SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ABOLLADURAS GENERADAS POR CARGAS EXPLOSIVAS EN ESTRUCTURAS NAVALES UTILIZANDO ANSYS 5.5.

HUGO RANGEL RODRIGUEZ

NESTOR PINEDO FORTICH

Monografía presentada como requisito para el Minor en Diseño en Ingeniería Mecánica

Director:

JAIRO F. USECHE VIVERO

Ingeniero Mecánico

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLIVAR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS

2003

AUTORIZACIÓN

Cartagena de Indias, D.T.C.H.,

Yo HUGO CARLOS RANGEL RODRIGUEZ, identificado con numero de cédula 9’236.692 de Cartagena, autorizo a la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catalogo online de la biblioteca

HUGO CARLOS RANGEL RODRIGUEZ
C.C. 9’236.692 de Cartagena

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ABOLLADURAS GENERADAS POR CARGAS EXPLOSIVAS EN ESTRUCTURAS NAVALES UTILIZANDO ANSYS 5.5.

HUGO RANGEL RODRIGUEZ

NESTOR PINEDO FORTICH

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLIVAR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS

2003

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

Jurado

_____

Jurado

Cartagena, 7 de Noviembre del 2003

Cartagena de Indias D.T y C. Noviembre 7 del 2003

Señores:

Comité Evaluador

Departamento de Ingeniería Mecánica

Apreciados señores:

Por medio de la presente me permito informarles que la monografía titulada "SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ABOLLADURAS GENERADAS POR CARGAS EXPLOSIVAS EN ESTRUCTURAS NAVALES UTILIZANDO ANSYS 5.5." ha sido desarrollada de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como autores del proyecto consideramos que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

Hugo C. Rangel Rodríguez

Nestor D. Pinedo Fortich

Cartagena de Indias D.T y C. Noviembre 7 del 2003

Señores:

Comité Evaluador

Departamento de Ingeniería Mecánica

Apreciados señores:

Por medio de la presente me permito informarles que la monografía titulada "SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE ABOLLADURAS GENERADAS POR CARGAS EXPLOSIVAS EN ESTRUCTURAS NAVALES UTILIZANDO ANSYS 5.5." ha sido desarrollada de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

_____

Ing. Jairo F. Useche Vivero

CONTENIDO

pag

INTRODUCCION 19

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 22

1.1 PRUEVA PRELIMINAR 23

1.2 GEOMETRIA DEL MODELO 24

1.3 CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE DEL MODELO DE LA ESTRUCTURA NAVAL 26

2. RESULTADOS Y DISCUSION 28

2.1 PRUEVA INICIAL 28

2.2 PRUEVA EN EL MODELO DE LA ESTRUCTURA 30

2.2.1 Desarrollo del evento con condiciones iniciales y de borde 1. 31

2.2.2 Desarrollo del evento con condiciones iniciales y de borde 2. 34

3. CONCLUSIONES 37

4. RECOMENDACIONES 39

BIBLIOGARAFIA 40

ANEXOS 42

LISTA DE FIGURAS

pág

Figura 1. Mallado lamina. 24

Figura 2. Geometría del modelo y zona del evento explosivo. 25

Figura 3. Desplazamientos verticales de la lámina. Vista isometrica. 29

Figura 4. Desplazamientos verticales de la lámina. Vista de canto. 29

Figura 5. Desplazamientos verticales de la lámina. Vista superior. 29

Figura 6. Deformaciones unitarias de la lámina. Vista superior. 29

Figura 7. Mallado de la estructura. 30

Figura 8. Deformaciones unitarias. Condición 1. 31

Figura 9. Detalle de figura 8. 31

Figura 10. Desplazamientos verticales. Condición 1. 32

Figura 11. Desplazamiento vertical contra tiempo. Condición 1. 33

Figura 12. Deformaciones unitarias. Condición 2. 34

Figura 13. Detalle de figura 12. 34

Figura 14. Desplazamientos verticales. Condición 2. 35

Figura 15. Desplazamiento vertical contra tiempo. Condición 2. 36

Figura 16. Elemento SHELL63. 43

Figura 17. Elemento SHELL63 (2). 44

Figura 18. Elemento BEAN4 3-D. 47

LISTA DE ANEXOS

pág

Anexo A. Elemento tipo SHELL63. 42

Anexo B. Elemento tipo BEAM4 3 – D. 46

Anexo C. Planos de la embarcación. 49

INTRODUCCIÓN

En las embarcaciones, las estructuras navales son comúnmente afectadas por explosiones, generadas por elementos inflamables, las cuales se manifiestan sobre la estructura de la embarcación por medio de procesos de deformación plástica o rotura, lo que podría producir la inhabilitación de estas.

