

**SISTEMA DE INGENIERIA ASISTIDA POR  
COMPUTADOR PARA EL ANALISIS DE  
ELEMENTOS MECANICOS Y ESTRUCTURALES**

Luis E. Quiroz L.

Mario I. Razeto M.

Emilio E. Dufeu D.

Departamento de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción  
Concepción - Chile.

**RESUMEN**

Se muestran los algoritmos básicos con los cuales se han construido programas de pre y post-procesamiento para el análisis estructural por elementos finitos. Estos programas son utilizados para obtener la generación automática de elementos, representación gráfica de la discretización, las deformaciones y los esfuerzos en elementos mecánicos y estructurales tridimensionales. Además, se presenta la aplicación de estos programas en el análisis de esfuerzos y deformaciones en el cono de trituración de una chancadora de cono.

**ABSTRACT**

The basic algorithms which has been developed pre and post-processing programs for structural analysis by finite elements is showed. This programs are used to obtain the automatic generation of elements, the graphic representation of discretization, strains and stresses in three dimensional mechanics and structural parts. Furthermore, an application of this programs is presented in the stresses and strains analysis on the cone of a cone crusher.

## INTRODUCCION

Un sistema de Ingeniería Asistida por Computador consiste en un programa de análisis (procesador) con una etapa de pre-procesamiento y una de post-procesamiento.

El programa de análisis para resolver un problema determinado, se basa comúnmente en la utilización del método de los elementos finitos. Este método requiere manejar un gran volumen de datos, tanto en la discretización del elemento a analizar como en el análisis posterior de los resultados. Por esto, se necesita disponer de un programa previo que permita minimizar el tiempo requerido para la entrada de datos y chequear posibles errores (pre-procesador) y de un programa posterior para visualizar la distribución de los resultados como, por ejemplo, esfuerzos y deformaciones (post-procesador).

El objetivo del presente trabajo es mostrar algunos algoritmos básicos que forman las partes principales de los programas de pre y post-procesamiento desarrollados por los autores, orientados a obtener un Sistema de Ingeniería Asistida por Computador para el análisis de elementos mecánicos y estructurales y presentar una aplicación de éste en el estudio de los esfuerzos y deformaciones producidas en el cono de trituración de una chancadora de cono.

## PRE-PROCESAMIENTO

Un programa pre-procesador requiere fundamentalmente de dos etapas: la generación automática de nodos y elementos y su representación gráfica con el fin de verificar la discretización obtenida.

### Generación automática [1]

El algoritmo utilizado se basa en la conocida discretización bidimensional mediante superelementos parabólicos. La FIG. 1 muestra un superelemento parabólico típico. Las coordenadas  $x$  e  $y$  de cualquier punto dentro del superelemento, se relacionan con los ocho pares de coordenadas nodales con las ecuaciones:

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i(\beta, \eta) x_i \quad (1)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i(\beta, \eta) y_i \quad (2)$$

donde  $N_i(\beta, \eta)$  es la función de forma asociada al nodo  $i$ .

Cada uno de los superelementos parabólicos que definen la geometría del cuerpo a analizar se denomina región.

Es relativamente simple construir un programa que genere una malla de un refinamiento dado una vez que se especifica el número de subdivisiones en las direcciones  $\beta$  y  $\eta$ . Una subdivisión se muestra en la FIG. 1, en que se observan 4 divisiones en la dirección  $\beta$  y 3 en la dirección  $\eta$  con las que se puede generar elementos triangulares o cuadrilaterales. Entonces sólo modificando el número de divisiones se obtiene mallas con

mayor o menor refinamiento.

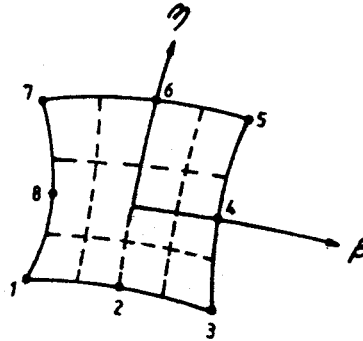


FIG. 1 Superelemento parabólico típico.

