

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DESARROLLO DE UN GENERADOR DE MALLAS PARA EL
ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE PROBLEMAS USANDO EL
MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Castro G, Jorge E.
Durán G, Henry J.
Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico.

Caracas 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN GENERADOR DE MALLAS PARA EL ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE PROBLEMAS USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO.

Tutor Académico: Prof. Manuel Martínez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Castro G, Jorge E.
Durán G, Henry J.
Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico.

Caracas 2005

Caracas 31 de mayo de 2005.

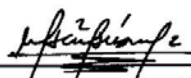
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres, titulado:

**"DESARROLLO DE UN GENERADOR DE MALLAS PARA EL
ANÁLISIS DE PROBLEMAS BIDIMENSIONALES UTILIZANDO
EL MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO"**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Antonio Barragán.


Prof. Rodolfo Berrios.


Prof. Manuel Martínez.
Tutor Académico.



Castro G, Jorge E.

Durán G. Henry J.

Desarrollo de un Generador de Mallas Para el Análisis Bidimensional de Problemas Usando el Método de Elementos de Contorno.

Tutor Académico: Manuel Martínez, Tesis, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2005 N° de páginas:83

Resumen

Palabras clave: Generadores de Malla, Método de Elementos de Contorno (MEC), Discretización.

En el presente trabajo se desarrolló un programa computacional PREPEC 2D, (su acrónimo indica PREProcesador de Elementos de Contorno 2D) diseñado especialmente para el preprocesamiento geométrico de problemas bidimensionales; en función de ello, utiliza el Método de Elementos de Contorno (MEC). En este sentido, se empleó el programa de modelaje geométrico AUTOCAD[®] con la finalidad de obtener, tanto la visualización como la data geométrica necesaria para la discretización de las diversas figuras. Esta data fue leída por un programa elaborado por los tesisas, en lenguaje FORTRAN[®]; posteriormente esta información, a los efectos del presente trabajo, es tratada de forma tal, que puedan ser insertadas en los distintos subprogramas de discretización.

A través de este proceso, se logró discretizar diversas geometrías básicas proporcionadas por AUTOCAD[®] entre las que se cuentan; líneas, círculos, arcos de círculos, elipses y arcos de elipses. Con estos resultados, el usuario podrá modelar, una amplia gama de problemas bidimensionales de interés.

Las discretizaciones logradas, fueron obtenidas por medio de elementos lineales (elementos compuestos por dos nodos) y por medio de elementos cuadráticos (elementos compuestos por tres nodos). Además, se pudo observar el mallado de Elementos de Contorno, logrado a través de los ejemplos ilustrados.

Por último, los investigadores presentan un manual de usuario, con la finalidad de instruir al interesado acerca del funcionamiento y operatividad del mismo.

Índice

Capítulo 1	iii
Introducción	iii
Introducción	iii
Motivación	v
Planteamiento del Problema.....	vi
Objeto:.....	vii
Objetivo General	viii
Objetivos Específicos.....	viii
Alcances	ix
Limitaciones.....	ix
Capítulo 2	1
Resolución de Problemas	1
En Ingeniería	1
Métodos experimentales:	1
Métodos Analíticos	2
Métodos Numéricos	3
Capítulo 3	6
Métodos Numéricos	6
En Ingeniería	6
Método de Diferencias Finitas	6
Método de Elementos Finitos	7
Método de Elementos de Contorno.....	8
Ideas Básicas Acerca del Método de Elementos de Contorno	10
Etapas para la Resolución	13
De Problemas por.....	13
Métodos Numéricos	13
El Pre-Proceso.....	13
Formas de efectuar la discretización	15
Por Elementos Lineales:.....	15
Por Elementos de Cuadráticos:	16
El Proceso	16
El Post-Proceso:	16
Capítulo 5	18
Desarrollo del.....	18
Preprocesador PREPEC 2D	18
AutoCad	18
Una breve historia del CAD: Antecedentes y evolución.	19
Fortran	21
Obtención de la Data Geométrica	23
6.1.1 Líneas:.....	23
6.1.2 Círculos	24

6.1.3 Arcos de Circulo	24
6.1.4 Elipses:	25
6.1.5 Arcos de Elipses:	25
Ordenamiento de la Información	26
6.2.1 Líneas	26
6.2.2 Círculos:	26
6.2.3 Arcos de Círculo:	26
6.2.4 Elipses:	26
6.2.5 Arcos de elipses:	26
Complementos de Información para Pre-Proceso	27
Elaboración de Programa para Pre-Proceso	27
Discretización de líneas	27
Discretización de círculos y arcos de círculos:	28
Discretización de Elipses y arcos de elipse:	29
Obtención de la Data de Pre-Proceso:	33
Visualización de la Discretización	33
Capítulo 6	33
Manual de Usuario	33
Pasos a Seguir para el Uso del Programa PREPEC 2D:	34
Elabore la Geometría deseada:	34
Ejemplos	50
9 Conclusiones y	62
Recomendaciones	62
Conclusiones	62
Recomendaciones	63

Capítulo 1

Introducción

Con formato: Numeración y viñetas

Introducción

La elaboración de diseños, en el campo de la Ingeniería Mecánica, utiliza como herramienta, el cálculo de esfuerzos y deformaciones, lo cual permite planificar detalladamente, la construcción de piezas mecánicas.

Tomando como referencia el campo de la ingeniería, disciplina que tiene como finalidad la resolución de problemas prácticos, la cual busca reducir una gran cantidad de casos particulares a modelos matemáticos, a través de diversas clases de planteamientos de problemas. Uno de estos casos son precisamente los problemas de valor en la frontera.

Muchos modelos de este tipo, se han usado para la resolución de problemas de transferencia de calor y masa, mecánica de sólidos, mecánica de los fluidos, entre otros. En muchas de estas aplicaciones, se suscitan restricciones que definen algunos parámetros en las fronteras del sistema a estudiar; mientras tanto, también se derivan los parámetros restantes, los cuales normalmente surgen de la solución del problema. Un ejemplo en este sentido sería, si en un problema de elasticidad lineal, se especificasen los esfuerzos en la frontera de un sistema, entonces los desplazamientos y deformaciones podrían detallarse en la solución del problema.

Si la región de estudio es de consistencia homogénea, la geometría, en este sentido, tiende a ser simple, las condiciones de continuidad y las ecuaciones diferenciales parciales serán lineales; entonces las soluciones analíticas del problema que se obtendrán serán sencillas. En cambio, si el caso fuese que en el sistema del problema, existiese una fuerza aplicada, este generaría una perturbación, la cual tiende a traer soluciones singulares al mismo. Esto haría que en las zonas de

perturbación se desarrollasen malos comportamientos, lo que derivaría que matemáticamente existan anomalías.

Por lo complicado de este proceso, no siempre es posible obtener las soluciones analíticas exactas a este tipo de problemas. Es así que, como caso contrario al antes especificado, es decir, región heterogénea, anisotrópica, con geometría irregular y condiciones de frontera complejas, es prácticamente imposible hallar soluciones analíticas que modelen esta situación. Es por esta razón, por la que el campo de la ingeniería recurre a los métodos numéricos, a los efectos de eliminar las limitaciones existentes en este tipo de casos.

Ahora bien, concéntrese en estos métodos numéricos; en este sentido se encuentran dos procesos bastante relevantes. Uno de estos es el método de elementos finitos (MEF) y el otro es el método de elementos de contorno (MEC).

El MEF es un método que ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas en ingeniería. Las aplicaciones de este método van desde el análisis por deformación y esfuerzo de automóviles, aeronaves, edificios y estructuras de puentes hasta el análisis de los campos del flujo de calor, de fluidos, magnético, filtraciones y otros problemas de flujo. Con los avances en los campos de las tecnologías de las computadoras y los sistemas CAD, pueden modelarse problemas complejos con relativa facilidad. Todo esto sugiere que es posible modernizar aplicaciones de ingeniería, utilizando estos desarrollos para entender la teoría básica, las técnicas de modelado y los aspectos computacionales del método de elementos finitos

El MEC, por otro lado, es también un método numérico bastante efectivo, ya que es capaz de calcular los parámetros desconocidos, usando los parámetros conocidos en la frontera. Este método ha tomado, en el campo de la elastostática, gran popularidad y su uso ha sido, en los últimos treinta años, cada vez más frecuente.

Para el caso bidimensional, como el que se está tratando en el presente trabajo especial, el hecho de que las integrales generadas sean de línea, trae consigo gran simplicidad a la hora de resolverlas.

Es claro que en el presente trabajo, no se realizará ninguna resolución de este tipo de integrales; simplemente se desarrollará una herramienta computacional, para atender y resolver casos bidimensionales; esto ayudará al usuario, a realizar de una manera automática, el preprocesamiento necesario, en cuanto a elementos de contorno.

En este sentido, el preprocesamiento se realizará por medio de la discretización del contorno bidimensional correspondiente.

Motivación

En la actualidad, existen en el mercado, muy pocos paquetes computacionales que sean capaces de generar las mallas a través del método de elementos de contorno (MEC). Se pueden mencionar como ejemplos de programas con aplicaciones específicas, a BEASY (de las siglas en ingles de: Boundary Element Analysis System) el cual es un paquete comercial de gran alcance pero costoso; esta característica limita al usuario que desea modelar problemas ingenieriles bajo el ambiente MEC, y el segundo de ellos, el PORTELA, el cual trabaja casos sencillos bidimensionales, lo cual lo hace un software bastante limitado para problemas complejos. Los paquetes computacionales más desarrollados que se consiguen en el mercado, trabajan generalmente, usando el método de elementos finitos (MEF) generando las mallas bajo este concepto. Esta limitación, para el objeto de esta investigación, obliga al usuario que desee modelar problemas ingenieriles bajo el ambiente MEC, a elaborar dichas mallas de manera manual, o a manipular programas que corren bajo el ambiente MEF, para que trabajen con lo que se requiere para trabajar con el MEC. En algunos casos resulta sencillo construir las mallas para el MEC, sin embargo, en aplicaciones más complejas puede resultar, en un procedimiento bastante engorroso.

La creación de un generador específico de mallas, bajo el ambiente MEC, permitirá a los usuarios que se encuentren ante esta disyuntiva, resolver problemas ingenieriles, ya que contarán con un software especialmente desarrollado, bajo el

concepto de MEC. En este sentido, encontrarán respuestas a una generalidad de casos, los cuales podrán resolverse, de manera versátil.

Planteamiento del Problema

Al aplicar los métodos numéricos, para resolver algún problema ingeniería, se suele dividir los mismos, en tres fases para la resolución. Estas fases son:

- El preproceso; la cual consiste en realizar una discretización del problema, a través de la construcción de una malla sobre el mismo; esta malla surgirá, dependiendo del método numérico utilizado (MEC, MEF, etc.). En este sentido, para elaborar ese mallado, se debe contar con una disposición correcta de la data de entrada, para que el programa encargado de este preproceso pueda realizar su concreción de una manera adecuada.
- El proceso; esta fase consiste en tomar la información arrojada en el preproceso a los efectos de poder realizar los cálculos interactivos pertinentes con los cuales se podrá elaborar el estudio.
- Y el postproceso; en esta última fase, es donde se hará la evaluación de los resultados arrojados en el proceso.

Para aplicar un proceso de resolución de problemas, por estos métodos, se debe tener conocimiento de la forma en la cual las diversas metodologías efectúan tales discretizaciones. Tomemos como ejemplo, el método, bajo ambiente MEF; en algunos casos resulta ser una buena herramienta para la resolución de problemas ingenieriles, pero al aumentar la complejidad del problema, el programa en cuestión tiende a invertir gran cantidad de tiempo en el proceso que debe efectuar. Este hecho se debe, a la forma poco precisa en que este método realiza la discretización, lográndose, en una gran cantidad de casos, resultados imprecisos, es decir, poco confiables.

Otro punto en contra que posee el antes mencionado ambiente MEF, es que la cantidad de elementos que se producen, para elaborar su estudio, es muy elevada, lo

que conlleva que las operaciones se hagan lentas, sobre todo en los casos donde las aplicaciones requieren de una geometría bastante compleja ; en estos casos, la discretización, tiende a hacerse bastante engorrosa.

Por otra parte, el ambiente MEC, por su ágil forma de elaborar las discretización, generaría muchos menos elementos que su contraparte MEF, lo cual agregaría precisión al resultado que se obtenga y disminuiría el tiempo de ejecución de los problemas. Además, este ambiente otorga la ventaja de generar la posibilidad de redefinir el mallado, brindándole al trabajo gran versatilidad, a poder ajustarse asertivamente a las circunstancias concretas del problema.

Objeto:

El presente Trabajo Especial de Grado, forma parte de una de las líneas de investigación del área de Postgrado, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, en esta orientación académica, según se puede entender, la Escuela de Ingeniería Mecánica busca agregar más versatilidad a sus tareas y disminuir los tiempos de ejecución de los programas. Ya que con ello se podrá abarcar una gran cantidad de problemas ingenieriles, pudiéndose elaborar los mismos, en períodos de ejecución razonables, que posean gran precisión y además que sean fácilmente adaptables a condiciones particulares.

← - - - Con formato: Numeración y viñetas

Objetivo General

Elaborar un programa computacional, bajo el ambiente MEC, que sea capaz de configurar un sistema de mallado, a problemas bidimensionales, los cuales son suministradas por un programa modelador geométrico.

Objetivos Específicos

- 1 Obtener la data geométrica, requerida para el programa de preproceso a elaborar, por medio del sistema de listas del programa AUTOCAD®.
- 2 Estudiar y comprender el lenguaje de programación FORTRAN®.
- 3 Elaborar una rutina computacional, en lenguaje FORTRAN® que sea capaz de leer esta data. Esta estructura computacional, por su parte, deberá ser capaz de almacenar en matrices, la información previamente leída. Asimismo, estas matrices deberán ser configuradas y posteriormente llenadas, de acuerdo al tipo de objeto encontrado.
- 4 Configurar la data obtenida de esta información, en un formato de matriz global, con la finalidad de que posteriormente se pueda ordenar la misma, por puntos consecutivos y por objetos, para que estas puedan facilitar el recorrido, en los cálculos de discretización posteriores. .
- 5 Desarrollar diversas subrutinas, en lenguaje FORTRAN®, que sean capaces de tomar la data ordenada y almacenada, en el formato de matriz global y discretizarlas de acuerdo al tipo de objeto que le sea pertinente.
- 6 Generar un programa que traduzca la data en cuestión, en visualización interactiva del mallado que se construya, para las geometrías discretizadas.
- 7 Descifrar el sistema de mallado, obtenido por el programa.
- 8 Concretar modelos con ejemplos, que permitan verificar la robustez del programa obtenido.
- 9 Elaborar, utilizando el programa AUTOCAD®, diversas geometrías bidimensionales, para ser tomadas como modelos.

- 10 Diseñar un manual de usuario, que permita descifrar la aplicación del software obtenido.

Alcances

El presente trabajo consta de dos partes, la primera parte consiste en la elaboración de un informe tipo trabajo de grado, siguiendo las pautas generadas por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela para otorgar el grado que se aspira, debe ser capaz de traducir las intenciones de los investigadores acerca de la resolución de problemas ingenieriles, cifrados en ambientes donde el método de elementos de contorno, sea utilizado. En la segunda parte se tiene como propósito, confeccionar y desarrollar un programa computacional, que sea capaz de generar de manera automática un sistema de mallado. El programa deberá efectuar el preprocesamiento numérico de los datos, para problemas bidimensionales, armar el sistema de discretización que de allí se desprenda, y visualizar el mallado en cuestión y posteriormente, si es necesario redefinir las discretizaciones, de acuerdo con las necesidades del usuario, por medio de las bases de datos creadas, para adaptarse asertivamente al problema planteado.

Deberán utilizarse elementos lineales y cuadráticos; según el problema con la finalidad de poder preparar adecuadamente la data, especialmente en lo que se refieren a las áreas de Mecánica de Sólidos y de Transferencia de Calor.

La data geométrica se definirá del problema cuando el usuario a través del programa AUTOCAD[®] realice la geometría a estudiar.

Limitaciones

El presente trabajo tiene la finalidad de desarrollar solo el preprocesamiento de problemas bidimensionales utilizando el MEC. Este preprocesamiento comprende la elaboración de la geometría del problema, el ordenamiento de la data geométrica,

la elaboración de los programas de discretización a partir de la información disponible y la visualización del mallado obtenido.

