

ALGUNAS APLICACIONES DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA MÉNSULA, UNA ZAPATA SOBRE PILOTES, CASCARONES Y CONEXIONES EN CONCRETO

SOME FINITE ELEMENT APPLICATIONS IN THE STRUCTURAL ANALYSIS OF A CORBEL, FOOTING OVER PILES, SHELLS AND CONCRETE CONNECTIONS

Giovanni, Gonzalez Peñuela

Ing. Civil, Estudiante de especialización, Docente y Jefe del Área de Estructuras de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogota D.C., Colombia, e-mail: giogon@umng.edu.co

Diego, Velandia Manchego

Ing. Civil, Joven Investigador de Estructuras y Sísmica de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia, e-mail: diego.velandia@umng.edu.co

Julian, Carrillo León

Ing. Civil, Magíster en Ingeniería Civil. Docente e Investigador de la Universidad Militar "Nueva Granada", Bogota D.C., Colombia, e-mail: wcarrillo@umng.edu.co

Fecha de recepción: Octubre 26 de 2006

Fecha de aprobación: Abril 9 de 2007

RESUMEN

Actualmente la modelación estructural se centra en el análisis de estructuras convencionales como pórticos y armaduras. A pesar de la existencia de métodos para el análisis de estructuras más complejas, hay una tendencia a modelar los mismos tipos de estructuras. El método de los elementos finitos y su implementación por medio de aplicaciones computacionales, permite modelar todo tipo de estructura, hasta aquellas en las que aun no se tienen claros los diferentes comportamientos que se generan frente a diferentes tipos de solicitaciones; algunas de estas estructuras son las ménsulas, las zapatas sobre pilotes, los cascarones y las conexiones de concreto. Los programas especializados en la modelación por medio del método de los elementos finitos, interpretan el comportamiento de las estructuras de una forma gráfica, en donde se pueden discutir las diferentes zonas críticas y proporcionar resultados más aproximados debido al buen manejo de fronteras. Este método se basa en la conversión de las ecuaciones de equilibrio a sistemas lineales o no lineales para llegar a la solución de un análisis tanto estático como dinámico. A partir de la utilización de un programa especializado, en este caso Ansys Civilfem, se reconoce que el método de los elementos finitos proporciona la mayor aproximación del comportamiento de una estructura bajo condiciones reales, facilitando la búsqueda de las falencias y también de las formas y diseños óptimos con los cuales se puede mejorar su desempeño.

PALABRAS CLAVE: sistema lineal, sistema no lineal, análisis estático, análisis dinámico.

ABSTRACT

Nowadays structural modeling is focused in frames and trusses structural analysis. Although there are some methods to analyze much complex structure, there is a tendency to keep modeling the same type of structures. The finite element method and its implementation by computational applications lets to model any kind of structure, even those structures which do not have a clear behavior facing any type of load; some of these structures are corbels, footing over piles, shells and concrete connections. The finite element modeling software displays the structural behavior by graphics where can be discussed critical zones giving more accurate results by the proper use of frontiers. This method is based on the conversion from the equilibrium equations to linear or non linear system to reach the solution of both the static and dynamic analysis. By using specialized software, in this case Ansys Civilfem, it must be recognized that the finite element method gives a better approximation of the behavior of a structure under real conditions, making easier not only the searching of the problems but also designs and geometrics that can improve the structure performance.

KEY WORDS: linear system, non linear system, static analysis, dynamic analysis.

INTRODUCCIÓN

Se han desarrollado programas que solucionan de forma eficiente las ecuaciones que componen un análisis por medio del método de los elementos finitos pero lamentablemente no son usados en la modelación de algunas estructuras debido a la simpleza o complejidad tanto de la geometría como del análisis de la misma estructura. El presente artículo pretende ilustrar cómo las estructuras que no son convencionalmente modeladas, pueden llegar a ser analizadas por medio de herramientas que permiten enmallar, refinar y dividir la estructura para llegar así a puntos críticos.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos tiene su origen en la ingeniería aeronáutica; nace de un caso en donde existe un problema de medio continuo, el cual es solucionado discretizando en regiones más pequeñas con formas geométricas sencillas llamadas elementos finitos (Roa y Garzón, 2002). El método de los elementos finitos es una técnica para resolver ecuaciones diferenciales parciales, primero se discretizan las ecuaciones al describir el problema en sus dimensiones espaciales. La discretización se lleva a cabo sobre las pequeñas regiones de formas arbitrarias. Estos resultados en matrices relacionan la entrada de puntos específicos a la salida de todos los puntos en el dominio. Para resolver las ecuaciones sobre grandes regiones, las ecuaciones en matrices para regiones más pequeñas son sumadas nodo por nodo, resultando en el desarrollo de matrices globales.

En programas de computador, se toma la geometría planteada y se convierte en un modelo con cierta cantidad definida de elementos. Estos elementos cuentan con propiedades y características definidas, y están enlazados por medio de nodos. Con el uso de los elementos finitos en las estructuras, los nodos presentan una deformación teniendo en cuenta el equilibrio entre esfuerzos y cargas, como también las condiciones que dan los apoyos.

La forma de trabajar de los elementos finitos es pasar todas las ecuaciones de equilibrio a sistemas de ecuaciones lineales o no lineales, teniendo en cuenta los desplazamientos en los nodos. A partir de esto se pueden obtener tanto esfuerzos como deformaciones.

