

Recomendaciones Simplistas para el Desarrollo de Modelos Matemáticos de Elementos de Concreto Sometidos a Cargas Cercanas a la Falla

Simplistic Recommendations for the Development of Mathematical Models of Concrete Elements Subjected to Loads Near Failure

Néstor González ^{1*}, Jorge Ortega ², José Gallardo ³, Rogelio Pittí ⁴

^{1,2,3,4} Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

¹ nestorsaul13@gmail.com, ² jorgeluisortega21@gmail.com, ³ jose.gallardo@utp.ac.pa, ⁴ rogelio.pitti@utp.ac.pa

Resumen– Como parte del proyecto de investigación de la capacidad a punzonamiento de las conexiones columna-losa de concreto con aberturas en la periferia, se ha realizado simulaciones de elementos de concreto reforzado en un software de elementos finitos. En el presente artículo se presentará una serie de recomendaciones para el desarrollo de estos modelos que permitirán simular el comportamiento estructural de elementos de concreto sometidos a historias de cargas monotónicas hasta la carga última o carga de falla.

Palabras claves– ANSYS, Módulo de elasticidad del concreto, Conexión columna-losa, Elementos finitos, APDL

Abstract– As part of the research project of the punching capacity of concrete column-slab connections with openings in the periphery, simulations of reinforced concrete elements in finite element software have been carried out. In the present article a series of recommendations will be presented for the development of these models that will allow to simulate the structural behavior of concrete elements subjected to histories of monotonic loads up to the last load or load of failure.

Keywords– ANSYS, Elasticity Module of concrete, Slab-column joint, Finite element, APDL

1. Introducción

La modelización del comportamiento de estructuras de concreto dentro del rango no-lineal, que considere el desarrollo de grietas y simule las condiciones que se generan durante la falla del elemento es una tarea de considerable complejidad, debido a que en estas etapas las deformaciones y esfuerzos en el concreto deben captar el efecto de discontinuidades o la existencia de zonas de muy baja rigidez (e.g. fisuras y zonas de aplastamiento a compresión). Por este motivo, gran parte del tiempo dedicado a esta investigación se orientó a determinar la metodología más conveniente para desarrollar estos modelos.

Se eligió el software ANSYS, por su amplio uso en investigaciones relativas al comportamiento de elementos de concreto y dada la disponibilidad del

mismo instalado en servidores de la Universidad Tecnológica de Panamá. Dentro de ANSYS se eligió trabajar en su plataforma WORKBENCH a través de comandos en el lenguaje paramétrico de diseño (APDL) por la posibilidad de generar secuencias de comandos que hacían posible la creación de modelos que incluyeran el uso de plasticidad en elementos tridimensionales.

2. Marco Teórico

En esta sección se definirá brevemente aspectos sobre los distintos elementos que forman parte de los modelos utilizados. Utilizando el software de elementos finitos ANSYS, se logra de una forma rápida y eficiente realizar el análisis mecánico que requiere todo elemento estructural a la hora de conocer su comportamiento. Se torna difícil simular el concreto no lineal tan solo con las

propiedades de los materiales que el paquete de WORKBENCH incluye por defecto, de modo que se decide aprovechar la tecnología disponible de ANSYS para simulaciones estructurales, tanto en su modo clásico MECÁNICO APDL como en su plataforma WB. Esto nos lleva a combinar el lenguaje paramétrico de diseño (APDL clásico) con la plataforma de WORKBENCH, dando como resultado simulaciones más eficientes y con bajo coste de tiempo.

A través del lenguaje paramétrico de diseño se definen los tipos de elementos por los que está compuesto el sistema en estudio, como también sus propiedades mecánicas (elásticas isotrópicas/ortotrópicas, plasticidad, criterios de falla, etc.).

