un generador paralelo de mallas basado en la DRE en un ambiente MIMD. El enfoque utilizado para el balanceo de carga consiste en reparticionar la malla y el árbol, en base a un algoritmo de bisección que divide porciones de los datos según las coordenadas geométricas. Las estructuras de datos principales son la malla y el árbol, los cuales son construidos secuencialmente en un solo procesador y luego repartidos entre los procesadores. La construcción en paralelo del árbol queda como un problema a resolver.

Las técnicas basadas en la subdivisión del espacio requieren un enfoque propio del paralelismo, como lo señalan Simone, M. L., et al, [37]. Ellos presentan una discusión acerca de las herramientas y técnicas para realizar la generación de mallas en base al concepto del árbol octal, en un contexto de computación distribuida. Los temas tratados son las estructuras de datos utilizadas para minimizar la comunicación entre procesadores, y procedimientos de balanceo de carga basados en la repartición de los datos, y el envío de octantes desde procesadores muy cargados hacia procesadores menos cargados. Se diseñan estructuras de datos locales (subárboles) destinadas a la

reducción de las recorridas del árbol. Se menciona especialmente el manejo de la información relativa a vecindad. No se menciona la construcción del árbol.

En el área de la generación de mallas, un concepto diferente es el uso de técnicas de descomposición del dominio para lograr un balance del trabajo realizado por los diferentes procesadores. Verhoeven, N. A., et al, [38] desarrollan procedimientos a tal efecto en un generador Delaunay de mallas 2D en el cual se utiliza información geométrica del contorno para crear contornos internos artificiales. El enfoque es del tipo “amo/esclavo”, en el cual el procesador “amo” realiza la asignación de la carga entre procesadores “esclavos”. La carga a distribuir consiste en una subdivisión de los datos de entrada en una cantidad de subdominios. Los contornos de estos subdominios son a su vez, las respectivas cargas para los procesadores “esclavos”.

Posteriormente, Globisch, G., [39] describe un programa para la generación en paralelo de mallas de tetraedros en cuerpo con simetría de revolución. La estrategia se basa en la descomposición de la región en subregiones simplemente conexas que son enviadas por un procesador maestro a los esclavos, en los cuales la malla se genera individualmente. Se discute la relación entre el número de subdominios y el número de esclavos disponibles.

La naturaleza dinámica del proceso de generación de mallas implica que un verdadero esquema “amo-esclavo”, en el cual varios procesadores trabajarían en forma individual para crear partes de la malla, no es posible en casos reales. Vidwans, A., et al, [40] desarrollan un algoritmo de balanceo de carga en cálculos adaptivos de mallas 3D no estructuradas en problemas de dinámica de fluidos. El enfoque utiliza el envío de celdas desde los

procesadores más ocupados hacia aquellos menos ocupados. Se hace énfasis en los procedimientos que debe emplear un procesador para determinar cuáles celdas debe enviar, ya que ello afecta la forma y estructura de los contornos de los subdominios.

Una proposición diferente para la generación de mallas en paralelo es la que presentan Hodgson, D. C. y Jimack, P. K., [41] en el desarrollo de un método para la discretización de una malla que ha sido previamente particionada. Ellos emplean el concepto de la malla de fondo (background mesh) de Löhner, R, et al, [32]. Los elementos de la malla de fondo son enviados a cada procesador para se discretizados en forma individual. El balanceo de carga se realiza a través de una estimación del número de vértices que serán generados en cada elemento de la malla original, realizando una descomposición de la misma, de tal manera que los nodos generados sean distribuidos equitativamente entre los procesadores.

Cheng, H. L. [42] plantea en su trabajo la generación de mallas mediante la subdivisión no uniforme de un elemento "padre" hexaédrico. Con ello se busca generar mallas de elementos de tamaño variable. El desarrollo que se presenta está limitado a un solo hexaedro, o Superelemento, y no se presentan detalles de su aplicación en una malla de varios super elementos.

Rashid, M.M.; Gullet, P.M. [4] presentan una formulación del MEF en la cual los elementos no están sujetos a las restricciones geométricas y topológicas usuales: Los elementos pueden estar formados por cualquier número de elementos en cualquier arreglo. Los polinomios que definen las funciones de interpolación surgen de un proceso de optimización restringida en

cada elemento, en lugar de una transformación isoparamétrica como en el MEF tradicional. Se argumenta que, debido a la ausencia de restricciones mencionadas, la generación se simplifica significativamente.

Una de las mayores dificultades al momento de mallar geometrías complejas tridimensionales radica en el hecho de que típicamente los programas CAD no toman en cuenta la correcta definición de las geometrías para propósitos de análisis. Ribó, R.; Bugeda, G.; Oñate, E. [45] proponen una serie de algoritmos para mejorar o corregir las definiciones geométricas suministradas por un programa CAD.

Su, Y.; Lee, K. H.; Kumar, S. [46] proponen un método de generación automática de mallas mixtas de elementos bidimensionales y tridimensionales.

El uso de datos discretos para representar estructuras generadas mediante la intersección de componentes más sencillos, requiere la realización de operaciones Booleanas entre grupos de superficies triangularizadas. En el proceso de intersección de superficies complejas, un paso crucial es la determinación exacta y eficiente de las líneas de intersección. Dados los números de los nodos que definen los triángulos, se establece en primer lugar las relaciones de adyacencia. Luego se construye una malla de respaldo para limitar el alcance de la búsqueda de triángulos que posiblemente se intersecten. Las líneas de intersección son determinadas por medio de un algoritmo basado en el seguimiento de los vecinos de los triángulos que se intersecten. Al determinar la intersección de dos triángulos, se identifican cuatro casos que luego son tratados de manera sistemática para aumentar la robustez y confiabilidad de la malla. Lo, S.H.; Wang, W.X. [47] presenta un trabajo donde

CAPITULO I: ANTECEDENTES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

se hace énfasis en el tratamiento consistente de la generación de la malla a lo largo de líneas de intersección.

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

2.1.- GENERACIÓN DE MALLAS

2.1.1.- INTRODUCCIÓN

Las definiciones y conceptos presentados a continuación [26] forman el basamento sobre el cual se desarrollan los procesos de construcción de la malla, con la finalidad de asegurar que las mallas generadas tengan validez requerida.

La generación de mallas de elementos finitos consiste en la descomposición de un dominio geométrico en un conjunto de subdominios de tamaño finito y de forma geométrica sencilla, llamados los elementos finitos. Usualmente, la entrada del generador de mallas es una descripción geométrica del objeto a analizar. Esta descripción geométrica recibe el nombre de modelo geométrico.

Tal como lo requiere la técnica del MEF, la descomposición debe ser tal que, a medida que el tamaño de los subdominios disminuye (aumentando así su número), la respuesta del modelo de elementos finitos se aproximara asintóticamente a la solución exacta.

Para poder cumplir estos requisitos, la malla de elementos finitos debe a su vez satisfacer ciertas condiciones y definiciones que se exponen en los párrafos siguientes.

2.1.2.- MODELO GEOMÉTRICO

Un modelo geométrico se considera compuesto de dos conjuntos de información:

$$G = \{S, T\} \quad (2.1)$$

Donde S representa la información geométrica que defina la forma de las entidades que definen el dominio, y T representa los tipos y relaciones topológicas de esas entidades. Usualmente, se asume que cada elemento finito es una región simple, delimitada por caras simplemente conexas, y en consecuencia, interesa conocer las entidades topológicas asociadas a las entidades geométricas de dimensión 0 a “n”, donde n es la dimensión del modelo geométrico. Por ejemplo, para el caso tridimensional (n=3):

$$T = \{V, A, C, R\} \quad (2.2)$$

Donde V, A, C, R son respectivamente, los conjuntos de vértices, aristas, caras y regiones que definan las entidades topológicas primarias del dominio geométrico. En la mayoría de los sistemas de modelado geométrico (SMS), esas entidades están relacionadas jerárquicamente entre sí en base a la dimensionalidad. Según esto, un ejemplo típico, en dirección decreciente de dimensionalidad seria:

Regiones (Tridimensional)

Caras (Bidimensional)

Aristas (Unidimensional)

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Vértices (0-dimensional)

2.1.3.- MALLA

La geometría y la topología de la malla son completamente similares a las del modelo geométrico. Sin embargo, la forma de los elementos geométricos que forman la malla es, en principio mucho más sencilla, y usualmente viene determinada por los tipos de elementos (triángulo, cuadrilátero, tetraedro, etc.) disponibles en el resolutor de elementos finitos, generalmente conocidas como las “bibliotecas de tipo de elementos”.

2.1.4.- GEOMETRÍA DE LA MALLA

La geometría de la malla consiste de los subdominios de tamaño finito y forma geométrica simple. Estos subdominios se interceptan a lo largo de fronteras adyacentes, por ejemplo, los triángulos de 3 nodos y cuadriláteros de 4 nodos se interceptan a lo largo de aristas comunes (líneas rectas). Además, los subdominios deben ser disjuntos; es decir, dados dos elementos s_j y s_k con $j \neq k$:

$$\text{interior}(s_j) \cap \text{interior}(s_k) = \emptyset \quad (2.3)$$

2.1.5.- TOPOLOGÍA DE LA MALLA

La topología de la malla es análoga a la del modelo geométrico; es decir, el dominio topológico consiste de los vértices, aristas, caras y regiones de las mallas.

2.2- CLASES DE MÉTODOS DE GENERACIÓN DE MALLA

A continuación se propone una clasificación general de los métodos de generación de malla en cinco categorías o clases y una clasificación adicional según el tipo de malla generada [47]. Una tarea difícil consiste en identificar claramente el método capaz de proveer un mallado adecuado, según el campo de aplicación. Básicamente, la geometría del dominio y el problema físico dirigen directamente al usuario hacia el método específico a aplicar.

2.2.1.- MÉTODOS MANUALES O SEMIAUTOMÁTICOS

Son aplicables a dominios geoméricamente simples. Como métodos representativos de esta clase se pueden mencionar los métodos enumerativos (los elementos de la malla son explícitamente suministrados por el usuario) y los métodos explícitos (que toman ventaja de las características geométricas del dominio).

2.2.2.- MÉTODOS DE PARAMETRIZACIÓN Ó MAPEO

La malla final es el resultado de la transformación inversa de un **conjunto** regular de puntos en un espacio paramétrico a un espacio físico. Esta clase se puede dividir en dos enfoques principales, dependiendo de si la función de mapeo esté definida implícita o explícitamente:

- Métodos de interpolación algebraica. En este caso la malla es obtenida usando una interpolación de curvas de frontera ó otras técnicas definidas explícitamente.

- Métodos basados en soluciones. En este caso la malla es generada basada en la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales (elípticas, hiperbólicas o parabólicas), basándose en una función definida analíticamente.

2.2.3.- MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN DE DOMINIO

La malla es resultado de un análisis de principio a fin que consiste en dividir el dominio para ser mallado en dominios de menor tamaño, geoméricamente cercano a un dominio de referencia (en términos de forma). Dos enfoques principales han sido propuestos, siendo la diferencia entre ellos la naturaleza estructurada o inestructurada de la malla usada para cubrir los dominios de menor tamaño:

- Métodos de descomposición de bloque. En estos métodos el dominio es descompuesto en varios sub-dominios más simples (bloques), que son cubiertos con una malla estructurada, obtenida por ejemplo usando una técnica de mapeo.
- Métodos de descomposición espacial. En estos métodos se aproxima el dominio con la unión de celdas disyuntivas que son subdivididas para cubrir una región espacial del objeto. Cada celda es luego descompuesta en elementos de la malla.

2.2.4.- MÉTODOS DE INTERSECCIÓN DE PUNTOS Ó CREACIÓN DE ELEMENTOS

Los métodos de este tipo generalmente parten de una discretización de la frontera del dominio y principalmente consisten en crear e interceptar los nodos internos (elementos) en el dominio. “Advancing-front” (creación de elementos) y los métodos basados en la técnica de Delaunay (intersección de puntos), son métodos que pertenecen a esta clase.

2.2.5.- MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

En los métodos de esta clase la malla final es el resultado de integrar varias mallas mediante el uso de transformaciones geométricas o topológicas, donde cada una de las mallas es creada mediante la aplicación de cualquiera de los métodos anteriormente mencionados.

2.3.- GENERADORES DE MALLAS ESTRUCTURADAS

La idea básica común a todos los métodos de generación de mallas estructuradas consiste en mallar un dominio inicial, como una geometría simple, y mapear esta malla en un dominio físico definido por la discretización de frontera. El primer problema a resolver es donde colocar los puntos de la malla de manera que se logre un orden natural apropiado al problema a considerar. La discretización del dominio físico requiere cierto nivel de organización para que el computador pueda procesar de manera eficiente la solución de las ecuaciones diferenciales parciales. Esta organización es

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

generalmente provista a través de un sistema de coordenadas cartesianas o cilíndricas.

En teoría, dos procedimientos pueden ser usados para generar un sistema de coordenadas, las técnicas de interpolación algebraica y las técnicas basadas en soluciones de ecuaciones diferenciales parciales. Desde el punto de vista computacional, los métodos algebraicos clásicos son usualmente más rápidos que los métodos de ecuaciones diferenciales.

2.4.- GENERADORES DE MALLAS NO ESTRUCTURADAS

En general, es difícil obtener de manera completamente automática mallas estructuradas para geometrías complejas y arbitrarias. Una alternativa a las mallas estructuradas consiste en usar elementos simplificados como triángulos o tetraedros. Esta característica le da a la malla máxima flexibilidad para direccionar geometrías complejas, así como para controlar la distribución de los puntos en el mallado.

La generación de mallas no estructuradas involucra la creación de puntos y conectividades relevantes. Esto por lo general se logra a través de varias etapas, que pueden ser englobadas de la siguiente manera:

- Definición de las fronteras del dominio.
- Especificación de la función de distribución del tamaño de los elementos.
- Generación de la malla con respecto a las fronteras del dominio.
- Optimización de las formas de los elementos (opcional).

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

En general, estas técnicas de mallado no permiten obtener de manera directa mallas de buena calidad. Por lo tanto, un paso de post-proceso es requerido para optimizar la malla en relación a la forma de los elementos. Sin importar el tipo de método de generación de malla utilizado, se requieren técnicas de modificación de mallas geométricas y topológicas para poder obtener una malla con la calidad suficiente para cálculos computacionales de elementos finitos.

Tres enfoques principales pueden mencionarse al momento de hablar de la generación de mallas inestructuradas. Los métodos de descomposición espacial, el “Advancing-Front” y los métodos de tipo Delaunay.

2.5.- SUPERELEMENTOS

La técnica conocida con el nombre de los Superelementos, es un concepto que se debe a Zienkiewicz, O. C. y Phillips, D. V. [1], y básicamente consiste en la subdivisión de un elemento finito (Superelemento), en un número de elementos que estarán contenidos dentro de ese Superelemento. Para ello, se utiliza el concepto de interpolación dentro de un elemento de tipo isoparamétrico.

El concepto de elemento isoparamétrico, se basa en la utilización de las funciones de interpolación del elemento, para generar la geometría del mismo. Ello permite generar coordenadas dentro y sobre el elemento, mediante relaciones que ya se encuentran presentes en un programa de elementos finitos.

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

El aspecto fundamental de la técnica de los Superelementos se fundamenta en la división de los lados o caras de un elemento finito en un número dado de subdivisiones. Ello genera una malla o red dentro de dicho elemento (ver figura 2.1), que corresponde a la división del espacio de dicho elemento. Para ello se emplean los mismos conceptos de interpolación que dan lugar al método.

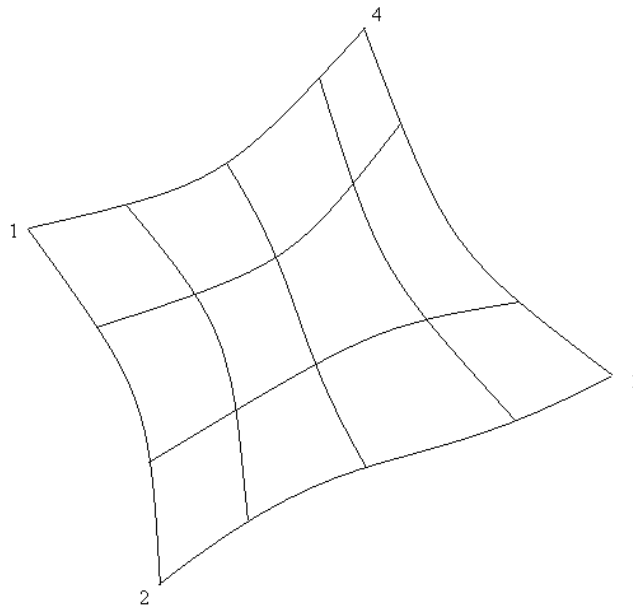


Figura 2.1: Generación de Superelementos en un elemento

Zienkiewicz, O. C. y Phillips, D. V. [1] propusieron esta técnica por primera vez, la cual se expandió rápidamente como metodología básica del método de elementos finitos. Las mismas funciones de interpolación que permiten evaluar las magnitudes en el interior del elemento a partir de sus valores nodales, pueden ser utilizadas para generar un conjunto de coordenadas dentro del elemento. Tomar como ejes de referencia los lados del elemento, es lo que permite establecer una división del elemento original, en elementos

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

internos a él. Este concepto puede ser aplicado en dos y tres dimensiones, y de allí su atractivo.

Para explicar la implementación de la técnica del súper elemento se presenta primero como ejemplo el caso bidimensional, para lo cual se toma un elemento de cuatro lados (cuadrilátero), cuyos lados perpendiculares, son paralelos a un sistema de coordenadas (x,y) . Ello define dos direcciones ortogonales en este elemento de referencia. Cada uno de esos dos lados se puede dividir en un número dado de segmentos, lo cual genera una retícula de puntos dentro del elemento, generando así un conjunto de elemento cuadriláteros dentro del mismo. Definiendo de manera adecuada y sistemática las conectividades de los elementos generados, se tiene un procedimiento, indicado aquí para un elemento de lados rectos, alineado con los ejes (x,y) se puede extender a cuadriláteros de lados curvos en cualquier posición, aplicando las ecuaciones de interpolación del elemento isoparamétrico. De esta manera, se tiene un esquema de generación para elementos de forma y orientación arbitraria.

Estos conceptos pueden aplicarse por igual en elementos tridimensionales (hexaedros), permitiendo así la generación de mallas tridimensionales (ver figura 2.2).

CAPITULO II: GENERACIÓN DE MALLAS Y SUPERELEMENTOS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

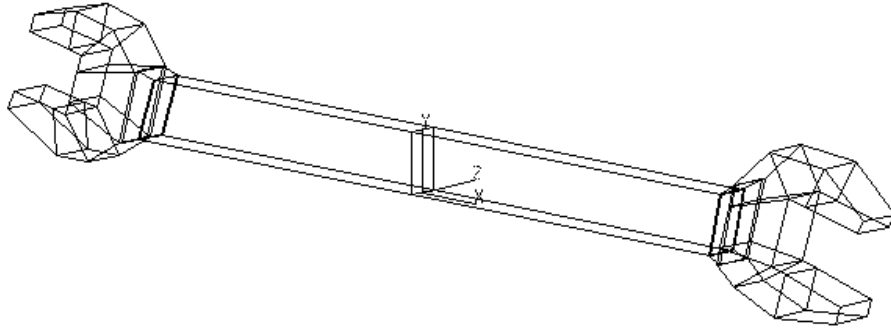


Figura 2.2: Superelementos en elementos tridimensionales.