1.2. PASOS PARA EL DESARROLLO DEL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

El método de elemento finito consta de 12 pasos:

- Definición del problema y su dominio
- Discretización del dominio
- Identificación de variables de estado
- Formulación del problema
- Planteamiento del sistema de coordenadas
- Construcción de funciones aproximadas para los elementos
- Obtención de las ecuaciones y las matrices del elemento
- Transformación de coordenadas
- Ensamble de las ecuaciones del elemento
- Introducción a las condiciones de frontera
- Solución del grupo final de ecuaciones
- Interpretación de resultados

1.2.1. FUNDAMENTOS ESTRUCTURALES USADOS POR LOS ELEMENTOS FINITOS

Relación esfuerzo-deformación. Los esfuerzos se relacionan con las deformaciones por medio de la Ecuación 1 (Kohnke, 2001):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (1)$$

Donde $\{\sigma\}$ = vector de esfuerzo $\{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}\}^T$

$[D]$ = matriz esfuerzo-deformación

$\{\varepsilon^{el}\}$ = vector deformación elástica $\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\}$

$\{\varepsilon\}$ = vector de deformación total $\{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx}\}^T$

$\{\varepsilon^{th}\}$ = vector de deformación por temperatura

La deformación se puede visualizar como:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^{\text{th}}\} + [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (2)$$

La matriz de flexibilidad $[D]^{-1}$ es:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde E_x = módulo de Young en la dirección x

ν_{xy} = relación de Poisson mayor

ν_{yx} = relación de Poisson menor

G_{xy} = modulo de cortante en el plano xy

Las deformaciones se representan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy} \sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz} \sigma_z}{E_x} \quad (4)$$

$$\epsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy} \sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz} \sigma_z}{E_y} \quad (5)$$

$$\epsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz} \sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{yz} \sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z} \quad (6)$$

Donde ϵ_x = deformación directa en la dirección x

σ_x = esfuerzo directo en la dirección x

ϵ_{xy} = deformación de cortante en el plano x-y

σ_{xy} = esfuerzo de cortante en el plano x-y

α_x = coeficiente de expansión térmica en la dirección x

ΔT = variación de temperatura

Trabajo virtual. El principio del trabajo virtual establece que un pequeño cambio virtual de la energía de deformación interna debe ser igualado por un cambio en el trabajo externo dado a las cargas aplicadas. Esto se representa por medio de la Ecuación 7.

$$\delta U = \delta V \quad (7)$$

Donde U = energía de deformación (trabajo interno) = $U_1 + U_2$

V = trabajo externo = $V_1 + V_2 + V_3$

δ = operador virtual

La energía de deformación virtual es:

$$\delta U_1 = \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) \{u\} - \{du\}^T \int_{vol} [B]^T [D] \{\epsilon^{th}\} d(vol) \quad (8)$$

Donde $\{u\}$ = vector del desplazamiento nodal

T = temperatura

vol = volumen del elemento

$[B]$ = matriz de esfuerzo desplazamiento

Cuando una superficie se mueve contra una resistencia distribuida, se presenta otra forma de la energía de deformación virtual, la cual se visualiza en la Ecuación 9.

$$\delta U_2 = \{\delta u\}^T k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n] d(area_f) \{u\} \quad (9)$$

Donde k = rigidez en unidades de fuerza por longitud por unidad de área

$area_f$ = área de la resistencia distribuida

N_n = matriz de las funciones de forma para movimientos normales a la superficie

Con respecto al trabajo virtual externo, los efectos inerciales se pueden representar por medio de la siguiente ecuación, donde ς es la constante del volumen:

$$\delta V_1 = -\{\delta u\}^T \varsigma \int_{vol} [N]^T [N] d(vol) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} \quad (10)$$

El vector de la fuerza de presión se representa de la siguiente forma:

$$\delta V_2 = \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]^T \{P\} d(area_p) \quad (11)$$

Donde $\{P\}$ = vector de presión aplicado

$area_p$ = área en donde la presión actúa

Finalmente las fuerzas nodales aplicadas al elemento se representan por medio de la Ecuación 12:

$$\delta V_3 = \{\delta u\}^T F_e^{nd} \quad (12)$$

Donde F_e^{nd} = fuerzas nodales aplicadas sobre el elemento

1.3.1. COMBINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

Esfuerzos. Los esfuerzos principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) son calculados con los componentes del esfuerzo por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{vmatrix} = 0 \quad (13)$$

Donde σ_0 = esfuerzo principal

Los tres principales esfuerzos son $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, siendo σ_1 positivo (tensión) y σ_3 negativo (compresión). A partir de estos esfuerzos se obtiene la intensidad del esfuerzo el cual es evaluado a partir de la Ecuación 14:

$$\sigma_I = MAX(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (14)$$

El esfuerzo equivalente se determina a partir del criterio de Von Mises.