Los autores han extendido la capacidad de generación automática a geometrías tridimensionales axisimétricas o prismáticas con elementos de 8 nodos ("ladrillo"), aplicando el algoritmo anterior para generar elementos cuadrilaterales en una sección, las que formarán una cara del elemento tridimensional de 8 nodos; como se muestra esquemáticamente en la FIG. 2.

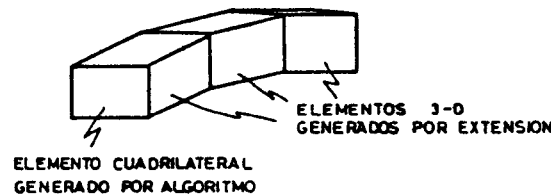


FIG. 2 Generación por extensión.

#### Representación gráfica de la discretización

En el caso de cuerpos bidimensionales no existe mayores dificultades en dibujar la discretización mediante el computador. Sin embargo, en cuerpos tridimensionales es necesario, la mayoría de las veces, representarlos sin que se dibujen las líneas que quedan debajo de las superficies visibles (líneas ocultas). Para remover estas líneas se ha utilizado un algoritmo bastante simple [2], el que se presenta aquí.

Como en la generalidad de los casos de análisis por elementos finitos éstos están formados por polígonos, los que a su vez están compuestos de líneas, el procedimiento a seguir es verificar si cada línea está oculta total o parcialmente por alguno de los polígonos que forman el modelo.

La primera etapa para implementar el algoritmo es transformar las coordenadas de los puntos nodales (x,y,z) a coordenadas del plano de visión (R,S,T) a través de alguna matriz de transformación, según se busque la representación en perspectiva o isométrica. Para este último caso, elegido por los autores, la matriz de transformación es [3]:

$$\begin{pmatrix} R \\ S \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \theta & \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \varphi & -\sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde  $\theta$  y  $\varphi$  son los ángulos definidos en la FIG. 3.

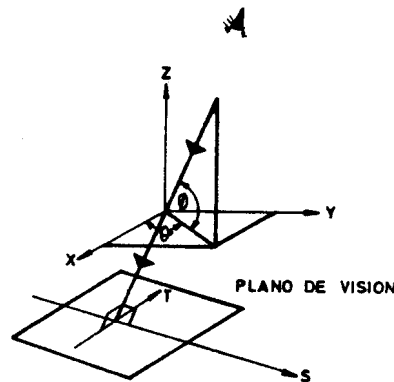


FIG. 3 Angulos  $\theta$  y  $\varphi$ .

Las líneas que son perpendiculares al plano de visión son eliminadas de inmediato. Luego se verifica cada línea con los polígonos existentes que no sean perpendiculares al plano de visión ni estén totalmente detrás, arriba, abajo, a la izquierda o a la derecha de la línea.

Si el polígono es cuadrilateral se divide en dos triángulos y se verifica la línea para cada uno. Posteriormente se determina la porción oculta según el diagrama de flujo de la FIG. 4.

Como se observó que el tiempo de proceso era excesivo cuando la discretización contenía muchos elementos, se desarrolló un programa inicial que filtra los polígonos que quedarían totalmente ocultos (basado en el trabajo de Gordon et al [4]), para aplicar posteriormente el algoritmo antes descrito. Con esto, el tiempo requerido para eliminar líneas ocultas disminuyó hasta en un 60%.