Una propiedad de esta técnica es que es posible establecer una relación entre un Superelemento y los elementos que dentro de él se generan, es decir, una relación “padre-hijo”. Esto permite que los elementos generados puedan “heredar” algunas propiedades que se consideran de interés, como por ejemplo condiciones de borde y propiedades del material.

3.1.- FUNCIONES DE INTERPOLACIÓN

Luego de discretizado el continuo mediante el uso del método de los Superelementos, la idea es tomar un conjunto de funciones, que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos del mismo. Conocidos los desplazamientos de todos los puntos del elemento, se pueden determinar las deformaciones en cualquier punto. Estas funciones son las llamadas funciones de interpolación.

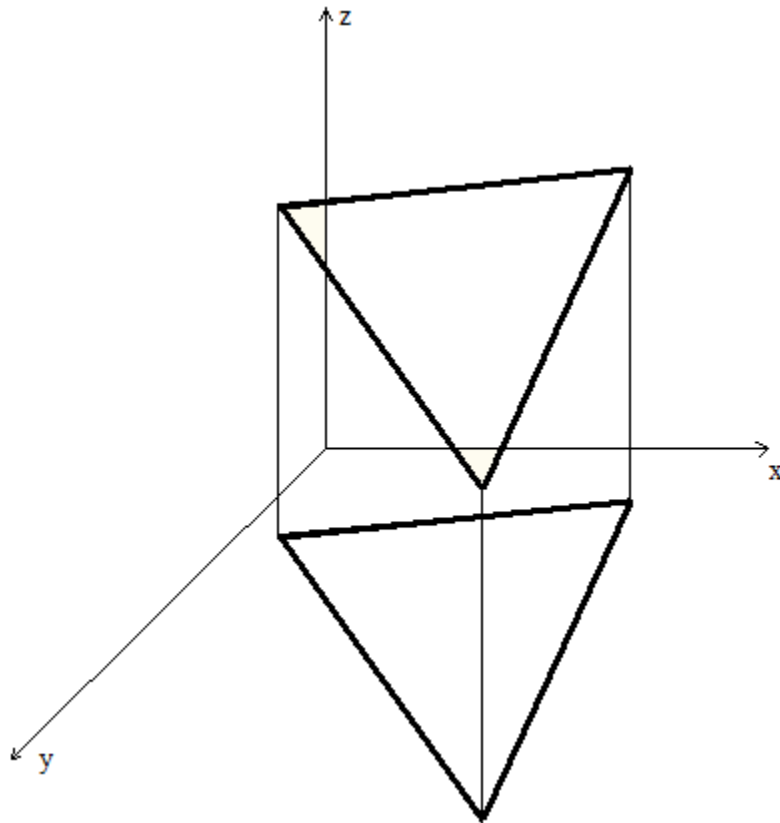


Figura 3.1: Interpolación lineal de un elemento triangular.

3.2.- FAMILIA SERENDIPITY [48]

Este tipo particular de funciones de interpolación fueron deducidas originalmente por mera observación, por tanto, fue apropiado llamar a esta familia “Serendipity” por referencia al famoso Príncipe de Serendip, célebre por sus descubrimientos fortuitos. Estas funciones dependen de valores nodales situados en el contorno, es decir, no requieren que se definan nodos internos a la figura a diferencia de las funciones lagrangianas en las cuales sí se incluyen nodos internos.

Si nos fijamos en la figura 3.2, se observa que hay el mismo número de nodos en cada lado. Para asegurar la continuidad, la variación de la función en cada lado es de segundo orden. Estos elementos como se puede observar corresponden al caso bidimensional, y se pueden denominar como elementos rectangulares.

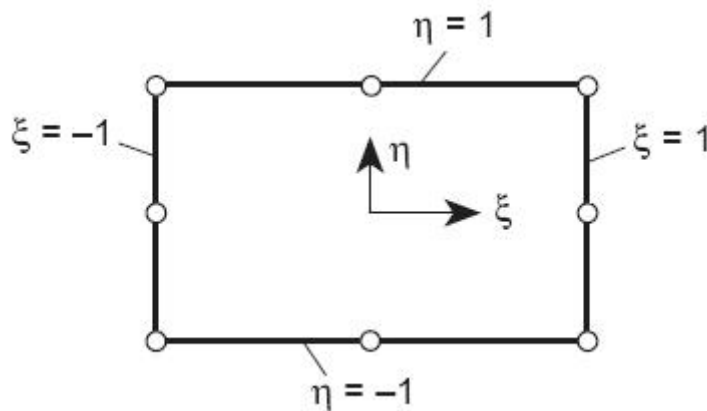


Figura 3.2: Rectángulo de la familia (Serendipity) de nodos en el contorno cuadrático [48]

CAPITULO III: FUNCIONES DE INTERPOLACION (SERENDIPITY)

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

A continuación se presentan las funciones de interpolación, tanto para los nodos laterales como para los vértices, correspondientes a un elemento cuadrático de 8 nodos.

➤ En los nodos de los vértices:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(\xi_i \xi + \eta_i \eta - 1) \quad (3.1)$$

➤ En los nodos laterales:

$$\xi_i = 0 \quad N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta) \quad (3.2)$$

$$\eta_i = 0 \quad N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi_i \xi)(1 + \eta^2) \quad (3.3)$$

Un elemento de prismas rectangulares como el representado en la figura 3.3 es precisamente equivalente a la representada en la figura 3.2, pero para el caso tridimensional.

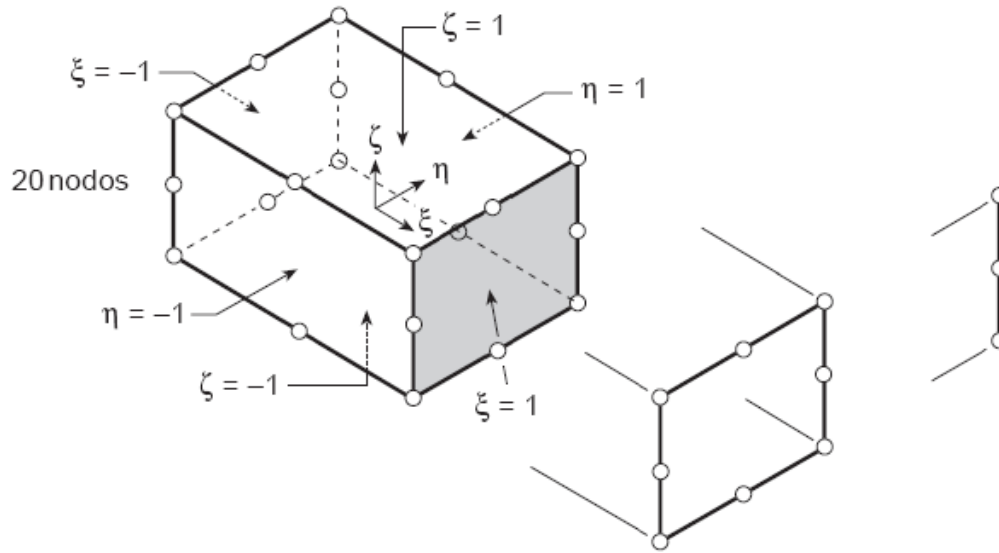


Figura 3.3: Prisma rectangular de la familia (Serendipity) de nodos en el contorno cuadrático con los elementos de cara y líneas correspondientes [48]

Utilizando ahora tres coordenadas normalizadas y siguiendo la terminología de la sección anterior se presentan las funciones de interpolación, tanto para los nodos intermedios como para los vértices, correspondientes a un elemento cuadrático de 20 nodos.

➤ En los nodos de los vértices:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta)(\xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta - 2) \quad (3.4)$$

➤ En los nodos intermedios:

$$\xi_i = 0, \eta_i = \pm 1, \zeta_i = \pm 1 \quad N_i = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad (3.5)$$

$$\xi_i = \pm 1, \eta_i = 0, \zeta_i = \pm 1 \quad N_i = \frac{1}{4} (1 - \eta^2) (1 + \xi_i \xi) (1 + \zeta_i \zeta) \quad (3.6)$$

$$\xi_i = \pm 1, \eta_i = \pm 1, \zeta_i = 0 \quad N_i = \frac{1}{4} (1 - \zeta^2) (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) \quad (3.7)$$

3.3.- ELEMENTOS ISOPARAMÉTRICOS [49]

Son aquellos elementos cuyas geometrías y variables de campo son descritas por las mismas funciones de interpolación y del mismo orden. Estos elementos han sido utilizados con gran éxito en la resolución de problemas de elasticidad en dos y tres dimensiones. Estos elementos se han vuelto populares por dos razones principalmente:

- El concepto que define un elemento isoparamétrico puede ser extendido para entender todos los elementos isoparamétricos.
- Los elementos isoparamétricos cuadráticos o de orden mayor pueden tener lados rectos o curvos, por lo tanto pueden ser utilizados para idealizar regiones con fronteras curvas.

CAPITULO IV: CONDICIONES DE BORDE EN LA GENERACIÓN DE MALLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

4.1.- CONDICIONES DE BORDE EN LA SIMULACIÓN

La imposición de las condiciones de desplazamientos o cargas conocidas a una malla es lo que hace la diferencia entre una simple cuadrícula y la representación de un problema físico. De aquí la importancia fundamental de la correcta interpretación de las condiciones del problema y su posterior transferencia a la malla inicial de Superelementos. Es en este paso donde se le da relevancia al contorno de la figura y donde se definen cuales regiones del mismo van a estar limitadas en su desplazamiento o sometidas a la acción de una carga para modelar de manera exitosa el problema propuesto.

4.2.- EL PROBLEMA DE LA ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE BORDE

El aspecto básico de la generación de condiciones de borde se puede plantear de la manera siguiente:

Sea M_i una malla inicial, creada por la división de una región dada en Superelementos, y sea ∂M_i su contorno. Si la dimensionalidad de M_i es n , entonces, el orden de ∂M_i es $n-1$. En esa malla, se asignan condiciones de borde a una parte de su contorno, es decir, a un subconjunto de ∂M_i , que llamaremos XXX, como se muestra en la figura 4.1.

CAPITULO IV: CONDICIONES DE BORDE EN LA GENERACIÓN DE MALLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

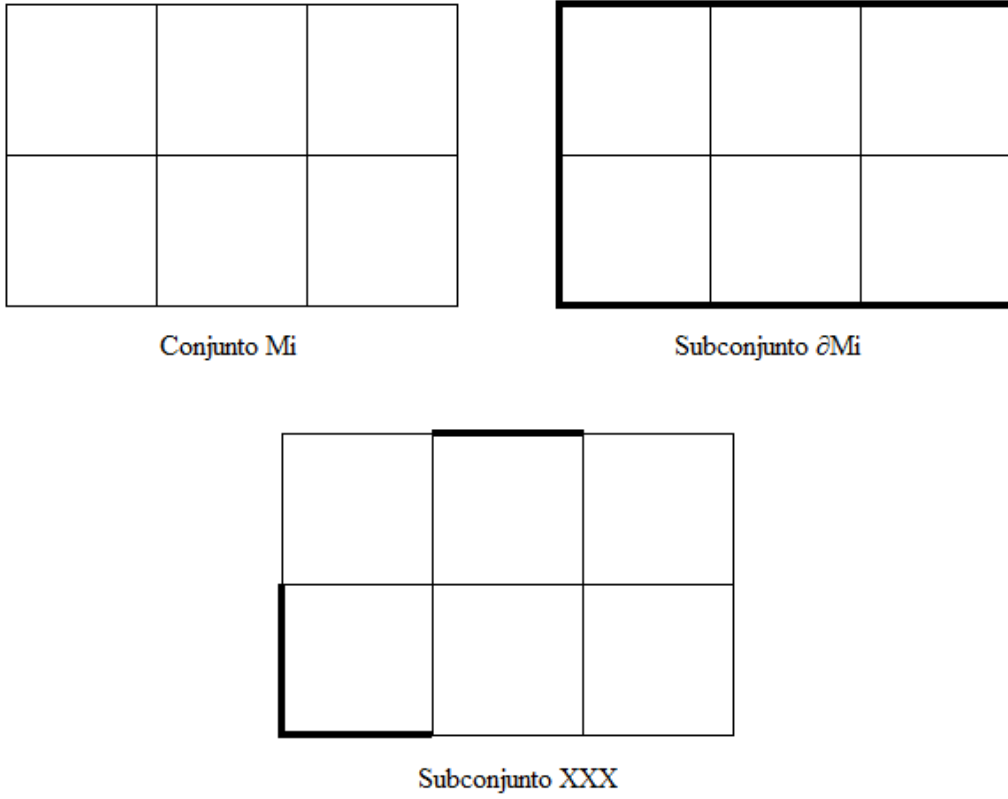


Figura 4.1: Conjunto y subconjunto de condiciones de borde.

Por otra parte, sea M_g una malla generada, creada por la división de cada uno de los elementos de M_i , y sea ∂M_g su contorno, como se muestra en la figura 4.2.

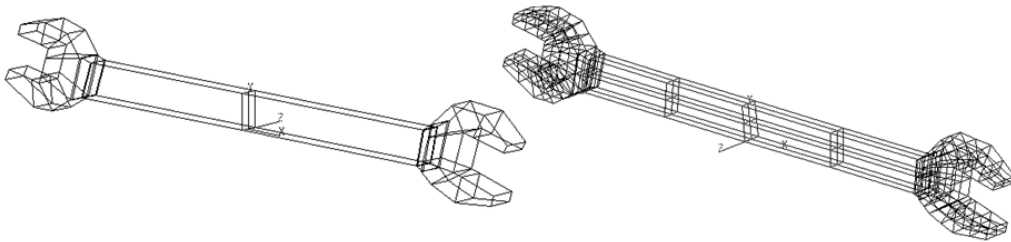


Figura 4.2: Malla inicial → Malla generada

CAPITULO IV: CONDICIONES DE BORDE EN LA GENERACIÓN DE MALLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

La generación de condiciones de borde en M_g consiste en transferir la información de las condiciones de borde correspondiente al subconjunto XXX de EC_i , a otro subconjunto YYY que corresponde a las entidades de contorno de M_g que están contenidas en XXX.

Entonces, el problema consiste en determinar el subconjunto YYY, a partir de la información en ∂M_i .

Se puede considerar que el problema de generar condiciones de borde consiste en tomar como punto de partida, la malla inicial del Superelemento (M_i), en el cual se han definido las condiciones de borde correspondientes, dependiendo del fenómeno que se desea modelar, entonces, el problema se puede plantear como la “transmisión” de las condiciones de borde desde la malla inicial (EC_i), a los elementos correspondientes de la malla generada (EC_g).

Conceptualmente, se puede plantear el problema de la generación de condiciones de borde de la siguiente manera: Sea C_i una cara de la malla inicial, sobre la cual se especifican condiciones de borde. Entonces, el problema de la generación de condiciones de borde consiste en encontrar el conjunto C_j formado por todas las caras de la malla generada, que coincidan con C_i . La asignación de condiciones de borde en C_j consiste en que todas las C_j heredan las condiciones de borde de la C_i .

CAPITULO IV: CONDICIONES DE BORDE EN LA GENERACIÓN DE MALLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

4.3.- ANALOGÍAS ENTRE LAS CONDICIONES DE BORDE EN LOS DIFERENTES TIPOS DE PROBLEMAS

En la Tabla 4.1 se ilustran algunas de las analogías existentes entre las variables utilizadas por el método de elementos finitos para el estudio de problemas de elasticidad y transferencia de calor.

Tabla 4.1: Analogías entre las condiciones de borde

PROBLEMA	ELASTICIDAD	TRANSFERENCIA DE CALOR
VARIABLE NODAL	Desplazamiento	Temperatura
ACCIONES NODALES INTERNAS	Fuerzas Internas	Flujo de calor interno
CARGAS	Fuerzas externa aplicada	Flujo de calor en las fronteras

4.4.- TIPOS DE CONDICIONES DE BORDE

Para que un generador de malla de elementos finitos sea de utilidad, es necesario que se conecte de manera directa con la fase de cálculo, es decir, el solucionador de elementos finitos. Para ello, además de proveer la información referente a la división del dominio espacial, es necesario dar la información referente a condiciones de frontera, también llamadas condiciones de borde. Estas condiciones pueden ser de los siguientes tipos:

- Acciones externas: Cargas, Flujos de Calor

CAPITULO IV: CONDICIONES DE BORDE EN LA GENERACIÓN DE MALLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- Consecuencias Nodales: desplazamientos, temperaturas.

Estas condiciones deben ser prescritas para que la resolución del problema, como problema de física matemática, pueda quedar completamente planteada. De no ser así, el problema queda indeterminado, por lo cual no tiene solución. Un ejemplo de esto ocurre, cuando en problemas de estática, no se indica el número suficiente de grados de libertad prescritos, lo cual se manifiesta numéricamente en la matriz del sistema indefinida.

El primer tipo se aplica sobre grados de libertad que estén LIBRES. El segundo tipo se aplica sobre grados de libertad que estén RESTRINGIDOS, o mejor dicho, todos los grados de libertad sobre los que se apliquen condiciones de borde del segundo tipo, se consideran RESTRINGIDOS. Ello se debe a que ese tipo de variable corresponde a la solución del sistema de global de ecuaciones, y al tener un valor previamente establecido, no participan en el proceso de solución.

Desde el punto de vista de la programación, los tipos de condiciones mencionadas se manejarán de la manera siguiente:

- Cinemáticas: Números enteros. Esto presume solo dos valores (Libre/Restringido).
- Fuerzas: Números reales (magnitud de la fuerza).

En un nodo dado, puede darse el caso de que sus diferentes grados de libertad tengan diferentes tipos de condiciones de borde. Por ejemplo, en el problema de la placa con el agujero, los grados de libertad que llevan carga

CAPITULO IV: CONDICIONES DE BORDE EN LA GENERACIÓN DE MALLAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

deben ser libres, mientras los que están apoyados se consideran restringidos.

En un programa de elementos finitos, las condiciones de borde se manejan a nivel de nodos. Por otra parte, en la fase de generación de la malla, es conveniente manejar las condiciones de borde en forma distribuida a nivel de cara/arista de la malla inicial, y que sea el programa de generación el que se encargue de transferir dicha información a los nodos generados. Por lo tanto, un punto que merece consideración especial, es entonces el manejo de condiciones de borde durante la creación de la malla.

5.1.- PROGRAMAS *Genera2D* y *Genera3D*

Estos son los programas que se encarga de la generación de las mallas, en el caso bidimensional y tridimensional respectivamente. En este capítulo se detallan las principales rutinas y subrutinas que los conforman, así como el funcionamiento de cada una de ellas. Es de notar que ambos programas poseen la misma estructura base y que la diferencia principal se nota en el uso en el caso bidimensional del término lado y el caso tridimensional del término cara.

Todo programa debe cumplir con una estructura previamente determinada para que lleve a cabo la ejecución de las rutinas en el orden correcto. Esto permite asegurar que los datos necesarios para que cada subrutina funcione correctamente sean generados y estén correctamente definidos. En la figura 5.1 se presenta el árbol de llamadas de las principales subrutinas para el programa *Genera2D*. El programa *Genera3D* tiene una estructura muy similar a su par bidimensional y como se puede observa en la figura 5.2 también parte de rutina *Principal*.

5.1.1.- RUTINA *Principal*

Los programas *Genera2D* y *Genera3D* están compuestos por una rutina *Principal* y una serie de subrutinas, cada una con una función específica, que permiten la ejecución del mismo. Durante la ejecución de la rutina *Principal*, la misma hace llamadas a dichas subrutinas, las cuales a su vez, llaman a otras que cumplen una función específica para alcanzar el resultado deseado. La función de la rutina *Principal* es dar estructura al programa y realizar las llamadas a las

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

subrutinas en el orden correcto. Esta secuencia de llamadas se detalla en los árboles ya mencionados.