Esfuerzo de Von Mises. Según Chandrupatla (1999) y Belegundu (1999) el esfuerzo de Von Mises se utiliza para poder determinar la aparición de una falla en materiales que son dúctiles. Este criterio de falla establece que el esfuerzo de Von Mises σ_{VM} debe ser menor que el esfuerzo de fluencia σ_Y del material:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_Y \quad (15)$$

El esfuerzo de Von Mises está dado por:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{I_1^2 - 3I_2} \quad (16)$$

Donde I_1 e I_2 son las primeras dos invariantes del tensor de esfuerzo y están dados por:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (17)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \quad (18)$$

En términos de los esfuerzos principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, las dos invariantes pueden escribirse como

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (19)$$

$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \quad (20)$$

Por consiguiente se obtiene como esfuerzo Von Mises la siguiente ecuación:

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (21)$$

Con respecto el estado de esfuerzo plano se presenta la siguiente ecuación:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y \quad (22)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2 \quad (23)$$

Y para la deformación unitaria plana:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (24)$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 \quad (25)$$

Donde $\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)$ (26)

Deformación. Las deformaciones principales se calculan por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{vmatrix} \epsilon_x - \epsilon_0 & \frac{1}{2} \epsilon_{xy} & \frac{1}{2} \epsilon_{xz} \\ \frac{1}{2} \epsilon_{xy} & \epsilon_y - \epsilon_0 & \frac{1}{2} \epsilon_{yz} \\ \frac{1}{2} \epsilon_{xz} & \frac{1}{2} \epsilon_{yz} & \epsilon_z - \epsilon_0 \end{vmatrix} = 0 \quad (27)$$

Donde $\epsilon_0 =$ esfuerzo principal

Usando las deformaciones principales, se obtiene la intensidad de la deformación, lo cual se visualiza a través de la Ecuación 28:

$$\epsilon_I = MAX(|\epsilon_1 - \epsilon_2|, |\epsilon_2 - \epsilon_3|, |\epsilon_3 - \epsilon_1|) \quad (28)$$

La deformación equivalente se obtiene utilizando el criterio de Von Mises. Su cálculo se realiza mediante la Ecuación 29:

$$\epsilon_e = \left(\frac{1}{2} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2] \right)^{1/2} \quad (29)$$

2. MODELOS Y MÉTODOS

Los modelos que se utilizan tienen las siguientes características:

Ménsula. La ménsula de concreto ($f'_c = 21.1$ MPa) soporta una viga de concreto ($f'_c = 21.1$ MPa) con una luz de 6 m y una carga distribuida de 130 kN/m. Entre la ménsula y la viga se encuentra una platina de acero ($f_y = 248$ MPa). Las dimensiones en metros de la ménsula y su respectiva platina se aprecian en la Figura 1:

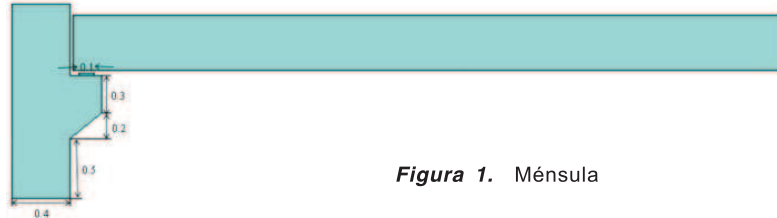


Figura 1. Ménsula

Zapata sobre pilotes. La zapata y los pilotes están diseñados para contener una carga transmitida por la columna de 1700 kN, para una profundidad de 7 m y un área de contacto de la zapata de 4 m². Los suelos que rodean la estructura tienen características cohesivas y no drenadas.

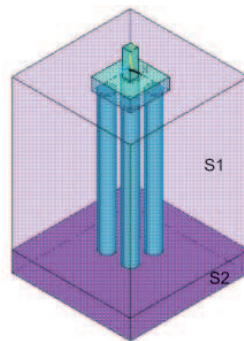


Figura 2. Zapata sobre pilotes

Cascarones. Los cascarones son variados, de diferentes dimensiones y formas, asemejándose a diferentes estructuras que actualmente existen o que dada su geometría compleja son interesantes para la modelación. El espesor de los cascarones es de 0.1 m y alcanzan alturas de hasta 8 m. La modelación de estas estructuras tiene en cuenta el peso propio además de algunas fuerzas externas distribuidas.

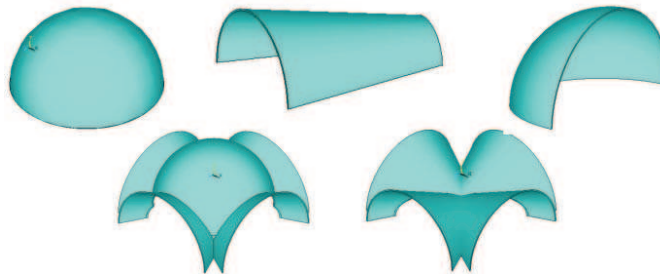


Figura 3. Cascarones

Conexiones en concreto. La primera conexión es la del pórtico plano, en donde las vigas tienen como dimensión 0.30x0.35 m y las columnas 0.30x0.40 m. Con respecto a la segunda conexión, la cual corresponde a la del pórtico tridimensional de concreto, las vigas son de 0.5x0.3 m, mientras que las columnas de 0.4x0.4 m.