Las abolladuras generadas por una explosión, producen una pérdida de la resistencia estructural en los componentes deformados. Esta resistencia estructural se encuentra relacionada con la magnitud de los esfuerzos y deformaciones residuales desarrolladas y con los posibles efectos visco-plásticos producidos por una carga explosiva.

En el país, actualmente no se cuenta con información sobre el comportamiento de estructuras sometidas a cargas explosivas, ni sobre la resistencia residual y confiabilidad de las estructuras abolladas. Lo cual produce que cada vez que se presenten estas situaciones la estructura sea reemplazada por completo, ya que

no existe un criterio que determine si está o no habilitada para la función para la que fue diseñada, lo que implica: costos imprevistos por reparación, retiro del servicio de la embarcación y alteración de la programación de trabajos en los astilleros comprometidos con el servicio de reparación.

Acercándonos a este estudio general, y puntualizando nuestra investigación, nuestro objetivo general es realizar un procedimiento para simular el proceso de formación de una abolladura generada por una carga explosiva en una estructura naval, mediante una formulación por elementos finitos utilizando ANSYS 5.5. Para esto determinaremos las características generales de una estructura naval específica (Geometría y propiedades del material), definiremos consideraciones para caracterizar la geometría de la estructura en ANSYS 5.5, identificaremos un procedimiento para simular una carga altamente dinámica sobre una estructura, y concluiremos con respecto al grado de aproximación obtenido en la simulación del evento a partir de los resultados obtenidos en una prueba preliminar.

El procedimiento y los resultados obtenidos en nuestra simulación serán un aporte útil para dicho estudio general.

Para el desarrollo de un modelo por elementos finitos que permita describir el comportamiento transiente de una estructura naval especifica, hecha de acero naval ASTM 131 – grado A, bajo una carga altamente dinámica, como lo es la

generada por una carga explosiva, se aplicarán procedimientos presentados por Useche en "*Respuesta dinámica no lineal de tuberías curvas bajo cargas explosivas mediante una formulación por elementos finitos* ".

RESUMEN

Esta investigación se centra en la realización de un procedimiento aplicable para evaluar teóricamente la magnitud y distribución de esfuerzos desarrollados por efectos de una carga explosiva en contacto con una estructura naval. El estudio se basa en la simulación computacional del proceso a través del modelamiento numérico por elementos finitos, utilizando el software ANSYS 5.5; en dicha simulación se monitorean variables que nos son imposibles de seguir experimentalmente.

El presente trabajo contiene una prueba preliminar (el evento explosivo sobre una placa empotrada en todos sus extremos) y dos pruebas siguientes sobre el modelo de la estructura en cuestión con condiciones de borde diferentes. La interacción estructura explosivo es modelada empleando una condición de velocidad inicial aplicada a puntos sobre el material directamente afectados por la onda de presión. Los efectos de amortiguamiento de la estructura no fueron tenidos en cuenta.

El modelo intenta predecir teóricamente la respuesta mecánica transiente, las deformaciones plásticas y la distribución de esfuerzos residuales. Puede ser empleado como una herramienta preliminar para el desarrollo de futuros modelos más ajustados para la estimación de la resistencia residual y la confiabilidad.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fenómeno se asume que inicia con un segmento pequeño del material explosivo cuya ignición genera un pulso de presión. El frente de la detonación interacciona con la estructura y una onda esférica de choque es trasmitida a éste. Posteriormente en el material se generan desplazamientos, rotaciones y deformaciones que generan la abolladura. El efecto de la presión generada por la detonación del material explosivo en contacto con la superficie de la estructura, es simulada por condiciones de velocidad inicial en los puntos localizados en esta área, (Morino, 1971). Cualquier otro punto sobre la estructura es considerado con velocidad inicial igual a cero. La distribución de la velocidad sobre esta área tiene la forma general:

$$V = V_{MAX}\sqrt{1-\frac{s^2}{a^2}-\frac{z^2}{b^2}}$$

donde *Vmax* representa la máxima velocidad en la distribución, a y b la máxima longitud de aplicación de carga en dirección circunferencial. Estas variables son consideradas independientes y permiten obtener diferentes tipos de geometrías

deformadas sobre la estructura. En nuestra simulación asumiremos a y b de igual valor obteniendo así una distribución esférica.

En la construcción del modelo se supone que el material es continuo durante el proceso de deformación e inicialmente se considera como isotrópico y homogéneo, pudiendo ser modelado empleando una curva esfuerzo deformación del tipo bi-lineal. El modelo no considera cambio en las propiedades mecánicas por temperatura como tampoco esfuerzos iniciales. Las propiedades mecánicas del material son: esfuerzo de fluencia máximo 34107,4 psi, modulo elástico $29x10^6$ psi, modulo de Poisson 0.29, densidad 0.282 lb/in^3, porcentaje de alargamiento 20%, esfuerzo ultimo 58263.34 psi, modulo tangencial 101000 psi.

1.1 PRUEBA PRELIMINAR

En esta prueba procederemos inicialmente a simular la abolladura en una placa plana rectangular de 0.1874 in de espesor, empotrada en todos sus extremos, y con las mismas propiedades mecánicas descritas a continuación para el modelo en cuestión. Este paso se efectúa con el propósito de comprobar si el procedimiento asumido para simular el evento es fiel a los resultados esperados.

La placa consta de 20 divisiones verticales y 18 horizontales como muestra la figura 1. Se han escogido elementos tipo lamina (Shell 63 Elastic 4 nodos).

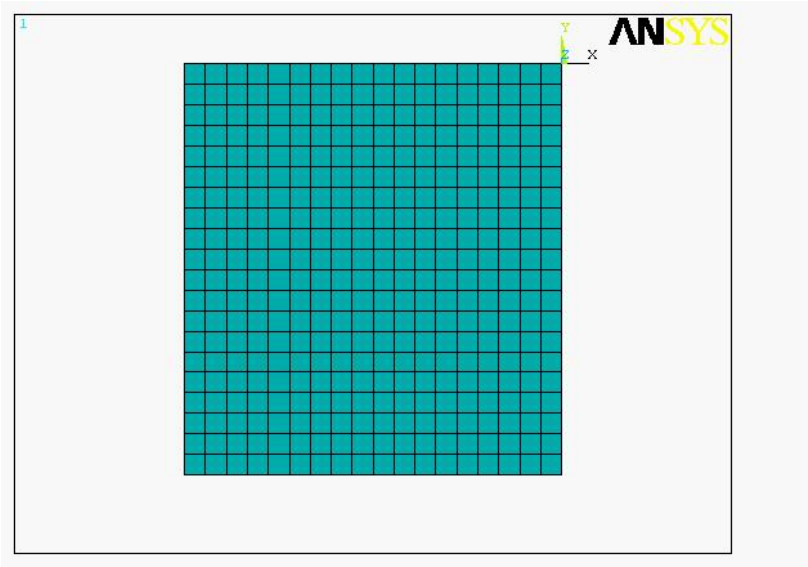

Figura 1. Mallado lamina.

1.2 GEOMETRÍA DEL MODELO:

Para el modelamiento de la geometría hemos hecho un corte transversal de la embarcación como muestra la figura 2, mostrando la zona de la estructura donde ocurrirá el evento. Se ha modelado solo la mitad de la sección escogida ya que es

simétrica a un eje longitudinal trazado en el centro de la embarcación lo que nos disminuiría el costo computacional.

