

Proceso automatizado de refinamiento H-adaptativo usando índices de energía de deformación

H-adaptative refinement automatic process by using deformation energy index

M. E. Elberg

Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,
Mérida 5101, Venezuela
mariael@ula.ve

H. Febres

Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,
Mérida 5101, Venezuela
hfebres@ula.ve

Resumen

En el método de elementos finitos y sus aplicaciones a la Ingeniería en cualquiera de sus ramas, es utilizado mundialmente para análisis de problemas de soluciones complejas. En este trabajo se muestra el proceso automatizado del refinamiento de mallas del tipo H-adaptativo en base a índices de energía de deformación obtenidos mediante un análisis por elementos finitos con valores conseguidos por el programa comercial ABAQUS. Se presentan resultados logrados mediante la creación y aplicación de un software desarrollado para lograr el refinamiento de mallas de elementos tridimensionales de cualquier complejidad. El programa que se utiliza está realizado en Fortran 90 quien procesa los valores de energía de deformación, indicadores del refinamiento, logrando un nuevo mallado de mayor refinamiento sólo en la zona del modelo que presenta singularidades. Los resultados finales corresponden a análisis realizados en menor tiempo computacional, un apropiado refinamiento y resultados numéricamente correctos.

Palabras Claves: Elementos finitos, refinamiento H-adaptativo, automatización.

Abstract

The finite elements method and its applications to engineering in many of its fields is broadly worldwide used to analyze problems whit complex solutions. This paper shows the automatic process of H-adaptative refinement type using deformation energy indexes and the commercial program ABAQUS. A software who gives results for tridimensional models is developed. This program who process the deformation energy and, refinement indicator to, get a better and concentrated new refinement in the model singularity zone is realized in Fortran 90. Final results are: computational time reduction, appropriated refinement and correct numerical results.

Key words: Finite elements, H-adaptative refinement, automatic process.

1 Introducción

El presente trabajo tiene la finalidad de mostrar el proceso de automatización del refinamiento H-adaptativo en

base a índices de energía de deformación obtenidos mediante un análisis por elementos finitos con valores obtenidos por el programa comercial ABAQUS. Los programas desarrollados no presentan interacción automática con los indi-

cadores de refinamiento, es por esto que el proceso puede llegar a ser engorroso y lento para lograr un apropiado grado de refinamiento en elementos complejos con geometrías compuestas por elevado número de nodos y elementos.

Se presenta un software desarrollado para lograr la automatización del proceso para elementos tridimensionales de cualquier complejidad. El programa principal que se muestra está realizado en lenguaje Fortran 90 quien logra automáticamente la lectura de los valores de Energía de Deformación obtenidos, indicadores de refinamiento, logrando un nuevo mallado refinado en la zona establecida como crítica.

2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es lograr la mayor exactitud numérica y el menor costo computacional con la discretización del mallado del modelo mas adecuada.

Para esto se realiza lo siguiente:

- Verificación y modificación de las subrutinas existentes en Fortran 90 para el proceso de refinamiento tipo H.
- Realización un programa en Fortran 90 con uso de las nuevas subrutinas modificadas. Programa **PlusOne**.
- Direccinamiento de la activación de PlusOne y ABAQUS mediante un programa master en SCH. Programa **PlusRun**.
- Comparación de resultados obtenidos por el proceso automatizado y ejemplos de la literatura consultada.

3 Antecedentes

Al crecer la potencialidad de las herramientas de cálculo, crecen también las expectativas de los resultados a obtener en soluciones de análisis aun mayores.

La automatización del refinamiento tipo H, en modelos tridimensionales permitirá dar un paso adelante en la línea de investigación del método de elementos finitos y servirá como inicio en estudios de problemas complejos que necesiten un mallado altamente ajustado a singularidades importantes.

Diversos autores refieren sus trabajos de estrategias de refinamiento a creación de software para realizar mallados apropiados a partir de singularidades específicas.

H. Febres (1984) utiliza exitosamente por primera vez los índices de densidad de energía de deformación (SED) como un indicador de refinamiento en problemas de elasticidad plana y Martins y Barata en 1992 y luego Buenaño y Febres (1995) aplican la misma base teórica para lograr procesos de refinamiento en placas deflectadas. Meléndez y Febres en 1999 amplían las investigaciones a modelos tridimensionales.