Antes de hacer una descripción breve de los tipos de elementos que se utilizan para los modelos matemáticos, mencionaremos las ecuaciones descritas para asignarles valores a las propiedades de los elementos. El Modelo de Hognestad [1], el cual es un modelo muy aceptado para el comportamiento del concreto no confinado, como sigue:

$$f_c = f'_c \left[\frac{2 \varepsilon_c - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2}{\varepsilon_0} \right], \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$f_c = 0.85 f'_c + \frac{0.00045 f'_c}{0.003 - \varepsilon_0} \left(-\frac{\varepsilon_c}{0.003} + 1 \right), \varepsilon_c \geq \varepsilon_0 \quad (2)$$

A su vez, también utilizamos la ecuación 19.2.2.1 del Código ACI 318-14 [2], para estimar el módulo de elasticidad del concreto, como se muestra a continuación:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

2.1 Tipos de elementos

SOLID 65 es el tipo de elemento utilizado para el modelado en 3-D de sólidos con o sin barras de refuerzo. Éste sólido tiene la capacidad de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión. El aspecto más importante de éste elemento es el tratamiento de no-linearidad que puede desarrollar.

Link180 es un elemento alargado en 3-D útil para una variedad de aplicaciones en la ingeniería. Éste elemento puede ser utilizado para modelar cerchas, cables, enlaces,

resortes, etc, siendo capaz de trabajar a tensión y a compresión con tres grados de libertad en cada nodo.

2.2 Propiedades del concreto

Es definido para el concreto (SOLID 65) las propiedades elásticas, como su módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. El primero provee al análisis linealidad en las relaciones de esfuerzo deformación y el segundo introduce el efecto de estrechamiento que sufre el material.

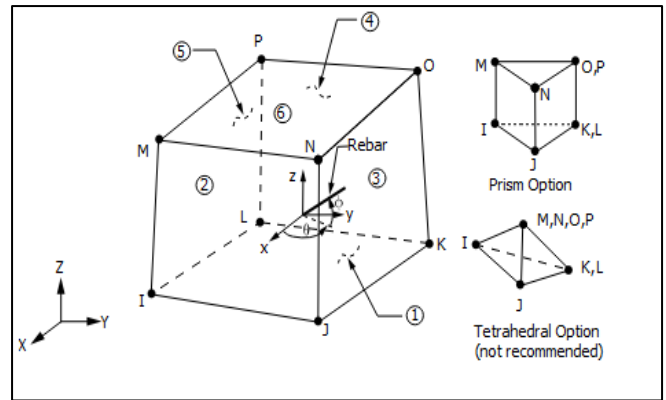


Figura 1. Elemento de ocho nodos SOLID65, Fuente: Ayuda de ANSYS.

Se define la curva esfuerzo-deformación para el estado de compresión al que se ve sometido el sistema estructural. Este estudio se basa en el modelo de Hognestad, que describe la curva mediante una ecuación de segundo grado, la misma es modelada con las ecuaciones (1) y (2).

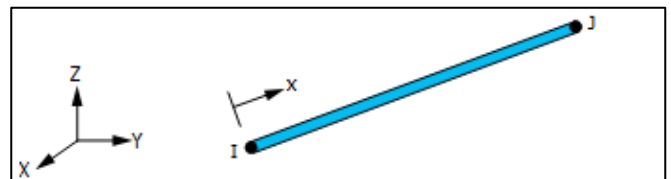


Figura 2. Elemento de dos nodos LINK180, Fuente: Ayuda de ANSYS.

Para la simplificación del análisis, se introducen estos datos como una serie de tramos multilíneales, es decir, se utilizan gráficas idealizadas, como se muestra a continuación:

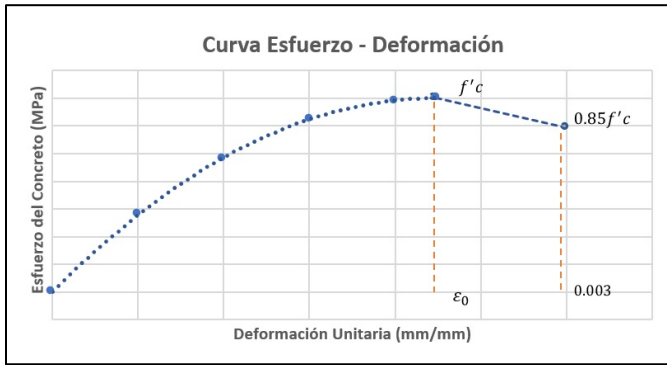


Figura 3. Curva Esfuerzo – Deformación propuesta por Hognestad.