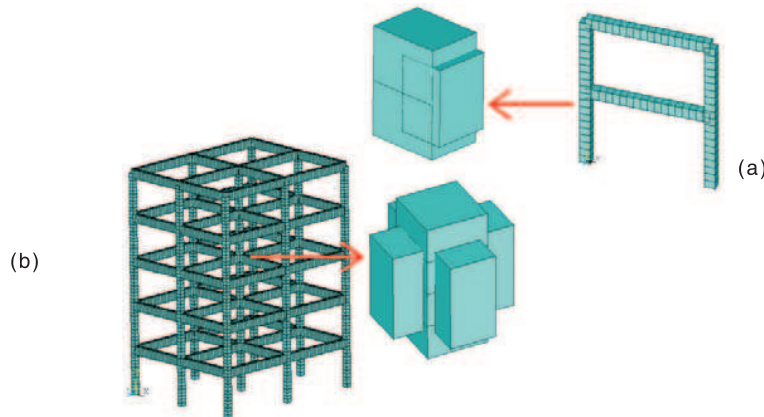


Figura 4. (a) Conexión de concreto pórtico plano, (b) Conexión de concreto pórtico tridimensional

El pórtico plano está cargado en el primer piso con 25 KN/m y en el segundo con 15 KN/m, mientras que el pórtico tridimensional de concreto está sometido a sismo ubicado en la zona 1 de los cerros de Bogotá según microzonificación sísmica de Bogotá (2001) y NSR (1998).

Los métodos utilizados en estas modelaciones se encuentran en el artículo “Ansys-CivilFEM y SAP 2000 en la Modelación Estructural” publicado en la Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Número 64 de 2006 y los procedimientos matemáticos se muestran en Fowler (1998).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El primer modelo que se analiza es la ménsula. Con la modelación de la ménsula se demuestra cómo por medio de los elementos finitos se pueden realizar análisis puntuales más exactos, usando la refinación del enmallado que maneja el software, en este caso Ansys Civilfem (Velandia y Cassiano, 2005). Para demostrar lo anterior se buscan las zonas críticas de la estructura, con el fin de realizar un enmallado preciso y tener una mejor visión del comportamiento estructural. En la Figura 5 se visualiza un enmallado más fino en la parte en donde se esperan los comportamientos más críticos de la estructura.

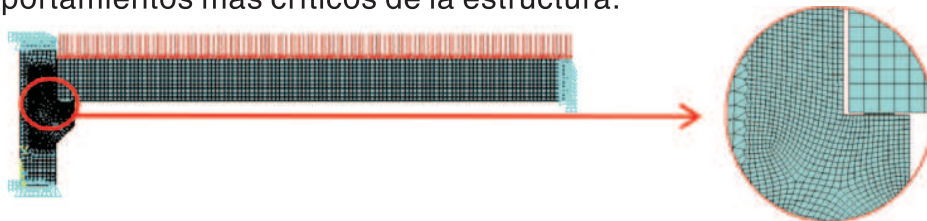


Figura 5. Ménsula con enmallado refinado

Al revisar la ménsula y la platina por medio del enmallado fino se visualizan los esfuerzos de una forma clara; estos llegan hasta los 117×10^6 Pa en la platina.

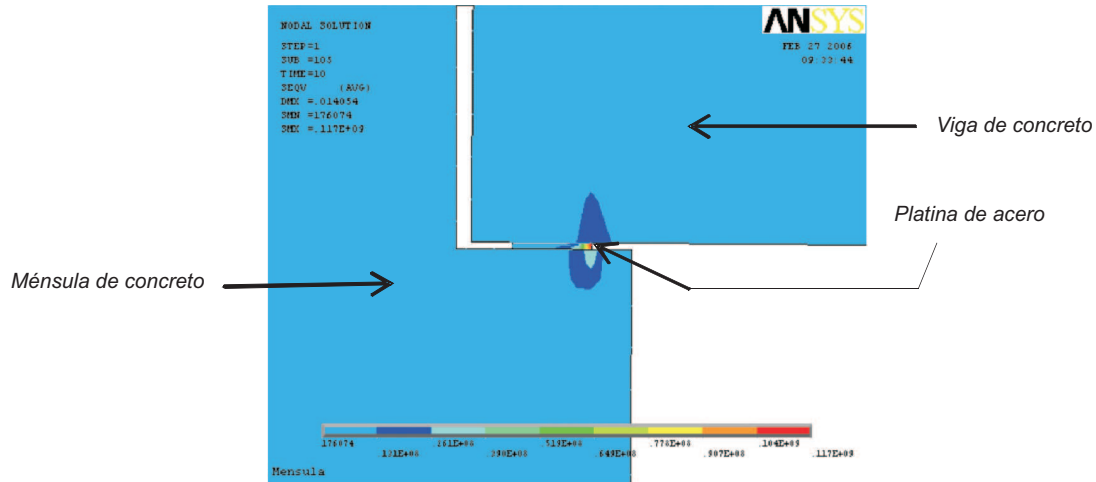


Figura 6. Esfuerzo Von Mises para la platina [Pa]

Dependiendo del enmallado realizado, se puede crear una trayectoria dentro de la estructura a través de la cual se aprecia la variación de los resultados de una forma gráfica por medio de una curva ó un diagrama. En la Figura 7 se aprecia la gráfica obtenida al seleccionar los nodos medios horizontales de la platina, en donde se tienen los mayores desplazamientos.