Capítulo 2

Resolución de Problemas

En Ingeniería

Desde los albores de la humanidad, el ser humano ha sentido la necesidad de poder cuantificar todo los fenómenos físicos con las cuales convive. Para este propósito el hombre ha tenido en la ciencia, la herramienta capaz de ayudarlo a encontrar esas respuestas. El hombre se ha visto de una manera conciente o inconciente en la necesidad de desarrollar herramientas, producto de una serie de experiencias.

Con el pasar del tiempo y con la formalización de los conocimientos científicos, se han desarrollado tres métodos que permiten al hombre analizar cada uno de los fenómenos que ocurren a su alrededor.

Entre estos métodos desarrollados se pueden citar:

- Métodos experimentales.
- Métodos analíticos.
- Métodos numéricos.

A continuación se describe, de una manera breve, cada uno de estos métodos mencionados.

Métodos experimentales:

Surgen de la observación directa de los fenómenos. Estos se han formalizado basándose a partir de estos hechos.

En estas épocas existió mucha divergencia en gran cantidad de resultados forzando al hombre a buscar alternativas que contribuyeran a perfeccionar los experimentos efectuados.

Con las conclusiones obtenidas de tal perfeccionamiento, se formalizaron tales actividades dando paso a los ensayos. En la actualidad estas actividades han sido normalizadas a través de diferentes organismos especializados en diversas áreas del saber.

Métodos Analíticos

Con el desarrollo y dominio de las matemáticas conjuntamente con los resultados experimentales, dio paso a la elaboración de métodos analíticos que sirvieron para ampliar los conocimientos en diversas áreas de la ciencia. Los avances han ocurrido de manera paulatina, usándose para poder describir el comportamiento de los sistemas.

Para ello se comenzó a establecer el comportamiento de un elemento diferencial y la relación de las diversas variables implicadas en el problema. Para poder terminar de establecer la descripción del sistema se hace necesario el uso de un sistema de ecuaciones diferenciales las cuales sirven para hacer el modelaje básico del mismo.

Lo importante de esta forma de resolución es que los problemas se pueden reducir a modelos matemáticos que pertenecen a una clase de problemas. Entre lo más conocidos encontramos los problemas de valor de frontera. Para esto se especifica una región de interés encerrados por una frontera.

Surge con ello una serie de ecuaciones diferenciales parciales que modelan el aspecto físico del problema en el dominio. La resolución de dichas ecuaciones diferenciales es el paso final para poder encontrar las variables que se necesitan conocer, y deben ser resueltas a ciertas restricciones o condiciones que describen lo que esta sucediendo en la frontera C .

De acuerdo al tipo del problema que se este tratando. Si el dominio es una región tridimensional, entonces C será una superficie. Ahora, si el dominio es una región bidimensional, C es un contorno de frontera.

Como se mencionó anteriormente el producto de tales análisis son las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del problema. Muchos modelos se han obtenido a través del análisis. Tal es el caso del estudio de materiales homogéneos con disposiciones geométricas simples y condiciones de fronteras C continuas. En esta circunstancia las ecuaciones diferenciales parciales resultantes son lineales; lo cual implica que ciertas soluciones pueden ser agrupadas para construir nuevas soluciones en el dominio. Estas soluciones obtenidas son referidas a un punto de perturbación que matemáticamente se le conoce como punto de singularidad (Este punto puede ser una fuerza aplicada en el sistema).

Estas soluciones pueden ser sumadas con la finalidad de encontrar la respuestas a casos en los cuales más de un punto de singularidad este presente.

En algunos casos la resolución es sencilla pero en la mayoría de estos no se gozan de tales privilegios.

Métodos Numéricos

Anteriormente se había mencionado que los métodos analíticos permiten encontrar al problema de estudio ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento del sistema. Bajo unas condiciones ideales explicadas anteriormente como material homogéneo, geometría sencilla y condiciones de frontera continuas, estas ecuaciones se pueden resolver fácilmente debido a que el producto de tal análisis nos lleva a resolver ecuaciones diferenciales parciales lineales.

Esta situación ha llevado al desarrollo de modelos aproximados a situaciones reales que permiten en ciertos casos predecir el comportamiento de problemas complejos .Pero los problemas reales difieren mucho de este hecho ya que las soluciones analíticas no se pueden encontrar . En un caso real se tendrá todo lo contrario a lo idealizado, es decir, la región dominio es heterogénea, la geometría es

completamente irregular y las condiciones de frontera difíciles para ser descritas por simples funciones matemáticas. Para poder lograr obtener una solución aproximada se hace necesario el desarrollo de un nuevo método que no obstaculice el estudio deseado.

A través de los años muchos investigadores han dejado a un lado sus paradigmas y se han concentrado en buscar otra perspectiva para la solución de los problemas llegando así a desarrollar una nueva técnica denominada **métodos numéricos**.

Dichos métodos aproximados permiten resolver problemas con geometría irregular y condiciones complicadas. Esta técnica requiere transformar un problema continuo original en uno discreto, que posean números finitos de parámetros o variables que caracterizan con una adecuada elección de sus valores.

Tales métodos numéricos consisten en poder resolver las ecuaciones diferenciales parciales generadas para cada elemento y la suma de todos ellos permitirá conocer el comportamiento del sistema continuo.

Estos métodos numéricos cada día poseen mayor aceptación dentro del campo de la ciencia ya que la cantidad de problemas que se han llegado a resolver conjuntamente con el desarrollo de la computación han sido bastante significativos.

La primera generación de estos métodos numéricos aplicaban directamente las ecuaciones diferenciales en la misma forma en que ellos fueron derivados teniendo entonces el Método de Diferencia Finitas y el Método de Elementos finitos como lo más representativos en esta clase. Tienen como gran ventaja la versatilidad para ser usados en cualquier sistema de ecuaciones diferenciales, teniendo como único problema la inclusión de las condiciones de borde del problema.

Pero el empleo de técnicas numéricas para la solución de problemas complejos de física e ingeniería, ha experimentado un desarrollo impresionante en los últimos 40 años, debido a la presencia cada vez más notoria de computadores de alta velocidad de procesamiento y gran capacidad de almacenamiento. Este hecho aplicado a campos de estudio como la mecánica de fluidos y transferencia de calor

han dado lugar a la dinámica de fluidos computacional (DFC), lo cual complementa todos los estudios teórico-experimentales hechos hasta ahora, sirviendo esto como una opción efectiva y de bajo costo para simular los diversos casos de flujos reales.

Este avance ha centrado las discusiones acerca de los diversos métodos numéricos creados.

Los métodos de simulación numérica han contribuido de gran manera al desarrollo de los diversos campos de la ingeniería, especialmente la Ingeniería Mecánica. Los más empleados al principio de su aplicación fueron el MEF y el Método de Dominio (MED). Por ello el establecimiento del MEC es más reciente y debido a esto, su uso no se encuentra muy difundido.

Otros métodos tales como el método de los volúmenes finitos, el método de elementos finitos basados en volúmenes de control (MEFVC) que utilizan el método de la mediatriz o los diagramas de Voronoi son técnicas muy utilizadas en condiciones muy especiales y específicas, a su vez este desarrollo ha dado lugar a la creación de otras técnicas computacionales emergentes como las redes neuronales, los algoritmos genéticos y lógica difusa.

El uso de estos métodos se justifica de acuerdo a la naturaleza del problema. Por ejemplo, cuando una empresa desee obtener certificaciones de calidad con respecto a la fabricación de una pieza, los ensayos efectuados a dicho componente permite arrojar los resultados necesarios para que, posteriormente, el organismo evaluador otorgue o no tal certificación.

Su uso también se justifica cuando los resultados obtenidos por métodos analíticos o numéricos no son confiables o cuando se desee corroborar los resultados arrojados por tales medios.

Capítulo 3

Métodos Numéricos

En Ingeniería

Método de Diferencias Finitas

El Método de Diferencias Finitas es un método de carácter general que permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales definidas en recintos finitos. Probablemente es el primer método numérico utilizado en la resolución de problemas electromagnéticos; existe documentación en la que se prueba que Gauss utilizó este método. Su uso se generalizó con la aparición de los primeros ordenadores, y la bibliografía sobre el mismo es abundante en los años 60, especialmente en relación con el análisis de guías de onda.

Por su sencillez conceptual y los escasos conocimientos matemáticos necesarios para su aplicación, el Método de Diferencias Finitas constituye un mecanismo idóneo para la resolución de problemas electromagnéticos.

El Método de Diferencias Finitas obtiene una solución aproximada de las ecuaciones diferenciales definidas en un recinto o región de trabajo. Sobre dicho recinto habrá definidas unas condiciones de contorno o frontera y unas condiciones iniciales que marcarán el punto de partida en la solución de problemas concretos.

El primer paso para la aplicación del método es definir el recinto donde ha de calcularse el valor de la función incógnita a resolver. Dicho recinto, que en este caso particular será de dos dimensiones, se discretiza en un número variable de puntos formando una malla o matriz rectangular. Esos puntos se llamarán nodos. La aplicación del Método de Diferencias Finitas sobre el recinto dará como resultado

conocer el valor de la función incógnita en cada uno de esos nodos. El número y disposición de los mismos depende de la exactitud que se desea en las soluciones.

El método aproxima la función incógnita en cada nodo por su desarrollo en serie de Taylor. El número de términos del desarrollo, que se tendrán en cuenta, será el suficiente para que junto con las condiciones de contorno y las condiciones iniciales, sea posible eliminar las derivadas y obtener, de este modo, una ecuación que nos permita conocer el valor de la función en cada nodo. Dicha ecuación, como se verá más adelante, relaciona el valor de la función en un nodo con el valor de la función en los nodos adyacentes.

El proceso anterior se repite para cada uno de los nodos, obteniéndose un sistema de ecuaciones, cuya resolución conduce a la obtención de la solución aproximada que se está buscando. La solución del sistema de ecuaciones es un proceso iterativo que puede resolverse utilizando diferentes métodos. La aplicación de un método u otro y el número de iteraciones que consideremos influirán en el resultado final.

Método de Elementos Finitos

Las ideas básicas del MEF se originaron gracias a los avances en el análisis estructural de aeronaves. Por ejemplo, En el año de 1941 Hrenikoff presentó una solución de problemas usando el “Método de Trabajo en el Marco”, también en un artículo publicado en 1943, Courant usó interpolación polinomial por partes sobre subregiones triangulares para modelar problemas de torsión. Turner y otros investigadores obtuvieron matrices de rigidez para armaduras vigas y otros elementos y presentaron sus hallazgos en 1956. Clough fue el primero en bautizar este método y emplear el término “Elemento Finito” en 1960.

En los años 80, Durocher y Gaspar desarrollaron una técnica automática para hacer la discretización el cual se basa en el método de generación de superelementos

presentado por Zienkiewicz y Phillip conocidos por el nombre de la malla de elementos finitos por subdivisión de elementos grandes en elementos más pequeños. Este trabajo consistía en delinear óptimamente los contornos de las regiones en la medida que la subdivisión de los superelementos usados sea mayor. Una mejor adaptación a elementos curvilíneos los representan los superelementos cuyas funciones de interpolación sean cuadráticas¹(7).

En la década de los 80 Yaumativ y Kuan Chen Realizan un trabajo en el cual en base a algoritmos generan elementos triangulares bi y tridimensionales. Ghassemi bajo el concepto de superelementos hizo que las regiones donde las regiones presentan más problema presentarán mayor cantidad de nodos que aquellas donde el dominio sea más regular.

Método de Elementos de Contorno

El Método de Elementos de Contorno (MEC) es un resultado más de la aparición y vertiginoso desarrollo de los computadores digitales en la segunda mitad del siglo XX. Como en otros casos, las posibilidades de cálculo que ofrece el computador han servido para abordar la aplicación práctica de formulaciones teóricas establecidas desde hace algún tiempo.

Sin embargo, el MEC es de desarrollo más reciente que otros métodos de cálculo, como el método de diferencias finitas (MDF) y el método de elementos finitos (MEF).

Se atribuye a Jaswon [1], en 1963, el desarrollo de la primera técnica numérica denominado Método Indirecto (MI). Dicho desarrollo sirvió para resolver las ecuaciones integrales de Fredholm [2] las cuales se originaron en 1903. Dicho estudio permitió el estudio de problemas de potencial.

Este mismo año Kupradze [3] presento la aplicación del MI en problemas de elastostática y en 1967 Rizzo [4] desarrolló la versión directa del método el cual se

¹ Estas se denominan pserendipicos debido a que están conformados por elementos de ocho nodos.

aplicaba a problemas bidimensionales. Este estudio estuvo basado en la solución fundamental de Kelvin para el medio elástico infinito.

En el año de 1969 Cruse (5) desarrolló el Método Directo (MD) para el análisis de dominio tridimensional en elastostática, usando interpolación constante de variables sobre la frontera.

Años después Ricardella [6] (1973) y Lachat y Watson (1975) (7) aplicaron el método considerando interpolación lineal, parabólica y cúbica sobre la frontera lo cual proporcionó mejoras sustanciales en los resultados obtenidos. Dichos trabajos lograron incorporar toda la filosofía de discretización y cálculo del MEF que sirvieron para dar las puertas al desarrollo del MEC.

Con todos estos trabajos, se pudo entonces considerar al MEC como un procedimiento de cálculo establecido, el cual genera un flujo más o menos continuo de publicaciones. En el año de 1977 se publica el primer libro introductorio acerca de este (8).

En 1977 Rizzo, Shippy y Stippes [9] proporcionan soluciones para considerar las fuerzas de dominio debidas al peso propio, fuerzas centrífugas y estados estacionarios de temperatura dentro de la formulación integral del método directo.

Nakahuma (1979) [10] aplicó las funciones de Mindlin (1936) [10] para el análisis de dominio tridimensional seminfinito en elastostática y posteriormente Telles y Brebbia (1981) [11] presentaron las expresiones analíticas de la solución fundamental para dominio bidimensionales elásticos seminfinitos.

A partir de entonces se produce un desarrollo significativo del MEC en el campo de la ingeniería, llegando a ser imposible nombrar todas las investigaciones y publicaciones presentadas a las comunidades científicas y de investigación que han usado el MEC.

Actualmente, los logros obtenidos en las investigaciones realizadas que hacen uso del MEC ha dado paso a novedosas fórmulas de integración numérica que se usan para evaluar de una manera óptima las integrales singulares que comúnmente

aparecen en un método de esta índole, optimizando así la forma de trabajo inclusive cuando se tengan geometrías complicadas.

El desarrollo del MEC es diez o quince años posterior al MEF, lo que ha contribuido a que sea un método menos usado por la poca popularidad que esta posee. Las aplicaciones industriales del MEC son relativamente escasas. Solo se ha visto provechoso su uso en aquellos casos en que el MEC es intrínsecamente más adecuado que el MEF, como los problemas de dominios infinitos (mecánica de suelos, acústica, interacción fluido-estructura), y en problemas donde se requiere gran precisión en el cálculo de tensiones (concentración de tensiones en problemas de mecánica de fractura). Por el contrario el uso del MEC a los problemas que involucran fluidos no han reportado resultados aceptables, por lo que los expertos no recomiendan su uso en esta aplicación.

Ideas Básicas Acerca del Método de Elementos de Contorno

Tanto el MEF como el MED pueden clasificarse como métodos numéricos de “dominio”. En esta clase de técnica el dominio Ω de definición del problema, o dominio de cálculo, se divide en subdominios, celdas o elementos. Luego la aproximación numérica a la solución del problema de campo se elabora a partir de las funciones que satisfacen por su definición, las condiciones de contorno del problema de modo parcial o total.

Otra forma para poder construir la aproximación numérica es utilizar funciones que satisfagan las ecuaciones del problema en el dominio Ω , aunque no cumplan de entrada las condiciones de contorno. Este tipo de técnicas se conocen, por contraposición a las anteriores, como métodos de “contorno”.

El MEC es un método de contorno. El término “elementos de contorno” consiste en tomar el contorno del dominio de cálculo y dividirlos en una serie de “elementos” sobre las cuales las funciones de aproximación pueden variar de determinada manera, del mismo modo que sucede en el MEF dentro de los elementos que divide en que se divide el dominio.

Los métodos de contorno poseen algunas ventajas sobre los métodos de dominio, estos son:

- Sólo trabajan sobre el contorno S del dominio de cálculo Ω . Siendo más sencillo definir el contorno que definir el dominio completo. Pudiéndose inferir que el MEC requiere únicamente la discretización del contorno, reduciéndose la dimensión del problema con respecto al MEF o al MDF.
- Si el problema es de dominios infinitos, son muchos más fáciles de tratar.
- Se obtiene el mismo grado de precisión en las dos variables duales del problema tales como desplazamientos y tensiones, potenciales y flujos, etc.