El criterio de falla para el concreto se basa en el modelo de Willam y Warnke. Un total de seis parámetros son necesarios para definir la superficie de falla.

Tabla 1. Coeficientes para definir el concreto.

| Constante | Símbolo | Significado |
|-----------|--------------|--|
| 1 | β_t | Coefficiente de transferencia de cortante para grieta abierta. |
| 2 | β_c | Coefficiente de transferencia de cortante para grieta cerrada. |
| 3 | f_t | Resistencia última a la tensión. |
| 4 | f_c | Resistencia última a la compresión. |
| 5 | f_{cb} | Resistencia última a la compresión biaxial. |
| 6 | σ_h^a | Estado de esfuerzo para ambiente hidrostático. |
| 7 | f_l | Esfuerzo de aplastamiento biaxial bajo estado de esfuerzos hidrostático ambiental. |
| 8 | f_2 | Esfuerzo de aplastamiento uniaxial bajo estado de esfuerzos hidrostático ambiental. |
| 9 | T_c | Multiplicador de rigidez para el agrietamiento en condición de tracción. (0.6 por defecto) |

Las constantes del 3 al 8 son las necesarias para definir la superficie de falla. Sin embargo, la superficie puede ser especificada por un mínimo de dos constantes,

f_t y f_c . Las otras cuatro constantes serán asignadas por el programa como sigue:

$$f_{cb} = 1.2 f'_c \quad (4)$$

$$f_1 = 1.45 f'_c \quad (5)$$

$$f_2 = 1.725 f'_c \quad (6)$$

La constante 6 (σ_h^a) sólo será introducida por el programa si:

$$\left| \sigma_h^a \right| \leq 3\sqrt{f'_c} \quad (7)$$

Las constantes 1, 2 y 9 complementan el modelo para el comportamiento por aplastamiento y agrietamiento que presenta el concreto en las etapas de análisis.

2.3 Propiedades del acero

El acero de refuerzo es definido con sus propiedades elásticas isotrópicas, tanto con su módulo de elasticidad como con su coeficiente de Poisson.

Se introduce a las barras de acero los datos necesarios para estados últimos de esfuerzo-deformación mediante un sistema bilineal. A continuación, se muestra la gráfica idealizada de la curva esfuerzo – deformación, como sigue:

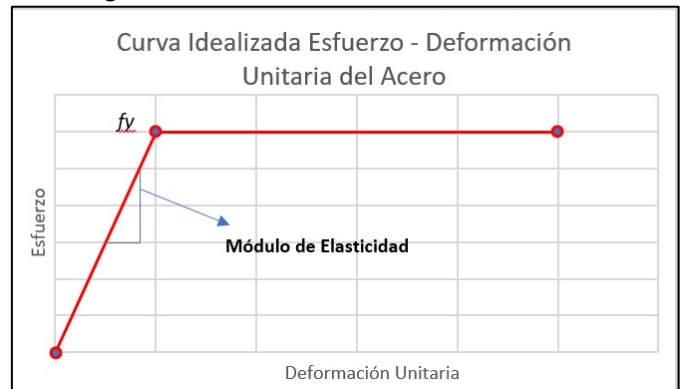


Figura 4. Curva Idealizada Esfuerzo – Deformación Unitaria del Acero. Fuente: Diseño de Estructuras de Acero, McCormac (2013), pág. 133 [3].