Se utilizarán, en este trabajo, subrutinas en su versión original y modificadas de:

- MODEL- 3 (Martins y Barata)
- GENERA-3 (Buenaño y Febres)
- GEMATRI (Meléndez y Febres)

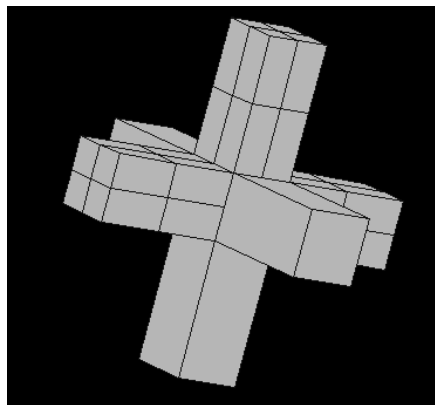


Fig. 1. Modelo tridimensional representando la aplicación de refinamiento tipo H.

4 Bases conceptuales

El método de elementos finitos es utilizado mundialmente para análisis de problemas de soluciones complejas. Se usa principalmente para resolver problemas para los cuales no existe una solución exacta. En Ingeniería se usa para análisis de esfuerzos y deformaciones, simulación de estratos de terreno, conducción de calor, fluidos en movimiento y modelados para bioingeniería, entre otros.

El método de basa en el principio de que cualquier problema físico puede ser dividido en un cierto número de áreas o volúmenes. Estas divisiones son llamadas elementos finitos.

Con la teoría de elementos finitos se puede convertir un problema de un número infinito de grados de libertad a uno con un número finito. Un elemento finito es entonces una subregión de un continuo discretizado.

La malla es, por lo tanto, el ensamblaje de los elementos finitos conectados entre si por puntos nodales o nodos.

Los nodos, no sólo son definidos en los puntos de conexión de los elementos finitos, existen también los nodos internos que son utilizados matemáticamente para mejorar la solución del problema.

El análisis de este ensamblaje, provee de los desplazamientos de cada uno de los nodos para ciertas cargas aplicadas al modelo. Los desplazamientos de los otros puntos dentro del elemento se interpolan a partir de los valores de los desplazamientos en los nodos que corresponden a este elemento. Cada nodo, tiene un número determinado de posibles movimientos llamados grados de libertad.

Al considerar un problema 3D, se obtienen las relaciones que se muestran, pudiendo hacer simplificaciones para casos 2D y 1D.

Entonces:

- los vectores de desplazamiento $\{U\}^t = (U_1, U_2, U_3)$,
- la matriz de deformaciones $\{\epsilon\}^t = (\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{31})$ y
- la matriz de esfuerzos

$$\{\sigma\}^t = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}),$$

son las incógnitas de cada elemento representativo del volumen considerado.

Ahora bien, para establecer el problema completo es necesario considerar:

- el campo de desplazamientos:

$$U_i = U_i(x_1, x_2, x_3),$$

- el campo de deformaciones:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x_1, x_2, x_3) \text{ y}$$

- el campo de esfuerzos:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3).$$

Por otro lado, los datos que se deben incluir en el modelo son:

- Geometría del sólido
- Apoyos y sus desplazamientos {d}
- Fuerzas externas {F_s} aplicadas sobre la superficie libre
- Fuerzas externas {F_d} aplicadas sobre el dominio
- Material del sólido (coeficientes E, u, etc.)

Para la resolución, se cuenta con las ecuaciones del modelo, mostradas en este caso para análisis en rango elástico, pudiendo aumentar la complejidad hasta incluir plasticidad, fractura o daño, por ejemplo.

4.1 Ecuaciones cinemáticas

Relaciones entre desplazamientos y deformaciones, considerando que no hay cambio de forma sin movimiento, se define el tensor de deformaciones de Lagrange y el tensor de deformaciones infinitesimales:

4.2 Teorema de trabajos virtuales

- Ecuaciones de equilibrio:

$\{F_1\}^t \{U^*\} + \{F_2\}^t \{U^*\} + \dots + \{F_n\}^t \{U^*\} = 0$, interpretado como el trabajo realizado por la fuerza F sobre el desplazamiento virtual U^* , y

$\{F_1\} + \{F_2\} + \dots + \{F_n\} = 0$, interpretado como el equilibrio de todas las fuerzas actuantes.

- Leyes de comportamiento elásticas considerando que los esfuerzos producen deformaciones, esto es:

Ley de Hooke generalizada:

$$\{\sigma\} = [K] \{\varepsilon\} \tag{1}$$

donde:

[K] = matriz de coeficientes del material.