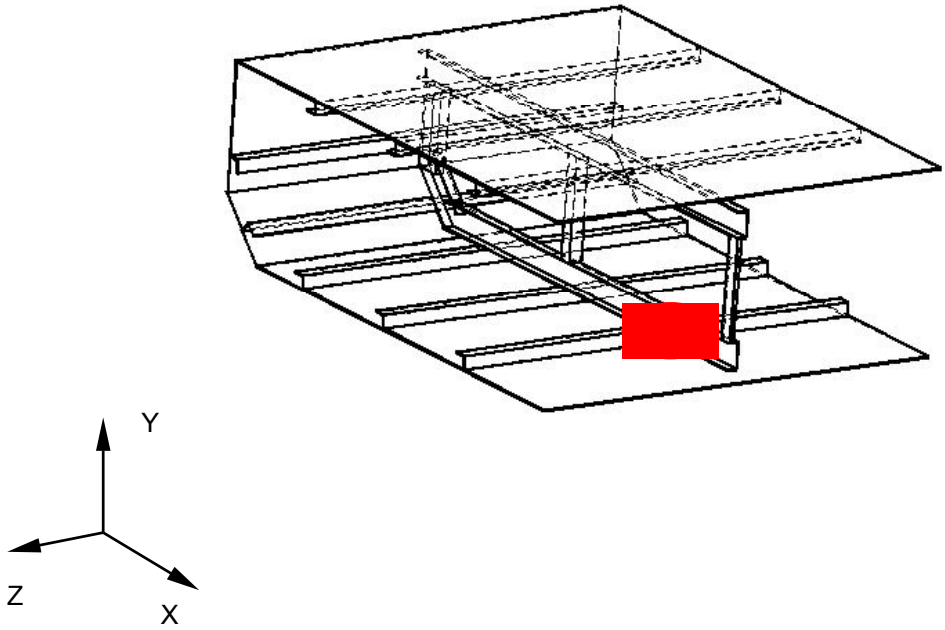

Figura 2. Geometría del modelo y zona del evento explosivo.

Las laminas que conforman los paneles tiene un espesor de 0.1874 in y serán enmalladas con elementos tipo lamina (Shell 63 Elastic 4 nodos). Estos elementos presentan doce grados de libertad por nodo: tres desplazamientos, tres ángulos de giro, tres velocidades lineales y tres aceleraciones en cada uno de los ejes, como se muestra en el *anexo A*. La vigas longitudinales y las columnas son ángulos 50.8x50.8x4.76mm y las vigas transversales son canales 101.6–8.04 Kg/m, y serán simuladas mediante líneas que serán enmalladas con elementos tipo viga

(3D Elastic Beam) y cuyas características y propiedades de sección transversal se encuentran en el *anexo B.*

El perímetro de la sección transversal se dividió en 53 partes, las líneas longitudinales en 20 partes y las columnas en 10 partes para un total de 1293 elementos.

La distancia entre las vigas transversales y las placas se asumen cero.

Los planos de la estructura de la embarcación se muestran en el *anexo C.*

1.3 CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE DEL MODELO DE LA ESTRUCTURA NAVAL

Para nuestro estudio hemos seleccionado dos condiciones iniciales y de borde :

- **Condición 1** :El modelo considera las líneas extremas que conforman el perímetro de la sección transversal de la estructura restringido en todos sus grados de libertad., siendo despreciable los desplazamientos en éstas. Las líneas longitudinales extremas del corte de la estructura se restringirán en los siguientes grados de libertad: desplazamiento en dirección *X* y rotación en los ejes Z y Y.

- **Condición 2** :El modelo considera las líneas extremas que conforman el perímetro de la sección transversal de la estructura restringido en todos sus grados de libertad, exceptuando los desplazamientos en las direcciones X y Y. Las líneas longitudinales extremas del corte de la estructura se restringirán en los siguientes grados de libertad: desplazamiento en dirección *X* y rotación en los ejes Z y Y.

La onda de presión generada por el explosivo que interactúa con la estructura es modelada a través de una condición inicial de velocidad en la dirección del “eje y” positivo . Dicha aproximación ha sido utilizada con bastante éxito por *Useche.*

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 PRUEBA INICIAL

El modelo de la lamina consta de 360 elementos y una condición inicial de velocidad igual a 500 in/s localizada en el centro de la placa. Fue corrido en un sistema COMPAQ con procesador Celeron de 1.7 GHz, 128 MB RAM y 40 GB, con un tiempo total de 55 minutos.