3. Escritura de comandos

Se presenta la estructura secuencial de comandos para definir los elementos y sus propiedades.

Tabla 2. Comandos necesarios para la simulación.

| Ubicación del comando | Comando | Definición |
|-----------------------|---|--|
| Concreto | | |
| | !Data Element Type ET,MATID,SOLID65 R,MATID,0,0,0,0,0,0,0,0 RMORE,0,0,0,0,0 | Se define el tipo de elemento a utilizar para el concreto (SOLID 65). ET: tipo de elemento (siglas en idioma inglés). MATID: identidad del material. R: constantes del material RMORE: constantes adicionales. |
| | !Data Material Properties MP,EX,MATID,# MP,PRXY,MATID,# MPTEMP,MATID,# | Se introduce las propiedades isotrópicas elásticas del material. MP: propiedad del material. EX: módulo de elasticidad en el eje X. PRXY: coeficiente de poisson en los ejes X y Y. MPTEMP: temperatura del material. |
| | !Data Input Non Metal Plasticity-Concrete TB,CONCR,MATID,1,9 TBTEMP,0 TBDATA,, β , β , β , ϵ_c , ϵ_c , ϵ_c , | Se asignan los valores para definir el criterio de falla utilizado en el concreto. TB: tabla. (de 1@9 son los datos que definen el concreto) CONCR: modelo de material, concreto. TBDATA: tabulado de datos. β : valores en el rango 0.35-0.40 β : valores en el rango 0.9-0.1 |
| | !Data Input Stress-Strain Non Linear - Multilinear Kinematic Hardening TB,KINH,MATID,1,n,0 TBTEMP,0 TBPT,, ϵ , σ TBPT,, ϵ , σ TBPT,, ϵ , σ TBPT,, ϵ , σ TBPT,, ϵ , σ TBPT,, ϵ , σ | Se define la representación da la curva esfuerzo-deformación mediante tramos (multilineal). KINH: endurecimiento por deformación. n: cantidad total de coordenadas definidas. TBPT: define un punto en la curva ni lineal. ϵ : valor para la deformación unitaria. σ : valor para el esfuerzo a compresión. |
| Acero | | |
| | ET,MATID,LINK180 MPDATA,EX,MATID,,# MPDATA,PRXY,MATID,,# TB,BISO,MATID,1,2 TBDATA,,#,# R,MATID,,#,0 | Se define el tipo de elemento a utilizar para el acero (LINK180). BISO: datos bilineales para el diagrama de esfuerzo-deformación. TBDATA: el primero valor es f_y y el segundo es el módulo tangente. R: valor para la sección transversal de barra. |
| Pre-procesado | | |
| | /PREP7 ESEL,S,ENAME,,65 ESEL,A,ENAME,,180 ALLSEL,BELOW,ELEM CPINTF,ALL,0.00001 ALLSEL,ALL /SOLU OUTRES,ALL,ALL | ESEL: seleccionar un subconjunto de elementos. S: seleccionar un nuevo conjunto A: seleccionar un conjunto adicional y ampliar el conjunto actual. ENAME: nombre del elemento. ALLSEL: selecciona todos los conjuntos en un solo comando. BELOW: selecciona todos los elementos directamente asociados con/y los elementos seleccionados del tipo de entidad especificada. CPINTF: genera ecuaciones de restricción en las interfaces. |
| Solución | | |
| | /SHOW,png /ANG,1 !/VIEW,1,1,0,0 !To change view Z-Y /VIEW,1,0,1,0 !To change view X-Z SET,1,1 /DEVICE,VECTOR,ON /POST1 | Se presentan imágenes en el ambiente clásico de ANSYS APDL mecánico, cómo se va comportando el modelo analizado hasta que este llega a la falla en divisiones de 10 pasos. Las grietas desarrolladas en el sistema se podrán apreciar al finalizar el análisis gracias a este comando. |

| | |
|---|--|
| SET,,, ,1 !To view crack time 0.1 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,2 !To view crack time 0.2 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,3 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,4 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,5 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,6 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,7 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,8 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,9 PLCRACK,0,0 | |
| SET,,, ,10 PLCRACK,0,0 | |

4. Modelo a desarrollar

En un estudio realizado por Hesham Eid [2] fueron ensayados un total de cinco (5) especímenes (conexión columna-losa con y sin abertura en la periferia) para obtener su resistencia a cortante por punzonamiento. Tres de los cinco modelos estaban preforzados, mientras que los restantes estaban simplemente reforzados.