Además, los Métodos de Contorno trabajan con los valores de las funciones incógnitas en el contorno. Entonces, si se desean calcular valores en puntos internos del dominio, es preciso establecer un algoritmo complementario que, en general, es relativamente costoso.

En la figura 1 se muestra la forma como el MEC realiza la discretización en comparación con sus contrapartes del MEF y el MDF.

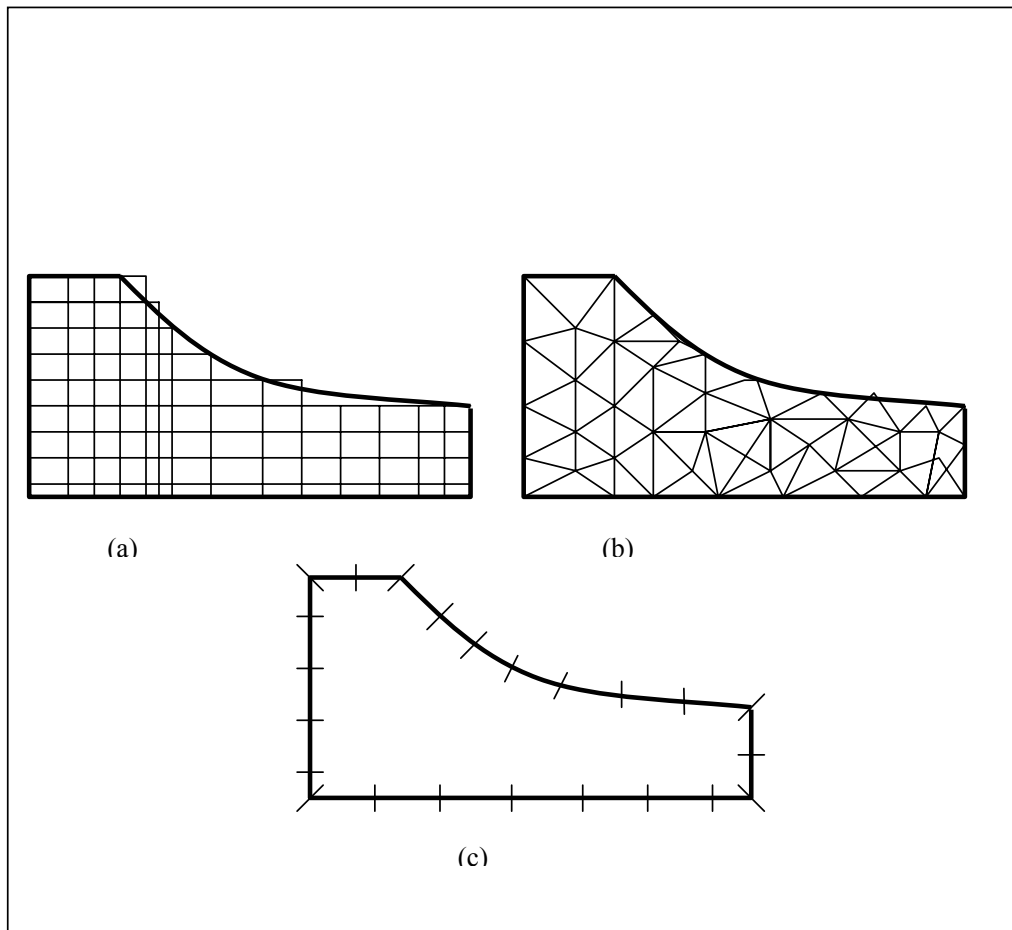


Fig. 1 Discretizaciones realizadas por los Métodos: (a) diferencias finitas (MDF), (b) Elementos finitos (MEF), (c) Elementos de Contorno (MEC)

Capítulo 4

Etapas para la Resolución De Problemas por Métodos Numéricos

La implementación de métodos numéricos para la resolución de problemas ingenieriles, requiere de varios requisitos para efectuar el estudio. Cualquier método numérico usado necesita de la transformación del tipo de aplicación, ya que estos fueron creados con otra perspectiva distinta a los medios tradicionales que se usaban antes de la aparición de estas técnicas.

Los métodos numéricos han revolucionado a todos los estilos analíticos tradicionales y el auge del desarrollo computacional ha contribuido a tal hecho, ya que estos transforman sistemas continuos a discretizados.

Para resolver problemas utilizando métodos numéricos se requieren de tres etapas. Estos son.

- El pre-proceso.
- El proceso.
- El post-proceso.

El Pre-Proceso

Para el uso de cualquier método numérico aplicado a la ingeniería, es necesario preparar los datos de entrada con el fin de obtener la solución descrita. Estos datos deben ser capaces de dar al programa principal las coordenadas de cada nodo y la topología de la malla, de tal manera de poder conectar los nodos de un

elemento entre sí. En aplicaciones más complejas donde la malla esté compuesta por muchos nodos, el trabajo de introducción de tales datos es embarazoso, además, el hecho de que una vez que se tiene la malla formada es necesario “afinarla” y optimizarla para la solución particular.

La elaboración de las mallas es lo que permite transformar el problema continuo original en uno discreto. Esto es lo que se conoce como **discretización**, el cual es una labor muy tediosa en casos donde la geometría sea compleja y el mallado posea una gran cantidad de elementos y nodos. La necesidad del mallado, es simplemente porque los métodos numéricos parten de un modelo discretizado para desarrollar los cálculos y no de un modelo continuo como los que se manejaban anteriormente por métodos analíticos.

A principio de estas aplicaciones estas se efectuaban de forma manual, para ello, se hacían los programas de análisis de métodos numéricos a usar, se elaboraba la geometría del problema, se dibujaba el mallado y luego se especificaban las coordenadas tanto de los nodos como los de la geometría del mismo.

El desarrollo de programas computacionales de dibujo ha permitido ahorrar esta tediosa tarea para algunos métodos como Elementos Finitos o Diferencias finitas pero para Elementos de Contorno aún no se han desarrollado formas de construir automáticamente las mallas.

El desarrollo de programas que generen estas mallas para el MEC hace que la discretización gane versatilidad ya que al tener datos introducidos el usuario puede adaptar el mismo a su conveniencia, aportando eficiencia y rapidez a sus procesos.

Esta fase donde se convierte el problema continuo en discreto, es lo que se conoce como preproceso y como todo método numérico este es una etapa vital para el estudio ya que el fundamento de estos parten de este hecho. Los métodos numéricos no se pueden aplicar a sistemas continuos.

Las mallas elaboradas deben adaptarse de modo que en aquellas zonas donde exista gran fluctuación de las soluciones (como por ejemplo en materiales anisotrópicos) en el cual las propiedades físicas pueden cambiar significativamente

de una región a otra especialmente en cercanías de contorno irregulares donde la solución es impredecible.

Un generador de mallas por lo general requiere de tres tipos de entrada:

- Las coordenadas de los nodos.
- Las conectividades de los elementos.
- El número de las coordenadas de cada elemento.

Se dijo anteriormente que la mayoría de los programas existentes trabajan con el MEF es que no es posible manipular la malla en un sector denominado dominio sin que el resto de los subelementos quede afectado.

Para los efectos de este trabajo se requieren para efectuar el mallado las siguientes entradas:

- Las coordenadas del problema.
- Las conectividades Geométricas de cada uno de estos puntos.

Formas de efectuar la discretización

Para llevar a cabo el preproceso se establecen diversos medios para la conversión de continuo a discreto. Para el caso a tratar de Elementos de Contorno en problemas bidimensionales, solo se hará énfasis en dos formas de efectuar la discretización:

- Por elementos lineales
- Por elementos cuadráticos

Por Elementos Lineales:

Esta forma de discretización está comprendida por elementos compuestos de dos nodos, ambos colocados a los extremos del elemento, tal como se muestra en la figura:

Por Elementos de Cuadráticos:

Esta forma de discretización está comprendida por elementos compuestos de tres nodos dos de ellos colocados a los extremos del elemento y otro entre estos, tal como se muestra en la figura:

El Proceso

Esta es la etapa donde se recogen los datos de discretización arrojados en el preproceso y se evalúan en las ecuaciones pertinentes para obtener la data que luego se visualizará en el postproceso. En esta etapa se recibe la data geométrica de los puntos que constituyen cada nodo y cada elemento ordenado en un sentido y con una consecutividad dada. Una introducción errónea de tales datos arrojará automáticamente un resultado equivocado en esta fase y, por supuesto, en el postproceso.

En esta fase también se reciben datos complementarios para el desarrollo del mismo.

El Post-Proceso:

La utilización de métodos numéricos en ingeniería genera habitualmente un gran volumen de información, correspondiente a los resultados numéricos del análisis realizado por el modelo. La manipulación de estas grandes cantidades de información numérica es difícil y, por lo general, resulta casi imposible realizarlo con un grado razonable de confiabilidad.

Por esta razón existe el uso de los post-procesadores de elementos numéricos. Estos post-procesadores son todos aquellos programas de computador que permiten una rápida y eficiente interacción del usuario con toda aquella data resultante del proceso y, esencialmente, deben exhibir las siguientes características.

- Fácil y rápida interpretación de los resultados.
- Eliminar la necesidad de consultar gruesos y engorrosos manuales para su utilización

- Manejo simultáneo de diversa data de resultados.
- Permitir un manejo sencillo para el usuario de las opciones que se ofrecen mediante familias jerarquizadas de menú.

Un algoritmo post-procesador que reúna todas estas características, estará en capacidad de alcanzar los dos objetivos básicos primordiales que deben ser satisfechos:

- Proporcionar una visión global del modelo y sus variables asociadas calculadas.
- Ayudar al usuario a detectar las zonas críticas del modelo.
- Esta rápida detección de zonas críticas en el modelo, permitirá modificar continuamente la pieza con la finalidad de optimizarla de acuerdo a los requerimientos. El cambio de las condiciones de contorno también será útil para este análisis.

Capítulo 5

Desarrollo del

Preprocesador PREPEC 2D

Selección del Software:

Al comienzo del presente trabajo, se disponía de una gran cantidad de softwares para elaborar el mismo. Pero la preocupación se centraba en buscar programas que se ajustaban mejor a este caso. Pero además se desea dar continuidad al trabajo desarrollado por Portela A y Aliabadi en. 1992 ya que este trabajo no solo realiza el preproceso sino también el proceso y postproceso. Con esto se tendrá, en un futuro, un programa completo para el análisis bidimensional por el MEC.

Este trabajo desarrollado por Portela y Aliabadi fue desarrollado en lenguaje FORTRAN[®], lo cual resulta conveniente para la continuidad del mismo el uso de este mismo lenguaje. Este lenguaje tiene como principal característica un poder de cálculo robusto.

En la actualidad FORTRAN[®] están disponibles en versiones tipo VISUAL, conocidos comercialmente como COMPAQ VISUAL FORTRAN[®]. Los cuales no solo ofrece grandes ventajas a la hora de realizar cálculos sino además que ofrecen una interfaz gráfica más agradable al usuario, la cual para el propósito del presente trabajo la hace bastante recomendable para su desarrollo.

AutoCad

AutoCad es una palabra compuesta por la marca que desarrollo el producto (Autodesk) y las siglas cad que significan: computer aided desing (diseño asistido por computadora).

Este software posee una gran cantidad de virtudes las cuales las hacen muy tentativas al usuario que desee hacer cualquier modelaje geométrico en un tiempo bastante aceptable. En este caso particular se selecciona tal programa debido a que este da la información geométrica fácilmente comparada con otros softwares existentes en el mercado, además de ser una herramienta bastante conocida.

Una breve historia del CAD: Antecedentes y evolución.

La evolución y desarrollo de las aplicaciones CAD han estado relacionados con los avances del sector informático. El nacimiento del CAD, se sitúa al final periodo de los ordenadores de primera generación, y su desarrollo a partir de la aparición de los ordenadores de cuarta generación donde aparecen los circuitos de alta escala de integración LSI (Large Scale Integration) y lenguajes de alto nivel. altamente desarrolladas.

A destacar, el gran interés estratégico que desde el principio ha tenido el CAD para las empresas, por el impacto enorme en la productividad. Las grandes empresas desde el principio han apostado por el CAD y ello supone importantes inversiones, que lógicamente potencian y convierten el CAD en un producto estratégico con un gran mercado.

En 1955, se presenta El primer sistema gráfico SAGE (Semi Automatic Ground Enviroment) de la Fuerzas aéreas norteamericanas (US Air Force's), es desarrollado en el Lincoln Laboratory del MIT (Massachussets Institute of Technology). Este sistema procesaba datos de radar y otras informaciones de localizaciones de objetos mostrándolos a través de una pantalla CTR.

Más tarde, en el año 1962, Ivan E. Sutherland desarrolló su tesis doctoral denominada "A Machines Graphics Communications System" desarrolla en el Lincoln Laboratory (MIT) el sistema Sketchpad, el cual establece las bases de los gráficos interactivos por ordenador tal y como hoy se conoce. También propuso la idea de

utilizar un teclado y un lápiz óptico para seleccionar situar y dibujar, conjuntamente con una imagen representada en la pantalla. Este autor utilizó una innovadora estructura de datos. A diferencia de todo lo que se había hecho hasta entonces, tal estructura estaba basada en la topología del objeto que iba a representar, es decir describía con toda exactitud las relaciones entre las diferentes partes que lo componía, introduciendo así, lo que conoce como Programación orientada a Objetos.

Antes de esto, las representaciones visuales de un objeto realizadas en el ordenador, se habían basado en un dibujo y no en el objeto en si mismo. Con el sistema Sketchpad de Sutherland, se trazaba una clara distinción entre el modelo representado en la estructura de datos y el dibujo que se veía en la pantalla.

Un año más tarde El sistema Sketchpad introducido en las universidades causa gran interés. Quizás lo más interesante fuera la demostración de que el ordenador podía calcular que líneas eran las que definían la parte vista del objeto al tiempo que borraba de la pantalla el resto.

En el año 1965, Basado en ITEK Control Data Corp., se comercializa el primer CAD. Con ello, A. R. Forrest realiza el primer estudio de investigación con un CAD, realizando intersección de dos cilindros.

En el año de 1970 Las grandes compañías del sector automóvil y aerospacial (General Motor, Ford, Chrysler, Lockheed) adoptan los sistemas CAD, para posteriormente la AMD (AVION MARCEL DASSAULT), desarrolla el primer sistema CAD/CAM y Lockheed es la primera empresa que lo compra.

Para 1978 la compañía COMPUTERVISION desarrolla la primer terminal gráfico que utiliza la tecnología raster. Luego varias empresas como Boeing, General Electric y NIST se suman a este trabajo aplicando además un desarrollo de un formato neutral de intercambio de datos IGES (Inicial Graphics Exchange Standard).

En el año de 1982 John Walker funda AUTODESK con 70 personas con la idea de producir un programa CAD para PC y luego se inicia la aplicación del sistema universal de transferencia de datos STEP (Standard for the Exchange of Product model data).

En el año de 1985 Se presenta MicoStation, desarrollo CAD para PC, basado en PseudoStation de Bentley System. Permite ver dibujos en formato IGDS, sin necesidad del software de Interghhs.

En el año de 1992 se realiza el primer AutoCAD sobre plataforma SUN (procesadores Risc), tres años más tarde sobre Windows. El sistema Unigraphics también adopta esta misma plataforma.

El crecimiento de Autodesk es vertiginoso y en el año de 1999 ya poseía 1.000.000 de usuarios y partir de entonces esta a sido la pionera en el desarrollo de sistemas de dibujo asistido por computadora. Además se han desarrollado software especiales para cada necesidad. Este crecimiento ha sido cada vez más acentuado con la adopción de ventas en Internet. En el año 2001 se presentó la versión de Autocad 2002 que destaca la función de asociación de funciones de las dimensiones en el dibujo, el editor gráfico de atributos, la definición de bloques y un conversor de capas asociado a la funcionalidad del gestor de normas. Orientación hacia Internet.