Las gráficas muestran el producto final del evento sobre la placa representadas en desplazamientos verticales (figuras 3, 4 y 5) y deformaciones unitarias totales (figura 6). Observamos que los desplazamientos verticales son máximos en la zona central, alrededor de 1.362 in, disminuyendo progresivamente en la dirección radial de la abolladura generada. Los desplazamientos negativos (color azul) son debido a las condiciones de borde de la lamina, es decir, al empotramiento de ésta en todos sus extremos. Al igual, las deformaciones unitarias máximas en la abolladura se hallan en su zona central, con valores dentro del rango de 1.65% y

2.04%. Las mayores deformaciones unitarias se presenta en los extremos debido a la concentración de esfuerzos, también provocadas por el empotramiento de la lámina.

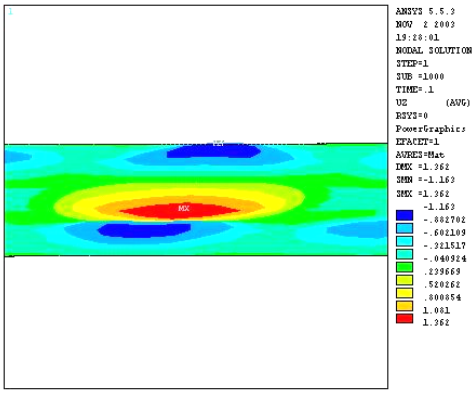

Figura 3. Despl. verticales
Vista isométrica.

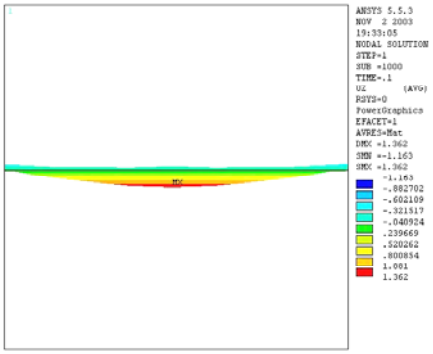

Figura 4. Despl. verticales
Vista de canto.

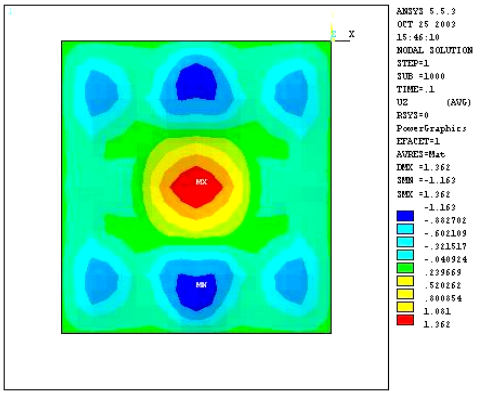

Figura 5. Despl. Verticales
Vista superior.

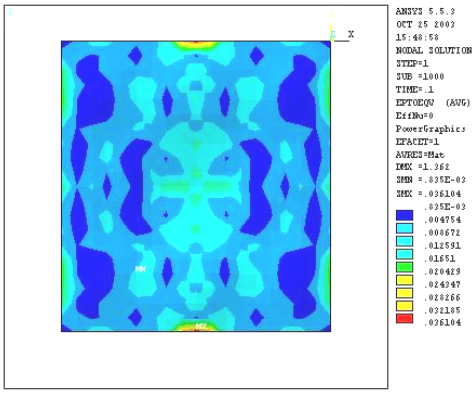

figura 6. Deform. Unitarias
Vista superior.

De aquí deducimos que la simulación de nuestro evento es lo suficientemente aproximada a los resultados esperados.