El modelo a desarrollar es el S4, sin abertura, simplemente reforzado, con las esquinas libres de rotar y apoyos simples en los 4 bordes.

Se introducirán todas las propiedades físicas y mecánicas que posee el modelo S4 en ANSYS. Todos los comandos creados para el modelo matemático son presentados en el análisis.

Tabla 3. Propiedades del modelo S4.

| Propiedades del modelo | Detalles |
|-----------------------------|------------|
| concreto | |
| Módulo de elasticidad | 28000 MPa |
| Coficiente de poisson | 0.2 |
| Resistencia a la compresión | 35 MPa |
| Resistencia a la tensión | 5.32 MPa |
| acero | |
| Módulo de elasticidad | 200000 MPa |
| Relación de Poisson | 0.3 |
| Resistencia a la tracción | 400MPa |

| | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Área de acero por barra a tensión | 50.26 mm ² /barra |
| Área de acero por barra a compresión | 113.09mm ² /barra |

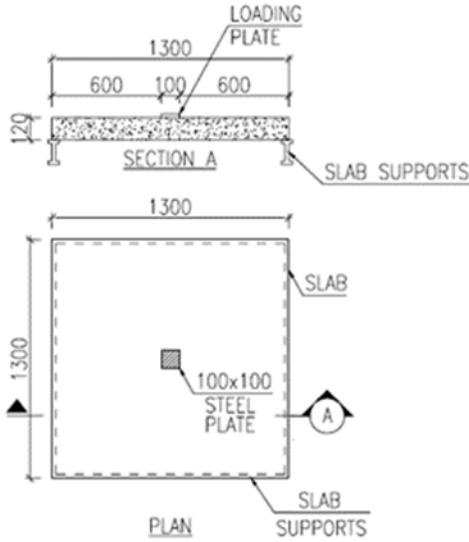


Figura 5. Curva Idealizada Esfuerzo – Deformación Unitaria del Acero.

5. Creación de modelo en workbench

Una vez abierta la interfaz de ANSYS Workbench, seleccionamos en la parte izquierda el tipo de análisis que deseamos realizar, para nuestro estudio usaremos Static Structural.

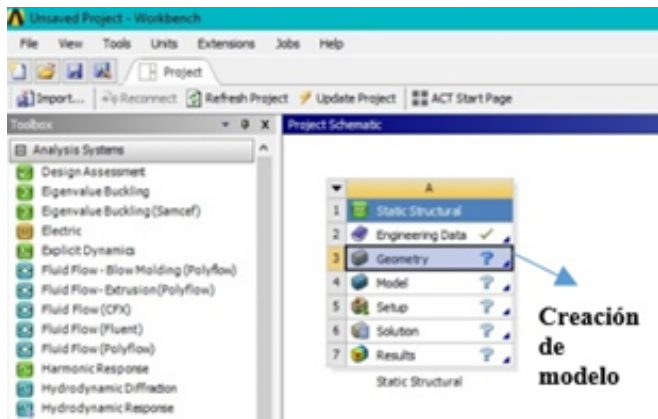


Figura 6. Creación del modelo en ANSYS.

A continuación, se muestra una imagen del modelo ya creado en el Design Modeler.