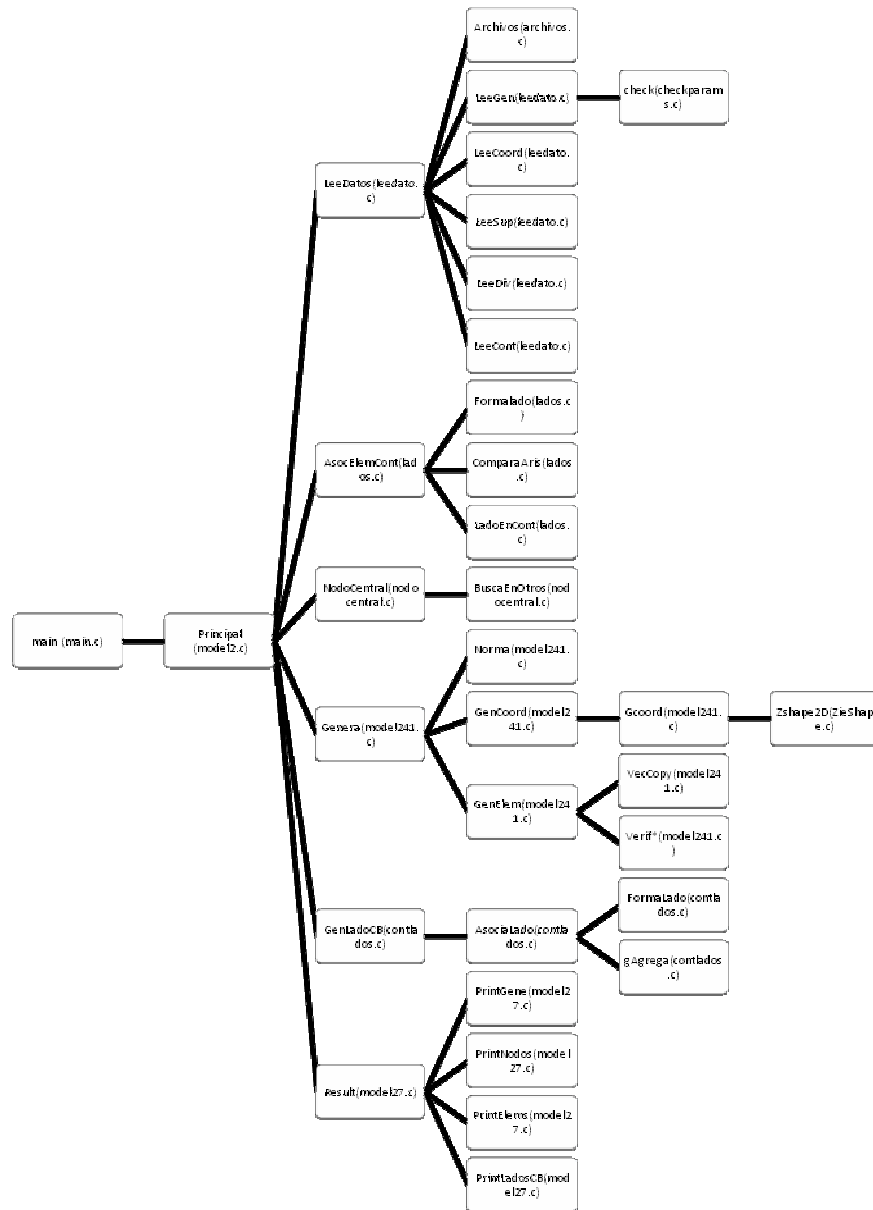


Figura 5.1: Árbol de llamadas programa Genera2D

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos



Figura 5.2: Árbol de llamadas programa Genera3D

5.1.2.- SUBROUTINA *LeeDatos*

Esta subrutina es la encargada en primer lugar de preparar los archivos que van a ser manejados por el programa, de acuerdo a lo que se desee realizar, tanto lectura como escritura de los mismos. Luego de realizada esta tarea la subrutina se encarga de obtener la información del archivo de datos previamente generado por el usuario y almacenarlos en estructuras para que luego puedan ser utilizados por otras subrutinas del programa. La correcta elaboración de este archivo para que pueda ser interpretado por esta subrutina se detalla en el apéndice C de este trabajo. Las dos estructuras principales generadas por esta rutina son:

- *lnodb []*: donde se almacenan todos los Superelementos, su número identificador, el material y los nodos que definen los lados o las caras que lo conforman. En la figura tal se muestra la manera como se almacenan los datos siendo el primer caso de Genera2D y el segundo de Genera3D.

Tabla 5.1: Arreglo *lnodb []*

Lnodb []									
K	Mat	n[]							
1	1	1	2	3	4	0	0	0	0
2	1	2	6	5	3	0	0	0	0
K	Mat	n[]							
1	1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	1	2	11	12	3	6	9	10	7

- *sArisCB []* (*Genera2D*): donde se almacenan los nodos que forman las aristas con condiciones de borde que luego van a constituir el conjunto

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

de los lados de contorno con condiciones de borde. También contiene la información sobre el tipo de condición de borde y su valor en el caso de cargas.

Tabla 5.2: Arreglo *sArisCB []*

<i>sArisCB[]</i>					
K	n[]			tipo	
1	3	4	1	2.0	3.0
2	4	1	0	0.0	1.0

sCaraCB [] (*Genera3D*): donde se almacenan los nodos que forman las caras con condiciones de borde que luego van a constituir el conjunto de las caras de contorno con condiciones de borde. De la misma manera que en caso bidimensional, este arreglo contiene la información del tipo de condición de borde y su valor en el caso de cargas.

Tabla 5.3: Arreglo *sCaraCB []*

sCaraCB[]									
K	n[]					tipo	cbx	cby	cbz
1	13	14	5	8	0	1.0	5.0	5.0	
2	6	7	5	8	1	3.0	3.0	3.0	

5.1.3.- SUBROUTINA *AsocElemCont*

Esta subrutina es de vital importancia para la posterior transferencia de las condiciones de borde a la malla generada. La misma se encarga de generar un arreglo dentro de la estructura *lnodb []* donde se almacenan los lados, en el

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

caso 2D, o las caras, en el caso 3D, de contorno haciendo uso de la información suministrada mediante el archivo de datos.

Para cada Superelemento definido en el archivo de datos, el programa *Genera2D* crea un lado que luego es comparado con la información contenida en la estructura *sArisCB []*. Si este lado coincide con uno de los lados definidos en la estructura mencionado, el programa coloca un marcador en la estructura *lnodb []*, indicando cual lado del Superelemento, que se está verificando en el momento, es de contorno.

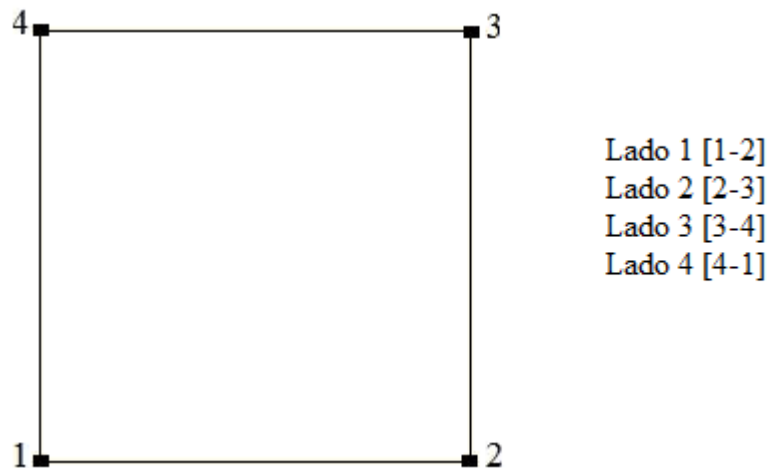


Figura 5.3: Lados definidos en la estructura *Genera2D* para un Superelemento.

En el caso tridimensional, el programa *Genera3D* realiza una operación similar, creando una cara en este caso y comparándola con las caras almacenadas en la estructura *sCaraCB []*. De la misma manera que en el caso anterior se coloca un marcador en la estructura *lnodb []* indicando cual cara del Superelemento en cuestión posee condiciones de borde.

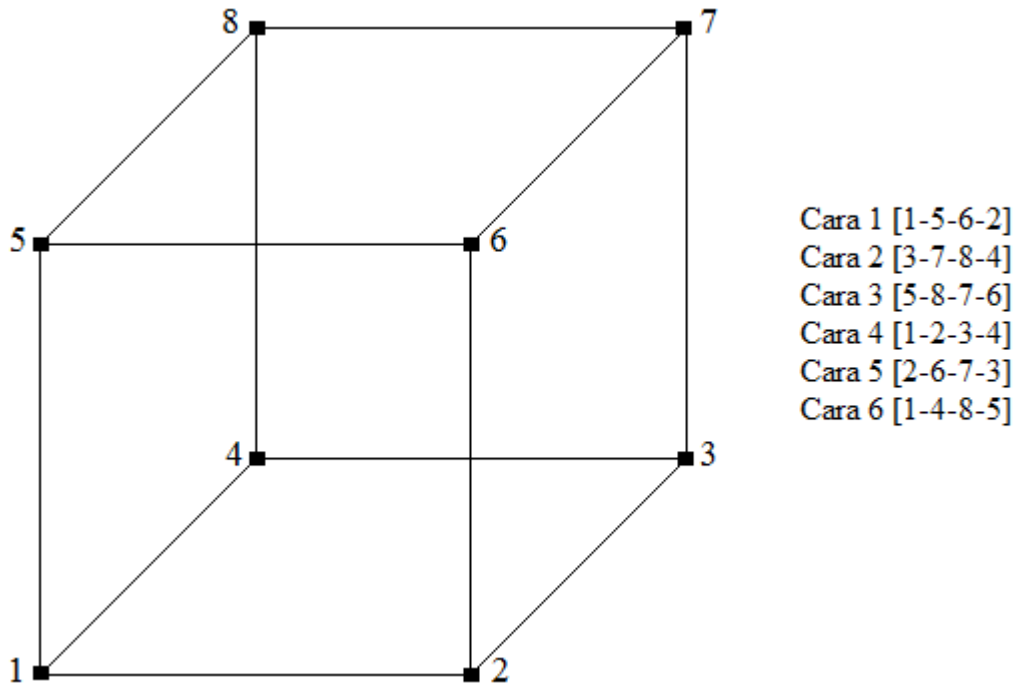


Figura 5.4: Caras definidas en la estructura Genera3D para un Superelemento.

5.1.4.- SUBROUTINA *NodoCentral*

Subrutina complementaria que se encarga de verificar que los Superelementos introducidos por el usuario estén completamente definidos, es decir, sean cuadriláteros de 8 nodos (2D) o hexaedros de 20 nodos (3D). En caso contrario, se encarga de generar los nodos intermedios faltantes para cada uno de los Superelementos definidos por el usuario.

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

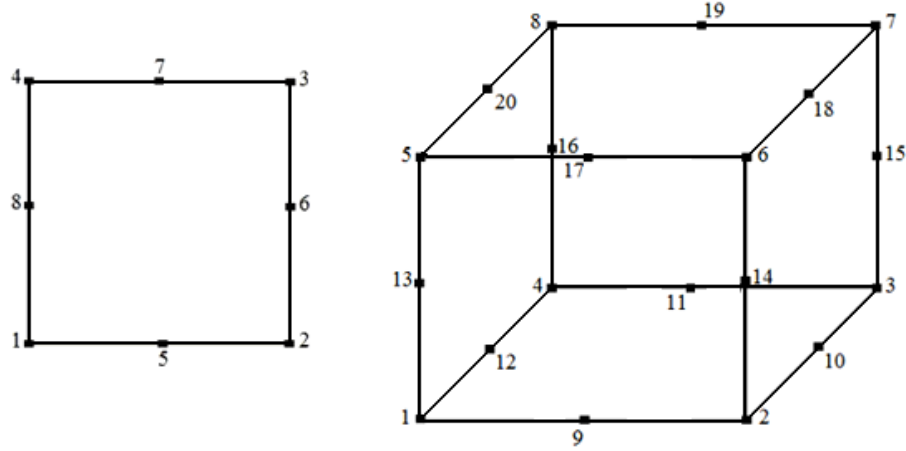


Figura 5.5: Cuadrilátero de 8 nodos y Hexaedro de 20 nodos

Es importante notar, como se explica en el apéndice C, que no es necesario que el usuario introduzca los nodos intermedios de los elementos a definir para que el programa pueda interpretar el archivo de datos original, ya que con esta rutina los elementos son completados de manera automática.

Empezando por el primer Superelemento, para cada arista o lado en específico, esta rutina genera un nuevo nodo por interpolación lineal entre los nodos de los vértices que luego compara con los nodos que definen la misma arista. En caso de no encontrar coincidencia agrega las coordenadas del nuevo nodo a la lista de nodos y lo relaciona a la arista y al Superelemento en cuestión.

$$X_{\text{NodeCentral}} = \left(\frac{X_{\text{vertex a}} + X_{\text{vertex b}}}{2.0} \right) \quad (5.1)$$

5.1.5.- SUBROUTINA *Genera*

Esta subrutina es la encargada de la generación de los elementos solicitados a partir de los Superelementos por lo que se puede decir que es el alma del programa. Para la generación de los elementos en el Superelemento se utilizan los cuadriláteros (rectángulo) y hexaedros (prisma rectangular) expuestos en el capítulo III, iniciando la generación en la coordenada local (-1,-1) (*Genera2D*) ó (-1,-1,-1) (*Genera3D*). Lo primero que hace esta subrutina es definir las divisiones entre cada elemento estableciendo la norma por la cual se rige la creación del siguiente punto, tomando como base el elemento de coordenadas locales con cada lado de magnitud 2.

- Norma para los vértices:

$$xnorm = 2 / ndiv[X] \quad (5.2)$$

$$ynorm = 2 / ndiv[Y] \quad (5.3)$$

$$znorm = 2 / ndiv[Z] \quad (5.4)$$

- Norma para los nodos intermedios:

$$xnormm = xnorm/2 \quad (5.5)$$

$$ynormm = ynorm/2 \quad (5.6)$$

$$znormm = znorm/2 \quad (5.7)$$

Donde *ndiv* es el número de divisiones respecto a cada eje de coordenadas ingresado en el archivo de datos y *xnormm*, *ynormm* y *znormm* son separaciones de los nodos de los vértices a los nodos intermedios.

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Luego de esto el programa procede a determinar el valor máximo de los marcadores que se van a usar para determinar la posición del elemento que se está generando y permitir a las rutinas *GenLadoCB* y *GenCaraCBt* transferir las condiciones de borde. El valor máximo valor de estas variables se determina de la siguiente manera:

$$nrows = ndiv[Y] + 1 \quad (5.8)$$

$$ncols = ndiv[X] + 1 \quad (5.9)$$

$$npags = ndiv[Z] + 1 \quad (5.10)$$

La subrutina *Genera* hace uso a su vez de dos subrutinas muy importantes, *GenCoord* y *GenElem*. Es importante tener claro que esta subrutina solo genera el conjunto de nodos y los elementos que van a formar la malla final, pero en este momento todavía no es transferida ninguna información sobre las condiciones de borde.

En la generación de Superelementos la figura dividida en varias subregiones, con la aplicación de elementos isoparamétricos en forma de cuadriláteros de 8 nodos o hexaedros de 20 nodos, las coordenadas x, y, y z (para el caso tridimensional) de un punto que pertenece al Superelemento son relacionadas a la coordenada natural de la siguiente manera:

$$X = \sum_{i=1}^k N_i x_i \quad (5.11)$$

$$Y = \sum_{i=1}^k N_i y_i \quad (5.12)$$

$$Z = \sum_{i=1}^k N_i z_i \quad (5.13)$$

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

En donde $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ es la función de forma asociada con cada nodo definida en términos de un sistema de coordenadas curvilíneas ξ , η y ζ . El valor k del límite de la sumatoria viene dado por el número de nodos que componen el elemento de entrada, es decir, 8 nodos para el programa *Genera2D* y 20 nodos para el programa *Genera3D*.

La subrutina *GenCoord* es la encargada de generar todos los nuevos puntos con sus respectivas. Esta subrutina genera un arreglo temporal de 8 nodos (*Genera2D*) ó 20 nodos (*Genera3D*) haciendo uso de las funciones de interpolación descritas en el capítulo III y usando la norma descrita anteriormente para los vértices y los nodos intermedios. Quedando uno de los elementos generados como se muestra en la figura 5.6.

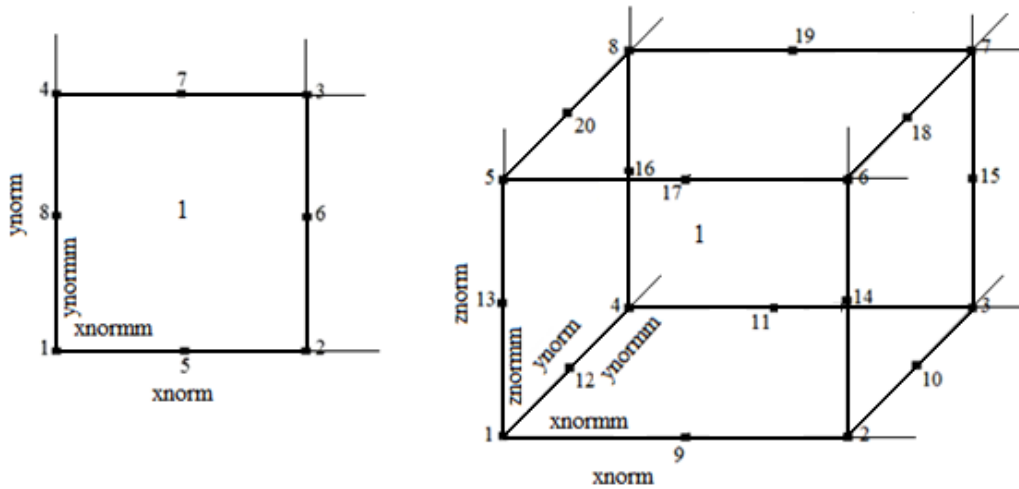


Figura 5.6: Arreglo temporal de 8 nodos y 20 nodos en el primer elemento de un Superelemento.

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

La subrutina *GenElem* es la encargada de generar los respectivos elementos a partir de los nodos generados por la subrutina anterior en el debido orden. Esta rutina también es la encargada de generar un arreglo donde se guarda la relación entre el elemento generado y el Superelemento del cual proviene.

Para lograr esto lo primero que realiza esta subrutina es verificar si los nodos que se generaron en *GenCoord* coinciden con los nodos de la malla inicial para evitar que se genere información duplicada que afecte el número total de nodos que van a definir la malla final. *GenElem* compara las coordenadas de los nodos generados con los ya existentes de la siguiente manera:

Si se cumple que:

$$|(x, y, z)_{\text{nodo generado}} - (x, y, z)_{\text{nodo existente}}| \leq 0.000001 \quad (5.14)$$

Entonces, el nodo generado se considera como existente, en caso contrario el mismo se agrega a la lista de nodos de la malla.

Luego de realizada esta verificación, la subrutina *GenElem* crea el arreglo *con[]* donde se almacena la posición del elemento generado dentro de la malla mediante los marcadores *row*, *col* y *pag*, así como el Superelemento del cual proviene. En la figura 5.7 se muestra la ubicación de un elemento genérico para el caso bidimensional. En las figuras 5.8 y 5.9, se muestra el orden de la generación que llevan a cabo las subrutinas *GenCoord* y *GenElem*.