Fortran

Fortran es lenguaje de propósito general, principalmente orientado a la computación matemática, por ejemplo en ingeniería. Fortran es un acrónimo de FORMula TRANslator, y originalmente fue escrito con mayúsculas como FORTRAN. Sin embargo la tendencia es poner sólo la primera letra con mayúscula, por lo que se escribe actualmente como Fortran. Fortran fue el primer lenguaje de programación de alto nivel. El desarrollo de Fortran se dio en la década de los 50 en IBM y ha habido muchas versiones desde entonces. Por convención, una versión de

Fortran es acompañada con los últimos dos dígitos del año en que se propuso la estandarización. Por lo que se tiene:

- Fortran 66
- Fortran 77
- Fortran 90 (95)

La versión más común de Fortran actualmente es todavía Fortran 77, sin embargo Fortran 90 esta creciendo en popularidad. Fortran 95 es una versión revisada de Fortran 90 la cual fue aprobada por ANSI en 1996. Hay también varias versiones de Fortran para computadoras paralelas. La más importante es HPF (High Performance Fortran), la cual es de hecho el estándar.

Los usuarios deben ser cuidadosos con los compiladores de Fortran 77, ya que pueden manejar un superconjunto de Fortran 77, por ejemplo contienen extensiones no estandarizadas.

Fortran es un lenguaje de programación dominante usado en aplicaciones de ingeniería y matemáticas, por lo que es importante que se tenga bases para poder leer y modificar un código de Fortran. Algunas opiniones de expertos han dicho que Fortran será un lenguaje que pronto decaerá en popularidad y se extinguirá, lo que no ha sucedido todavía. Una de las razones para esta sobrevivencia es *la inercia del software*, ya que una vez que una compañía ha gastado muchos millones de dólares y de años en el desarrollo de software, no le es conveniente traducir el software a un lenguaje diferente, por el costo que implica y por ser una tarea difícil y laboriosa.

Elaboración del Software

Obtención de la Data Geométrica

La resolución de problemas ingenieriles a través de cualquier método numérico, requiere de un planteamiento geométrico. Para llevar a cabo este planteamiento, se hace necesario disponer de los puntos que se encuentren en el contorno del modelo. Posteriormente se deben dar las conectividades geométricas existentes entre cada punto. Al disponer de esta información, las condiciones estarían dadas para efectuar el preproceso que permita transformar el problema continuo en uno discreto.

Para el desarrollo de este trabajo estos puntos de contorno se obtienen a través de una lista que proporciona el software de dibujo asistido por computadora AUTOCAD®, el cual permite obtener la información geométrica de las siguientes figuras bidimensionales de interés.

- Líneas.
- Círculos.
- Arcos de Círculos.
- Elipses.
- Arcos de elipses.

En todos los casos, esta lista que proporciona AUTOCAD® no solo da la información completa de la geometría obtenida, sino además toda la información de la construcción del mismo.

A continuación se describe la información que se obtiene en cada uno de estos casos:

6.1.1 Líneas: Aparece el nombre del objeto “LINEA”, el numero de capa a la que pertenece el objeto, el tipo de espacio. un identificador, Las coordenadas XYZ tanto del punto inicial como del punto final, la longitud de la línea, el ángulo en el plano XY y por último los incrementos con respecto a cada uno de los ejes, tal como se muestra en la figura 6.1.1.

```

LINEA      Capa: "0"
           Espacio: Espacio modelo
           Identificador = 96
           de punto, X= 0.3772 Y= 2.4774 Z= 0.0000
           hasta punto, X= 4.5637 Y= 5.0374 Z= 0.0000
           Longitud = 4.9072, Ángulo en el plano XY = 31
           Incremento X = 4.1865, Incremento Y = 2.5600,
Incremento Z = 0.0000

```

Fig. 6.1.1 Información obtenida de línea

6.1.2 Círculos: Aparece el nombre del objeto “CIRCULO”, el número de capa al que pertenece, el tipo de espacio, un identificador, las coordenadas del centro, el radio, la longitud del arco dado por la expresión “circunferencia” igual a $2 \cdot \Pi \cdot \text{radio}$, donde $\Pi = 3.14159$ y el área del círculo, tal como se muestra en la figura 6.1.2.

```

CIRCULO    Capa: "0"
           Espacio: Espacio modelo
           Identificador = 99
           centro punto, X= 0.3577 Y= 5.8804 Z= 0.0000
           radio 1.7144
           circunferencia 10.7718
           área 9.2334

```

Fig. 6.1.2 Información obtenida de Círculo

6.1.3 Arcos de Círculo: Aparece el nombre del objeto “ARCO”, el número de capa al que pertenece, el tipo de espacio, un identificador, las coordenadas del centro, el radio, el ángulo inicial, el ángulo final y la longitud del arco, tal como se muestra en la figura 6.1.3

```

ARCO       Capa: "0"
           Espacio: Espacio modelo
           Identificador = 99
           centro punto, X= 0.3577 Y= 5.8804 Z= 0.0000
           radio 1.7144
           inicial ángulo 358
           final ángulo 96
           longitud 2.9562

```

Fig. 6.1.3 Información obtenida de Círculo

6.1.4 Elipses: Aparece el nombre de objeto “ELLIPSE”, el número de capa al que pertenece, el tipo de espacio, un identificador, la longitud de la elipse, los puntos de referencia del eje mayor y el eje menor (el cual al unirse con las coordenadas del centro dan la orientación de los ejes característicos de la elipse) y la relación de radio de la elipse., tal como se muestra en la figura 6.1.4.

```

ELLIPSE  Capa: "0"
          Espacio: Espacio modelo
          Identificador = A1
          Área: 16.7826
          Circunferencia: 14.6127
          Center: X = 2.3140   , Y = 6.5058   , Z = 0.0000
          Eje mayor: X = -1.9759 , Y = -1.5829 , Z = 0.0000
          Eje menor: X = 1.3193  , Y = -1.6468 , Z = 0.0000
          Relación del radio: 0.8334

```

Fig. 6.1.3 Información obtenida de Elipse

6.1.5 Arcos de Elipses: Aparece el nombre del objeto “ELLIPSE”, el número de capa al que pertenece, el tipo de espacio, un identificador, la longitud del arco de elipse, las coordenadas del centro, los puntos de referencia del eje mayor y del eje menor (el cual al unirse con las coordenadas del centro dan la orientación de los ejes característicos de la elipse). El punto de inicio y el punto final, el ángulo final e inicial del arco de elipse y la elipsicidad, tal como se muestra en la figura 6.1.5.

```

ELLIPSE  Capa: "0"
          Espacio: Espacio modelo
Identificador = A1
Longitud: 7.3506
Center: X = 2.3140 , Y = 6.5058 , Z = 0.0000
Eje mayor: X = -1.9759 , Y = -1.5829 , Z = 0.0000
Eje menor: X = 1.3193 , Y = -1.6468 , Z = 0.0000
Punto inicial: X = 1.6814 , Y = 4.2314 , Z = 0.0000
Punto final: X = 2.9024 , Y = 8.7838 , Z = 0.0000
Ángulo inicial: 36
Ángulo final: 217
Relación del radio: 0.8334

```

Fig. 6.1.3 Información obtenida de Arcos de Elipse.

Ordenamiento de la Información

Posterior a revisar la data obtenida en el programa AUTOCAD[®] se realizará una selección de la información requerida para el desarrollo del trabajo, desechando la información restante. Para ello se procede con estas listas a colocar las mismas en un formato de texto (.txt) y luego desarrollar un programa que lea esta información establecida en un formato estandarizado. La información a seleccionar es la siguiente:

6.2.1 Líneas. Se tomará el nombre del objeto "LINEA" y las coordenadas del punto inicial y final de esta.

6.2.2 Círculos: Se seleccionará el nombre del objeto "CIRCULO", las coordenadas del centro y el radio del círculo.

6.2.3 Arcos de Círculo: Se seleccionará el nombre del objeto "ARCO", las coordenadas del centro, el radio del arco, el ángulo inicial y final.

6.2.4 Elipses: Se seleccionará el nombre del objeto "ELLIPSE" las coordenadas del centro de la elipse, las direcciones del eje mayor y menor y la relación de radios o excentricidad.

6.2.5 Arcos de elipses: Se seleccionará nuevamente, como en el caso anterior, el nombre del objeto "ELLIPSE", las coordenadas del centro, el ángulo inicial y final del arco de elipse, las coordenadas del punto final e inicial del arco, las direcciones del eje mayor y eje menor de la elipse y la excentricidad.

Posterior a tomar la información geométrica se procede a elaborar una rutina que permita obtener una consecutividad de puntos de forma tal que los objetos pertenecientes al contorno del problema se recorran en un sentido ya sea horario o antihorario.

Complementos de Información para Pre-Proceso

Para poder efectuar completamente el proceso de discretización que requiere el MEC, se debe introducir otra información tales como el tipo de discretización a efectuar, tales como, elementos lineales o cuadráticos, el numero de elementos que componen cada objeto y el número de nodos, el tipo de caso (STRAIN o STRESS). Otra información requerida es posteriormente serán le módulo de Young (E), la razón de Poisson (ν) y el número de cuadratura de Gauss para casos de elasticidad, y el coeficiente de Conductividad Térmica (k) para los casos de potencial.

Elaboración de Programa para Pre-Proceso

Debido a que la data arrojada por el programa Autocad[®] no se dispone de manera ordenada, se procederá a realizar un ordenamiento de la misma para ello se elaborará un programa que realice tal función de forma tal que se disponga un recorrido dado a cada modelo a estudiar.

Teniendo los puntos de contorno y los objetos ordenados, se procederá a elaborar la discretización. Para ello se guardará en una matriz central toda la información geométrica ordenada de tal forma que se puedan aplicar estrategias a fin de elaborar el preproceso fácilmente.

Discretización de líneas: La línea queda descrita como la distancia más cierta existente entre dos puntos (Véase Fig 5.1.)

Para elaborar la discretización de las líneas utilizaremos el recurso de una ecuación paramétrica de la recta. Esta ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$X(j) = X_1 + \lambda(X_2 - X_1) \quad \text{Ecuac 5.1a}$$

$$Y(j) = Y_1 + \lambda(Y_2 - Y_1) \quad \text{Ecuac 5.1b}$$

Donde: $\lambda = 1 / \text{Div}$; Div, será la cantidad de divisiones de un objeto

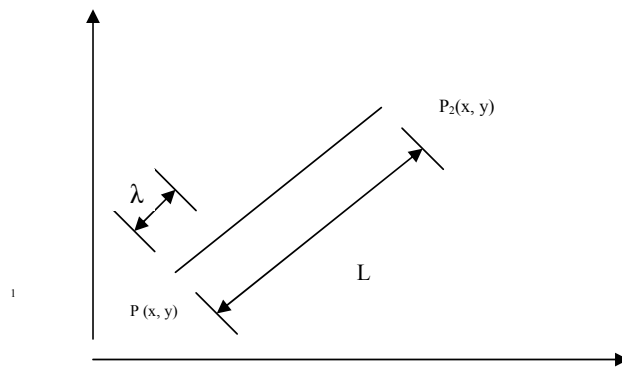


Fig. 5.1 Discretización de líneas

Discretización de círculos y arcos de círculos: Un círculo o circunferencia es el lugar geométrico de todos los puntos tal que la distancia a un punto fijo, el cual se llamará Centro, es siempre constante. (Véase Fig.5.2)

Para discretizar los círculos se procederán a realizar lo siguiente:

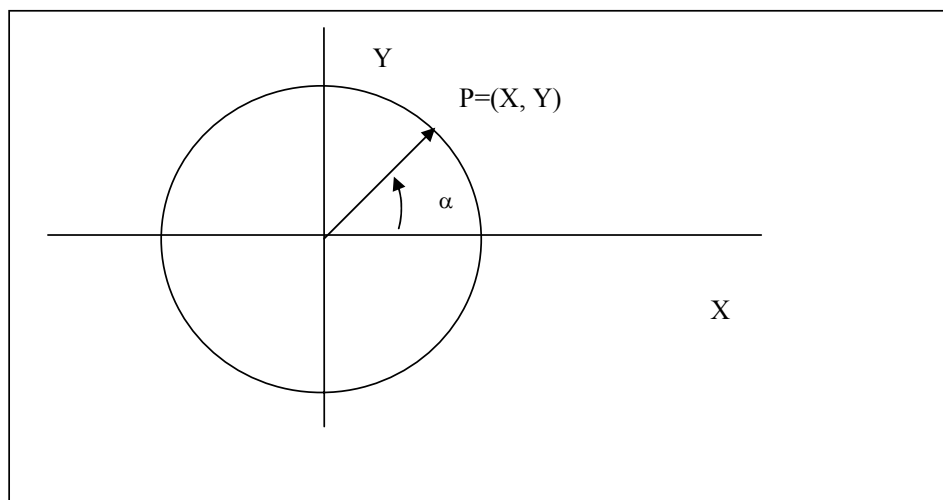


Fig.5.2 Recorrido del círculo para su discretización

Se aplicarán las siguientes ecuaciones para cada iteración:

$$X(j) = r \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Ecuac 5.2a}$$

$$Y(j) = r \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Ecuac 5.2b}$$

Donde θ es el ángulo que forma el radio vector con el eje X, θ se recorre desde el ángulo inicial que se llamará θ_1 y el ángulo final θ_2

El caso más general de la circunferencia se presenta cuando este trasladado del eje de coordenadas absoluto.

En este se tiene lo siguiente:

$$X(j) = r \cdot \cos(\alpha) + X_c \quad \text{Ecuac 5.2c}$$

$$Y(j) = r \cdot \sin(\alpha) + Y_c \quad \text{Ecuac 5.2d}$$

Donde X_c y Y_c son las coordenadas del centro de la circunferencia con respecto al sistema de coordenadas absolutas definido.

Discretización de Elipses y arcos de elipse: Una elipse es el lugar geométrico de todos los puntos tal que la suma de la distancia a dos puntos fijos llamado focos es siempre constante. (Véase Fig. 5.3).

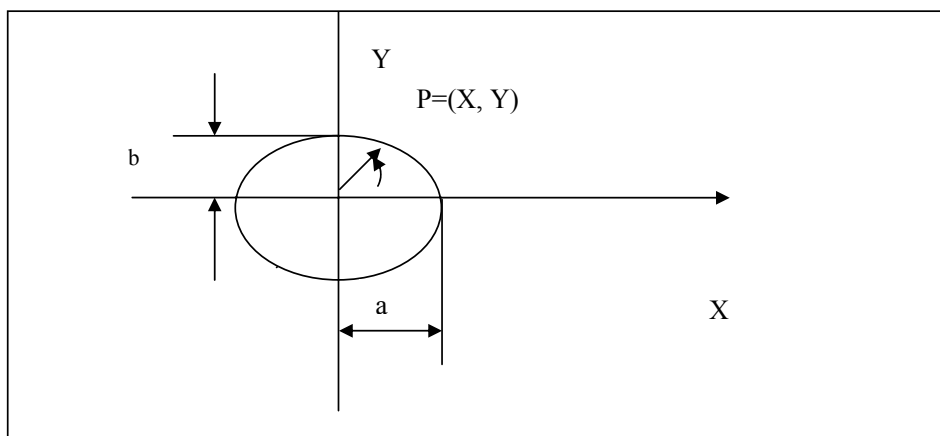


Fig. 5.3 Recorrido de las elipses y arcos de elipses para la discretización

Para elaborar la discretización de las elipses resultará útil el uso de las ecuaciones paramétricas para esta curva. La aplicación de tales relaciones, simplificará significativamente el desarrollo del programa porque evita el uso de ecuaciones particulares de la curva para distintos ángulos de recorrido.

Las ecuaciones paramétricas de la elipse son;

$$X(\Theta) = a \cdot \cos(\Theta) \quad \text{Ecuac 5.3a}$$

$$Y(\Theta) = b \cdot \sin(\Theta) \quad \text{Ecuac 5.3b}$$

Como se ve, estas nos arroja los valores de X e Y según el ángulo de recorrido.

En el caso de elipses que tengan el eje mayor de la misma con un determinado ángulo de inclinación se deben aplicar las condiciones de rotación de sistemas de coordenadas. Dichas condiciones conducirán a establecer una matriz que permita tal efecto.

Para ver esto es necesario colocar la elipse en una posición genérica con respecto a un sistema de coordenadas cartesianas X-Y tal como se muestra en la figura 5.3.1.