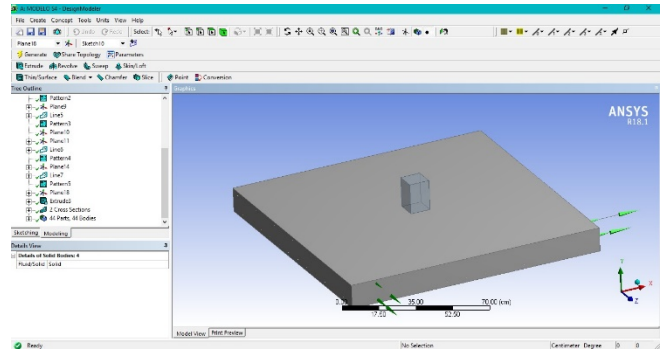


Figura 7. Modelado final.

Una vez creado el modelo, procedemos a seleccionar la opción Model de la interfaz de ANSYS, donde procederemos a introducir las propiedades a los materiales (Módulo de Elasticidad, relación de Poisson, entre otras). Seguido, se muestra para el concreto los comandos asignados.

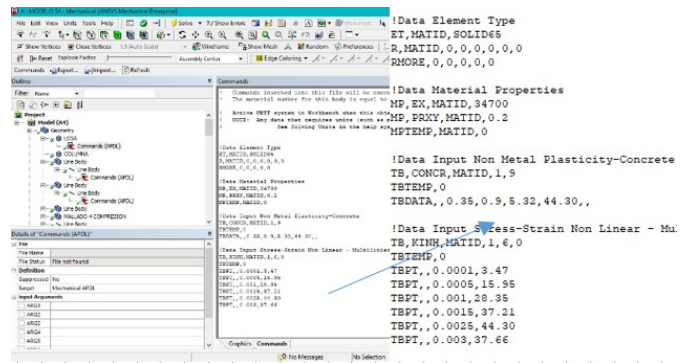


Figura 8. Introducción de comando al concreto.

Para insertar las propiedades, damos clic derecho al solido denominado LOSA, insertar comando, y se coloca el comando descrito anteriormente ya con cada uno de los valores correspondientes.

Posteriormente procedemos a realizar el mallado del sistema, es decir, definir el tamaño de los elementos finitos. Una vez hecho, se colocan las cargas y condiciones de apoyo al sistema, como se muestra a continuación:

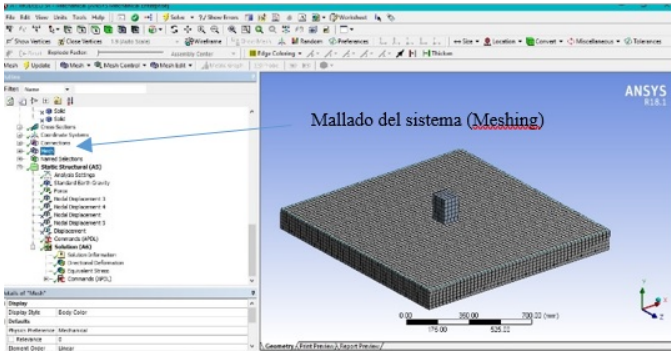


Figura 9. Discretizado del modelo.

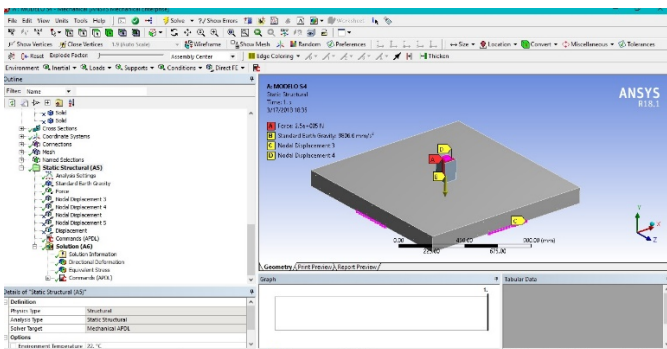


Figura 10. Modelo estructural.