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

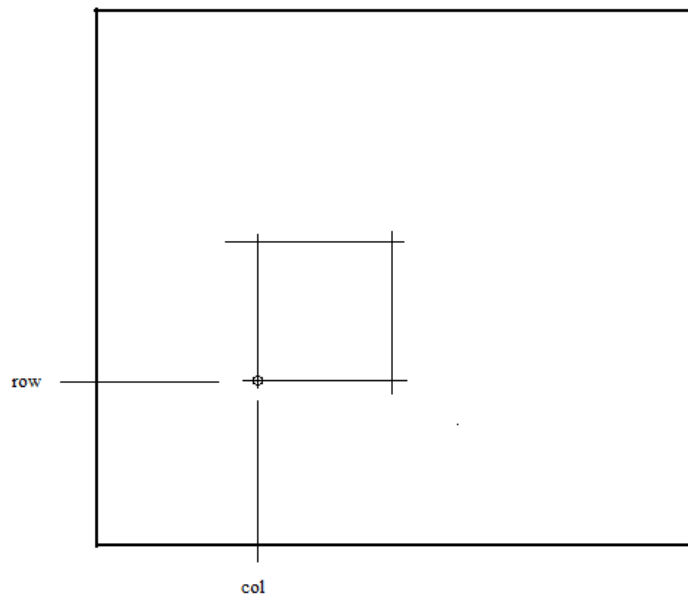


Figura 5.7: ubicación de un elemento genérico.

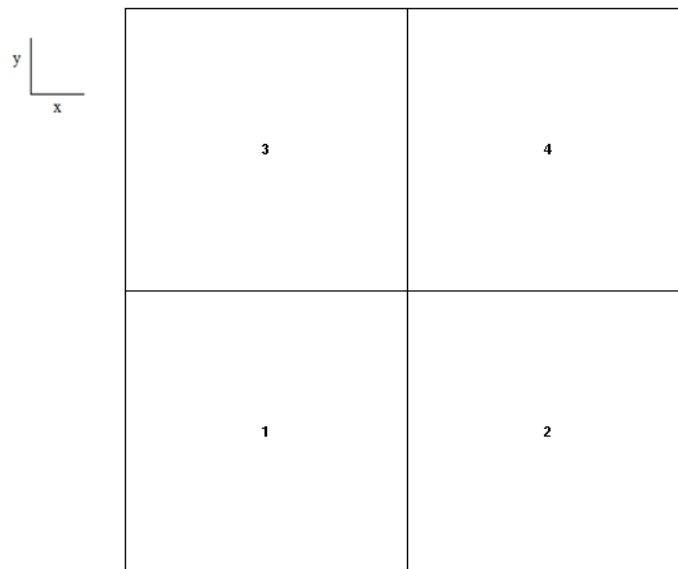


Figura 5.8: Orden de la generación de elementos en un Superelemento 2D con divisiones 2x2.

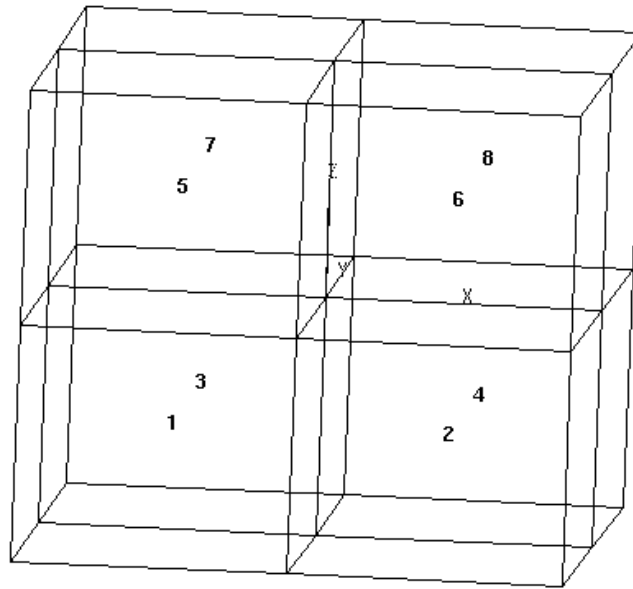


Figura 5.9: Orden de la generación de elementos en un Superelemento 3D con divisiones 2x2x2.

5.1.6.- SUBROUTINAS *GenLadoCB* y *GenCaraCBt*

Estas son las rutinas encargadas de transferir las condiciones de borde de los Superelementos ó elementos padre a los elementos generados en el caso bidimensional y tridimensional respectivamente, haciendo uso de la información contenida en el arreglo generado por la subrutina *GenElem*.

Estas rutinas procesan los lados o las caras de los elementos generados, determinado los lados o caras que coincidan con los lados o caras del Superelemento del cual provienen, excluyendo los lados o caras que se formen dentro del Superelemento. Si ese lado o cara del Superelemento pertenecen al contorno, estas rutinas se encargan de crear un lado o cara de contorno con el

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

lado o cara del elemento generado al cual se le copian las condiciones de borde correspondientes. Luego este lado o cara generada se agrega a la lista de contornos generados.

Haciendo uso de la información almacenada en el arreglo *con* [], estas rutinas proceden a verificar para cada Superelemento ó elemento padre solo las caras de contorno haciendo uso de los marcadores *row*, *col* y *pag*. Para ilustrar el procedimiento tomaremos como ejemplo un Superelemento bidimensional. En la figura 5.10 se muestra como estos marcadores permiten al programa solo concentrarse en las caras que son de contorno teniendo en cuenta lo siguiente: los lados de contorno están solo están definidos para los valores de *row=1*, *col=1*, *row=nrows* y *col=ncols*. Donde *nrows* y *ncols* son el número máximo de filas y columnas generadas en la subrutina *Genera*.

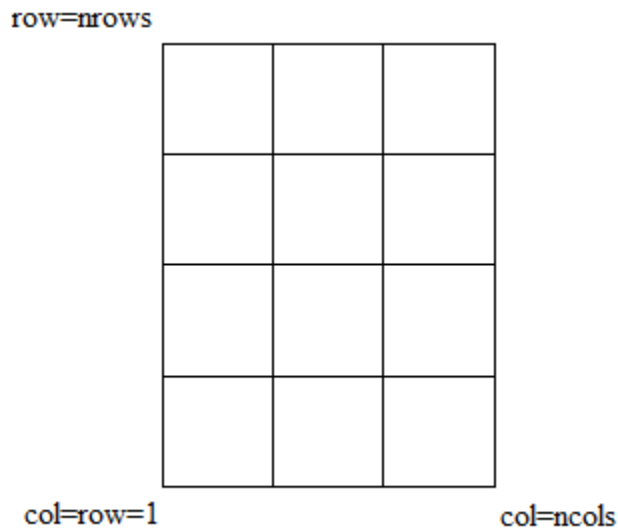


Figura 5.10: Superelemento genérico de 5 filas y 4 columnas.

CAPÍTULO V: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

De esta manera los programas pueden pasar por alto todos los lados internos que se generan. En la figura 5.11 se puede observar que un lado ubicado en $row=3$ y $col=2$, no forma parte del contorno.

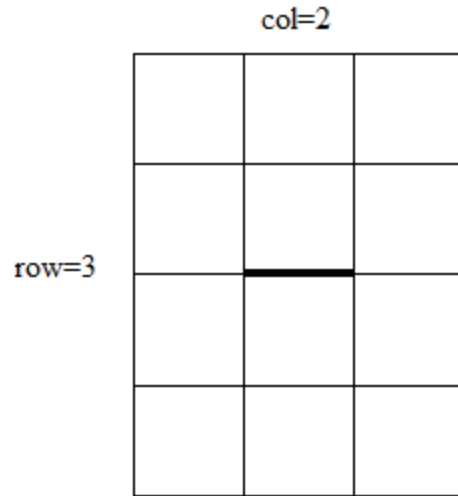


Figura 5.11: lado que no pertenece al contorno.

Para cada Elemento lado identificado como parte del contorno se procede a la transferencia de las condiciones del elemento padre previamente identificadas por la subrutina *AsocElemCont*.

Este procedimiento es similar en el caso tridimensional, pero con la introducción de las variables *pag* y *mpag*. Es importante notar que estas rutinas no modifican la información contenida en el arreglo de los elementos generados. Simplemente generan un nuevo arreglo que solo contiene los lados o caras que forman parte del contorno y que poseen condiciones de borde.

5.1.7.- SUBROUTINE *Result*

Esta rutina como su nombre bien lo indica es la encargada de imprimir la malla generada en un archivo tipo texto para que pueda ser utilizada por un resolutor de elementos finitos. En este archivo de resultados se especifican tanto los nodos generados como los elementos que los agrupan y las caras o lados que poseen condiciones de borde con sus respectivos valores. En el anexo 2 se muestran algunos ejemplos de archivos de resultados.

CAPÍTULO VI: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

6.1.- EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En este capítulo se muestra un archivo de datos y resultados de una geometría sencilla donde se pueden observar la transferencia de las condiciones de borde de la malla inicial de Superelementos a la malla generada. También se presentan dos ejemplos de geometrías más complejas.

6.1.1.- CUADRILÁTERO DE 2 SUPERELEMENTOS

```
ejemplo_tesis3
Datos_Generales
6 2 3 1
Nodos
1 -2.00 -2.00
2 2.00 -2.00
3 2.00 2.00
4 -2.00 2.00
5 8.00 2.00
6 8.00 -2.00
Elementos
1 1 1 2 3 4 0 0 0 0
2 2 2 6 5 3 0 0 0 0
Divisiones
1 2 2
2 2 2
Condiciones_de_Borde
1 3 4 1 2.0 3.0
3 2 6 1 1.0 1.0
```

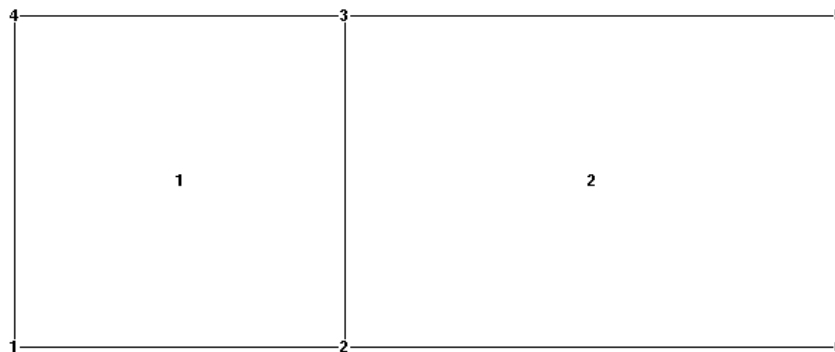


Figura 6.1: Separación de Superelementos generado en el dibujador dibm2d

CAPÍTULO VI: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas
de Elementos Finitos

```

ejemplo_tesis3
Datos_generales
  37      8      4      1
Nodos
  1  -2.000  -2.000
  2   0.000  -2.000
  3   0.000   0.000
  4  -2.000   0.000
  5  -1.000  -2.000
  6   0.000  -1.000
  7  -1.000   0.000
  8  -2.000  -1.000
  9   2.000  -2.000
 10   2.000   0.000
 11   1.000  -2.000
 12   2.000  -1.000
 13   1.000   0.000
 14   0.000   2.000
 15  -2.000   2.000
 16   0.000   1.000
 17  -1.000   2.000
 18  -2.000   1.000
 19   2.000   2.000
 20   2.000   1.000
 21   1.000   2.000
 22   5.000  -2.000
 23   5.000   0.000
 24   3.500  -2.000
 25   5.000  -1.000
 26   3.500   0.000
 27   8.000  -2.000
 28   8.000   0.000
 29   6.500  -2.000
 30   8.000  -1.000
 31   6.500   0.000
 32   5.000   2.000
 33   5.000   1.000
 34   3.500   2.000
 35   8.000   2.000
 36   8.000   1.000
 37   6.500   2.000
Elementos
  1   1   1   2   3   4   5   6   7   8
  2   1   2   9  10   3  11  12  13   6
  3   1   4   3  14  15   7  16  17  18
  4   1   3  10  19  14  13  20  21  16
  5   2   9  22  23  10  24  25  26  12
  6   2  22  27  28  23  29  30  31  25
  7   2  10  23  32  19  26  33  34  20
  8   2  23  28  35  32  31  36  37  33
Aristas_con_CB
  1   14  15   1   2.00  3.00
  2   19  14   1   2.00  3.00
  3    9  22   1   1.00  1.00
  4   22  27   1   1.00  1.00

```

CAPÍTULO VI: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

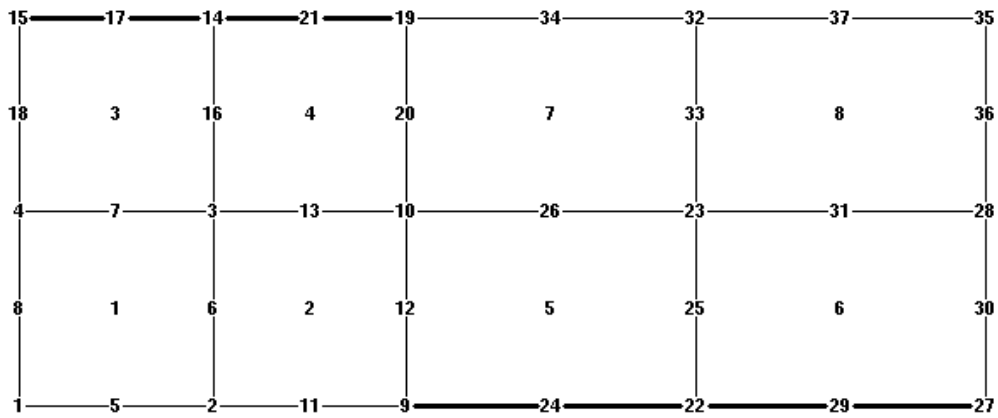


Figura 6.2: Malla final con Superelementos divididos 2x2 generado en el dibujador dibm2d

6.1.2.-Llave de 12mm y 13mm



Figura 6.3: Llaves hexagonales de diferentes tamaños

CAPÍTULO VI: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

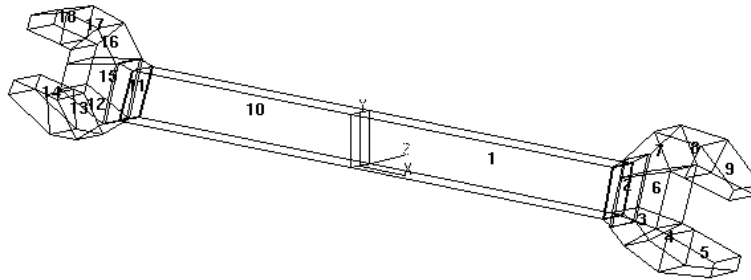


Figura 6.4: Separación de Superelementos en la llave de 12mm y 13mm generado en el dibujador Xdibm3d

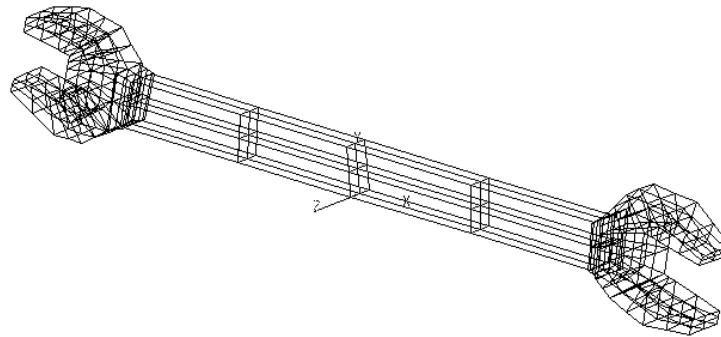


Figura 6.5: Malla final con Superelementos divididos 2x2x2 generado en el dibujador Xdibm3d

6.1.3.- EXCÉNTRICO DE ESCALADA

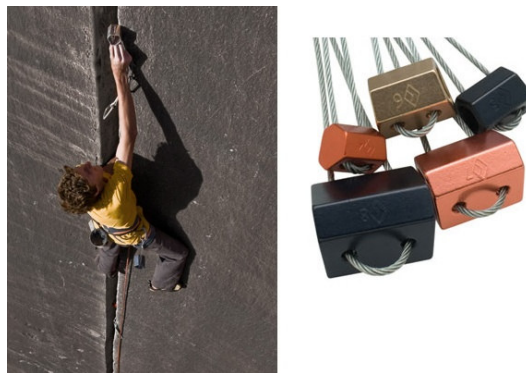


Figura 6.6: excéntricos de diferentes tamaños y colocación de un excéntrico.

CAPÍTULO VI: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

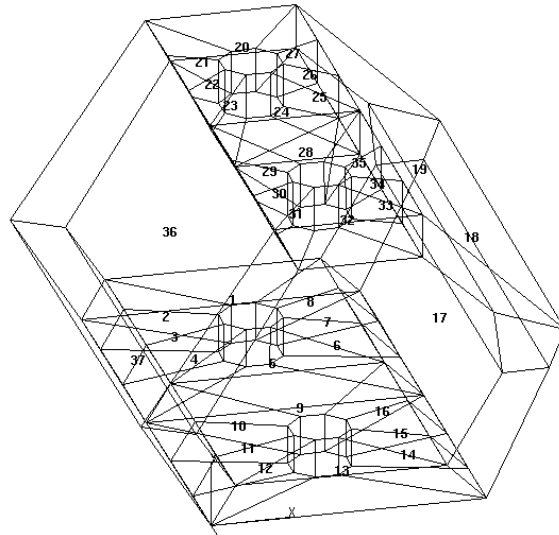


Figura 6.7: Separación de Superelementos en el excéntrico, generado en el dibujador Xdibm3d

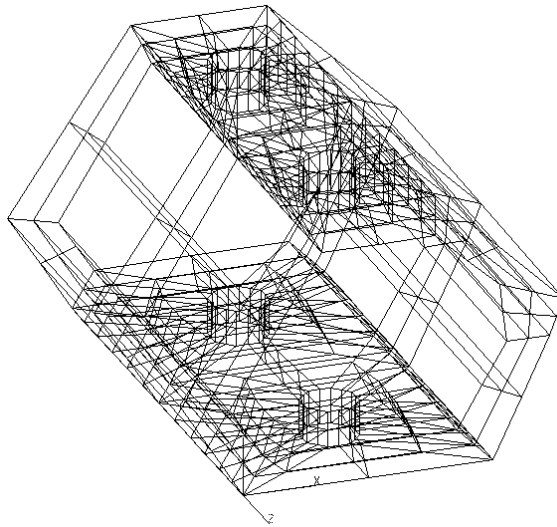


Figura 6.8: Malla final con Superelementos divididos 2x2x2, generado en el dibujador Xdibm3d

CONCLUSIONES

- Se obtuvieron dos programas que poseen la capacidad de transferir automáticamente las condiciones de borde de la malla inicial de Superelementos a los nuevos elementos de la malla generada.
- Los programas tienen la capacidad de transferir condiciones de borde de los siguientes tipos: acciones externas como cargas ó flujos de calor y consecuencias nodales representadas por desplazamientos ó temperaturas.
- Estos programas cuentan con la capacidad de generar mallas para cualquier geometría, tanto para el caso bidimensional como para el caso tridimensional.
- Con estos programas se cuenta ahora con un software que permite la conexión directa entre la fase de generación y la fase de análisis.
- El método de los Superelementos es particularmente útil para el modelado de geometrías rectangulares. En el caso de geometrías cilíndricas o circulares, el método es poco eficiente ya que para poder modelar de manera adecuada la geometría se hace necesaria la definición de un gran número de elementos en la etapa manual.
- El uso de números enteros para ubicar la posición de los elementos generados elimina los errores de redondeo y optimiza el uso de los recursos computacionales disponibles.
- Estos programas poseen la capacidad de transferir automáticamente las condiciones de borde de la malla inicial de Superelementos a los nuevos elementos de la malla generada.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- La utilización de un sistema de coordenadas en particular no influye en los resultados mientras se cumple el modo de ordenar los Superelementos.
- El archivo de resultados puede ser utilizado para reinsertarse en el programa para generar una malla con un número mayor de elementos.