#### POST-PROCESAMIENTO

Los resultados más relevantes obtenidos en el análisis de elementos mecánicos son las deformaciones y los esfuerzos. La representación gráfica de éstos, permite una visión global rápida de su distribución y

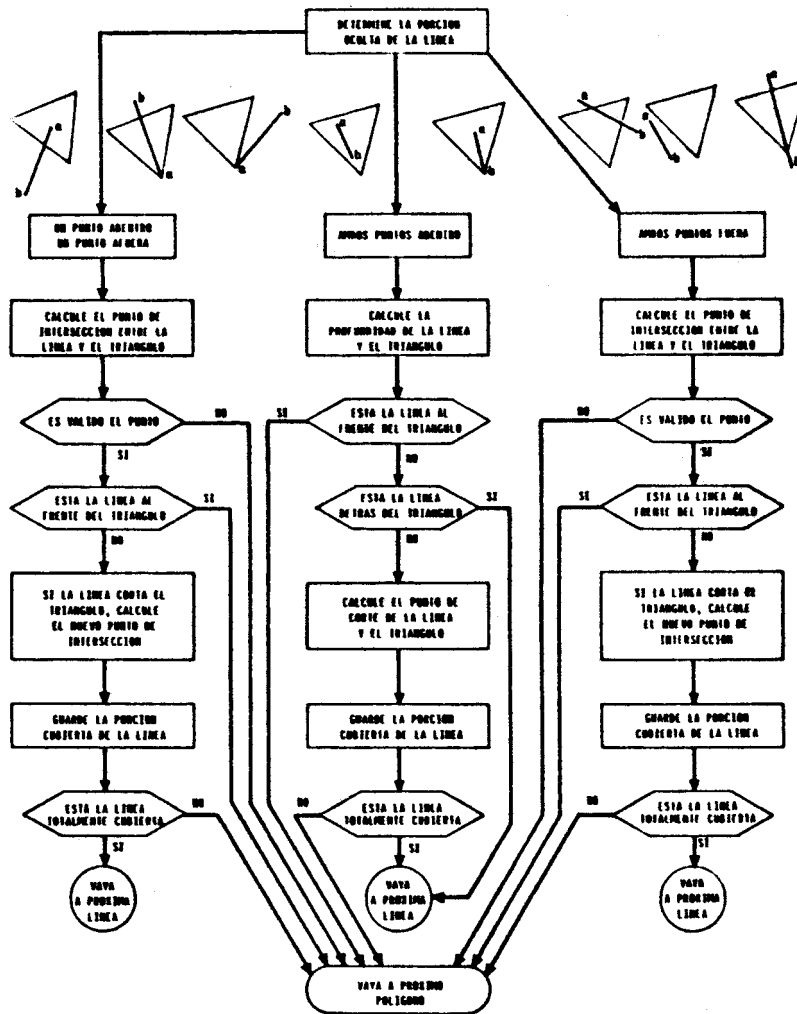


FIG. 4 Diagrama de flujo para la determinación de las líneas ocultas [2].

valores máximos. Dicha representación es, en el caso de las deformaciones, relativamente sencilla si ya se dispone de un programa para la visualización de la discretización.

Para obtener una representación gráfica de los esfuerzos, existen varias técnicas que poseen en común el subdividir en un cierto número de niveles el rango total de esfuerzos en el objeto analizado y graficar estos niveles sobre la pieza mediante líneas, vectores o colores.

Por ser más directa, los autores han preferido la representación por zonas de diferentes colores de los niveles de esfuerzos en la pantalla del computador.

El algoritmo utilizado se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1.- Se determina el esfuerzo promedio en los nodos [1].
- 2.- Se determina el mínimo y máximo esfuerzo existente en el modelo y se construye una escala desde el mínimo al máximo en 8 tramos [6].
- 3.- Se establece el nivel al que corresponde el esfuerzo en cada nodo.
- 4.- Se encuentran los puntos sobre la frontera del elemento para los cuales se produce un cambio de nivel.
- 5.- Se generan polígonos dentro del elemento a partir de estos puntos de cambio de nivel, de manera que todos los puntos dentro de un polígono están en un mismo nivel de esfuerzo, mediante interpolación lineal.
- 6.- Se aplica el procedimiento a todas las superficies de cada elemento y a todos los elementos.

La FIG. 5 muestra el esquema de un elemento genérico sobre el cual se aplica el algoritmo.