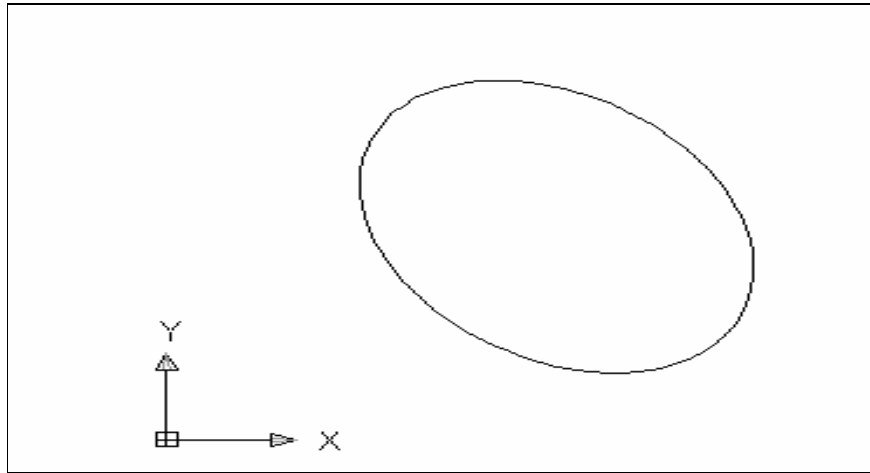


Fig. 5.3.1 Vista genérica de la elipse

Para poder resolver este caso tan general, se debe expresar cada punto perteneciente a la elipse en el sistema de coordenadas XY. Para ello es necesario ubicarse en la Fig 5.3.2 con la finalidad de poder extraer las condiciones que permitan devolver la rotación.

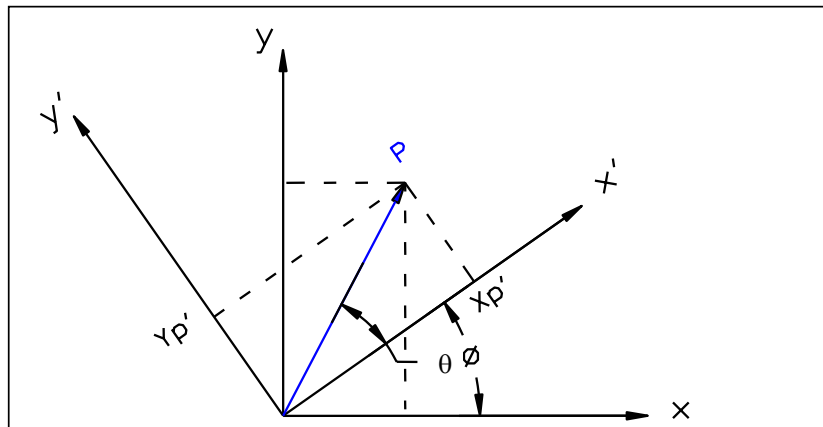


Fig. 6.4.4.2-Rotación de coordenadas.

De aquí se puede decir lo siguiente:

$$X_p = p \cdot \cos(\Theta) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3c})$$

$$Y_p = p \cdot \sin(\Theta) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3d})$$

$$X = p \cdot \cos(\Theta + \phi) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 e})$$

$$Y = p \cdot \sin(\Theta + \phi) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 f})$$

Desarrollando la suma de los cosenos y senos de los ángulos de las ecuaciones (Ecuac 5.3 e) y (Ecuac 5.3 f) se tiene lo siguiente:

$$X = P \cdot \cos(\Theta) \cdot \cos(\phi) - P \cdot \sin(\Theta) \cdot \sin(\phi) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 g})$$

$$Y = P \cdot \sin(\Theta) \cdot \cos(\phi) + P \cdot \cos(\Theta) \cdot \sin(\phi) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 h})$$

Introduciendo las ecuaciones (Ecuac 5.3c) y (Ecuac 5.3d) en (Ecuac 5.3 g) y (Ecuac 5.3 h)

se tiene lo siguiente:

$$X = X_p \cdot \cos(\phi) - Y_p \cdot \sin(\phi) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 i})$$

$$Y = X_p \cdot \sin(\phi) + Y_p \cdot \cos(\phi) \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 j})$$

Expresando en forma matricial se tiene que:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \end{pmatrix} \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 k})$$

Por Último para tomar en cuenta la traslación que la figura posea, para ello se sumarán las coordenadas del centro de la elipse en las ecuaciones (5) y (6).

$$X = X_p \cdot \cos(\phi) - Y_p \cdot \sin(\phi) + X_c \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 l})$$

$$Y = X_p \cdot \sin(\phi) + Y_p \cdot \cos(\phi) + Y_c \dots\dots\dots (\text{Ecuac 5.3 m})$$

Dónde X_c y Y_c son las coordenadas del centro de la elipse con respecto al sistema de coordenadas absoluto del dibujo.

Obtención de la Data de Pre-Proceso:

Para obtener la data se creará una rutina en FORTRAN que lea la información disponible en un archivo de texto. En el programa AUTOCAD, después de haber efectuado el dibujo se procederá a obtener de las listas de este programa y llevarlas al formato de texto descrito. La rutina de FORTRAN efectuada abrirá y leerá a este archivo de texto. De allí se obtiene toda la data necesaria y procesarla para realizar el mallado.

Visualización de la Discretización

Este se realiza con la finalidad de ver si el programa esta realizando las operaciones de discretización de cada objeto que componen el problema de una manera correcta. Para ello después de haber efectuado la lectura de datos y un ordenamiento adecuado, se procederá a diferenciar cada objeto y a aplicar cada una de las estrategias de discretización ya explicadas.

Capítulo 6

Manual de Usuario

Ahora se procederá a explicar la forma de trabajo de el programa PREPEC 2D. Aspectos tales como la toma de data, la forma de introducir la misma, las geometrías que esta maneja, etc., son de principal interés para el correcto funcionamiento del mismo.

Para hacer uso del programa PREPEC 2D se deben seguir una secuencia de pasos que a continuación se explican.

Pasos a Seguir para el Uso del Programa PREPEC 2D:

Elabore la Geometría deseada: Inicie una aplicación de AUTOCAD y efectúe la geometría bidimensional a estudiar. La elaboración de dicha geometría debe efectuarse de manera cuidadosa de forma tal de que no haya objetos superpuestos, sea como ejemplo de la figura 6.1

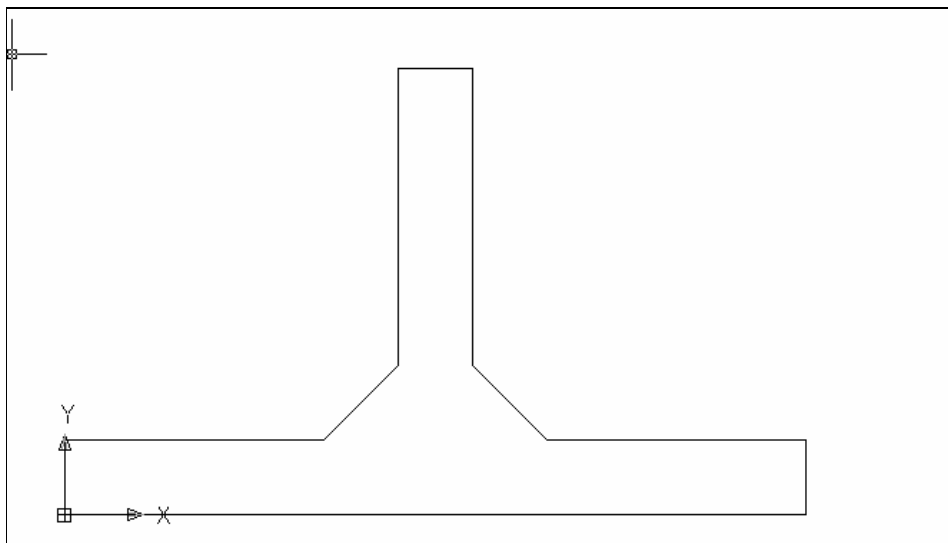


Fig. 6.1 Ejemplo utilizado

Extraiga la data geométrica del problema:

- Después de elaborada la geometría del problema proceda a obtener la lista asociada al dibujo efectuado. Para ello vaya al menú herramientas de Autocad.-Consulta-Lista.

Nota: En caso de haber elaborado las geometrías a través de polilíneas, el usuario debe seleccionar dichas geometrías y “explotarlas” con el comando *explode* de la barra de herramientas del AUTOCAD

- Posteriormente seleccione la figura bidimensional a estudiar, Para ello coloque el cursor en una posición adecuada de forma tal que al arrastrar el

Mouse con el botón izquierdo presionado se pueda mover a otra posición que garantice que todos los objetos de la figura a estudiar queden seleccionados. Para ello, estos estarán representados por una línea segmentada como se muestra en la figura 6.2. El número máximo de contornos que este programa puede estudiar son diez (10).

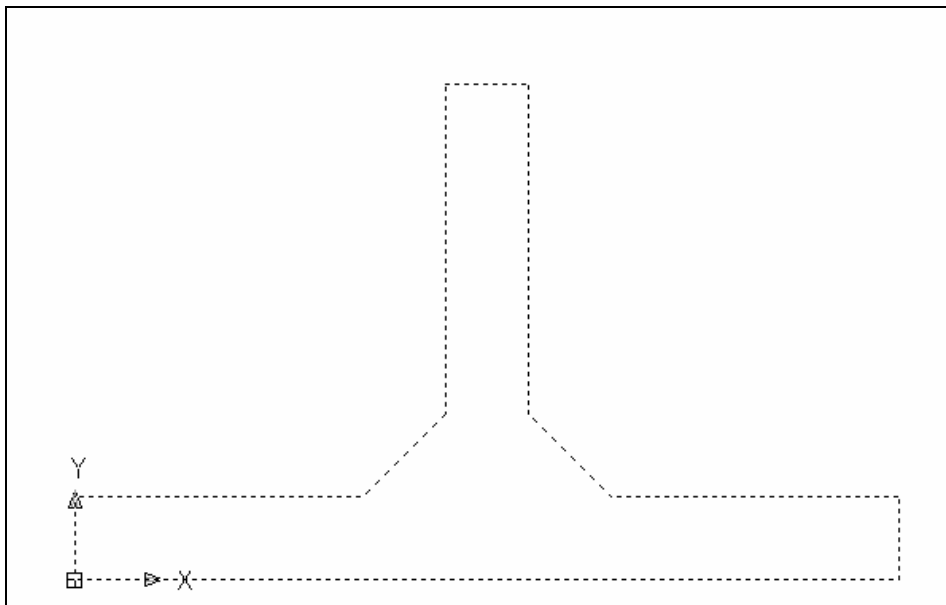


Fig 6.2 Visualización de la selección para la generación de la lista

- Seleccione la data geométrica arrojada ubicando el cursor al comienzo de la lista y desplazándose por medio de las flechas del teclado con el botón SHIFT presionado, o también puede colocar el cursor en el punto inicial de selección y manteniendo el botón izquierdo de Mouse presionado haga la selección deseada. Asegúrese además que la cantidad de objetos existentes sea igual a la cantidad de objetos seleccionados. En este ejemplo se puede observar que la cantidad de objetos son 10
- Presione las teclas Ctrl. C, Para copiar la geométrica asociada.

- Abra el archivo INTRO.txt
- Coloque el número de objetos que conforman la geometría de cada uno de los contornos a estudiar separados por un espacio. Tal como se muestra en la figura.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fig. 6.3 Colocación del número de contornos en el archivo INTRO.txt, para el ejemplo dado

- Presionando las teclas ctrl.+V, pegue la información en el archivo INTRO.txt, de tal forma que quede como esté dispuesto como en la figura 6.4.

```

10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0|
      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = AA
                  de punto, X= 200.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
                  hasta punto, X= 200.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
                  Longitud = 20.0000, Ángulo en el plano XY = 90
                  Incremento X = 0.0000, Incremento Y = 20.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = A8
                  de punto, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
                  hasta punto, X= 200.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
                  Longitud = 200.0000, Ángulo en el plano XY = 0
                  Incremento X = 200.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = AC
                  de punto, X= 0.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
                  hasta punto, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
                  Longitud = 20.0000, Ángulo en el plano XY = 270
                  Incremento X = 0.0000, Incremento Y = -20.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = B3
                  de punto, X= 70.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
                  hasta punto, X= 0.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
                  Longitud = 70.0000, Ángulo en el plano XY = 180
                  Incremento X = -70.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = BA
                  de punto, X= 90.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
                  hasta punto, X= 70.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000

```

```

Longitud = 80.0000, Ángulo en el plano XY = 270
Incremento X = 0.0000, Incremento Y = -80.0000,
Incremento Z = 0.0000

LINEA Capa: "0"
Espacio: Espacio modelo
Identificador = B2
de punto, X= 90.0000 Y= 120.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 110.0000 Y= 120.0000 Z= 0.0000
Longitud = 20.0000, Ángulo en el plano XY = 0
Incremento X = 20.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

LINEA Capa: "0"
Espacio: Espacio modelo
Identificador = AF
de punto, X= 110.0000 Y= 120.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 110.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
Longitud = 80.0000, Ángulo en el plano XY = 270
Incremento X = 0.0000, Incremento Y = -80.0000,
Incremento Z = 0.0000

LINEA Capa: "0"
Espacio: Espacio modelo
Identificador = B9
de punto, X= 130.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 110.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
Longitud = 28.2843, Ángulo en el plano XY = 135
Incremento X = -20.0000, Incremento Y = 20.0000,
Incremento Z = 0.0000

LINEA Capa: "0"
Espacio: Espacio modelo
Identificador = AB
de punto, X= 200.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 130.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
Longitud = 70.0000, Ángulo en el plano XY = 180
Incremento X = -70.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

```

Fig. 6.4 Información copiada en el archivo INTRO.TXT del ejemplo mostrado

NOTA: Elimine, en caso de existir, la expresión “PRESIONE INTRO PARA CONTINUAR” arrojada ocasionalmente por la lista de data geométrica, para ello seleccione esta expresión y seguido de esto pulse el botón “Supr” de su teclado.

Nota: el espacio libre dejado por esta expresión al borrarla debe inmediatamente llenarse con la información inmediata que se encuentre debajo de esta.

- Diríjase al Menú Archivo de INTRO.TXT y guarde la información obtenida.

Nota: Asegúrese de haber copiado la información en el formato descrito. (Véase anexos) Cualquier diferencia entre este formato con el que el usuario introduce acarreará errores en la ejecución del programa. En caso de existir tal discrepancia, acomode nuevamente y vuelva a guardar los cambios

Ejecute el programa: Posterior a obtener la data geométrica del programa de AUTOCAD se procederá a correr el programa para ello Vaya a la carpeta debug y



haga clic en el archivo PROGRAMA1.EXE. (PROGRAMA1.exe) De aquí se tendrá una ventana como se muestra en la figura 7.1.5:

```
Indique el tipo de Discretización a Utilizar
Lineal=1
Cuadratico=2
```

Fig. 6.5 Pregunta inicial

En esta ventana el programa pedirá el tipo de discretización a efectuar. En el cual marcará “1” si desea realizar una discretización lineal o “2” si lo desea hacer de manera cuadrática.

A modo de prueba pulse “1” para hacer una discretización lineal.

Al insertar el tipo de discretización a efectuar el usuario procederá a responder al programa lo siguiente:

“¿Desea discretizar todos los objetos con igual cantidades de elementos (6)? Al pulsar “s” el programa por defecto dividirá cada objeto en 6 partes iguales, si por el contrario presiona “n” el programa comenzará a pedir el número de divisiones de cada objeto.

A modo de prueba pulsemos “s” a esta pregunta.

Posterior al terminar de responder al programa esta pregunta y presionar la tecla “ENTER”, este dará una lista que corresponde a la información geométrica ordenada del problema a estudiar como se muestra en la figura 6.6.

ORDENADO					
200.000000	0.000000	200.000000	20.000000	60.000000	LINEA
200.000000	20.000000	130.000000	20.000000	60.000000	LINEA
130.000000	20.000000	110.000000	40.000000	60.000000	LINEA
110.000000	40.000000	110.000000	120.000000	60.000000	LINEA
110.000000	120.000000	90.000000	120.000000	60.000000	LINEA
90.000000	120.000000	90.000000	40.000000	60.000000	LINEA
90.000000	40.000000	70.000000	20.000000	60.000000	LINEA
70.000000	20.000000	0.000000	20.000000	60.000000	LINEA
0.000000	20.000000	0.000000	0.000000	60.000000	LINEA
0.000000	0.000000	200.000000	0.000000	60.000000	LINEA

Fig 6.6 Data geométrica ordenada del ejemplo.

Culminado esto se procede a presionar la tecla “ENTER” y podrá observarse la figura discretizada como se muestra en la figura 6.7.