En la imagen anterior, apreciamos las cargas aplicadas al sistema en color rojo, la fuerza de la gravedad en amarilla, (flecha hacia abajo), los puntos en rosado representan las condiciones de frontera del sistema aplicada en los nodos (restricción de movimiento en los ejes).

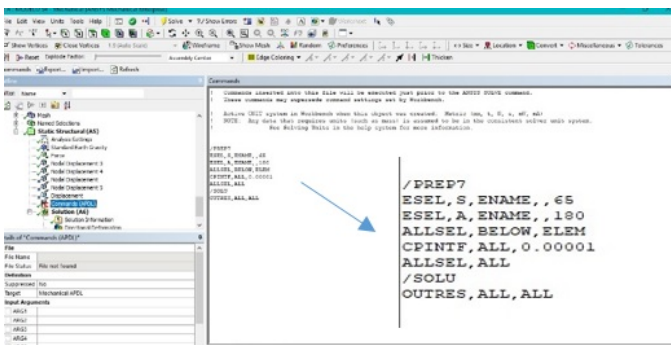


Figura 11. Comando de preproceso.

Seguido, se da clic derecho a Stactic Structural (A5) y se elige la opción insertar comando.

Como último paso seleccionamos Solution (A6), donde se le solicita al software la información que

deseamos, ya sea desplazamientos, esfuerzos, etc; a su vez, también insertamos los comandos de solución para indicarle al programa que presente los diferentes estados de agrietamiento que sufre el sistema.

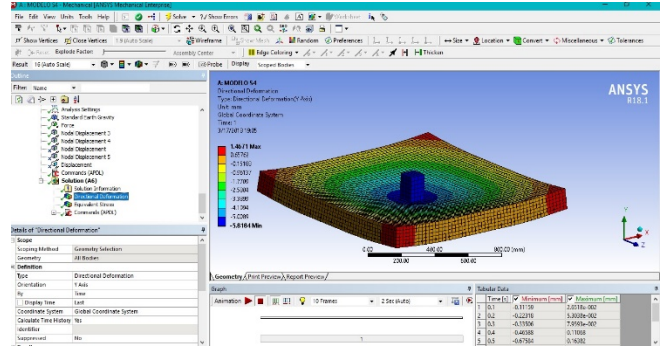


Figura 12. Solución del sistema.

Los comandos introducidos en la parte de solución permiten observar los resultados solicitados en función de diez pasos; es decir, se divide toda la simulación en 10 estados del modelo.

A continuación se muestra en cada paso del análisis como se desarrolla el agrietamiento. Se anexa también la gráfica de carga vs desplazamiento comparando ANSYS vs el estudio experimental S4.

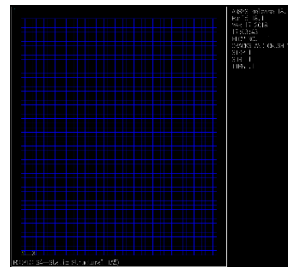


Figura 13. Paso 1.

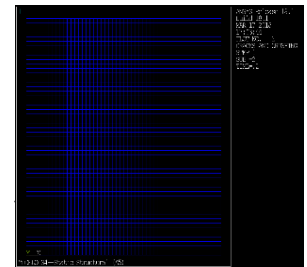


Figura 14. Paso 2.

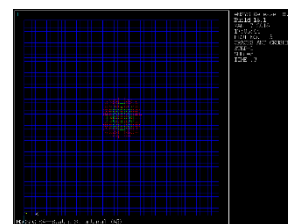


Figura 15. Paso 3.

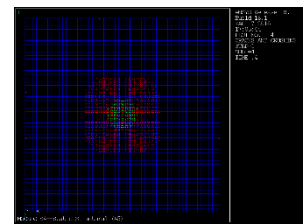


Figura 16. Paso 4.

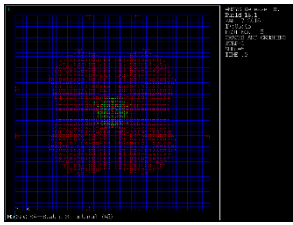


Figura 17. Paso 5.