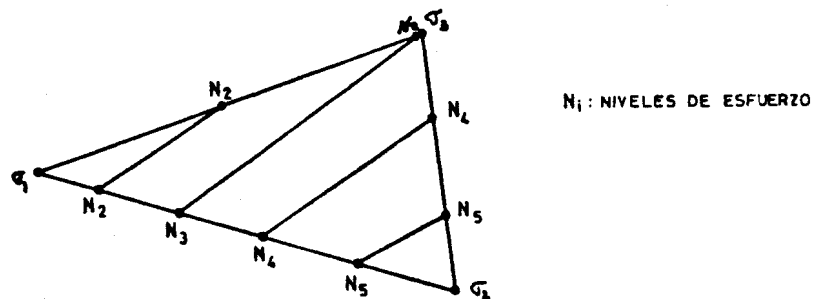


FIG. 5 Generación de polígonos de igual nivel de esfuerzo.

#### APLICACION

El sistema desarrollado se aplica para el análisis de la distribución de esfuerzos y deformaciones en el cono de trituración de una chancadora de cono, ampliamente usado en la minería del cobre.

En la FIG. 6 se observa el modelo de carga utilizado para el análisis. La FIG. 7 muestra la discretización inicial con 14 superelementos. Las FIG. 8 y FIG. 9 muestran 2 discretizaciones obtenidas variando solamente los parámetros de generación. En la FIG. 10 se observa la discretización completa del cono con la remoción de las líneas ocultas. Con el post-procesador se obtuvieron las deformaciones mostradas en la FIG. 11, y la distribución de esfuerzos equivalentes en las FIG. 12 y FIG. 13.

El programa procesador utilizado es el SAP-IV implementado en un computador VAX-11/780. Las representaciones gráficas se obtuvieron en la pantalla de un microcomputador IBM-AT y una impresora IBM Pro-

printer. El microcomputador se conectó al VAX utilizándose como terminal gráfico VT-240 mediante un paquete emulador, y además se usó en forma independiente como procesador gráfico.

Para construir las rutinas gráficas se usó el lenguaje Graphical Kernel System (GKS), el cual es estándar internacional desde 1985. Su principal característica es la independencia de los dispositivos de salida o entrada, lo cual asegura su funcionamiento al cambiar las características de los periféricos utilizados.

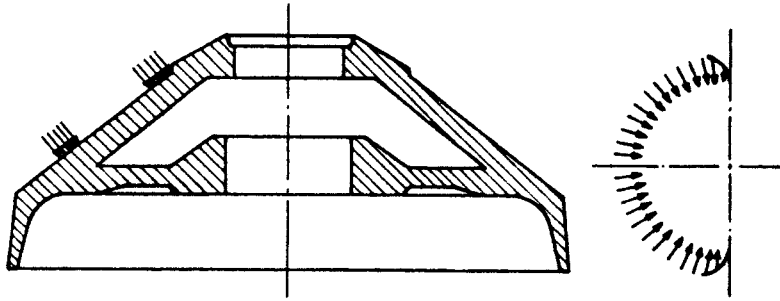


FIG. 6 Modelo de carga.

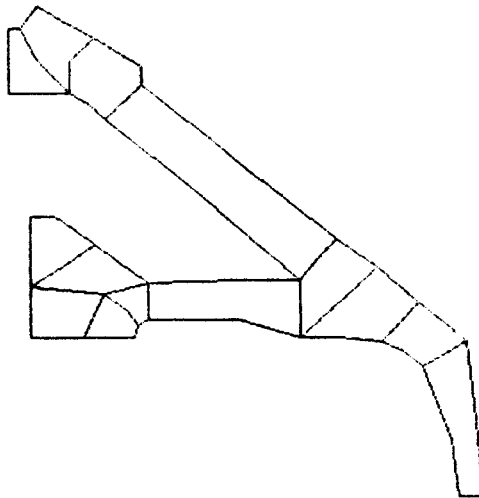


FIG. 7 Discretización inicial.