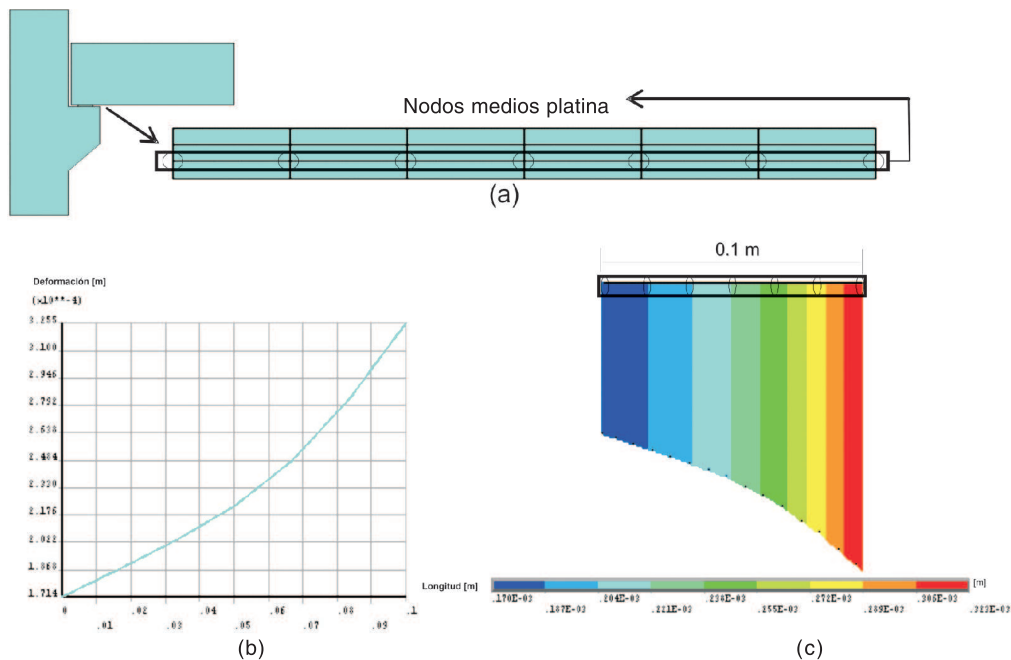


Figura 7. Desplazamiento interior de la platina [m], (a) Nodos medios horizontales de la platina (b) Curva de desplazamiento, (c) Diagrama de desplazamiento

A partir de la modelación de la ménsula, los comportamientos más críticos de la estructura se encuentran en la platina y el límite entre la ménsula y la platina. El método permite además iniciar la búsqueda en este caso de una o varias geometrías no convencionales, en las cuales los esfuerzos se minoricen y aseguren una mejor funcionalidad de la estructura.

Al igual que la ménsula, la zapata sobre pilotes tiene un enmallado más fino en zonas en donde se requiere un mejor análisis; el suelo no tiene un enmallado fino debido a que no es objeto de estudio. A pesar del gran tamaño de esta estructura, el método permite que la modelación tenga la misma complejidad que una estructura de menor tamaño. Al analizar la zapata sobre pilotes se demuestra que a pesar de la supuesta complejidad de la modelación aun se puede realizar un análisis estructural riguroso por medio de los elementos finitos.

La Figura 8 muestra la estructura separada del suelo para apreciar mejor los diferentes comportamientos. Es importante tener en cuenta que el suelo se modela colocando las características reales del terreno en el volumen que rodea la estructura. El mayor desplazamiento es de 4.4×10^{-3} m y está ubicado en la unión de la parte superior de la zapata, mientras que el mayor esfuerzo es de 13×10^5 Pa en la unión de la parte inferior de la zapata con la parte superior de los pilotes, esto sin tener en cuenta el comportamiento de la columna.

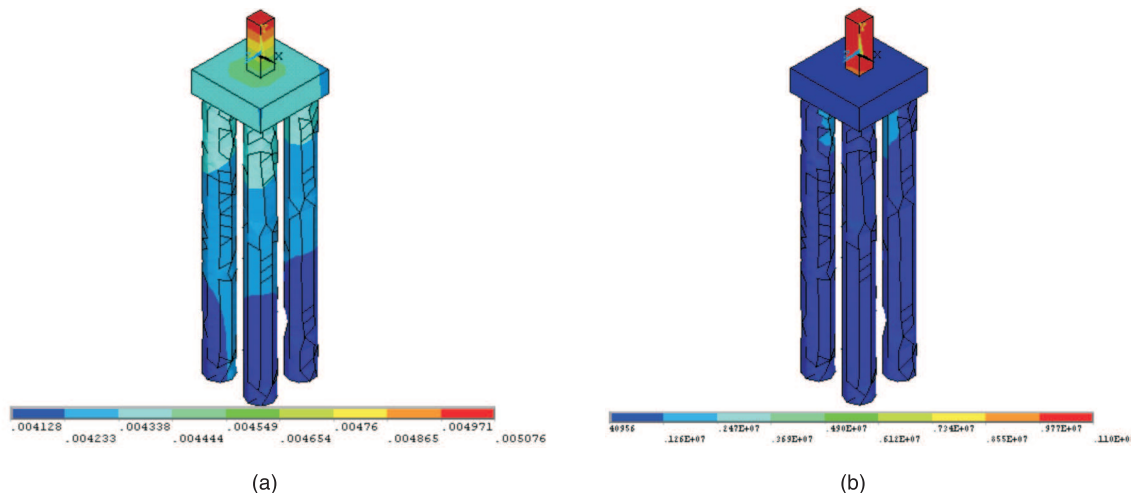


Figura 8. (a) Sumatoria de desplazamientos de la estructura [m] (b) Esfuerzos de la estructura [Pa]