RECOMENDACIONES

Con la finalidad de ampliar los alcances de este programa, en futuros trabajos se recomienda:

- Adecuar el archivo de salida para que la conectividad concuerde con la numeración usada en el programa *MEFET*.
- Elaborar una interfaz gráfica más amigable para el acceso al programa.
- Modificar los programas de dibujo *dibm2dX*, *dibm3d* y *GLdibm3d* para que puedan procesar cuadriláteros 8 nodos y hexaedros de 20 nodos.
- Fomentar el desarrollo de otras aplicaciones bajo ambiente Linux.
- Difundir el programa para que los usuarios aporten mejoras al código que contribuyan a la optimización del mismo.

APÉNDICES

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

APÉNDICE A

CONSIDERACIONES GENERALES

1. El archivo debe ser realizado en formato de texto.
2. Cada punto listado, tanto en el programa *Genera2D* y *Genera3D*, representa una línea en el archivo de texto.
3. Es importante que no se usen espacios en blanco, para separar palabras se debe usar el símbolo underscore (_).
4. Los datos numéricos se separan con espacios en blanco, la cantidad de espacios que se usen no afecta la correcta lectura de los datos.
5. El máximo número de lados con condiciones de borde por Superelemento es de dos y de caras son de tres.
6. La numeración inicial de los nodos de los Superelementos no se mantiene en la malla resultante. Se aplica la regla de numeración de apéndice anterior, reenumerando los nodos desde el primer elemento generado.
7. Se aconseja que el número de divisiones por Superelemento sea el mismo, para mantener la conectividad de la malla generada a transferir al resolutor.

APÉNDICE B

REGLAS PARA LA NUMERACIÓN DE LAS CONECTIVIDADES PARA UN SUPERELEMENTO

Asignar la conectividad a un elemento consiste simplemente en indicar los nodos que lo conforman en una secuencia determinada. A continuación se describen los pasos a seguir para la asignación de la conectividad para los Superelementos de entrada, tanto para el caso bidimensional como para el caso tridimensional.

- Cuadrilátero de cuatro (4) nodos: La numeración de la conectividad de este tipo de elementos, se realiza en sentido anti horario, comenzando por el nodo que se encuentra en la esquina inferior izquierda como se muestra en la figura B.1.

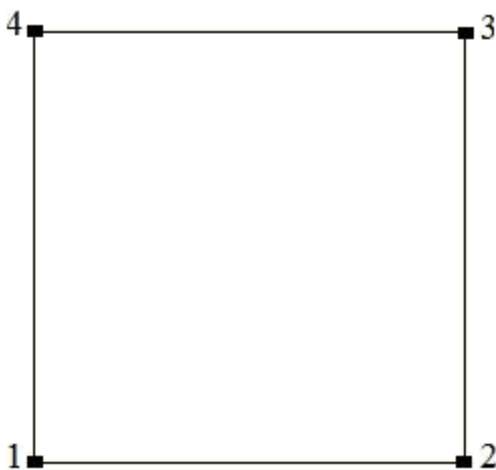


Figura B.1: Cuadrilátero de 4 nodos

- Hexaedro de ocho (8) nodos: para la numeración de la conectividad de los elementos de este tipo se puede como en el caso anterior a numerar los nodos en sentido antihorario. Empezando por el plano horizontal inferior y continuando al plano horizontal superior como se muestra en la figura B.2.

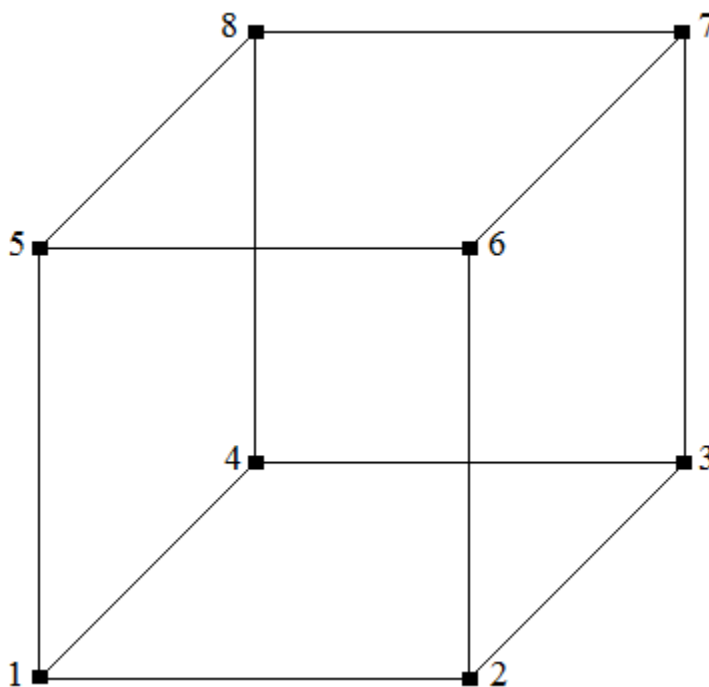


Figura B.2: Hexaedro de 8 nodos

Es importante tener en cuenta que para ambos casos lo que es relevante es mantener el orden de asignación de los nodos al construir el Superelemento, pero es indiferente el número que se le asigne al mismo en el archivo de datos.

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

APÉNDICE C

REALIZACIÓN DE UN ARCHIVO DE DATOS

A continuación se describe la forma de conformar un archivo para que pueda ser interpretado por *Genera2D* y *Genera3D*.

PROGRAMA *Genera2D*

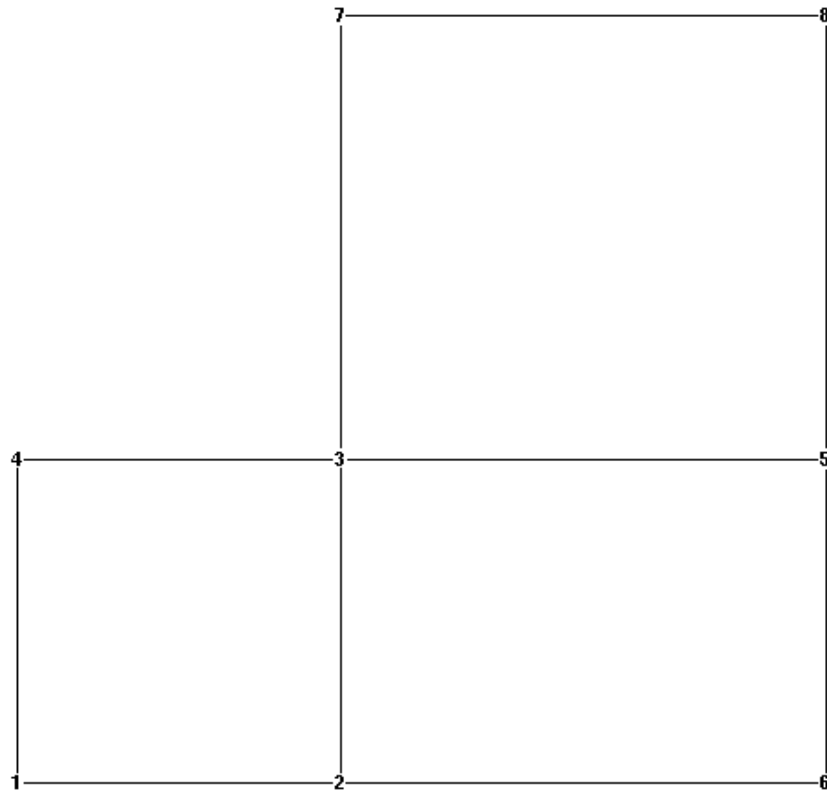


Figura C.1: Ejemplo *Genera2D* para la realización de un archivo de datos

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Tomando en cuenta la figura C.1 se procede a la realización del archivo de datos para su respectivo mallado:

Tabla C.1: Hoja de datos 2D

ejemplo_tesis2	Linea 1
Datos_Generales	Linea 2
8 3 6 1 1	Linea 3
Nodos	Linea 4
1 -2.00 -2.00	Linea 5
2 2.00 -2.00	Linea 6
3 2.00 2.00	Linea 7
4 -2.00 2.00	Linea 8
5 8.00 2.00	Linea 9
6 8.00 -2.00	Linea 10
7 2.00 7.50	Linea 11
8 8.00 7.50	Linea 12
Elementos	Linea 13
1 1 1 2 3 4 0 0 0 0	Linea 14
2 2 2 6 5 3 0 0 0 0	Linea 15
3 1 3 5 8 7 0 0 0 0	Linea 16
Divisiones	Linea 17
1 2 2	Linea 18
2 3 3	Linea 19
3 1 1	Linea 20
Condiciones_de_Borde	Linea 21
1 3 4 1 2.0 3.0	Linea 22
2 4 1 0 0.0 1.0	Linea 23
3 2 6 1 1.0 1.0	Linea 24
4 5 6 0 0.0 0.0	Linea 25

- **Línea 1:** Título del proyecto.
- **Línea 2:** Indicación de que a continuación se presentaran los datos del proyecto (Ejemplo: “Datos_Generales”).

APÉNDICES

- **Línea 3:** Se debe identificar el valor de los siguientes datos, los cuales deben ir por separados por espacios, y tienen que seguir el orden que se mostrara a continuación:
 - Número de Nodos.
 - Número de Superelementos.
 - Número de Caras con Condiciones de Borde.
 - Numero de Materiales.
 - Generación de cargas nodales (1 para generar, 0 para no generar).
- **Línea 4:** Indicación de que a continuación se presentaran los nodos con sus coordenadas (Ejemplo: “Nodos”).
- **Línea 5-12:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de nodos (uno por línea) se coloca la siguiente información: número del nodo, coordenada X y coordenada Y.
- **Línea 13:** Indicación de que a continuación se presentaran los Superelementos con su número de material y respectivos nodos (Ejemplo: “Elementos”).
- **Línea 14-16:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de Superelementos (uno por línea) se coloca la siguiente información: número del Superelemento, número del material, nodos que lo conforman, sino se desean indicar los nodos intermedios se deben colocar cuatro ceros después de los nodos de los vértices.
- **Línea 17:** Indicación de que a continuación se presentaran las divisiones de cada Superelemento (Ejemplo: “Divisiones”).

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- **Línea 18-20:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de Superelementos (uno por línea) se coloca la siguiente información: número del Superelemento, divisiones en X y divisiones en Y.
- **Línea 21:** Indicación de que a continuación se presentaran los lados con condiciones de borde (Ejemplo: “condiciones_de_borde”).
- **Línea 22-25:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de condiciones de borde (uno por línea) se coloca la siguiente información: número de lado de condición de borde, nodos que lo conforman, tipo de la condición de borde, valor de la restricción en X y valor de la restricción en Y.

PROGRAMA *Genera3D*

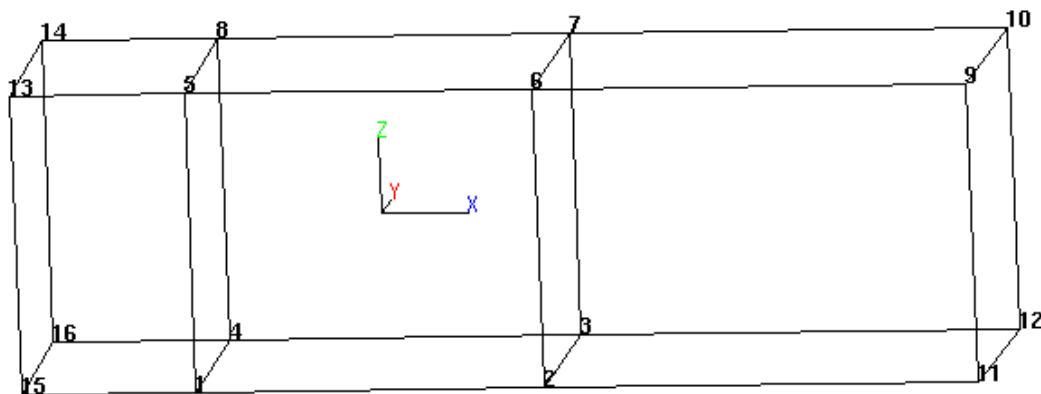


Figura C.2: Ejemplo Genera3D para la realización de un archivo de datos

Tomando en cuenta la figura C.2 se procede a la realización del archivo de datos para su respectivo mallado:

Tabla C.2: Hoja de datos 3D

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

ejemplo3d_tesis2	Línea 1
Parametros_Generales	Línea 2
16 3 4 1 0	Línea 3
Nodos	Línea 4
1 -2 -2 -2	Línea 5
2 2 -2 -2	Línea 6
3 2 2 -2	Línea 7
4 -2 2 -2	Línea 8
5 -2 -2 2	Línea 9
6 2 -2 2	Línea 10
7 2 2 2	Línea 11
8 -2 2 2	Línea 12
9 7 -2 2	Línea 13
10 7 2 2	Línea 14
11 7 -2 -2	Línea 15
12 7 2 -2	Línea 16
13 -4 -2 2	Línea 17
14 -4 2 2	Línea 18
15 -4 -2 -2	Línea 19
16 -4 2 -2	Línea 20
Elementos	Línea 21
1 1 1 2 3 4 5 6 7 8	Línea 22
2 2 2 11 12 3 6 9 10 7	Línea 23
3 1 15 1 4 16 13 5 8 14	Línea 24
Divisiones	Línea 25
1 2 2 2	Línea 26
2 2 2 2	Línea 27
3 1 3 3	Línea 28
Condiciones_de_Borde	Línea 29
1 13 14 5 8 0 1.0 5.0 5.0	Línea 30
2 6 7 5 8 1 3.0 3.0 3.0	Línea 31
3 6 7 9 10 0 3.0 2.0 4.0	Línea 32
4 1 2 3 4 1 2.0 2.0 2.0	Línea 33

- **Línea 1:** Título del proyecto.

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- **Línea 2:** Indicación de que a continuación se presentaran los datos del proyecto (Ejemplo: “Datos_Generales”).
- **Línea 3:** Se debe identificar el valor de los siguientes datos, los cuales deben ir por separados por espacios, y tienen que seguir el orden que se mostrara a continuación:
 - Número de Nodos.
 - Número de Superelementos.
 - Número de Condiciones de Borde.
 - Numero de Materiales.
 - Generación de cargas nodales (1 para generar, 0 para no generar).
- **Línea 4:** Indicación de que a continuación se presentaran los nodos con sus coordenadas (Ejemplo: “Nodos”).
- **Línea 5-20:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de nodos (uno por línea) se coloca la siguiente información: número del nodo, coordenada X, coordenada Y y coordenada Z.
- **Línea 21:** Indicación de que a continuación se presentaran los Superelementos con su número de material y respectivos nodos (Ejemplo: “Elementos”).
- **Línea 22-24:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de Superelementos (uno por línea) se coloca la siguiente información: número del Superelemento, número del material, nodos que lo conforman.
- **Línea 25:** Indicación de que a continuación se presentaran las divisiones de cada Superelemento (Ejemplo: “Divisiones”).

APÉNDICES

- **Línea 26-28:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de Superelementos (uno por línea) se coloca la siguiente información: número del Superelemento, divisiones en X, divisiones en Y y divisiones en Z.
- **Línea 29:** Indicación de que a continuación se presentaran los lados con condiciones de borde (Ejemplo: “condiciones_de_borde”).
- **Línea 30-33:** A partir de esta línea y dependiendo de la cantidad de condiciones de borde (uno por línea) se coloca la siguiente información: número de lado de condición de borde, nodos que lo conforman, tipo de la condición de borde, valor de la restricción en X, valor de la restricción en Y y valor de la restricción de Z.

APÉNDICE D

MANUAL DEL USUARIO

El programa Gen23DP fue creado bajo el sistema operativo Debian Etch con KDE 3.5.5 con kernel 2.6.18. La programación fue realizada en KDeveloped 3.3.5, el cual no es necesario para compilar el programa, ya que se puede compilar por la consola (*Shell*) usando el comando *make*. En el anexo 1 se encontrara el CD donde se encuentra el programa. Para la instalación (compilación) y corrida del programa se siguen los siguientes pasos:

➤ INSTALACIÓN DEL PROGRAMA (COMPILACIÓN)

Estas instrucciones se pueden realizar tanto como usuario ó *root*, para esta explicación se hará como usuario usando la consola (*Shell*) proporcionada por el Linux así como también se puede hacer con la interfaz KDE:

1. Copiar archivo *Gen23DP.zip* al directorio HOME (ej. */home/fernando*) y descomprimirlo (figura D.1) usando: *unzip Gen23DP.zip* ó haciéndolo manualmente dándole click con el botón derecho del ratón, extract→extract to Gen23DP/.

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos



Figura D.1

2. Crear el sub-directorio bin en el directorio HOME (figura D.2) usando: `mkdir /home/fernando/bin` ó haciéndolo manualmente dándole click con el botón derecho del ratón en (ej. `/home/fernando/`), create→new folder (bin)



Figura D.2

APÉNDICES

3. Agregar a la variable de ambiente *PATH* la ruta *"/home/fernando/bin"* (figura D.3) usando: *PATH=\$PATH:/home/fernando/bin*.

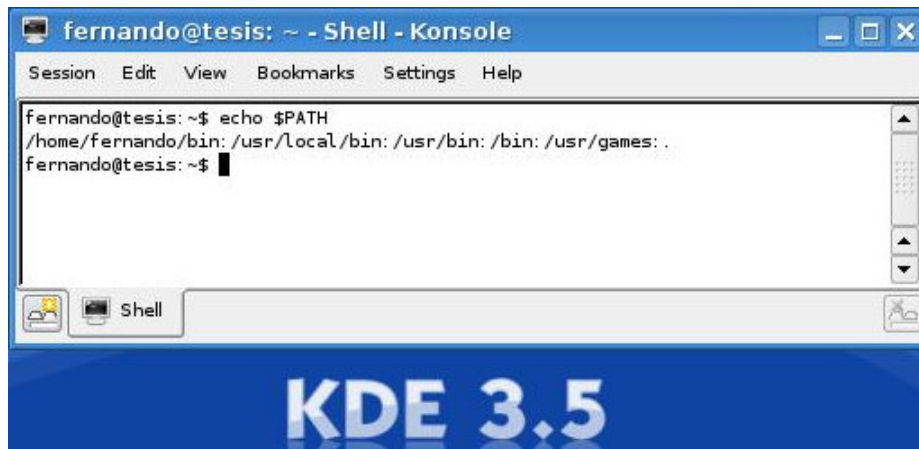


Figura D.3

4. En el directorio (ej. */home/fernando/Gen23DP/2D/Genera2D*) compilar (figura D.4) usando: *make* ó usando el Kdevelop; Built→Built Project (F8).