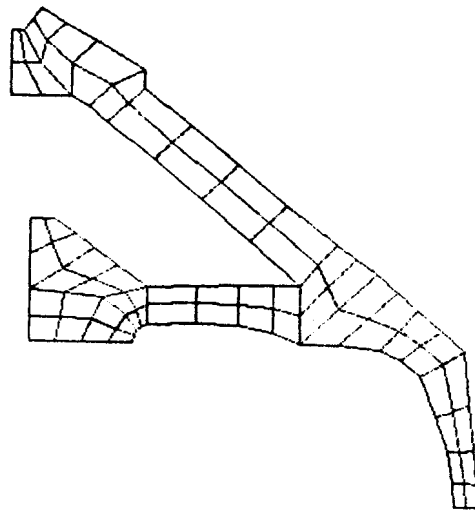


FIG. 8 Discretización generada.

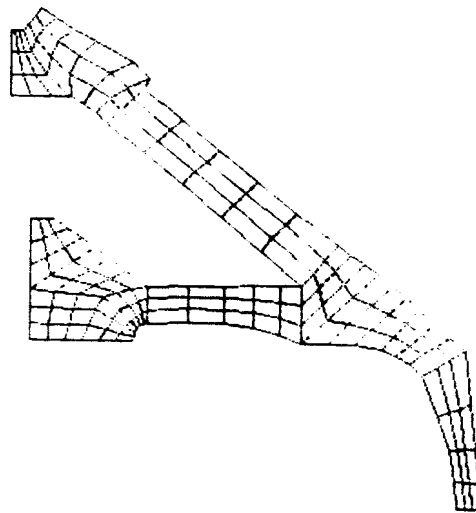


FIG. 9 Discretización generada más fina.



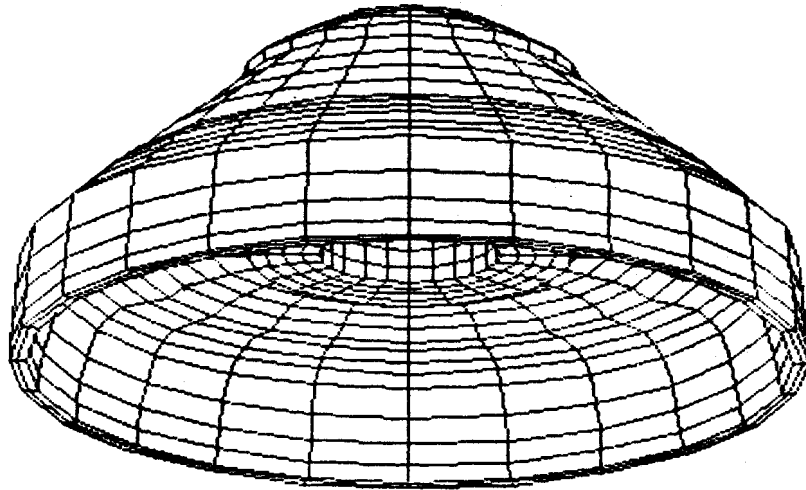


FIG. 10 Discretización del cono con remoción de líneas ocultas.

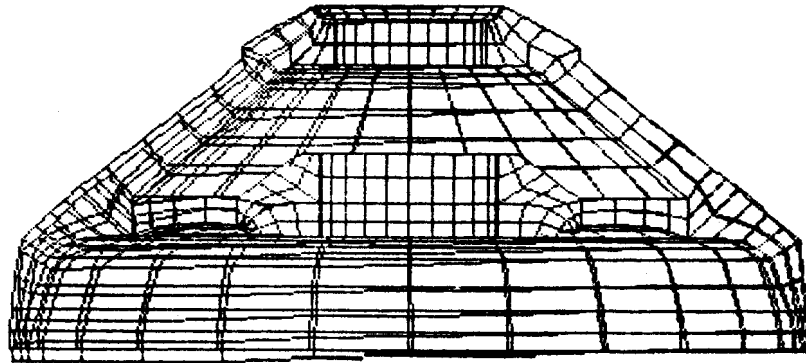


FIG. 11 Deformaciones del cono.