El comportamiento de una estructura de gran tamaño como la zapata sobre pilotes es analizado por medio de los elementos finitos, realizando cortes en diferentes puntos, como se aprecia en la Figura 9, en donde se corta longitudinalmente parte de la zapata, pilotes y suelo para visualizar mejor los desplazamientos y los esfuerzos:

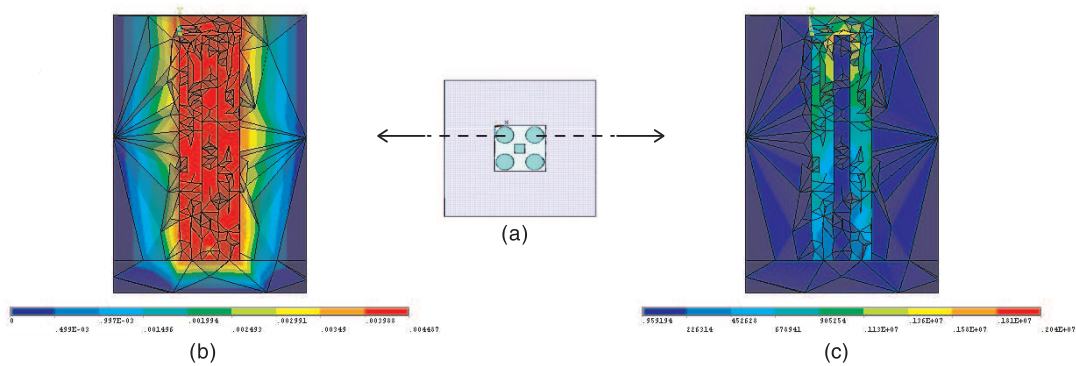


Figura 9. Visualización del comportamiento interno por medio de cortes de la zapata sobre pilotes y suelo (a) Corte longitudinal de la zapata sobre pilotes y suelo (b) Desplazamiento [m] (c) Esfuerzos [Pa]

La modelación de estructuras con formas complejas tales como los cascarones, ayuda a demostrar cómo los elementos finitos por medio del programa Ansys-Civifem permite modelar estructuras que poseen una geometría regular o irregular. La forma predominante de los cascarones es esférica, y a partir de ésta se desarrollan varias formas teniendo como carga principal su propio peso.

El primer cascarón es una media esfera hueca con espesor de 0.10 m y altura de 8 m, la cual se encuentra sometida a su propio peso. La modelación tiene como característica el enmallado en la parte superior, el cual es más fino dada la necesidad de apreciar mejor los resultados en este punto (ver Figura 10).

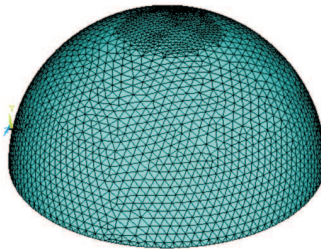


Figura 10. Enmallado del cascarón

El mayor desplazamiento que se presenta en la estructura al ser afectada por su propio peso, se encuentra en la parte superior, la cual es de 0.103×10^{-3} m (ver Figura 11(a)). Aparte de su propio peso, un sismo podría afectar la estructura y al ser introducido en la modelación, los elementos finitos permiten la visualización del comportamiento de una forma clara. En la Figura 11(b) se aprecia uno de los modos necesarios para desarrollar el análisis modal-espectral.

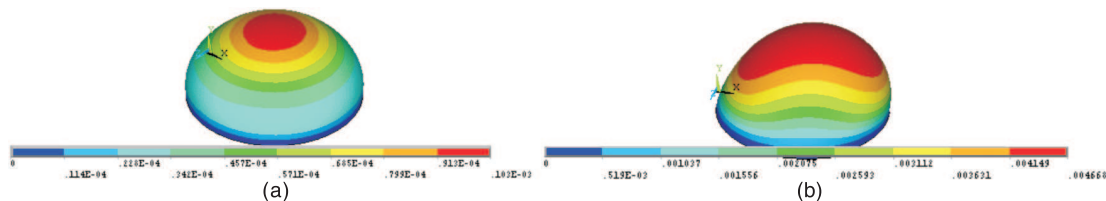


Figura 11. (a) Desplazamiento [m], (b) Desplazamiento modo natural de vibración de la estructura [m]

Además de esta estructura, se modelan otras más en donde se aprecia que modelaciones realmente complejas pueden ser analizadas utilizando elementos finitos. En la Figura 12 se visualizan los desplazamientos de algunos cascarones sometidos a su propio peso.

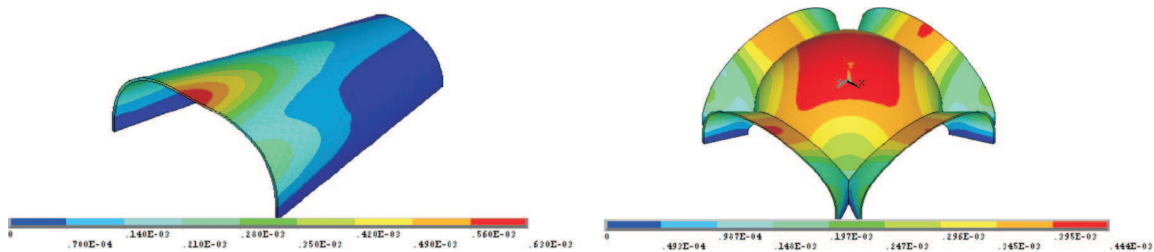


Figura 12. Desplazamiento de las estructuras [m]