Figura D.4

APÉNDICES

5. En el directorio (ej. */home/fernando/Gen23DP/3D/Genera3D*) compilar (figura D.5) usando: *make* ó usando el Kdevelop; Built→Built Project (F8)



```
fernando@tesis: ~/Gen23DP/3D/Genera3D - Shell - Konsole
Session Edit View Bookmarks Settings Help

fernando@tesis:~/Gen23DP/3D/Genera3D$ make
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o main.o main.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o model3.o model3.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o model311.o model311.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o leeunso.o leeunso.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o nodocentral.o nodocentral.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o model341.o model341.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o model35.o model35.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o model37.o model37.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o contcaras.o contcaras.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -c -o caras.o caras.c
gcc -g -Wall -DPRUEBA -I../Include -o /home/fernando/bin/gen3dp main.o model3.o
model311.o leeunso.o nodocentral.o model341.o model35.o model37.o contcaras.o
caras.o -lm
fernando@tesis:~/Gen23DP/3D/Genera3D$
```

Figura D.5

De esta manera queda instalado (compilado) el programa *Gen23DP* (figura D.6).



Figura D.6

➤ CORRIDA DEL PROGRAMA

- Para el programa *Genera2D*

Dentro de la carpeta *Genera2D* se debe copiar el archivo de datos *.dat* elaborado según las indicaciones del apéndice A. Esta carpeta contiene todas las rutinas y subrutinas necesarias para compilar el programa con cualquier compilador de lenguaje C.

Luego de compilado el programa se debe abrir una consola (Shell) estando ubicados en la carpeta *Genera2D* (ej. */home/fernando/Gen23DP/2D/Genera2D*) donde se tecleará el comando *gen2dp* seguido de un espacio en blanco y el nombre del archivo de datos, de la siguiente manera:

gen2dp ejemplo_tesis (Figura D.7)

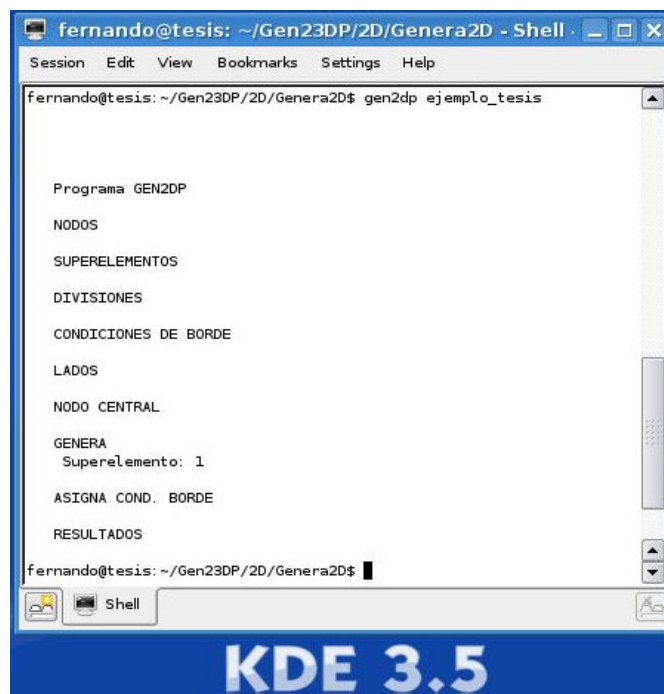


Figura D.7

APÉNDICES

- Para el programa *Genera3D*

Dentro de la carpeta *Genera3D* se debe copiar el archivo de datos *.dat* elaborado según las indicaciones del apéndice A. Esta carpeta contiene todas las rutinas y subrutinas necesarias para compilar el programa con cualquier compilador de lenguaje C.

Luego de compilado el programa se debe abrir una consola (Shell) estando ubicados en la carpeta *Genera3D* (ej. */home/fernando/Gen23DP/3D/Genera3D*) donde se tecleará el comando *gen3dp* seguido de un espacio en blanco y el nombre del archivo de datos, de la siguiente manera:

gen3dp ejemplo3d_tesis (Figura D.8)

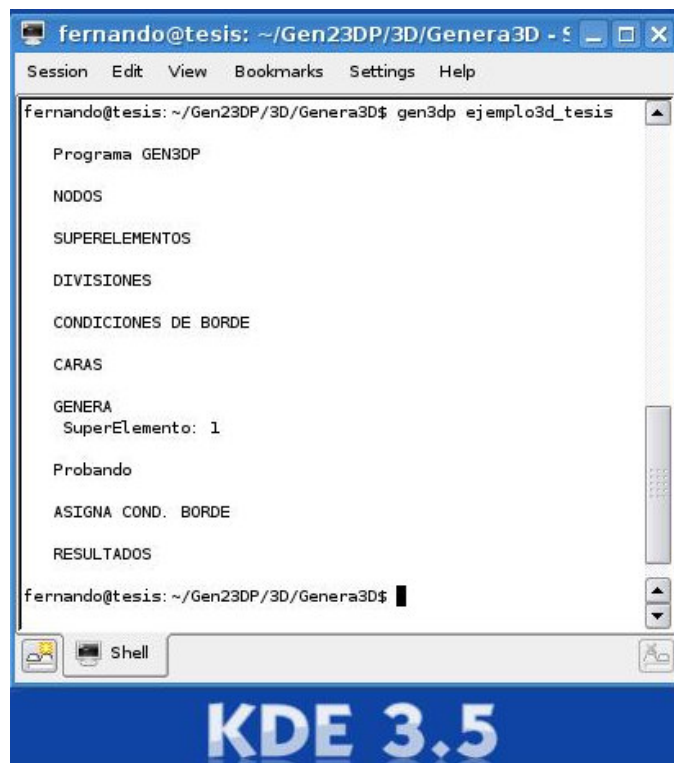


Figura D.8

- **DIBUJADORES *dibm2d*, *Xdibm3d* y *GLdibm3d* (OPCIONAL)**

Estos dibujadores fueron desarrollados y proporcionados por el profesor Antonio Barragán, como una visión a futuros trabajos en esta misma rama. Es importante tomar en cuenta la siguiente acotación: estos dibujadores sólo grafican Superelementos cuadriláteros de 4 nodos (2D) y hexaedros de 8 nodos (3D), por lo cual no se podrán graficar archivos *.res* arrojados por los programas *Genera2D* y *Genera3D*, solamente se podrán dibujar archivos *.dat* ó *.res* modificados que cumplan con los Superelementos antes mencionados.

➤ **INSTALACIÓN DEL PROGRAMA (COMPILACIÓN)**

Estas instrucciones se pueden realizar sólo como *root*, esta explicación se hará usando la consola (Shell) proporcionada por el Linux. Para la instalación de los dibujadores *dibm2d*, *Xdibm3d* y *GLdibm3d* se hará:

Como usuarios *root* se deben realizar los siguientes enlaces simbólicos en */usr/lib/*, usando:

- ✓ `ln -s libX11.so.6.2.0 libX11.so`
- ✓ `ln -s libXmu.so.6.2.0 libXmu.so`
- ✓ `ln -s libXt.so.6.0.0 libXt.so`
- ✓ `ln -s libXi.so.6.0.0 libXi.so`

Con esto ya se pueden instalar (compilar) los dibujadores *dibm2d* y *Xdibm3d* usando *make* desde cada una de sus rutas. Para la instalación del

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

dibujador *GLdib3m* se necesitará instalar las siguientes librerías usando:
aptitude install

- ✓ *freeglut3*
- ✓ *freeglut3-dev*

Luego de instaladas las librerías, usando *make* se compilara desde su ruta.

Para la corrida de cada dibujador estos se ejecutaran desde la carpeta *Genera2D* y *Genera3D* respectivamente.

- ✓ */home/fernando/Gen23DP/2D/Genera2D/dibm2d*
ejemplo_tesis4nodos.res
- ✓ */home/fernando/Gen23DP/3D/Genera3D/Xdibm3d*
ejemplo3d_tesis8nodos.res
- ✓ */home/fernando/Gen23DP/3D/Genera3D/GLdibm3d*
ejemplo3d_tesis8nodos.res 0.5

Donde *ejemplo_tesis4nodos.res* será un archivo con Superelementos de 4 nodos y *ejemplo3d_tesis8nodos.res* será un archivo con Superelementos de 8 nodos. En el *GLdibm3d* se debe colocar la escala del grafico, en este caso 0,5.

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

APÉNDICE E

EJEMPLOS DE PROGRAMA

PROGRAMA *Genera2D*

1. Tres cuadriláteros con 2 lados de condiciones de borde cada uno y diferentes divisiones, (figura E.1).

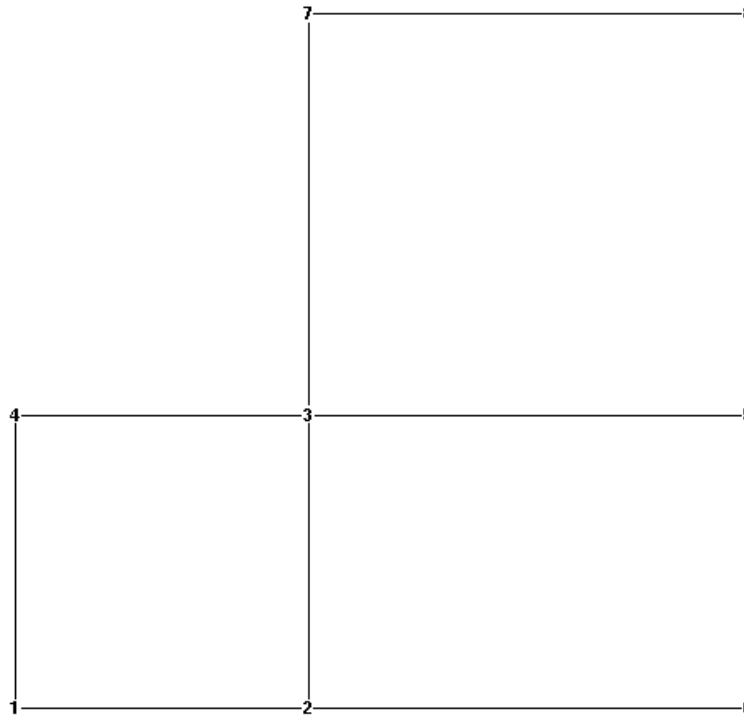


Figura E.1

- **ARCHIVO DE DATOS:**

```

ejemplo_tesis2
Datos_Generales
8 3 6 1
Nodos
1 -2.00 -2.00
2 2.00 -2.00
3 2.00 2.00
4 -2.00 2.00
5 8.00 2.00
6 8.00 -2.00
7 2.00 7.50
8 8.00 7.50
Elementos
1 1 1 2 3 4 0 0 0 0
2 2 2 6 5 3 0 0 0 0
3 1 3 5 8 7 0 0 0 0
Divisiones
1 2 2
2 2 2
3 2 2
Condiciones_de_Borde
1 3 4 1 2.0 3.0
2 4 1 0 0.0 1.0
3 2 6 1 1.0 1.0
4 5 6 0 0.0 0.0
5 3 7 1 2.0 5.0
6 5 8 0 0.0 4.0

```

- **DATOS DE SUBROUTINAS:**

➤ **SUBROUTINA *LeeDatos***

```

lnodb: k=1 mat=1 n[0] = 1 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[1] = 2 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[2] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[3] = 4 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[4] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[5] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[6] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[7] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[0] = 2 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[1] = 6 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[2] = 5 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[3] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[4] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[5] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2

```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
lnodb: k=2 mat=2 n[6] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[7] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[0] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[1] = 5 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[2] = 8 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[3] = 7 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[4] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[5] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[6] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[7] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
CB=1 n[3] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=3.000000
CB=1 n[4] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=3.000000
CB=2 n[4] Tipo=0 cbx=0.000000 cby=1.000000
CB=2 n[1] Tipo=0 cbx=0.000000 cby=1.000000
CB=3 n[2] Tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000
CB=3 n[6] Tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000
CB=4 n[5] Tipo=0 cbx=0.000000 cby=0.000000
CB=4 n[6] Tipo=0 cbx=0.000000 cby=0.000000
CB=5 n[3] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=5.000000
CB=5 n[7] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=5.000000
CB=6 n[5] Tipo=0 cbx=0.000000 cby=4.000000
CB=6 n[8] Tipo=0 cbx=0.000000 cby=4.000000
```

➤ SUBROUTINA *AsocElemCont*

```
res=1 l=2
res=2 l=3
res=3 l=0
res=4 l=1
res=6 l=1
res=5 l=3
```

➤ SUBROUTINA *NodoCentral*

```
lnodb: k=1 mat=1 n[0] = 1 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[1] = 2 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[2] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[3] = 4 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[4] = 9 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[5] = 10 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[6] = 11 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[7] = 12 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[0] = 2 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[1] = 6 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[2] = 5 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[3] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[4] = 13 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[5] = 14 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[6] = 15 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=2 mat=2 n[7] = 10 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[0] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
lnodb: k=3 mat=1 n[1] = 5 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[2] = 8 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[3] = 7 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[4] = 15 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[5] = 16 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[6] = 17 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=3 mat=1 n[7] = 18 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
```

➤ SUBROUTINA *Genera*

```
ibloc=1, xsi=-2.000000 eta=-2.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=-2.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=-2.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=-1.000000 eta=-2.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=-1.000000
ibloc=1, xsi=-1.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=-2.000000 eta=-1.000000
  GenElem: numel = 1 row = 1 col = 1
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=-2.000000
ibloc=1, xsi=2.000000 eta=-2.000000
ibloc=1, xsi=2.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=1.000000 eta=-2.000000
ibloc=1, xsi=2.000000 eta=-1.000000
ibloc=1, xsi=1.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=-1.000000
  GenElem: numel = 2 row = 1 col = 2
ibloc=1, xsi=-2.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=2.000000
ibloc=1, xsi=-2.000000 eta=2.000000
ibloc=1, xsi=-1.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=1.000000
ibloc=1, xsi=-1.000000 eta=2.000000
ibloc=1, xsi=-2.000000 eta=1.000000
  GenElem: numel = 3 row = 2 col = 1
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=2.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=2.000000 eta=2.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=2.000000
ibloc=1, xsi=1.000000 eta=0.000000
ibloc=1, xsi=2.000000 eta=1.000000
ibloc=1, xsi=1.000000 eta=2.000000
ibloc=1, xsi=0.000000 eta=1.000000
  GenElem: numel = 4 row = 2 col = 2
ibloc=2, xsi=2.000000 eta=-2.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=-2.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=2.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=3.500000 eta=-2.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=-1.000000
ibloc=2, xsi=3.500000 eta=0.000000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
ibloc=2, xsi=2.000000 eta=-1.000000
  GenElem: numel = 5  row = 1  col = 1
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=-2.000000
ibloc=2, xsi=8.000000 eta=-2.000000
ibloc=2, xsi=8.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=6.500000 eta=-2.000000
ibloc=2, xsi=8.000000 eta=-1.000000
ibloc=2, xsi=6.500000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=-1.000000
  GenElem: numel = 6  row = 1  col = 2
ibloc=2, xsi=2.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=2.000000
ibloc=2, xsi=2.000000 eta=2.000000
ibloc=2, xsi=3.500000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=1.000000
ibloc=2, xsi=3.500000 eta=2.000000
ibloc=2, xsi=2.000000 eta=1.000000
  GenElem: numel = 7  row = 2  col = 1
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=8.000000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=8.000000 eta=2.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=2.000000
ibloc=2, xsi=6.500000 eta=0.000000
ibloc=2, xsi=8.000000 eta=1.000000
ibloc=2, xsi=6.500000 eta=2.000000
ibloc=2, xsi=5.000000 eta=1.000000
  GenElem: numel = 8  row = 2  col = 2
ibloc=3, xsi=2.000000 eta=2.000000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=2.000000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=2.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=3.500000 eta=2.000000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=3.375000
ibloc=3, xsi=3.500000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=2.000000 eta=3.375000
  GenElem: numel = 9  row = 1  col = 1
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=2.000000
ibloc=3, xsi=8.000000 eta=2.000000
ibloc=3, xsi=8.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=6.500000 eta=2.000000
ibloc=3, xsi=8.000000 eta=3.375000
ibloc=3, xsi=6.500000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=3.375000
  GenElem: numel = 10 row = 1  col = 2
ibloc=3, xsi=2.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=7.500000
ibloc=3, xsi=2.000000 eta=7.500000
ibloc=3, xsi=3.500000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=6.125000
ibloc=3, xsi=3.500000 eta=7.500000
ibloc=3, xsi=2.000000 eta=6.125000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
GenElem: numel = 11 row = 2 col = 1
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=8.000000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=8.000000 eta=7.500000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=7.500000
ibloc=3, xsi=6.500000 eta=4.750000
ibloc=3, xsi=8.000000 eta=6.125000
ibloc=3, xsi=6.500000 eta=7.500000
ibloc=3, xsi=5.000000 eta=6.125000
GenElem: numel = 12 row = 2 col = 2
```

➤ SUBROUTINAS *GenLadoCB*

```
nel = 1 dad = 1 row = 1 col = 1
Asocia: elem = 1 row = 1 col = 1 gNumACB= 0
slado=2 tipo=0 cbx=0.000000 cby=1.000000
nel = 2 dad = 1 row = 1 col = 2
nel = 3 dad = 1 row = 2 col = 1
Asocia: elem = 3 row = 2 col = 1 gNumACB= 1
slado=1 tipo=1 cbx=2.000000 cby=3.000000
Asocia: elem = 3 row = 2 col = 1 gNumACB= 2
slado=2 tipo=0 cbx=0.000000 cby=1.000000
Asocia: elem = 4 row = 2 col = 2 gNumACB= 3
slado=1 tipo=1 cbx=2.000000 cby=3.000000
Asocia: elem = 5 row = 1 col = 1 gNumACB= 4
slado=3 tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000
Asocia: elem = 6 row = 1 col = 2 gNumACB= 5
slado=3 tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000
Asocia: elem = 6 row = 1 col = 2 gNumACB= 6
slado=4 tipo=0 cbx=0.000000 cby=0.000000
Asocia: elem = 8 row = 2 col = 2 gNumACB= 7
slado=4 tipo=0 cbx=0.000000 cby=0.000000
Asocia: elem = 9 row = 1 col = 1 gNumACB= 8
slado=5 tipo=1 cbx=2.000000 cby=5.000000
Asocia: elem = 10 row = 1 col = 2 gNumACB= 9
slado=6 tipo=0 cbx=0.000000 cby=4.000000
Asocia: elem = 11 row = 2 col = 1 gNumACB= 10
slado=5 tipo=1 cbx=2.000000 cby=5.000000
nel = 12 dad = 3 row = 2 col = 2
Asocia: elem = 12 row = 2 col = 2 gNumACB= 11
slado=6 tipo=0 cbx=0.000000 cby=4.000000
```

➤ SUBROUTINA *Result*

```
ejemplo_tesis2
Datos_generales
53 12 8 1
Nodos
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

1	-2.000	-2.000
2	0.000	-2.000
3	0.000	0.000
4	-2.000	0.000
5	-1.000	-2.000
6	0.000	-1.000
7	-1.000	0.000
8	-2.000	-1.000
9	2.000	-2.000
10	2.000	0.000
11	1.000	-2.000
12	2.000	-1.000
13	1.000	0.000
14	0.000	2.000
15	-2.000	2.000
16	0.000	1.000
17	-1.000	2.000
18	-2.000	1.000
19	2.000	2.000
20	2.000	1.000
21	1.000	2.000
22	5.000	-2.000
23	5.000	0.000
24	3.500	-2.000
25	5.000	-1.000
26	3.500	0.000
27	8.000	-2.000
28	8.000	0.000
29	6.500	-2.000
30	8.000	-1.000
31	6.500	0.000
32	5.000	2.000
33	5.000	1.000
34	3.500	2.000
35	8.000	2.000
36	8.000	1.000
37	6.500	2.000
38	5.000	4.750
39	2.000	4.750
40	5.000	3.375
41	3.500	4.750
42	2.000	3.375
43	8.000	4.750
44	8.000	3.375
45	6.500	4.750
46	5.000	7.500
47	2.000	7.500
48	5.000	6.125
49	3.500	7.500
50	2.000	6.125
51	8.000	7.500
52	8.000	6.125
53	6.500	7.500

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

Elementos									
1	1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	1	2	9	10	3	11	12	13	6
3	1	4	3	14	15	7	16	17	18
4	1	3	10	19	14	13	20	21	16
5	2	9	22	23	10	24	25	26	12
6	2	22	27	28	23	29	30	31	25
7	2	10	23	32	19	26	33	34	20
8	2	23	28	35	32	31	36	37	33
9	1	19	32	38	39	34	40	41	42
10	1	32	35	43	38	37	44	45	40
11	1	39	38	46	47	41	48	49	50
12	1	38	43	51	46	45	52	53	48
Aristas_con_CB									
1	4	1	0	0.00	1.00				
2	14	15	1	2.00	3.00				
3	15	4	0	0.00	1.00				
4	19	14	1	2.00	3.00				
5	9	22	1	1.00	1.00				
6	22	27	1	1.00	1.00				
7	27	28	0	0.00	0.00				
8	28	35	0	0.00	0.00				

PROGRAMA *Genera3D*

- Un hexaedro con dos divisiones en cada eje y tres condiciones de borde en diferentes caras, (figura E.2).