El proceso matemático que realiza el computador se refiere al análisis del ensamblaje de la estructura, y a la obtención de los desplazamientos para cada nodo dependiendo de las cargas aplicadas al modelo. Los desplazamientos para otros puntos son interpolados de los valores del nodo que corresponden al elemento.

El uso de los teoremas energéticos es planteado por Zienkiewicz (1994), donde se considera además las can-

tidades virtuales como variaciones, diferenciales, de las cantidades reales. Con esto, el principio del trabajo virtual puede replantearse utilizando el teorema de la energía potencial total:

$$\Pi = U + W \tag{2}$$

donde:

Π = energía potencial

U = energía de deformación interna

W = energía potencial de las cargas

La energía de deformación (U) es definida de la siguiente manera (Fig. 2)

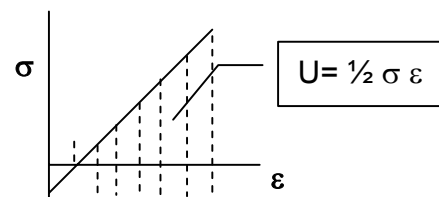


Fig. 2. Energía de deformación

Y puesto que la Ley de Hooke establece que:

$$\sigma = \varepsilon E \tag{3}$$

donde:

σ = esfuerzos

ε = deformaciones

E = módulo de Young

se obtiene:

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2} E \varepsilon^2 \tag{4}$$

Es decir que la energía potencial es función de los desplazamientos: $\Pi = \Pi(u)$

Entonces, cuando la energía es minimizada con respecto a los desplazamientos, se definen directamente las ecuaciones de equilibrio $\partial \Pi / \partial d_i = 0$.

El índice de densidad de energía de deformación (SED) lo define H. Febres (1984) para un elemento i como:

$$SED_i = U_i / V_i \tag{5}$$

donde:

U_i = energía de deformación del elemento i

V_i = volumen del elemento i

Por otro lado, el índice de concentración de energía global (GSED) se obtiene mediante la relación:

$$GSED = ETD / VT \tag{6}$$

donde:

ETD = energía total de deformación

VT = volumen total

Se establece también un indicador (ϕ) para realizar comparaciones entre elementos, el cual se define de la siguiente manera:

$$\phi_i = \text{SED}_i / \text{GSED} \quad (7)$$

donde los elementos de refinamiento serán adicionados donde se cumpla que $\phi_i \geq \beta$, donde β es un indicador de la magnitud del refinamiento deseado, el cual puede tomar valores a lo largo de iteraciones y regiones para un problema dado. Un valor de $\beta=1$ indicaría que aquellos elementos con SED_i mayores que el promedio GSED, serán refinados. Un valor de $\beta=0$, indica que todos los elementos serán refinados, (Meléndez y Febres, 1999).

El análisis por elementos finitos requiere gran potencialidad de hardware y software. En esto último, son muchos los programas creados para agilizar, mejorar y obtener resultados adecuados en tiempos prudencialmente cortos.

Para la investigación que se presenta es importante el conocimiento de ABAQUS ya que el proceso automatizado creado utiliza este programa como generador de valores de energía de deformación, llamados SENER.

ABAQUS crea diversos tipos de archivos, que dependiendo de lo deseado por el usuario pueden ser solicitados y revisados. Para esta investigación son de suma importancia los archivos de extensión *.inp* y *.dat*, siendo el primero un archivo ejecutable por ABAQUS y el contenedor de la información de la geometría, el mallado y las condiciones propias y principales del modelo. El segundo es generado según las especificaciones del primero y contiene las salidas numéricas de los resultados solicitados. Es en este archivo donde se obtienen los valores de los SENER.

5 Metodología

El trabajo que se presenta utiliza una metodología que puede ser dividida en tres (3) etapas diferentes:

5.1 ETAPA I. Recopilación de información

En esta fase, se realiza el estudio y la definición del problema a analizar, se recopila la información teórica y los antecedentes de investigaciones anteriores relacionadas con el tema.

Se realiza la verificación y modificación de subrutinas existentes en Fortran para el proceso de refinamiento tipo H.

5.2 ETAPA II. Creación y uso del software

Esta etapa consiste en la elaboración y prueba de los programas PlusRun y PlusOne encargados de automatizar el proceso de refinamiento H-adaptativo.

Cada uno de ellos es realizado según las especificaciones correspondientes para lograr la total automatización del proceso.

5.3 ETAPA III. Análisis de resultados

Esta parte de la investigación consiste en la comparación de resultados obtenidos por el proceso automatizado creado y ejemplos de la literatura consultada.