A estas estructuras se les induce un sismo con el fin de apreciar sus diferentes comportamientos. En la Figura 13 se aprecian los comportamientos de otros tipos de cascarones; los mayores esfuerzos tienden a presentarse en los apoyos de las estructuras, en donde existe la primera posibilidad de fractura; así mismo, la disipación de la fuerza que tiene el sismo, depende de la geometría, generando en el primer caso esfuerzos en la parte superior de la estructura, mientras que en el segundo caso los esfuerzos tienden a presentarse en las caras laterales de cada uno de los cuatro cascarones concéntricos (ver Figura 13).

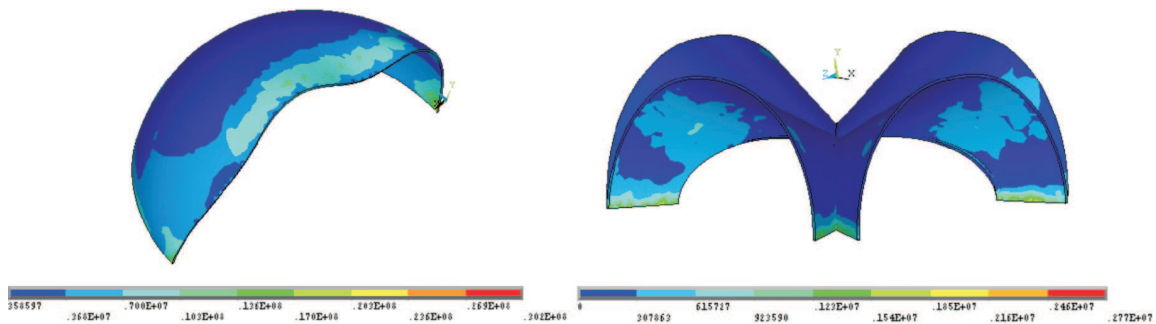


Figura 13. Esfuerzos Von Mises de las estructuras sometidas a sismo [Pa]

Finalmente las últimas modelaciones son las conexiones de concreto, las cuales hacen parte de un pórtico plano y un pórtico tridimensional. Las modelaciones de las conexiones de concreto demuestran que los elementos finitos llegan hasta los puntos más cruciales de los pórticos, y a su vez permiten dividir estos puntos hasta encontrar el comportamiento más crítico del elemento, en este caso entre la viga y la columna. Los desplazamientos de la conexión del pórtico plano de concreto al aplicarle las cargas anteriormente nombradas, se visualizan de una forma clara por medio de la división de las conexiones. Se aprecia que el mayor desplazamiento

313.865x10⁻⁶ m se ubica en la viga. El enmallado laminar permite ver que la variación de los desplazamientos de las secciones de la columna están entre 47.716x10⁻⁶ m y 97.327x10⁻⁶ m (ver Figura 14).

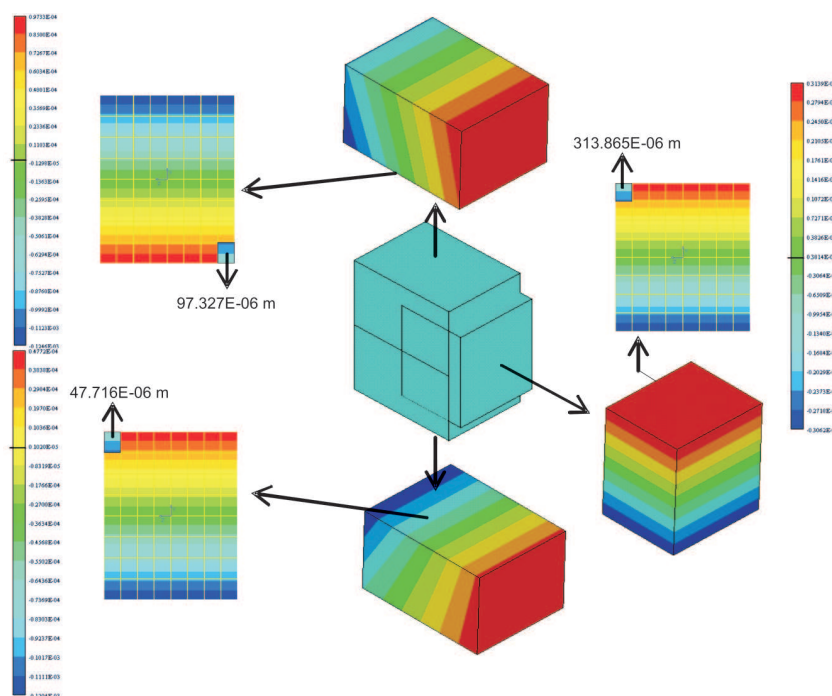


Figura 14. Desplazamientos pórtico plano de concreto [m]