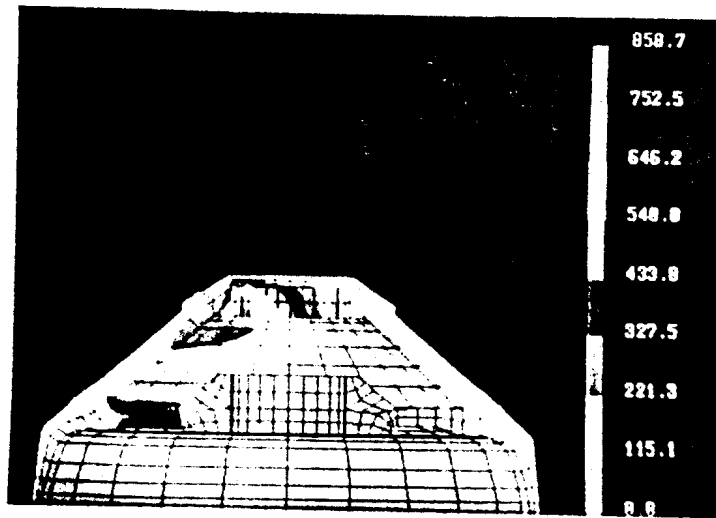


FIG. 12 Distribución de esfuerzos equivalentes en un corte del cono.

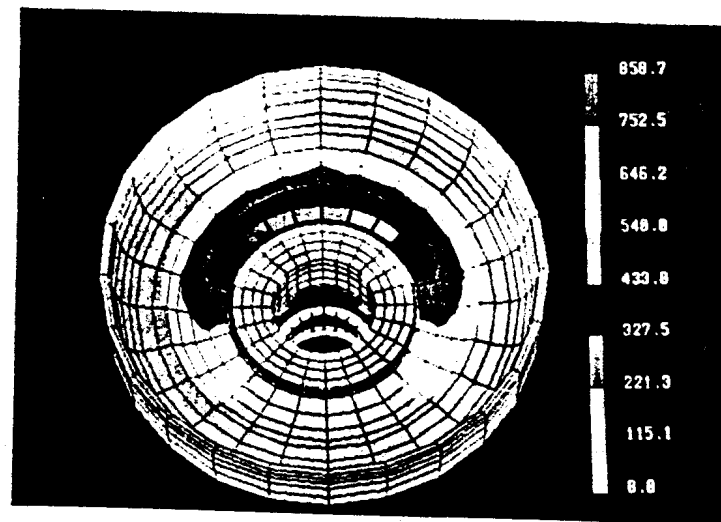


FIG. 13 Distribución de esfuerzos equivalentes en la superficie del cono.

**REFERENCIAS**

- [ 1 ] Durocher, L.L., Gasper, A., "A Versatile Two-Dimensional Mesh Generator with Automatic Bandwidth Reduction", **Computers and Structures**, Vol.10, 1979, pp. 561-575.
- [ 2 ] Janssen, T.L., "A Simple Efficient Hidden Line Algorithm", **Computers and Structures**, Vol.17, 1983, pp. 563-571.
- [ 3 ] Besant, C.B., "Computer-Aided Design and Manufacture", Ellis Horwood Ltd. England, 1983.
- [ 4 ] Gordon, J., Goodzeit, G., "COIFES-An Efficient Structural Graphics Program Using the Hidden Line Technique", **Computers and Structures**, Vol.12, 1980, pp. 699-712.
- [ 5 ] Barlow, J., "Optimal Stress Locations in Finite Elements Models", **International Journal for Numerical Methods in Engineerings**, Vol.10, 1976, pp. 243-251.
- [ 6 ] Pao, Y.C., "Elements of Computer-Aided Design and Manufacturing", John Wiley and Sons, Inc. New York, 1984.