El proceso automatizado de refinamiento H que se presenta, cuenta con tres herramientas fundamentales:

- **PlusRun**: programa creado en CSH ejecutado bajo UNÍX. Es el encargado de direccionar y activar PlusRun y ABAQUS.
- **PlusOne**: programa creado en Fortran 90. Se encarga de leer valores de los SENER dados en el archivo *.dat* y generar un nuevo archivo ejecutable por ABAQUS, el archivo *.inp*.
- **ABAQUS**: programa comercial mencionado anteriormente.

El proceso automatizado de refinamiento H, es descrito con el diagrama general siguiente:

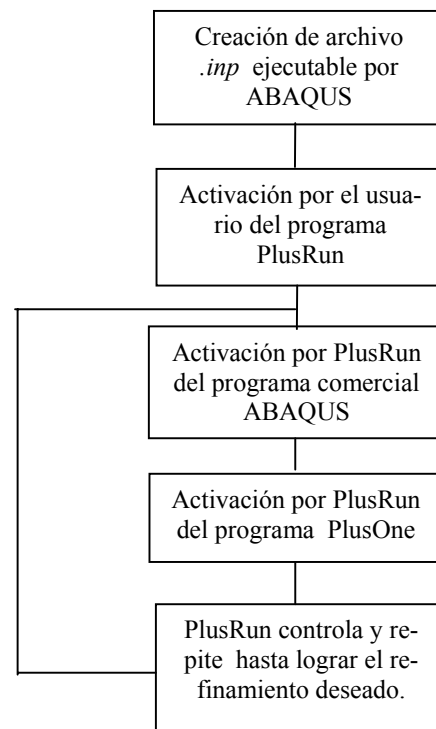


Fig. 3. Descripción del proceso de refinamiento automatizado tipo H.

6 Descripción del software creado

6.1 PlusRun

PlusRun es un programa creado para realizar el control y direccionamiento del proceso de refinamiento-H automatizado. Está realizado en CSH (C-Shell) y corre bajo UNIX. Cuenta con tres (3) bloques o unidades donde cada uno de ellos está realizado para cumplir específicas funciones del proceso automatizado de nueva discretización de malla que se realiza.

Unidad I. Verificación

Este bloque es el encargado de la confirmación de la presencia del programa PlusOne y del archivo *.inp* indispensables para iniciar el proceso de refinamiento. Todos deben estar en el mismo directorio de trabajo para poder iniciar el proceso. Verifica también la posibilidad de errores de sintaxis, ya que el archivo ejecutable por ABAQUS debe ser dado sin la extensión *.inp*. Esto es, si el archivo se llama *nombre.inp* debe ser escrito solamente *nombre* en el línea de ejecución cuando PlusRun es activado por el usuario y solicita el nombre del archivo *.inp*. Por otro lado, si es cometido un error y se introduce *nombre* en lugar de *nombre*, el error es detectado y envía un mensaje indicando que el archivo no existe.

Unidad II. Control de ciclos de refinamiento

PlusRun esta capacitado para activar automáticamente cinco (5) ciclos de refinamiento y uno adicional inicial para activar la generación del archivo *.dat* producto del archivo *.inp* original. Dicho de otra forma, luego de las verificaciones originales, el programa activa ABAQUS que lee el *.inp* para dar como resultado un archivo *.dat* con la información de los SENER requeridos para realizar el refinamiento H.

El número de repeticiones de los ciclos de refinamiento puede ser modificado si el usuario así lo requiere.

Unidad III. Recopilación de archivos

PlusRun guarda los archivos *.inp* y *.dat* generados en el proceso de refinamiento, entregando no solo un archivo final con el nuevo mallado, sino los archivos con los mallados obtenidos en los ciclos de proceso intermedios, esto con la finalidad de poder comparar resultados.

6.2 PlusOne

El programa PlusOne es realizado en Fortran 90 y es el encargado de realizar el proceso de refinamiento de la malla, del tipo H-adaptativo. PlusOne cuenta con tres (3) Unidades que se encargan de diversas funciones. Estas son:

UNIDAD I. Lectura de datos

Corresponde a la introducción de datos para la posterior realización del proceso de discretización definido con anterioridad. PlusOne lee el archivo *.dat* generado por ABAQUS, busca los valores de los Índices de energía de deformación, SENER, y genera un nuevo archivo *.sener* contenedor de esta información.

UNIDAD II. Refinamiento tipo H-adaptativo

En este módulo, PlusOne genera un nuevo mallado según los valores de los SENER. Utiliza el archivo *.sener* para el proceso de refinamiento.