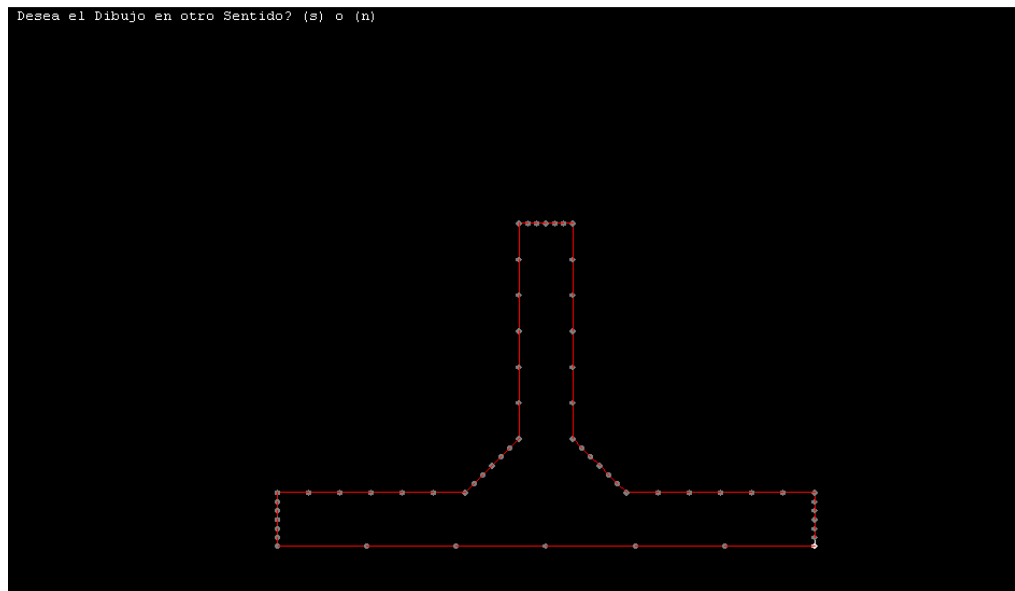


Fig 6.7 Visualización de la figura discretizada del ejemplo mostrado.

En esta pantalla se puede ver un nodo y un elemento característico el cual esta pintado en color blanco. Esto indica el sentido de recorrido del contorno en cuestión.

A partir de este punto, pueden surgir varias necesidades como por ejemplo, discretizar los objetos de manera diferente. Para ello en esta pantalla de visualización existirá una pregunta la cual es: ¿Desea el dibujo en otro sentido?

Si desea discretizar con diferente número de elementos cada objeto pulse la tecla “s” a esta pregunta. Al realizar esto y pulsar la tecla “ENTER” el programa pedirá nuevamente el tipo de discretización a efectuar. Pulse, a modo de prueba, la tecla “1”.

El programa preguntará nuevamente si desea discretizar todos los objetos de igual manera. A modo de prueba pulse la tecla “s” para discretizar nuevamente por defecto a seis elementos por objeto pero con sentido distinto al anterior. Véase figura 6.8.

Fig 6.8- Visualización del cambio de recorrido efectuado con número de elementos por defecto de seis elementos por objeto para el ejemplo mostrado

Ahora si desea discretizar de manera particular cada objeto del dibujo, pulse nuevamente la tecla “s” y luego la tecla “ENTER”. Introduzca nuevamente el tipo de discretización deseada, posteriormente presione la tecla “ENTER” y más tarde la tecla “n” para discretizar de forma distinta cada objeto del problema.

Ahora ubíquese en el extremo opuesto del objeto indicado con el nodo y elemento color blanco e introduzca la cantidad de elementos que desea en este, y luego “ENTER”.

Repítase este último paso de acuerdo a la cantidad de objetos que posea el problema.

Nota: Para guiarse use la visualización anterior, recuerde que debe comenzar en el extremo opuesto del objeto indicado con el nodo y elemento color blanco.

Ahora puede observarse la discretización de la figura con diferente número de elementos por cada objeto. (Véase la Fig. 6.9)

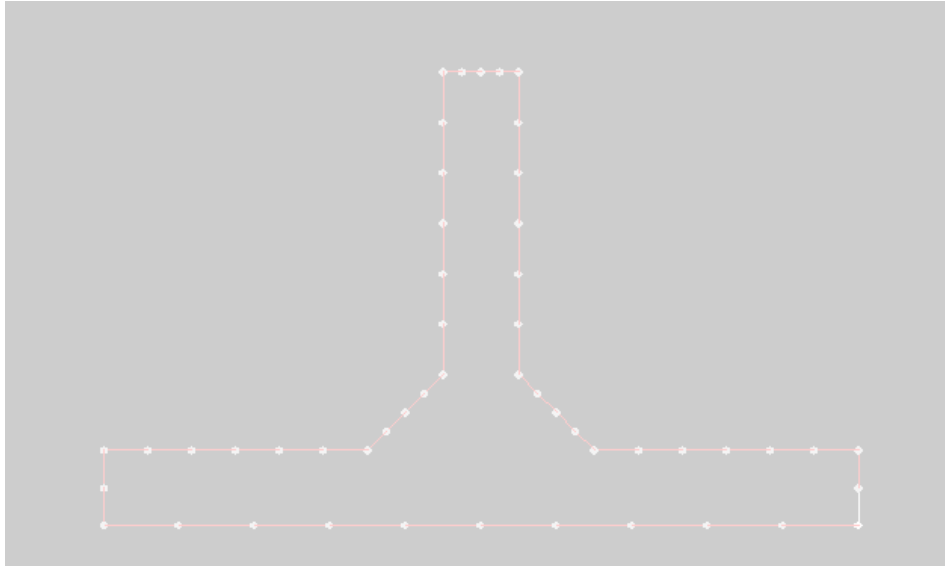


Fig 6.9-Discretización con recorrido antihorario con distintos número de elementos por nodo para el ejemplo mostrado.

Ahora supóngase que este es el orden deseado por el usuario, para ello este debe pulsar la tecla “n” .Al pulsar esta tecla y luego “ENTER”, el programa preguntará si desea realizar un estudio de potencial o un estudio de elasticidad. Por tanto:

Seleccionando la tecla “0” estudiará problemas de **potencial**.

Seleccionando la tecla “1” estudiará problemas de **elasticidad**.

Problemas de potencial: Como ya se mencionó esta clase de problemas se seleccionarán oprimiendo la tecla “0” seguido de la tecla “ENTER” En estos problemas se resolverán aquellos que involucran conducción de calor. Este tipo de problemas cumplen con la ecuación de Laplace de segundo orden el cual tiene la siguiente forma:

$$\nabla^2 \theta_{(x,y)} = 0 \quad \text{Para condiciones de borde: } \theta = \theta_0 ; q = q_0$$

Al seleccionar este tipo de problemas, el programa pedirá el valor de la constante K de transmisión de calor por conducción. Al introducir este dato el programa comenzará a pedir las condiciones de borde desde un nodo inicial hasta uno final, para ello el usuario previamente debe conocer el planteamiento geométrico de forma tal que pueda insertar dichas condiciones de manera correcta. Dichas condiciones se piden en el orden mostrado de la figura 6.10

```
Indique las condiciones de Borde
Desde el nodo
17
Hasta el nodo
21
Indique el tipo de Condicion de Borde a Utilizar
Dq=0
q=1
1
Indique el Valor de la condicion de borde
1000
```

Fig. 6.10 Condiciones de borde pedidas para casos de potencial.

Dichas instrucciones deben darse hasta que se llega al último nodo del problema.

Al terminar de insertar las condiciones de borde se procede a ir a los archivos *mall.txt* y *borde.txt*. En el primero se puede observar la data geométrica de la discretización efectuada y sus conectividades (véase fig 7.1.11 a-b), en el segundo se encuentran las condiciones de borde insertadas en el problema (véase fig 7.1.11 c)

NOTA: En los nodos donde no se dan condiciones iniciales el programa colocará por defecto el código “0” y de valor 0 (transferencia de calor igual a 0).

NN=	50		
NE=	50		
Puntos Discretizados			
nodo	X	Y	
1	200.000000000000	0.00000000000000E+000	
2	200.000000000000	10.00000000000000	
3	200.000000000000	20.00000000000000	
4	188.333333333333	20.00000000000000	
5	176.666666666667	20.00000000000000	
6	165.000000000000	20.00000000000000	
7	153.333333333333	20.00000000000000	
8	141.666666666667	20.00000000000000	
9	130.000000000000	20.00000000000000	
10	125.000000000000	25.00000000000000	
11	120.000000000000	30.00000000000000	
12	115.000000000000	35.00000000000000	
13	110.000000000000	40.00000000000000	
14	110.000000000000	53.3333333333333	
15	110.000000000000	66.6666666666667	
16	110.000000000000	80.0000000000000	
17	110.000000000000	93.3333333333333	
18	110.000000000000	106.666666666667	
19	110.000000000000	120.000000000000	
20	105.000000000000	120.000000000000	
21	100.000000000000	120.000000000000	
22	95.0000000000000	120.000000000000	
23	90.0000000000000	120.000000000000	
24	90.0000000000000	106.666666666667	
25	90.0000000000000	93.3333333333333	
26	90.0000000000000	80.0000000000000	
27	90.0000000000000	66.6666666666667	
28	90.0000000000000	53.3333333333333	
29	90.0000000000000	40.0000000000000	
30	85.0000000000000	35.0000000000000	
31	80.0000000000000	30.0000000000000	
32	75.0000000000000	25.0000000000000	
33	70.0000000000000	20.0000000000000	
34	58.3333333333333	20.0000000000000	
35	46.6666666666667	20.0000000000000	
36	35.0000000000000	20.0000000000000	

6.11 (a) Data de la discretización e identificación de las coordenadas de los nodos, Número de nodos (NN) y Número de elementos (NE), vistos desde el archivo *mallatxt*

Conectividad Elemento	Nodo inicial	Nodo Final
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5
5	5	6
6	6	7
7	7	8
8	8	9
9	9	10
10	10	11
11	11	12
12	12	13
13	13	14
14	14	15
15	15	16
16	16	17
17	17	18
18	18	19
19	19	20
20	20	21
21	21	22
22	22	23
23	23	24
24	24	25
25	25	26
26	26	27
27	27	28
28	28	29
29	29	30
30	30	31
31	31	32
32	32	33
33	33	34
34	34	35
35	35	36
36	36	37
37	37	38
38	38	39
39	39	40
40	40	41

Fig. 6.11 (b) Conectividades entre nodos para el ejemplo mostrado bajo discretización por elementos lineales visto desde el archivo *mallatxt*.

K= 2500.000			
Elemento	nodo	code	valor
1	1	0	0.0000
1	2	0	0.0000
2	2	0	0.0000
2	3	0	0.0000
3	3	0	0.0000
3	4	0	0.0000
4	4	0	0.0000
4	5	0	0.0000
5	5	0	0.0000
5	6	0	0.0000
6	6	0	0.0000
6	7	0	0.0000
7	7	0	0.0000
7	8	0	0.0000
8	8	0	0.0000
8	9	0	0.0000
9	9	0	0.0000
9	10	0	0.0000
10	10	0	0.0000
10	11	0	0.0000
11	11	0	0.0000
11	12	0	0.0000
12	12	0	0.0000
12	13	0	0.0000
13	13	0	0.0000
13	14	0	0.0000
14	14	0	0.0000
14	15	0	0.0000
15	15	0	0.0000
15	16	0	0.0000
16	16	0	0.0000
16	17	1	1000.0000
17	17	1	1000.0000
17	18	1	1000.0000
18	18	1	1000.0000
18	19	1	1000.0000
19	19	1	1000.0000
19	20	1	1000.0000
20	20	1	1000.0000
20	21	1	1000.0000

6.11 (c) Condiciones de borde para casos de potencial insertadas por el usuario, vistas en el archivo *borde.txt*

Problemas de elasticidad: Como ya se mencionó esta clase de problemas se seleccionarán oprimiendo la tecla “1” seguido de la tecla “ENTER” Para este caso de problemas se tendrá la siguiente mecánica de trabajo.

El programa pedirá que introduzca el valor del Módulo de Young. Inserte desde teclado y presione la tecla “ENTER”

Repita el procedimiento para introducir la Razón de Poisson y el Número de Cuadratura de Gauss.

Ahora el programa preguntará acerca del caso a estudiar. Marque desde su teclado “11” si desea estudiar el caso de deformación plana o marque “12” Si desea realizar el estudio de Esfuerzo plano. Introduzca y presione la tecla “ENTER”

Luego el programa comenzará a pedir al usuario las condiciones de borde a utilizar en el problema, el cual debe seleccionar “0” para los desplazamientos y “1” para tracción. Aquí se debe tener precaución debido a que para cada nodo son cuatro condiciones que se deben introducir, y para ello el usuario debe tener orden a la hora de insertar la información. Esta información se inserta como se muestra en la figura 6.12

```
Indique las condiciones de Borde
Desde el nodo
19
Hasta el nodo
23
Indique el tipo de Condicion de Borde a Utilizar en el eje X
Traccion=0
Desplazamiento=1
0
Indique el Valor de la condicion de borde en X
0
Indique el tipo de Condicion de Borde a Utilizar en el eje Y
Traccion=0
Desplazamiento=1
0
Indique el Valor de la condicion de borde en Y
1000
```

Fig. 6.12- Inserción de las condiciones de borde para casos de elasticidad.

Como se puede observar se piden condiciones para las direcciones X e Y en los nodos respectivos. Dichas instrucciones deben darse hasta que se llega al último nodo del problema.

Al terminar de insertar las condiciones de borde se procede a ir a los archivos *mallatxt* y *Elastic.txt*. En el primero se puede observar como en el caso anterior la

data geométrica de la discretización efectuada y sus conectividades (véase fig 6.11 a-b). En el segundo se encuentran las condiciones de borde insertadas en el problema (véase fig 6.13)

NOTA: En los nodos donde no se dan condiciones iniciales el programa colocará por defecto el código “0” y de valor 0 (tracción igual a 0).

Módulo de Young = 2500					
Razón de Poisson = 0.3000000					
Cuadratura de Gauss = 0.1000000					
Esfuerzo Plano					
Elemento	nodo	code X	valor X	code Y	valor Y
1	1	0	0.0000	0	0.0000
1	2	0	0.0000	0	0.0000
2	2	0	0.0000	0	0.0000
2	3	0	0.0000	0	0.0000
3	3	0	0.0000	0	0.0000
3	4	0	0.0000	0	0.0000
4	4	0	0.0000	0	0.0000
4	5	0	0.0000	0	0.0000
5	5	0	0.0000	0	0.0000
5	6	0	0.0000	0	0.0000
6	6	0	0.0000	0	0.0000
6	7	0	0.0000	0	0.0000
7	7	0	0.0000	0	0.0000
7	8	0	0.0000	0	0.0000
8	8	0	0.0000	0	0.0000
8	9	0	0.0000	0	0.0000
9	9	0	0.0000	0	0.0000
9	10	0	0.0000	0	0.0000
10	10	0	0.0000	0	0.0000
10	11	0	0.0000	0	0.0000
11	11	0	0.0000	0	0.0000
11	12	0	0.0000	0	0.0000
12	12	0	0.0000	0	0.0000
12	13	0	0.0000	0	0.0000
13	13	0	0.0000	0	0.0000
13	14	0	0.0000	0	0.0000
14	14	0	0.0000	0	0.0000
14	15	0	0.0000	0	0.0000
15	15	0	0.0000	0	0.0000
15	16	0	0.0000	0	0.0000
16	16	0	0.0000	0	0.0000
16	17	0	0.0000	0	0.0000
17	17	0	0.0000	0	0.0000
17	18	0	0.0000	0	0.0000
18	18	0	0.0000	0	0.0000
18	19	0	0.0000	0	1000.0000
19	19	0	0.0000	0	1000.0000

6.13 Condiciones de borde para casos de potencial insertadas por el usuario, vistas en el archivo *Elastic.txt*

Capítulo 7

Ejemplos

Aplicación en elasticidad.

- 1- Sea una placa con la forma mostrada en la figura. Las dimensiones están dadas en mm. El extremo izquierdo de la placa se encuentra empotrado mientras el otro extremo tiene una fuerza uniformemente distribuida en tensión.