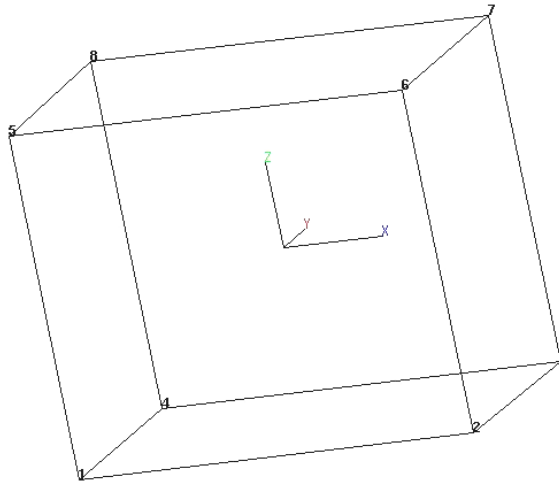


Figura E.2

• ARCHIVO DE DATOS:

```

ejemplo3d_tesis
Parametros_Generales
8 1 3 1
Nodos
1 -2 -2 -2
2 2 -2 -2
3 2 2 -2
4 -2 2 -2
5 -2 -2 2
6 2 -2 2
7 2 2 2
8 -2 2 2
Elementos
1 1 1 2 3 4 5 6 7 8
Divisiones
1 2 2 2
Condiciones_de_Borde
1 2 6 7 3 0 3.0 3.0 3.0
2 1 5 8 4 1 2.0 2.0 2.0
3 1 2 6 5 1 1.0 1.0 1.0

```

• DATOS DE SUBROUTINAS:

➤ SUBROUTINA *LeeDatos*

```

lnodb: k=1 mat=1 n[0] = 1 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[1] = 2 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[2] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[3] = 4 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[4] = 5 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[5] = 6 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[6] = 7 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[7] = 8 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[8] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[9] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[10] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[11] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[12] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[13] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[14] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[15] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[16] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[17] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[18] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[19] = 0 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2 ndiv[2]=2
CB=1 n[2] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000

```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
CB=1 n[6] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=1 n[7] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=1 n[3] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=2 n[1] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=2 n[5] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=2 n[8] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=2 n[4] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=3 n[1] Tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
CB=3 n[2] Tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
CB=3 n[6] Tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
CB=3 n[5] Tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
```

➤ SUBROUTINA *AsocElemCont*

```
res=3 cara=0
res=1 cara=4
res=2 cara=5
```

➤ SUBROUTINA *NodoCentral*

```
lnodb: k=1 mat=1 n[0] = 1 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[1] = 2 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[2] = 3 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[3] = 4 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[4] = 5 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[5] = 6 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[6] = 7 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[7] = 8 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[8] = 9 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[9] = 10 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[10] = 11 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[11] = 12 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[12] = 13 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[13] = 14 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[14] = 15 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[15] = 16 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[16] = 17 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[17] = 18 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[18] = 19 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
lnodb: k=1 mat=1 n[19] = 20 ndiv[0]=2 ndiv[1]=2
```

➤ SUBROUTINA *Genera*

```
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-1.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta= 0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-1.000000 psi= 0.000000
GenElem: numel = 1 row = 1 col = 1 pag:1
```

```
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta= 0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta= 0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-1.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta= 0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-1.000000 psi= 0.000000
GenElem: numel = 2 row = 1 col = 2 pag:1
```

```
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=0.000000 psi=-1.000000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=1.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=1.000000 psi= 0.000000
GenElem: numel = 3 row = 2 col = 1 pag:1
```

```
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=1.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=0.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=2.000000 psi=-1.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=0.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=1.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=1.000000 psi= 0.000000
GenElem: numel = 4 row = 2 col = 2 pag:1
```

```
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=-2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta= 0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=-2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-1.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta= 0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-1.000000 psi=2.000000
GenElem: numel = 5 row = 1 col = 1 pag:2
```

```
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi=0.000000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
ibloc=1 xsi=0.000000 eta= 0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta= 0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=-2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta= 0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta= 0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=-2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=-1.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta= 0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=-1.000000 psi=2.000000
GenElem: numel = 6 row = 1 col = 2 pag:2
```

```
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=1.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-1.000000 eta=2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=1.000000 psi=2.000000
GenElem: numel = 7 row = 2 col = 1 pag:2
```

```
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=0.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=2.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=1.000000 psi=0.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=0.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=0.000000 psi=1.000000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=2.000000 psi=1.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=0.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=2.000000 eta=1.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=1.000000 eta=2.000000 psi=2.000000
ibloc=1 xsi=0.000000 eta=1.000000 psi=2.000000
GenElem: numel = 8 row = 2 col = 2 pag:2
```

➤ SUBROUTINAS *GenCaraCBt*

```
nel = 1 dad = 1 row = 1 col = 1 pag = 1
scara=3 tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
scara=2 tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
nel = 2 dad = 1 row = 1 col = 2 pag = 1
scara=3 tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
scara=1 tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
nel = 3 dad = 1 row = 2 col = 1 pag = 1
scara=2 tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
nel = 4 dad = 1 row = 2 col = 2 pag = 1
scara=1 tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
nel = 5 dad = 1 row = 1 col = 1 pag = 2
scara=3 tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
scara=2 tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
nel = 6 dad = 1 row = 1 col = 2 pag = 2
scara=3 tipo=1 cbx=1.000000 cby=1.000000 cbz=1.000000
scara=1 tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
nel = 7 dad = 1 row = 2 col = 1 pag = 2
scara=2 tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
nel = 8 dad = 1 row = 2 col = 2 pag = 2
scara=1 tipo=0 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
```

➤ SUBROUTINA *Result*

```
ejemplo3d_tesis
Datos_Generales
81 8 12 1
Nodos
1 -2.000 -2.000 -2.000
2 0.000 -2.000 -2.000
3 0.000 0.000 -2.000
4 -2.000 0.000 -2.000
5 -2.000 -2.000 0.000
6 0.000 -2.000 0.000
7 0.000 0.000 0.000
8 -2.000 0.000 0.000
9 -1.000 -2.000 -2.000
10 0.000 -1.000 -2.000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

11	-1.000	0.000	-2.000
12	-2.000	-1.000	-2.000
13	-2.000	-2.000	-1.000
14	0.000	-2.000	-1.000
15	0.000	0.000	-1.000
16	-2.000	0.000	-1.000
17	-1.000	-2.000	0.000
18	0.000	-1.000	0.000
19	-1.000	0.000	0.000
20	-2.000	-1.000	0.000
21	2.000	-2.000	-2.000
22	2.000	0.000	-2.000
23	2.000	-2.000	0.000
24	2.000	0.000	0.000
25	1.000	-2.000	-2.000
26	2.000	-1.000	-2.000
27	1.000	0.000	-2.000
28	2.000	-2.000	-1.000
29	2.000	0.000	-1.000
30	1.000	-2.000	0.000
31	2.000	-1.000	0.000
32	1.000	0.000	0.000
33	0.000	2.000	-2.000
34	-2.000	2.000	-2.000
35	0.000	2.000	0.000
36	-2.000	2.000	0.000
37	0.000	1.000	-2.000
38	-1.000	2.000	-2.000
39	-2.000	1.000	-2.000
40	0.000	2.000	-1.000
41	-2.000	2.000	-1.000
42	0.000	1.000	0.000
43	-1.000	2.000	0.000
44	-2.000	1.000	0.000
45	2.000	2.000	-2.000
46	2.000	2.000	0.000
47	2.000	1.000	-2.000
48	1.000	2.000	-2.000
49	2.000	2.000	-1.000
50	2.000	1.000	0.000
51	1.000	2.000	0.000
52	-2.000	-2.000	2.000
53	0.000	-2.000	2.000
54	0.000	0.000	2.000
55	-2.000	0.000	2.000
56	-2.000	-2.000	1.000
57	0.000	-2.000	1.000
58	0.000	0.000	1.000
59	-2.000	0.000	1.000
60	-1.000	-2.000	2.000
61	0.000	-1.000	2.000
62	-1.000	0.000	2.000
63	-2.000	-1.000	2.000
64	2.000	-2.000	2.000
65	2.000	0.000	2.000

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

66	2.000	-2.000	1.000
67	2.000	0.000	1.000
68	1.000	-2.000	2.000
69	2.000	-1.000	2.000
70	1.000	0.000	2.000
71	0.000	2.000	2.000
72	-2.000	2.000	2.000
73	0.000	2.000	1.000
74	-2.000	2.000	1.000
75	0.000	1.000	2.000
76	-1.000	2.000	2.000
77	-2.000	1.000	2.000
78	2.000	2.000	2.000
79	2.000	2.000	1.000
80	2.000	1.000	2.000
81	1.000	2.000	2.000
Elementos			
1	1	1	2
2	1	2	21
3	1	4	3
4	1	3	22
5	1	5	6
6	1	6	23
7	1	8	7
8	1	7	24
9	1	3	22
10	1	5	6
11	1	6	23
12	1	8	7
13	1	7	24
14	1	3	22
15	1	5	6
16	1	6	23
17	1	8	7
18	1	7	24
19	1	3	22
20	1	5	6
21	1	6	23
22	1	8	7
23	1	7	24
24	1	3	22
25	1	5	6
26	1	6	23
27	1	8	7
28	1	7	24
29	1	3	22
30	1	5	6
31	1	6	23
32	1	8	7
33	1	7	24
34	1	3	22
35	1	5	6
36	1	6	23
37	1	8	7
38	1	7	24
39	1	3	22
40	1	5	6
41	1	6	23
42	1	8	7
43	1	7	24
44	1	3	22
45	1	5	6
46	1	6	23
47	1	8	7
48	1	7	24
49	1	3	22
50	1	5	6
51	1	6	23
52	1	8	7
53	1	7	24
54	1	3	22
55	1	5	6
56	1	6	23
57	1	8	7
58	1	7	24
59	1	3	22
60	1	5	6
61	1	6	23
62	1	8	7
63	1	7	24
64	1	3	22
65	1	5	6
66	1	6	23
67	1	8	7
68	1	7	24
69	1	3	22
70	1	5	6
71	1	6	23
72	1	8	7
73	1	7	24
74	1	3	22
75	1	5	6
76	1	6	23
77	1	8	7
78	1	7	24
79	1	3	22
80	1	5	6
81	1	6	23
82	1	8	7
83	1	7	24
84	1	3	22
85	1	5	6
86	1	6	23
87	1	8	7
88	1	7	24
89	1	3	22
90	1	5	6
91	1	6	23
92	1	8	7
93	1	7	24
94	1	3	22
95	1	5	6
96	1	6	23
97	1	8	7
98	1	7	24
99	1	3	22
100	1	5	6
Caras_de_Contorno			
1	1	5	6
2	1	4	8
3	2	6	23
4	21	23	24
5	4	34	36
6	22	24	46
7	5	52	53
8	5	8	55
9	6	53	64
10	23	64	65
11	8	36	72
12	24	65	78

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

3. Tres Hexaedros continuos sin divisiones en sus ejes, cada hexaedro contiene una condición de borde en una misma cara y adicionalmente el segundo hexaedro contiene una condición de borde en su cara opuesta a la anterior, (Figura E.3).

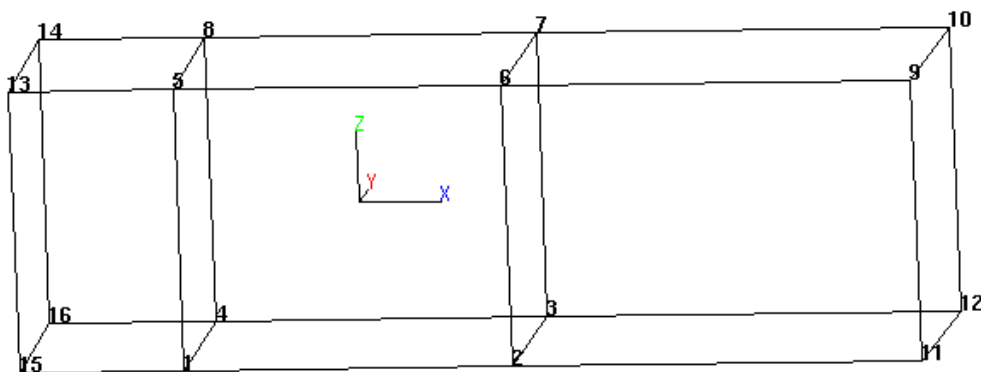


Figura E.3

- **ARCHIVO DE DATOS:**

```
ejemplo3d_tesis2
Parametros_Generales
16 3 4 1
Nodos
1 -2 -2 -2
2 2 -2 -2
3 2 2 -2
4 -2 2 -2
5 -2 -2 2
6 2 -2 2
7 2 2 2
8 -2 2 2
9 7 -2 2
10 7 2 2
11 7 -2 -2
12 7 2 -2
13 -4 -2 2
14 -4 2 2
15 -4 -2 -2
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
16  -4  2 -2
Elementos
1  1  1  2  3  4  5  6  7  8
2  2  2 11 12  3  6  9 10  7
3  1 15  1  4 16 13  5  8 14
Divisiones
1 1 1 1
2 1 1 1
3 1 1 1
Condiciones_de_Borde
1 13 14 5 8 0 1.0 5.0 5.0
2 6 7 5 8 1 3.0 3.0 3.0
3 6 7 9 10 0 3.0 2.0 4.0
4 1 2 3 4 1 2.0 2.0 2.0
```

• DATOS DE SUBROUTINAS:

➤ SUBROUTINA *LeeDatos*

```
lnodb: k=1 mat=1 n[0] = 1 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[1] = 2 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[2] = 3 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[3] = 4 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[4] = 5 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[5] = 6 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[6] = 7 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[7] = 8 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[8] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[9] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[10] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[11] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[12] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[13] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[14] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[15] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[16] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[17] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[18] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[19] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[0] = 2 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[1] = 11 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[2] = 12 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[3] = 3 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[4] = 6 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[5] = 9 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[6] = 10 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[7] = 7 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[8] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[9] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[10] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
lnodb: k=2 mat=2 n[11] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[12] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[13] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[14] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[15] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[16] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[17] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[18] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[19] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[0] = 15 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[1] = 1 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[2] = 4 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[3] = 16 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[4] = 13 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[5] = 5 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[6] = 8 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[7] = 14 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[8] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[9] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[10] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[11] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[12] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[13] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[14] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[15] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[16] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[17] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[18] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[19] = 0 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1 ndiv[2]=1
CB=1 n[13] Tipo=0 cbx=1.000000 cby=5.000000 cbz=5.000000
CB=1 n[14] Tipo=0 cbx=1.000000 cby=5.000000 cbz=5.000000
CB=1 n[5] Tipo=0 cbx=1.000000 cby=5.000000 cbz=5.000000
CB=1 n[8] Tipo=0 cbx=1.000000 cby=5.000000 cbz=5.000000
CB=2 n[6] Tipo=1 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=2 n[7] Tipo=1 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=2 n[5] Tipo=1 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=2 n[8] Tipo=1 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
CB=3 n[6] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=2.000000 cbz=4.000000
CB=3 n[7] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=2.000000 cbz=4.000000
CB=3 n[9] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=2.000000 cbz=4.000000
CB=3 n[10] Tipo=0 cbx=3.000000 cby=2.000000 cbz=4.000000
CB=4 n[1] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=4 n[2] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=4 n[3] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
CB=4 n[4] Tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
```

➤ SUBROUTINA *AsocElemCont*

```
res=2 cara=2
res=4 cara=3
res=3 cara=2
res=1 cara=2
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

➤ SUBROUTINA *NodoCentral*

```
lnodb: k=1 mat=1 n[0] = 1 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[1] = 2 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[2] = 3 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[3] = 4 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[4] = 5 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[5] = 6 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[6] = 7 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[7] = 8 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[8] = 17 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[9] = 18 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[10] = 19 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[11] = 20 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[12] = 21 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[13] = 22 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[14] = 23 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[15] = 24 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[16] = 25 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[17] = 26 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[18] = 27 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=1 mat=1 n[19] = 28 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[0] = 2 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[1] = 11 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[2] = 12 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[3] = 3 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[4] = 6 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[5] = 9 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[6] = 10 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[7] = 7 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[8] = 29 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[9] = 30 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[10] = 31 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[11] = 18 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[12] = 32 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[13] = 33 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[14] = 34 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[15] = 22 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[16] = 26 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[17] = 35 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[18] = 36 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=2 mat=2 n[19] = 27 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[0] = 15 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[1] = 1 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[2] = 4 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[3] = 16 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[4] = 13 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[5] = 5 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[6] = 8 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[7] = 14 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[8] = 37 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[9] = 20 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
lnodb: k=3 mat=1 n[10] = 38 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[11] = 39 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[12] = 40 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[13] = 24 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[14] = 41 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[15] = 42 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[16] = 43 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[17] = 25 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[18] = 28 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
lnodb: k=3 mat=1 n[19] = 44 ndiv[0]=1 ndiv[1]=1
```

➤ SUBROUTINA *Genera*

```
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta= 2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 2.000000 psi= 0.000000
ibloc=1 xsi= 0.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=1 xsi= 2.000000 eta= 0.000000 psi= 2.000000
ibloc=1 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi= 2.000000
GenElem: numel = 1 row = 1 col = 1 pag:1

ibloc=2 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=2 xsi=4.500000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=4.500000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=2 xsi=7.000000 eta= 2.000000 psi= 0.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta= 2.000000 psi= 0.000000
ibloc=2 xsi=4.500000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
```

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

```
ibloc=2 xsi=7.000000 eta= 0.000000 psi= 2.000000
ibloc=2 xsi=4.500000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=2 xsi=2.000000 eta= 0.000000 psi= 2.000000
GenElem: numel = 2 row = 1 col = 1 pag:1
```

```
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-3.000000 eta=-2.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-3.000000 eta= 2.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta= 0.000000 psi=-2.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta=-2.000000 psi= 0.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta= 2.000000 psi= 0.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta= 2.000000 psi= 0.000000
ibloc=3 xsi=-3.000000 eta=-2.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-2.000000 eta= 0.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-3.000000 eta= 2.000000 psi= 2.000000
ibloc=3 xsi=-4.000000 eta= 0.000000 psi= 2.000000
GenElem: numel = 3 row = 1 col = 1 pag:1
```

➤ SUBROUTINAS *GenCaraCBt*