UNIDAD III. Archivos

Los resultados obtenidos por PlusOne se resumen en archivos *.inp* generados y guardados en cada ciclo para

comprobación de valores de SENER y optimización de la malla.

7 Resultados

Luego del proceso de refinamiento automatizado, creado, los resultados obtenidos corresponden a mallados de mayor densidad en las zonas de singularidad.

En la figura siguiente, se muestra una estructura rectangular que es afectada por una carga distribuida en la superficie y su empotramiento que produce una concentración de energía de deformación para lo cual el software creado refina automáticamente de cinco (5) elementos iniciales a cuarenta (40) elementos distribuidos luego del tercer ciclo.

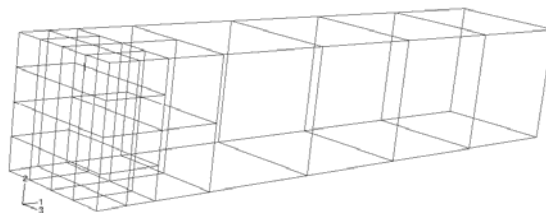


Fig. 4. Elemento con carga distribuida y empotramiento, discretizado por PlusOne luego del tercer ciclo de refinamiento.

La Fig. 5, muestra una estructura simple con una carga puntual en el extremo, donde se observa luego del tercer ciclo de refinamiento, la concentración del mallado.

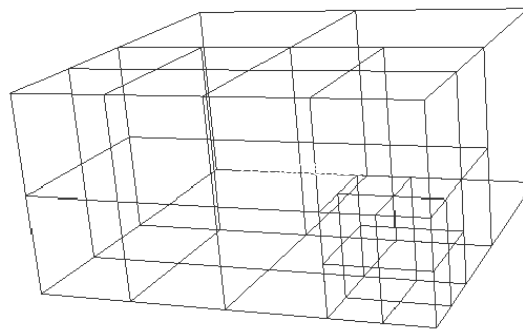


Fig. 5. Elemento con carga puntual en el extremo, discretizado por PlusOne luego del tercer ciclo de refinamiento.

8 Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones obtenidas en esta investigación se presentan enumeradas a continuación:

- Fueron realizados dos programas para la automatización del proceso de refinamiento H-adaptativo basado en Índices de Energía de Deformación utilizando la técnica de macro elementos, obteniendo la discretización mas óptima del modelo.
- Los programas fueron llamados PlusRun y PlusOne. El primero controlador de la automatización del proceso y

- el segundo encargado de lograr el refinamiento tipo H.
- Se compararon resultados obtenidos por el proceso automatizado y ejemplos de la literatura consultada obteniendo valores altamente similares.
 - Se modificaron y utilizaron las subrutinas existentes en Fortran para el Proceso de Refinamiento tipo H.
 - Se compararon modelos discretizados por el proceso automatizado creado en esta investigación y mallas uniformes obteniendo resultados mas apropiados en los primeros.
 - Las mallas obtenidas mediante el software creado presentaron menor tiempo computacional que en mallados uniformes.

Las principales recomendaciones surgidas de esta investigación son dirigidas a la propuesta de continuar esta rama de investigación, ya que no se ha incluido en el proceso automatizado de refinamiento-H indicadores función de análisis de errores, lo cual sería altamente apropiado para establecer un mallado perfecto que obtenga resultados perfectos.

Referencias

- Buenaño A y Febres H, 1995, Generador de malla H-adaptativo aplicado a problemas de flexión de placas usando Índices de densidad de energía de deformación, Boletín Técnico IMME, Vol. 33, No. 1.
- Cook R, Malkus D y Plesha M, 1989, Concepts and application of finite element analysis, 3rd edition, Editorial John Wiley & Sons, Inc.
- Febres H y Batí M, 1988, A simple strain energy bases finite element mesh refinement scheme, Computers & Structures, Vol. 28, No.4.
- Febres H, 1984, An energy based adaptative finite element analysis of two-dimensional elasticity problems, Thesis for degree of science in civil and environmental engineering, University of Iowa.
- Hibbit Karlsson & Sorensen Inc, 2001, ABAQUS User's manual, Versión 6.2.
- Meléndez C y Febres H, 1999, Generador de mallas H-adaptativo aplicado a problemas tridimensionales usando índices de densidad de energía de deformación, Tesis de Maestría en ingeniería estructural, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Zienkiewicz C y Zhu J, 1992, Mesh regeneration and automatic adaptative analysis, Numerical methods in engineering, Elsevier, Vol 34, No 2.