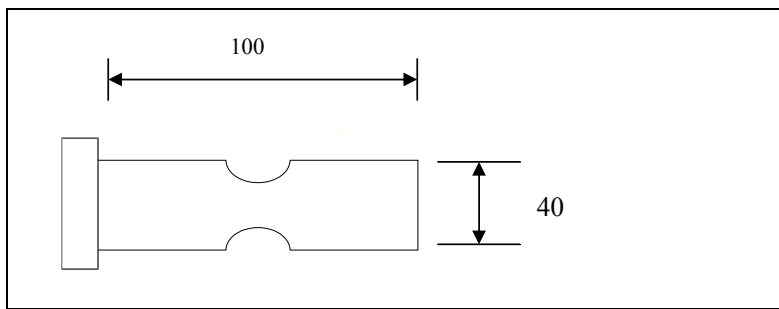


Fig 7.1.1 Esquema del ejemplo 1

Solución:

Al realizar este dibujo en la aplicación de AUTOCAD se posee la siguiente lista:


```

8 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      ARCO      Capa: "0"
                Espacio: Espacio modelo
                Identificador = 9B
                centro punto, X= 50.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
                radio 10.0000
                inicial ángulo 0
                final ángulo 180
                longitud 31.4159

      ARCO      Capa: "0"
                Espacio: Espacio modelo
                Identificador = 9A
                centro punto, X= 50.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
                radio 10.0000
                inicial ángulo 180
                final ángulo 0
                longitud 31.4159

      LINEA      Capa: "0"
                Espacio: Espacio modelo
                Identificador = 99
                de punto, X= 0.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
                hasta punto, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
                Longitud = 40.0000, Ángulo en el plano XY = 270
                Incremento X = 0.0000, Incremento Y = -40.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                Espacio: Espacio modelo
                Identificador = 9C
                de punto, X= 40.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
                hasta punto, X= 0.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
                Longitud = 40.0000, Ángulo en el plano XY = 180
                Incremento X = -40.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                Espacio: Espacio modelo
                Identificador = 98
                de punto, X= 100.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
                hasta punto, X= 60.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000

```

Fig. 7.1.2 Lista del ejemplo 1

Ejecutando el programa y seleccionando una discretización cuadrática por defecto de 6 elementos cada objeto se obtiene la siguiente lista:

```

ORDENADO
60.000000  0.000000  40.000000  -0.000001  0.000000 180.000000  10.000000  50.000000  0.000000  62.000000ARCO DE CI
40.000000  0.000000  0.000000  0.000000  60.000000LINEA
0.000000  0.000000  0.000000  40.000000  60.000000LINEA
0.000000  40.000000  40.000000  40.000000  60.000000LINEA
40.000000  39.999999  60.000000  40.000000 180.000000  0.000000  10.000000  50.000000  40.000000  62.000000ARCO DE CI
60.000000  40.000000  100.000000  40.000000  60.000000LINEA
100.000000  40.000000  100.000000  0.000000  60.000000LINEA
100.000000  0.000000  60.000000  0.000000  60.000000LINEA
Fortran Pause - Enter command<CR> or <CR> to continue.

```

Fig 7.1.3 Lista ordenada del ejemplo 1

Pulsando “ENTER” se observa la figura discretizada. Tal como se muestra en la figura:

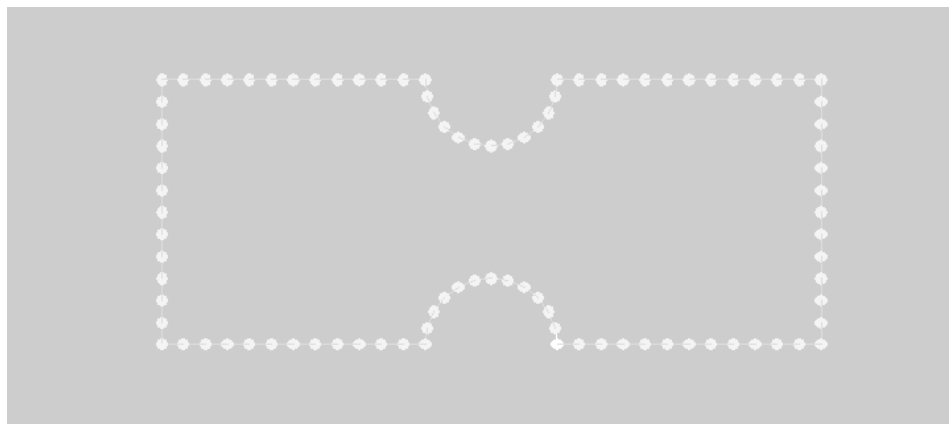


Fig 7.1.4 Figura del ejemplo discretizada

Al observar el punto inicial de recorrido y el elemento distinto de color gris se puede observar el recorrido horario que esta posee. Como se desea es que el recorrido sea antihorario, se pulsa desde teclado “s” para realizar la inversión.

Siguiendo las instrucciones se obtiene la inversión definida, tal como se muestra:

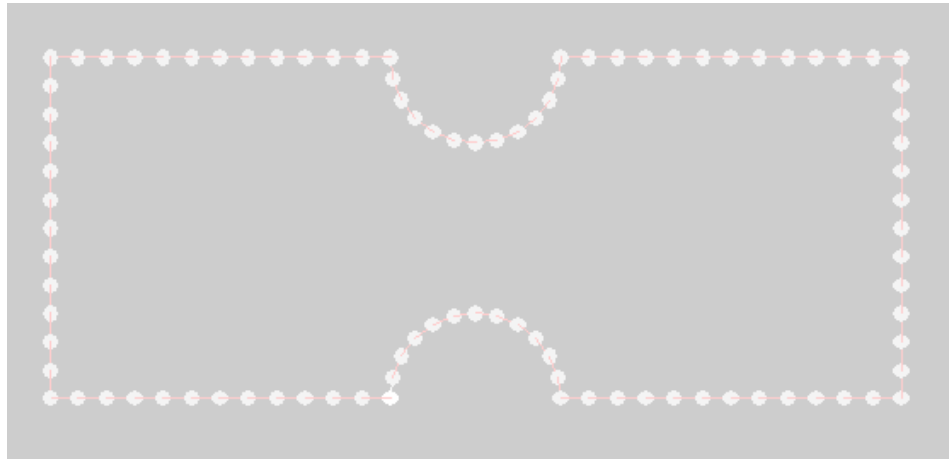


Fig 7.1.5 Discretización con recorrido corregido

Ahora se pulsará “1” para seleccionar problemas de elasticidad y luego se introducen los valores del Módulo de Young, Razón de Poisson y Número de Cuadratura de Gauss.

Luego se debe introducir el tipo de estudio que desee efectuar, selecciónese por ejemplo “Esfuerzo plano” (12).

Por último introdúzcase las condiciones de borde. En este caso particular desde los elementos 37 al 42, el desplazamiento y la tracción es igual a 0.

El archivo malla.txt arrojado es el siguiente:

NN=	96	
NE=	48	
Puntos Discretizados		
nodo	X	Y
1	40.0000000000000	1.224606353822377E-015
2	40.3407417371093	2.58819045102521
3	41.3397459621556	5.00000000000000
4	42.9289321881345	7.07106781186548
5	45.0000000000000	8.66025403784439
6	47.4118095489748	9.65925826289068
7	50.0000000000000	10.0000000000000
8	52.5881904510252	9.65925826289068
9	55.0000000000000	8.66025403784439
10	57.0710678118655	7.07106781186547
11	58.6602540378444	5.00000000000000
12	59.6592582628907	2.58819045102521
13	60.0000000000000	0.00000000000000E+000
14	63.3333333333333	0.00000000000000E+000
15	66.6666666666667	0.00000000000000E+000
16	70.0000000000000	0.00000000000000E+000
17	73.3333333333333	0.00000000000000E+000
18	76.6666666666667	0.00000000000000E+000
19	80.0000000000000	0.00000000000000E+000
20	83.3333333333333	0.00000000000000E+000
21	86.6666666666667	0.00000000000000E+000
22	90.0000000000000	0.00000000000000E+000
23	93.3333333333333	0.00000000000000E+000
24	96.6666666666667	0.00000000000000E+000
25	100.000000000000	0.00000000000000E+000
26	100.000000000000	3.33333333333333
27	100.000000000000	6.66666666666667
28	100.000000000000	10.0000000000000
29	100.000000000000	13.3333333333333
30	100.000000000000	16.6666666666667
31	100.000000000000	20.0000000000000
32	100.000000000000	23.3333333333333
33	100.000000000000	26.6666666666667
34	100.000000000000	30.0000000000000
35	100.000000000000	33.3333333333333
36	100.000000000000	36.6666666666667

Fig 7.1.6 Puntos discretizados del ejemplo 1

```

Módulo de Young =      25000
Razón de Poisson =  0.2000000
Cuadratura de Gauss =  4.0000000
Deformación Plana
Elemento      nodo      code X      valor X      code Y      valor Y
1             1             0             0.0000             0             0.0000
1             2             0             0.0000             0             0.0000
1             3             0             0.0000             0             0.0000
2             3             0             0.0000             0             0.0000
2             4             0             0.0000             0             0.0000
2             5             0             0.0000             0             0.0000
3             5             0             0.0000             0             0.0000
3             6             0             0.0000             0             0.0000
3             7             0             0.0000             0             0.0000
4             7             0             0.0000             0             0.0000
4             8             0             0.0000             0             0.0000
4             9             0             0.0000             0             0.0000
5             9             0             0.0000             0             0.0000
5            10             0             0.0000             0             0.0000
5            11             0             0.0000             0             0.0000
6            11             0             0.0000             0             0.0000
6            12             0             0.0000             0             0.0000
6            13             0             0.0000             0             0.0000
7            13             0             0.0000             0             0.0000
7            14             0             0.0000             0             0.0000
7            15             0             0.0000             0             0.0000
8            15             0             0.0000             0             0.0000
8            16             0             0.0000             0             0.0000
8            17             0             0.0000             0             0.0000
9            17             0             0.0000             0             0.0000
9            18             0             0.0000             0             0.0000
9            19             0             0.0000             0             0.0000
10           19             0             0.0000             0             0.0000
10           20             0             0.0000             0             0.0000
10           21             0             0.0000             0             0.0000
11           21             0             0.0000             0             0.0000
11           22             0             0.0000             0             0.0000
11           23             0             0.0000             0             0.0000
12           23             0             0.0000             0             0.0000
12           24             0             0.0000             0             0.0000
12           25             0             1000.0000             0             0.0000
13           25             0             1000.0000             0             0.0000

```

Fig 7.1.7 Condiciones de borde del ejemplo 1 visto desde elastic.txt

Aplicación en potencial

- 2- Sea una placa con la forma mostrada en la figura. Las dimensiones están dadas en mm. La placa tiene una perforación de El extremo izquierdo de la placa se encuentra aislado mientras el otro extremo se tiene una temperatura constante $T=100^{\circ}\text{C}$

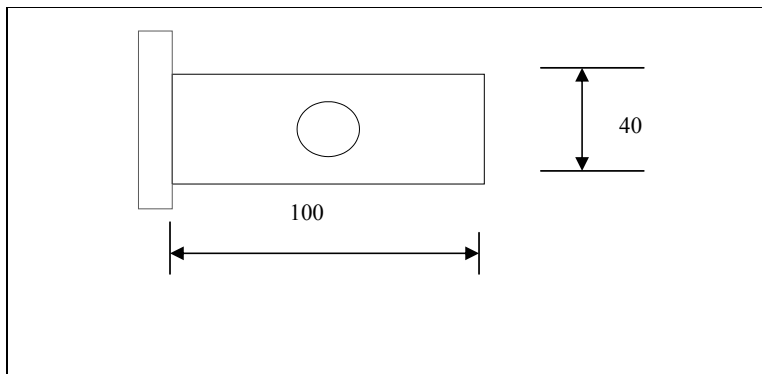


Fig 7.2.1 Esquema del ejemplo 2

Solución:

Al realizar este dibujo en la aplicación de AUTOCAD se posee la siguiente lista:

```

4 1 0 0 0 0 0 0 0 0
      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = 99
de punto, X= 0.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
Longitud = 40.0000, Ángulo en el plano XY = 270
Incremento X = 0.0000, Incremento Y = -40.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = 98
de punto, X= 100.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 0.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
Longitud = 100.0000, Ángulo en el plano XY = 180
Incremento X = -100.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = 97
de punto, X= 100.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 100.0000 Y= 40.0000 Z= 0.0000
Longitud = 40.0000, Ángulo en el plano XY = 90
Incremento X = 0.0000, Incremento Y = 40.0000,
Incremento Z = 0.0000

      LINEA      Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = 96
de punto, X= 0.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
hasta punto, X= 100.0000 Y= 0.0000 Z= 0.0000
Longitud = 100.0000, Ángulo en el plano XY = 0
Incremento X = 100.0000, Incremento Y = 0.0000,
Incremento Z = 0.0000

      CIRCULO    Capa: "0"
                  Espacio: Espacio modelo
                  Identificador = 9B
centro punto, X= 50.0000 Y= 20.0000 Z= 0.0000
radio 10.0000

```

Fig. 7.2.2 Lista del ejemplo 2

Posterior a obtener esta lista, se inserta tal información en el archivo intro.txt. y luego se procede a guardar la información.

Ejecutando el programa y seleccionando una discretización lineal por defecto de 6 elementos cada objeto con el fin de ver el recorrido se obtiene la siguiente lista:

```

Indique el tipo de Discretización a Utilizar
Lineal=1
Cuadratico=2
1
Desea Discretizar Todos los objetos de Igual manera, (6) Elementos? (s) o (n)
s
ORDENADO
0.000000 40.000000 0.000000 0.000000 60.000000LINEA
0.000000 0.000000 100.000000 0.000000 60.000000LINEA
100.000000 0.000000 100.000000 40.000000 60.000000LINEA
100.000000 40.000000 0.000000 40.000000 60.000000LINEA
50.000000 20.000000 10.000000 2.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 61.000
Fortran Pause - Enter command<CR> or <CR> to continue.

```

Fig 7.2.3 Lista ordenada del ejemplo 2

Presionando ENTER se tiene la visualización de la geometría discretizada:

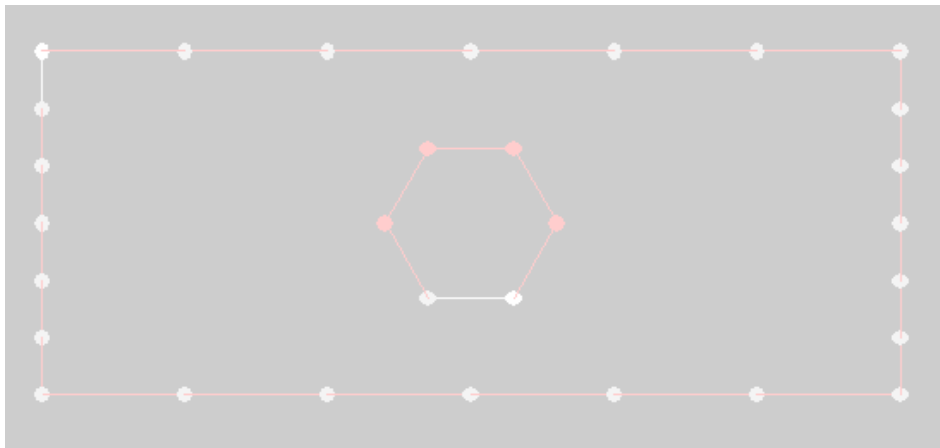


Fig 7.2.4 Figura del ejemplo discretizada por defecto

Aquí se observa el recorrido antihorario del contorno exterior y el recorrido horario del contorno interior, pero esta discretización por defecto no brinda la mejor aproximación geométrica deseable en este caso. El usuario

debe para ello llegar al recorrido de la pieza deseable y además colocar mayor número de elementos de forma tal que se pueda observar una aproximación aceptable. Presionando “s” a la pregunta efectuada en esta ventana y posteriormente introduciendo los elementos en cada objeto se tiene lo siguiente. (véase fig 7.2.5)

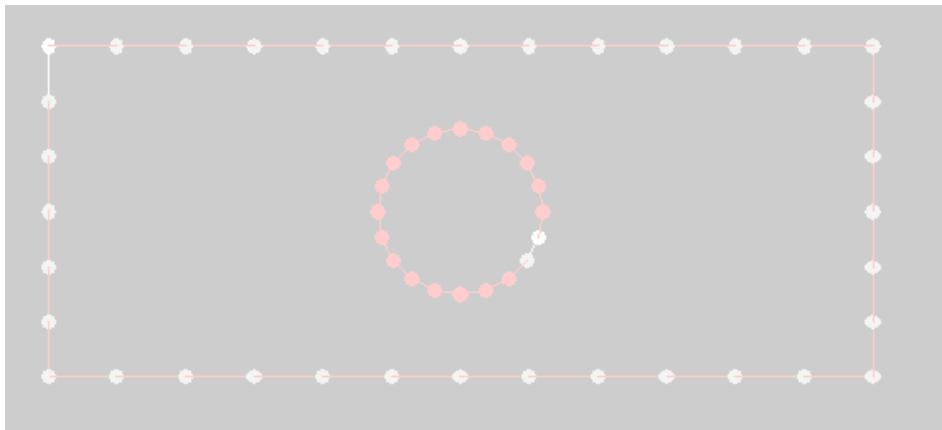


Fig. 7.2.5 Visualización de la discretización corregida con distinto número de elementos por objeto

Se introducen ahora las condiciones de borde del problema obteniendo la lista de la fig 7.2.6.