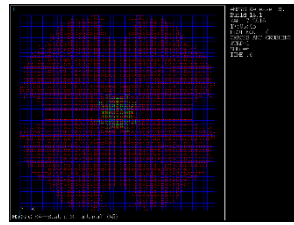


Figura 18. Paso 6.

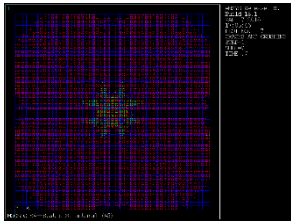


Figura 19. Paso 7.

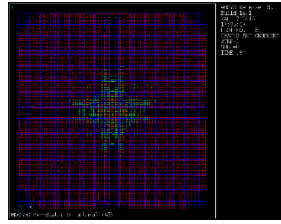


Figura 20. Paso 8.

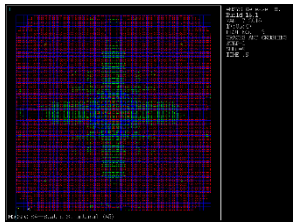


Figura 21. Paso 9.

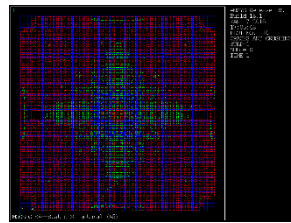


Figura 22. Paso 10.

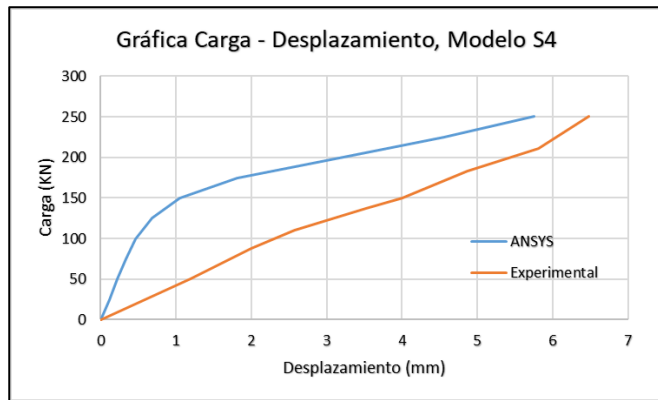


Figura 23. Comparación entre modelo S4 experimental y S4 ANSYS.

6. Análisis de los resultados

Después de haber revisado información en el ANSYS HELP [3] para todo el proceso de calibrado del modelo matemático, y así hacer el contraste con los resultados que fueron obtenidos en el ensayo del espécimen S4 de forma experimental (sección 4), podemos decir que los datos de ANSYS Workbench se ajustan bastante a la realidad, teniendo un margen de error razonable, ya que

en ANSYS obtuvimos un desplazamiento de 5.7 mm; mientras que el experimental fue de 6.6 mm en la parte central de la losa. El resultado del modelo presenta una variación 13.6% respecto al trabajo experimental.

7. Conclusión

Se puede atribuir la variación que existe entre el modelo matemático y el modelo experimental, a la manera en que se idealizan ciertas condiciones del dominio en ANSYS Workbench con el fin de mejorar la comprensión sobre el comportamiento que tienen estos sistemas estructurales.

El método de elementos finitos utilizado en el software, combinado con el lenguaje de diseño paramétrico, provee un sistema de solución rápido y eficiente a la hora de realizar simulaciones de sistemas estructurales no lineales, reduciendo costes de tiempo y de requisitos computacionales.

8. Referencias

- [1] Hognestad, E. (1951), "A study of combined bending axial load in reinforced concrete members", Bulletin Series No. 399 (vol 49).
- [2] Hesham E. S. Mohamed A. (2012), "Effect of near column opening in punching behavior of post tensions slabs".
- [3] ANSYS HELP, Paquete de ayuda de ANSYS Workbench.