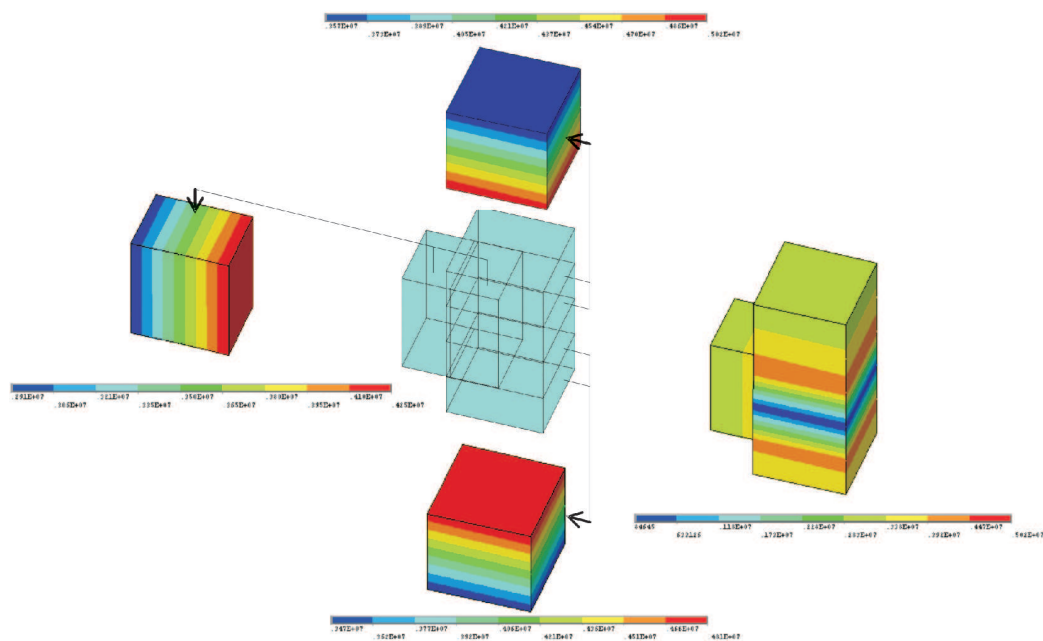


Figura 15. Esfuerzos pórtico tridimensional de concreto [Pa]

Las conexiones del pórtico tridimensional de concreto tienen el mismo enmallado laminar. Se analiza la conexión más crítica: la unión entre 4 vigas y 2 columnas. En esta conexión los esfuerzos se aprecian en forma clara y alcanzan los 5×10^6 Pa en la columna.

4. CONCLUSIONES

Estructuras de gran tamaño y geometrías complejas pueden ser analizadas por medio de los elementos finitos, donde no sólo se visualiza el comportamiento externo de la estructura, sino también el comportamiento interno por medio del enmallado; una estructura de gran tamaño se divide en varias partes hasta ubicar el elemento más crítico, encontrando sus esfuerzos debido a las condiciones externas a las que es sometido.

La exactitud de los resultados que se obtienen en la modelación de estructuras depende del enmallado que se utilice. La refinación del enmallado en el área de la estructura en donde se presenta un comportamiento crítico permite una mejor visualización de las reacciones, facilitando la ubicación exacta de la falla utilizando el criterio de Von Mises.

La modelación utilizando el método de los elementos finitos permite encontrar geometrías con las cuales las estructuras presentan un mejor comportamiento frente a las diferentes condiciones a las que se someten. Al manejar enmallados complejos, se pueden llegar a modelar formas vanguardistas, realizando así nuevos diseños.

RECOMENDACIONES

Al realizar un análisis con elementos finitos utilizando un software especializado es importante tener un especial cuidado en poseer el conocimiento propio de lo que está solicitando el software al momento de introducir los valores, debido a que los resultados pueden terminar en consecuencias lamentables. De esta misma forma, al realizar cualquier tipo de análisis es importante tener en cuenta todas las variables posibles que puedan afectar a la estructura, por ejemplo en un análisis dinámico en donde influyen factores externos como las características propias del lugar.

Es necesario seguir investigando acerca de las posibles formas geométricas que podrían mejorar el desempeño de algunas estructuras utilizando el método de los elementos finitos y su implementación en los software. Al encontrar nuevas formas se buscaría garantizar un mejor comportamiento durante la vida útil de la estructura frente a diferentes solicitudes, marcando un gran avance en el diseño estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente-NSR-98. Bogotá, Colombia. AIS.
- [2] ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. (2001). Decreto 074, Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá. Bogotá, Colombia. 18 p.
- [3] CARRILLO, Julian, GONZALEZ, Giovanni y VELANDIA, Diego. 2006. Ansys-CivilFEM y SAP 2000 en la Modelación Estructural; En: Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Número 64, pp. 6-12.
- [4] CHANDRUPATLA, T. y BELEGUNDU, A. (1999). Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería, Pearson Education.
- [5] FOWLER, A.C. (1998). Mathematical Model in the Applied Sciences. Cambridge, United Kingdom. Cambridge University. Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, 402 p.
- [6] KOHNKE, Peter. (2001). Theory Manual 2. ANSYS, Inc. Canonsburg. 1266 p.
- [7] ROA GARZON, M. y GARZON ALVARADO, D. (2002). Introducción al Modelamiento por Elementos Finitos con ANSYS. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.
- [8] VELANDIA, D. y CASSIANO, J. Análisis Comparativo de los Resultados Obtenidos por Medio de los Programas SAP2000 v7.1 y ANSYS-CivilFEM v8.1 en el Análisis de Estructuras. Bogotá, 2005, Colombia. Tesis de grado. Universidad Militar Nueva Granada. Páginas 75 -123.