K= 2500.000			
Elemento	nodo	code	valor
1	1	0	0.0000
1	2	0	0.0000
2	2	0	0.0000
2	3	0	0.0000
3	3	0	0.0000
3	4	0	0.0000
4	4	0	0.0000
4	5	0	0.0000
5	5	0	0.0000
5	6	0	0.0000
6	6	0	0.0000
6	7	0	0.0000
7	7	0	0.0000
7	8	0	0.0000
8	8	0	0.0000
8	9	0	0.0000
9	9	0	0.0000
9	10	0	0.0000
10	10	0	0.0000
10	11	0	0.0000
11	11	0	0.0000
11	12	0	0.0000
12	12	0	0.0000
12	13	0	0.0000
13	13	0	0.0000
13	14	0	0.0000
14	14	0	0.0000
14	15	0	0.0000
15	15	0	0.0000
15	16	0	0.0000
16	16	0	0.0000
16	17	0	0.0000
17	17	0	0.0000
17	18	1	100.0000
18	18	1	100.0000
18	19	1	100.0000
19	19	1	100.0000
19	20	1	100.0000
20	20	1	100.0000
20	21	1	100.0000

Fig 7.2.6 Lista de condiciones de borde para el ejemplo 2 visto desde *borde .txt*

El archivo *mallatxt* es de la siguiente forma (véase fig 7.2.7)

NN=	56	
NE=	56	
Puntos Discretizados		
nodo	X	Y
1	0.000000000000000E+000	40.0000000000000
2	0.000000000000000E+000	33.3333333333333
3	0.000000000000000E+000	26.6666666666667
4	0.000000000000000E+000	20.0000000000000
5	0.000000000000000E+000	13.3333333333333
6	0.000000000000000E+000	6.66666666666667
7	0.000000000000000E+000	0.000000000000000E+000
8	8.33333333333333	0.000000000000000E+000
9	16.6666666666667	0.000000000000000E+000
10	25.0000000000000	0.000000000000000E+000
11	33.3333333333333	0.000000000000000E+000
12	41.6666666666667	0.000000000000000E+000
13	50.0000000000000	0.000000000000000E+000
14	58.3333333333333	0.000000000000000E+000
15	66.6666666666667	0.000000000000000E+000
16	75.0000000000000	0.000000000000000E+000
17	83.3333333333333	0.000000000000000E+000
18	91.6666666666667	0.000000000000000E+000
19	100.000000000000	0.000000000000000E+000
20	100.000000000000	6.66666666666667
21	100.000000000000	13.3333333333333
22	100.000000000000	20.0000000000000
23	100.000000000000	26.6666666666667
24	100.000000000000	33.3333333333333
25	100.000000000000	40.0000000000000
26	91.6666666666667	40.0000000000000
27	83.3333333333333	40.0000000000000
28	75.0000000000000	40.0000000000000
29	66.6666666666667	40.0000000000000
30	58.3333333333333	40.0000000000000
31	50.0000000000000	40.0000000000000
32	41.6666666666667	40.0000000000000
33	33.3333333333333	40.0000000000000
34	25.0000000000000	40.0000000000000
35	16.6666666666667	40.0000000000000
36	8.33333333333333	40.0000000000000

Fig 7.2.6 Lista de condiciones de borde para el ejemplo 2 visto desde *mallA.txt*

9 Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se ha logrado en este trabajo la discretización de geometrías bidimensionales partiendo de una data geométrica obtenida desde un software modelador de sólidos, posteriormente mediante una visualización, se puede observar la malla obtenida.

Las geometrías básicas tratadas permitieron lograr la discretización de geometrías que involucran contornos lineales, circulares y elípticos, el cual resulta útil para la resolución de una amplia gama de problemas.

Los datos geométricos obtenidos del programa AUTOCAD, fueron tratados de forma tal que todos los puntos que conforman el contorno del problema se presenten al usuario de manera consecutiva y posteriormente se ofrezcan en un sentido deseado. Dicho sentido puede disponerse de forma horaria o antihoraria.

Para llevar a cabo la discretización de cada uno de los objetos de cualquier geometría planteada fue necesario discriminar la data geométrica obtenida clasificándolos en líneas, círculos, arcos de círculos, elipses y arcos de elipses. De acuerdo a cada uno de estos casos encontrados se ordenó la ejecución de diversas subrutinas para obtener la información resultante de la discretización. Estas subrutinas se conocen como subrutinas de discretización. Las ecuaciones usadas para tal fin fueron escritas de forma paramétrica con la finalidad de poder expresar cada uno de los puntos obtenidos en función de un ángulo de recorrido, para el caso de objetos elípticos o circulares, o para en función de un porcentaje de la longitud total en el caso de una línea.

El uso de ecuaciones paramétricas son usados con fines prácticos debido a que las ecuaciones convencionales generan en el desarrollo de la programación un sin fin de casos particulares que llevan a efectuar engorrosos códigos.

Es necesario dentro de este tipo de programas que la respuesta obtenida, en este caso los puntos de la discretización, se dispongan de manera ordenada dentro de archivos que puedan ser usados fácilmente por los programas subsiguientes de proceso y postproceso. Por esto se procedió a escribir y ordenar estos resultados en archivos de textos. Estos resultados deben venir además complementados con la información de condiciones de borde respectivas para el problema a estudiar, las cuales deben ser suministradas por el usuario. Estas condiciones de borde también deben disponerse en formatos apropiados para que puedan ser fácilmente usados por los programas de proceso y postproceso.

Recomendaciones

Aprovechando las versiones VISUAL de FORTRAN, se sugiere mejorar el entorno gráfico del programa con el fin de optimizar las visualizaciones de las discretizaciones realizadas.

Este trabajo además requiere mejoras operativas que permitan un mejor manejo con el usuario, esto puede lograrse con un grado más elevado de automatización. Es posible a través del uso de diversos macros de Visual Basic construir el archivo txt de data geométrica de manera automática sin necesidad de acceder a la lista y de crear de forma manual el archivo de lectura de data geométrica ni tampoco forzar al usuario a ordenar la data en formatos estándares previo a la ejecución del programa.

Se recomienda incluir en las mejoras de este programa el uso de funciones que permitan obtener el refinado de la malla para cada objeto del problema.

Se deben agregar a este programa rutinas que permitan realizar estudios de desarrollo de grietas debido a que estos tiene la característica de ser para el estudio, elementos discontinuos que deben tratarse de forma especial.

Por último se hace necesario elaborar un programa homólogo a éste que permita generar mallas para geometrías tridimensionales, con la finalidad de lograr un mayor alcance a la resolución de problemas utilizando el MEC.

Bibliografía

Argote José, (2001) [Página Web en Línea], Disponible: <http://personal.telefonica.terra.es/web/cad/historia.htm> [Consulta 2005, mayo 6]

Balderrama Rafael, *et al* .2004. “Implementación de la Integral J de dominio para el análisis de grietas termoelásticos tridimensionales usando el MEC”, Memorias del VII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIMENICS 2004, San Cristóbal. Vol. 2.

Castro Alejandro y Coluccio Antonio, 1991, “Análisis de Esfuerzos en Terminaciones Gingivales de Coronas Dentales usando el método de Elementos de Contorno” Trabajo Especial de Grado UCV, FI, EIM

Cerrolaza Miguel. 1992 “Técnicas de pre y post-proceso para Métodos Numéricos.” Trabajo de Ascenso. UCV, FI, EIM

Chandrupatla Tirupathi y Belegundu Ashou, 1999,”Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería”, “2da edición, Prentice Hall

Escalona Belén y Kecsmeti Francisco, 1990 “Análisis de esfuerzos de piezas mecánicas Mediante el Método de Elementos de Contorno usando Elementos Cuadráticos” Trabajo Especial de Grado. UCV, FI, EIM.

Jo J, Chung D y Mata Jesús, 1991 “Solución de problemas de elasticidad tridimensional por el método de elementos de contorno (MEC) mediante el uso de un Microcomputador” Trabajo Especial de Grado UCV, FI, EIM

Lehmann, Charles, 1953. ”Geometría Analítica”. Unión Tipográfica Editorial Hispanoamericana.1ª edición.México.

Portela A, Aliabadi M.H. 1992 .Crack Growth Analysis Using Boundary Elements. Computational Mechanics publication. Southampton U.K.

Swokowski, E.W, 1982, “Cálculo con Geometría Analítica”.Prentice Hall Hispanoamericana, 3º edición, México.

Universidad de Vigo. (2003). [Página Web en línea] disponible:
http://www.com.uvigo.es/~obi/software/cicyt/mdf/doc_mdf/doc_mdf.html#MET%20DIF. [Consulta: 2003, noviembre 11]

La Web del Programador, (2003). [Página Web en línea] disponible:
<http://www.lawebdelprogramador.com/cursos/mostrar.php?id=32&texto=Fortran>.
[Consulta: 2003, noviembre 11]

La Web del Programador, (2004), [Página Web en Línea]
disponible:<http://web1.cti.unav.es/cti/manuales/AutoCAD/index.html>-[Consulta:
2003, noviembre 11]

Referencias Bibliográficas.

- [1] Jaswon M.A., 1963, "Integral Equation Methods in Potential Theory I". Proc. Roy. Soc., págs. 23-32.
- [2] Fredholm I, 1903, "Sur Une Classe d'equation Fonctionelle », Acta Math., 27, Págs 365-390.
- [3] Kupradze, V.D, 1963, "Potential Methods in the Theory of Elasticity", Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, Israel.
- [4] Rizzo F.J, 1967, "An Integral Equation Approach to Boundary Value Problems or Classical Elastostatics, Quart. Appl.Math, 25(1), Págs 83-95.
- [5] Cruse, T.A, 1969, "Numerical Solutions in three dimensional Elastostatic". Int .J. Solids and Structures, 5, págs.1259-1274.
- [6] Ricardella, P.C, 1973, "An Implementation of the BEM for Planar Problem in Elasticity and Elastoplasticity" Department of Mechanical Engineering, Carnegie University, USA.
- [7] Lachat J.C, Watson J.O, 1975," A Second Generation Integral Equation Program a Three-dimensional Elastic Analysis" en Boundary Integral Equation Methods: Computational Applications in Applied Mechanics, editado por T.A. Cruse y F.J. Rizzo. ASME.
- [8] Jaswon M.A y Symm G.T, 1977, "Integral Equation Methods in Potential Theory and Elastostatics". Academics Press.
- [9] Rizzo, F.J, Shippy, D.J, 1967, "A Integral Equation Approach to Boundary Value Problems of Classical Elastostatics" Quart. Appl. Math., Págs 25-83.
- [10] Mindlin R.D, 1936 "Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid", Physics, 7. Págs 195-202.

[11] Nakahuma, R.K, 1979, “Three Dimensional Elastostatics Using Boundary Elements Method” PhD Thesis, Universidad de Southampton.

[12] Palma, Douglas y Santaella Jorge, 2005, “Elaboración de un Prototipo de Base de Datos de Geometrías y Atributos de Modelos Bidimensionales de Órganos Dentarios para Visualización y Análisis” Trabajo Especial de Grado UCV, FI, EIM

ANEXOS

A manera ilustrativa y para demostrar la robustez del programa desarrollado en el presente Trabajo especial de Grado se presentan las visualizaciones de las discretizaciones en dos casos de ingeniería mecánica. Uno de ellos es el caso de un diente lingual [12] y el otro es un caso típico de ingeniería mecánica como lo es una rueda de engranaje recto.

En el caso de la rueda de diente de engranaje recto tenemos el modelo desarrollado en AUTOCAD que queda de la siguiente forma:

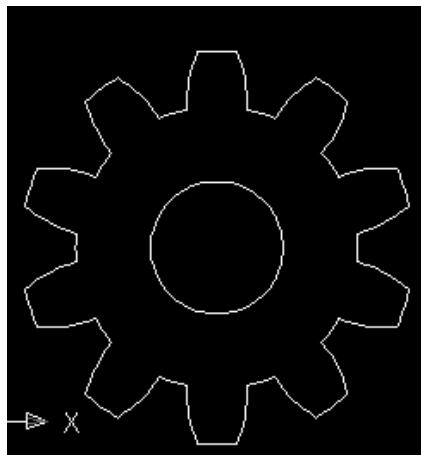


Fig A2 Diente de engranaje modelado

Tomando la data geométrica de la lista de AUTOCAD y discretizando con el programa desarrollado:

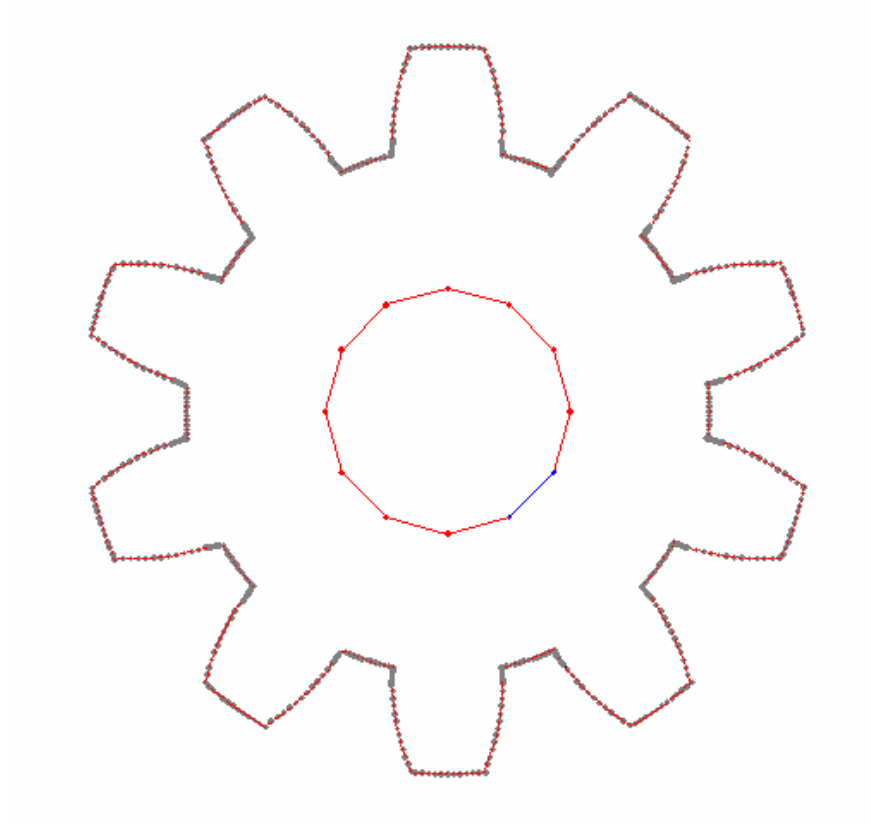


Fig A2 Diente de engranaje discretizado

Para el caso del diente lingual modelado se tiene:

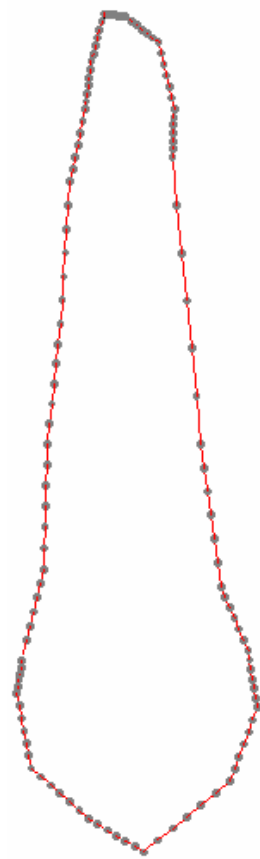


Fig. A4 Discretización del diente lingual