```
nel = 1 dad = 1 row = 1 col = 1 pag = 1
scara=4 tipo=1 cbx=2.000000 cby=2.000000 cbz=2.000000
scara=2 tipo=1 cbx=3.000000 cby=3.000000 cbz=3.000000
nel = 2 dad = 2 row = 1 col = 1 pag = 1
scara=3 tipo=0 cbx=3.000000 cby=2.000000 cbz=4.000000
nel = 3 dad = 3 row = 1 col = 1 pag = 1
scara=1 tipo=0 cbx=1.000000 cby=5.000000 cbz=5.000000
```

➤ SUBROUTINA *Result*

ejemplo3d_tesis2

Datos_Generales

44 3 4 1 0

Nodos

1	-2.000	-2.000	-2.000
2	2.000	-2.000	-2.000
3	2.000	2.000	-2.000
4	-2.000	2.000	-2.000
5	-2.000	-2.000	2.000
6	2.000	-2.000	2.000
7	2.000	2.000	2.000

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

8	-2.000	2.000	2.000
9	0.000	-2.000	-2.000
10	2.000	0.000	-2.000
11	0.000	2.000	-2.000
12	-2.000	0.000	-2.000
13	-2.000	-2.000	0.000
14	2.000	-2.000	0.000
15	2.000	2.000	0.000
16	-2.000	2.000	0.000
17	0.000	-2.000	2.000
18	2.000	0.000	2.000
19	0.000	2.000	2.000
20	-2.000	0.000	2.000
21	7.000	-2.000	-2.000
22	7.000	2.000	-2.000
23	7.000	-2.000	2.000
24	7.000	2.000	2.000
25	4.500	-2.000	-2.000
26	7.000	0.000	-2.000
27	4.500	2.000	-2.000
28	7.000	-2.000	0.000
29	7.000	2.000	0.000
30	4.500	-2.000	2.000
31	7.000	0.000	2.000
32	4.500	2.000	2.000
33	-4.000	-2.000	-2.000
34	-4.000	2.000	-2.000
35	-4.000	-2.000	2.000
36	-4.000	2.000	2.000
37	-3.000	-2.000	-2.000
38	-3.000	2.000	-2.000
39	-4.000	0.000	-2.000
40	-4.000	-2.000	0.000
41	-4.000	2.000	0.000
42	-3.000	-2.000	2.000
43	-3.000	2.000	2.000
44	-4.000	0.000	2.000
Elementos			
1	1	1	2
2	2	2	21
3	1	33	1
4	35	36	8
5	6	23	24
6	7	25	26
7	8	27	10
8	9	28	14
9	10	29	15
10	11	30	31
11	12	32	18
12	13	40	13
13	14	16	41
14	15	42	20
15	16	43	44
16	17	19	20
17	18	31	32
18	19	32	18
19	20	43	44
20	21	44	20
21	22	20	21
22	23	21	22
23	24	22	23
24	25	23	24
25	26	24	25
26	27	25	26
27	28	26	27
28	29	27	28
29	30	28	29
30	31	29	30
31	32	30	31
32	33	31	32
33	34	32	33
34	35	33	34
35	36	34	35
36	37	35	36
37	38	36	37
38	39	37	38
39	40	38	39
40	41	39	40
41	42	40	41
42	43	41	42
43	44	42	43
44	45	43	44
Caras_de_Contorno			
1	1	2	3
2	5	8	7
3	6	7	24
4	35	36	8
5	1	2	3
6	5	8	7
7	6	7	24
8	35	36	8
9	1	2	3
10	5	8	7
11	6	7	24
12	35	36	8
13	1	2	3
14	5	8	7
15	6	7	24
16	35	36	8
17	1	2	3
18	5	8	7
19	6	7	24
20	35	36	8
21	1	2	3
22	5	8	7
23	6	7	24
24	35	36	8
25	1	2	3
26	5	8	7
27	6	7	24
28	35	36	8
29	1	2	3
30	5	8	7
31	6	7	24
32	35	36	8
33	1	2	3
34	5	8	7
35	6	7	24
36	35	36	8
37	1	2	3
38	5	8	7
39	6	7	24
40	35	36	8
41	1	2	3
42	5	8	7
43	6	7	24
44	35	36	8
45	1	2	3
46	5	8	7
47	6	7	24
48	35	36	8
49	1	2	3
50	5	8	7
51	6	7	24
52	35	36	8
53	1	2	3
54	5	8	7
55	6	7	24
56	35	36	8
57	1	2	3
58	5	8	7
59	6	7	24
60	35	36	8
61	1	2	3
62	5	8	7
63	6	7	24
64	35	36	8
65	1	2	3
66	5	8	7
67	6	7	24
68	35	36	8
69	1	2	3
70	5	8	7
71	6	7	24
72	35	36	8
73	1	2	3
74	5	8	7
75	6	7	24
76	35	36	8
77	1	2	3
78	5	8	7
79	6	7	24
80	35	36	8
81	1	2	3
82	5	8	7
83	6	7	24
84	35	36	8
85	1	2	3
86	5	8	7
87	6	7	24
88	35	36	8
89	1	2	3
90	5	8	7
91	6	7	24
92	35	36	8
93	1	2	3
94	5	8	7
95	6	7	24
96	35	36	8
97	1	2	3
98	5	8	7
99	6	7	24
100	35	36	8

APÉNDICE F

GENERACIÓN DE CARGAS NODALES

En éste anexo se detallan las subrutinas *Genera_Cargas_Nodales2D* y *Genera_Cargas_Nodale*. Estas subrutinas se crean partiendo de la necesidad de generar un archivo de resultados que se conecte de la manera más automática posible con el programa solucionador de elementos finitos MEFET, el cual requiere para su funcionamiento un archivo de entrada donde se especifiquen las cargas y restricciones aplicadas a cada nodo y no la carga distribuida por lado o cara como en el archivo resultado por defecto que generan los programas *Genera2D* y *Genera3D*. También se detallan las modificaciones a la subrutina *Result* para la impresión los nodos cargados y restringidos.

RUTINAS *Genera_Cargas_Nodales2D* y *Genera_Cargas_Nodales*

Estas son las rutinas encargadas de transformar las cargas distribuidas asociadas a los lados o caras en valores que luego se asignan a los nodos que conforman esas caras o lados.

Para lograr esto las rutinas *Genera_Cargas_Nodales2D* y *Genera_Cargas_Nodales* hacen uso de la condición libre o restringida de cada elemento y de los coeficientes de transformación propuestos por Smith, I.M. y D.V. Griffiths [50]. Estos coeficientes se definen para los nodos libres sometidos a cargas distribuidas uniformes, dependiendo del tipo de elemento a cual se le aplica la transformación, es decir, se definen unos coeficientes para

asignación de cargas nodales para los elementos cuadriláteros de ocho nodos y otros coeficientes para los hexaedros de veinte nodos.

El valor de la carga distribuida es asociado y almacenado previamente a cada nodo generado por las rutinas *GenLadoCB* y *GenCaraCBt* por lo que las rutinas *Genera_Cargas_Nodales2D* y *Genera_Cargas_Nodales* aplican según sea el caso el factor correspondiente a cada lado o cara cargados para transformar la carga distribuida a su valor nodal.

Para los nodos restringidos éstas rutinas definen para cada nodo componente del lado o cara restringida la dirección restringida según corresponda.

Los valores de los coeficientes usados tanto para el caso bidimensional como para el caso tridimensional se detallan en las figuras F.1 y F.2 respectivamente. Para estas figuras se asume un valor de carga distribuida unitario.

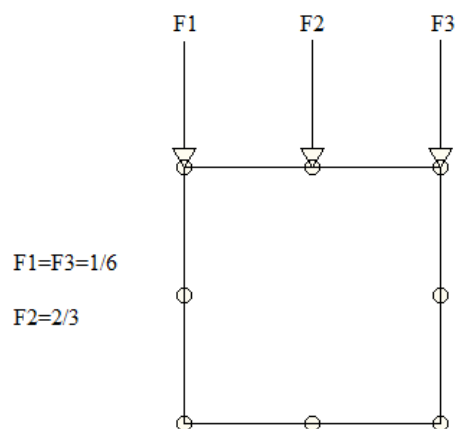


Figura F.1: Coeficientes para el cuadrilátero de 8 nodos. Caso Bidimensional

APÉNDICES

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

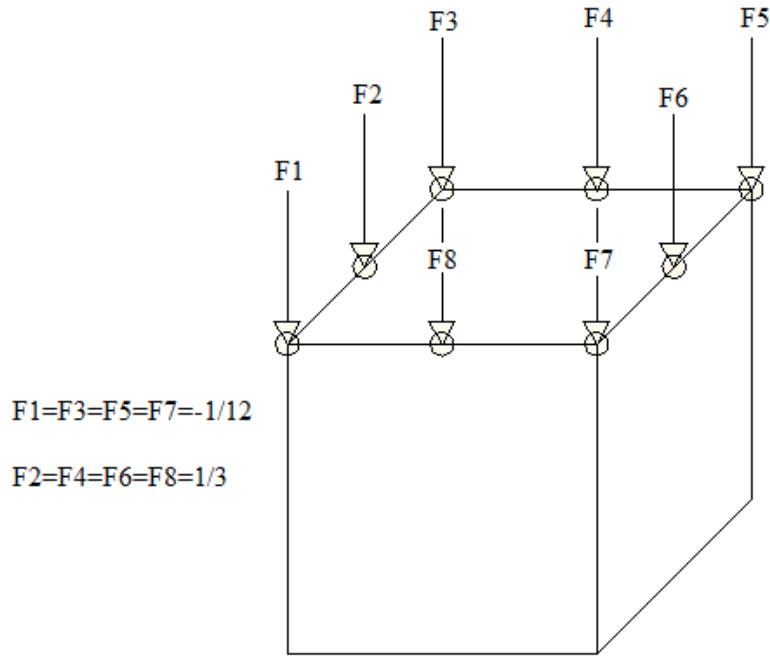


Figura F.2: Coeficientes para el hexaedro de 20 nodos. Caso Tridimensional

MODIFICACIÓN A LA SUBROUTINA *RESULT*

Como se mencionó lo que se busca con esta modificación es lograr imprimir un archivo de resultados que se adapte a los requerimientos del programa MEFET. Para lograr esto modificó la subrutina *Result* para que tenga la capacidad de imprimir tanto los lados o caras de contorno con la información de las condiciones de borde correspondientes, como la información generada por las subrutinas *Genera_Cargas_Nodales2D* y *Genera_Cargas_Nodales*. La impresión de uno u otro archivo de resultados viene dado por el valor de la variable *gcn* especificado en el archivo de datos como se explica en el apéndice C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zienkiewicz, O. C., Phillips, D. V., 1971. “*An automatic mesh generation scheme for plane and curved surfaces by “Isoparametric” co-ordinates*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 519-528.
- [2] Durocher, L. L., Gasper, A., 1979, “*A versatile two-dimensional mesh generator with automatic bandwidth reduction*”. Computers & Structures, Vol. 10, No. 4, pp. 561-575.
- [3] Ghassemi, F., 1982. “*Automatic mesh generation scheme for a two- or three-dimensional triangular curved surface*”. Computers & Structures, Vol. 15, No. 6, pp. 613-626.
- [4] Liu, Y., Chen, K., 1988, “*Modifications of the program ‘a versatile two-dimensional mesh generator with automatic bandwidth reduction’ for superelements sharing more than one boundary*”. Computers & Structures, Vol. 28, No. 2, pp. 305-307.
- [5] Imafuku I., et al, 1980. “*A generalized automatic mesh generation scheme for finite element method*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 713-731.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [6] Martins, P. A. F., Barata, M. J. M., 1992. “*Model3-A three-dimensional mesh generator*”. Computers & Structures, Vol. 42, No. 4, pp. 511-529.
- [7] Thacker, W. C., et al, 1980. “*A method for automating the construction of irregular computational grids for storm surge forecast models*”. Journal of Computational Physics, Vol. 37, pp. 371-387.
- [8] Cavendish, J., et al, 1985. “*An approach to automatic three-dimensional finite element mesh generation*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 329-347.
- [9] Frey, W., 1987. “*Selective refinement: A new strategy for automatic node placement in graded triangular meshes*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, No. 11, pp. 2183-2200.
- [10] Sloan, S. W., 1987. “*A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane*”. Advances in Engineering Software, Vol. 9, No.1, pp. 34-51.
- [11] Bykat, A., 1976, “*Automatic generation of triangular grid: I- Subdivision of a general polygon into convex subregions. II- Triangulation of convex polygons*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 1329-1342.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [12] Lewis, B. A., Robinson, J. S., 1978. "*Triangulation of planar regions with applications*". The Computer Journal, Vol. 21, No. 4, pp. 324-332.
- [13] Schoofs, A. J. G., et al, 1979. "*A general purpose two-dimensional mesh generator*". Advances in Engineering Software, Vol. 1, No. 3, pp. 131-136.
- [14] Joe, B., 1986. "*Delaunay triangular meshes in convex polygons*". SIAM J. Sci. Stat. Comput., Vol. 7. No 2, pp. 514-539.
- [15] Joe, B., Simpson, R. B., 1986. "*Triangular meshes for regions of complicated shape*". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 751-778.
- [16] Joe, B., 1995. "*Quadrilateral mesh generation in polygonal regions*". Computer-Aided Design, Vol. 27, No. 3, pp. 209-222.
- [17] Joe, B., 1994. "*Tetrahedral mesh generation in polyhedral regions base don convex polyhedron decompositions*". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 693-713.
- [18] Yerry, M. A., Shephard, M. S., 1983. "*A modified quadtree approach to finite element mesh generation*". IEEE Computer Graphics and Application, Vol. 3, No. 1, pp. 39-46.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [19] Yerry, M. A., Shephard, M. S., 1984. “*Automatic three-dimensional mesh generation by the modified-octree technique*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1965-1990.
- [20] Yerry, M. A., Shephard, M. S., 1985. “*Automatic mesh generation por three-dimensional solids*”. Computers & Structures, Vol. 20, No. 1-3, pp. 31-39.
- [21] Kela, A., et al, 1986. “*Toward automatic finite element analysis*”. Computers in Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 57-71.
- [22] Perucchio, R., et al, 1989. “*Automatic mesh generation from solid models base on recursive spatial decompositions*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 28, No. 11, pp. 2469-2501.
- [23] Shephard, M. S., et al 1986. “*Automatic mesh generation allowing for efficient a priori and a posteriori mesh refinement*”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 55, No. 1-2, pp. 161-180.
- [24] Baehmann, P. L., et al, 1987. “*Robust, geometrically based, automatic two-dimensional mesh generation*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, 1043-1078.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [25] Carey, G. F., et al, 1988. "*A class of sata structures for 2-D and 3-D adaptive mesh refinement*". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 26, No. 12, pp. 2607-2622.
- [26] Schroeder, W.J., Shephard M. S., 1988. "*Geometry-Based fully automatic mesh generation and the Delaunay triangulation*". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 26, No. 11, pp. 2503-2515.
- [27] Schroeder, W. J., Shephard, M. S., 1990. "*A combined octree/delaunay method for fully automatic 3-D mesh generation*". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 37-55.
- [28] Yuen, M. M. F., et al, 1991. "*A hierarchical approach to automatic finite element mesh generation*". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 501-525.
- [29] Jung, Y. H., Lee, K., 1993. "*Tetrahedron-Based octree encoding for automatic mesh generation*". Computer-Aided Design, Vol. 25, No. 3, pp. 141-153.
- [30] Yang, H., Hoeltzel, D. A., 1994. "*Automatic finite element mesh generation over intersecting rigid body-movable subdomains for the automation of parametric conceptual Design*". Journal of Mechanical Design, Vol. 116, No. 4, pp. 1049-1057.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [31] Saxena, M., Perucchio, R., 1992. “*Parallel FEM algorithms base on recursive spatial Decomposition-I. automatic mesh generation*”. Computers & Structures, Vol. 45, No. 5-6, pp. 817-831.
- [32] Löhner, R., et al, 1992. “*Parallel unstructured grid generation*”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 95, No. 3, pp. 343-357.
- [33] Shostko, A., Löhner, R., 1995. “*Three-Dimensional parallel unstructured grid generation*”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 38, No. 6, pp. 905-925.
- [34] Özturan, C., et al, 1994. “*Parallel adaptive mesh refinement and redistribution on distributed memory computers*”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 119, No. 1-2. pp. 123-137.
- [35] de Cougny, H., et al, 1994. “*Parallel three-dimensional mesh generation*”. Computing Systems in Engineering, Vol. 5, No. 4-6, pp. 311-323.
- [36] de Cougny, H., et al, 1995. “*Parallel three-dimensional mesh generation on distributed memory mimd computers*”. Engineering with Computers, Vol 12, No. 2, pp. 94-106.
- [37] Simone, M. L., et al, 1996. “*Tools and techniques for parallel grid generation*”. Scientific Computation Research Center, Rensselaer Polythecnic Institute, Report #5, pp. 1-10.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [38] Verhoeven, N. A., et al, 1995. “*Dynamic load balancing in a 2D parallel Delaunay mesh generation*”. Elsevier Science Publishers B.V, pp. 641-648.
- [39] Globisch, G., 1995. “*On an automatically parallel generation technique for tetrahedral meshes*”. Parallel Computing, Vol. 21, No. 12, pp. 1979-1995.
- [40] Vidwans, A., et al, 1994. “*Parallel dynamic load-balancing algorithm for three-dimensional adaptive unstructured grids*”. AIAA Journal, Vol. 32, No. 3, pp. 497-505.
- [41] Hodgson, D. C., Jimack, P. K., 1996. “*Efficient parallel generation of partitioned unstructured meshes*”. Advances in Engineering Software, Vol. 27, No. 1-2, pp. 59-70.
- [42] Li, H., Cheng, G., 2000. “*New method for graded mesh generation of all hexahedral finite elements*”. Computers & Structures, Vol. 76, No. 6, pp. 729-740.
- [43] Rashid, M. M., Gullet, P. M., 2000. “*On a finite element with variable element topology*”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 190, No. 11-12, pp. 1509-1527.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estrategias Computacionales para la Asignación de Condiciones de Frontera en la Generación de Mallas de Elementos Finitos

- [44] Ribó, R., et al, 2002. “*Some algorithms to correct a geometry in order to create a finite element mesh*”. Computers & Structures, Vol. 80, No 16-17, pp. 1399-1408.
- [45] Su, Y., et al, 2004. “*Automatic mesh generation and modification techniques for mixed quadrilateral and hexahedral element meshes of non-manifold models*”. Computer-Aided Design, Vol 36. No. 7, pp. 581-594.
- [46] Lo, S. H., Wang, W. X., 2005 “*Finite element mesh generation over intesectioning curved surfaces by tracing of neighbours*”. Finite Elements in Analysis and Design, Vol 41, No. 4, pp. 351-370.
- [47] Pascal, J. F., Paul-Louis, G. (2000) Mesh Generation, application to finite elements. Oxford: Hermes science europe. 814 p.
- [48] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. C., (2000) The Finite Element Method, Volumen 1: The Basis, 5ta ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 689 p.
- [49] Rao, S.S., (2004) The Finite Element Method in Engineering. 4ta ed. Miami: Elsevier Science & Technology Books. 663 p.
- [50] Smith, I. M., Griffiths, D. V., (1988) Programming the Finite Element Method. 2da ed. New York: John Wiley & Sons. 469 p.