2.2 PRUEBA EN MODELO DE LA ESTRUCTURA NAVAL

El modelo de la estructura consta de 1293 elementos y una condición inicial de velocidad igual a 300 in/s. Fue corrido en un sistema COMPAQ con procesador Celeron de 1.7 GHz, 128 MB RAM y 40 GB, con un tiempo total de 150 minutos

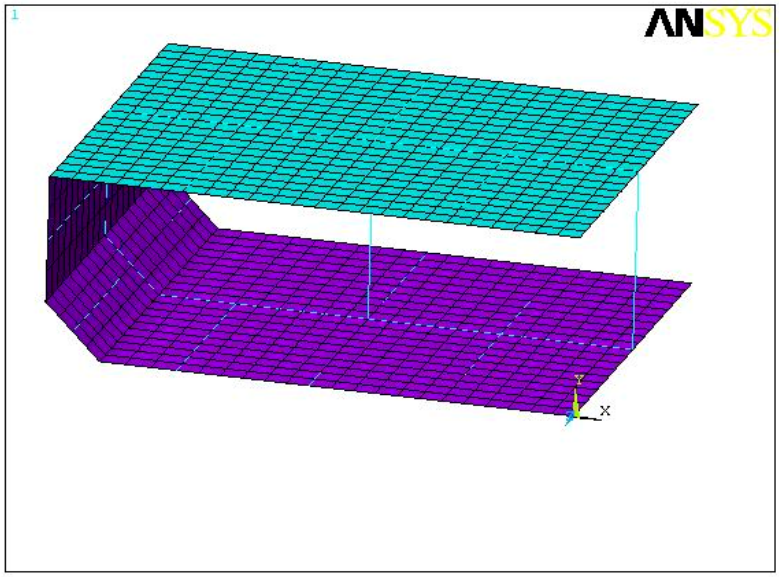

Fig. 7. Mallado de la estructura

2.2.1 DESARROLLO DEL EVENTO CON CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE 1.

La gráficas mostrada en las figuras 8 y 9 muestran el resultado final de la explosión, con una condición inicial de velocidad de 300in/s sobre la estructura,

representada por las deformaciones unitarias totales equivalentes que se presentaron. Observamos que la deformaciones unitarias máximas, del orden del 2.31% al 2.97% se localizaron en las zonas que se muestran en color rojo en la lámina inferior. lo cual nos aportaría una señal de que el material ubicado en esta región tenderá a fallar primero, más sin embargo habría que tener en cuanta que la deformación máxima unitaria del acero astm grado A es del orden del 20%, luego entonces bajo estas condiciones de carga y desde el punto de vista del limite de deformación unitaria permisible para dicho material no estaría en lo absoluto cerca de fallar.

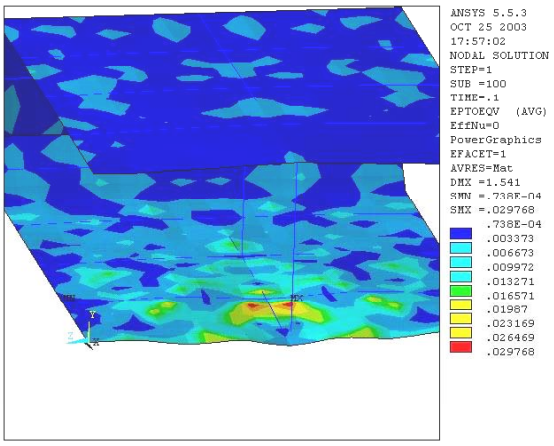

figura 8.deform. unitarias condición 1

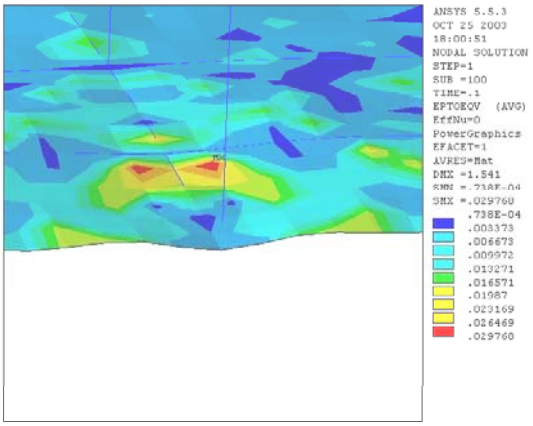

figura 9. detalle deform. unitarias condición 1

Los desplazamientos verticales en la zona donde se aplicaron las condiciones iniciales de velocidad resultaron negativos, con valores del orden de -0.159 in en la zona central, hasta convertirse en positivos en dirección radial con valores del orden de 0.116 in en el flanco externo, como se muestra en la figura 10.

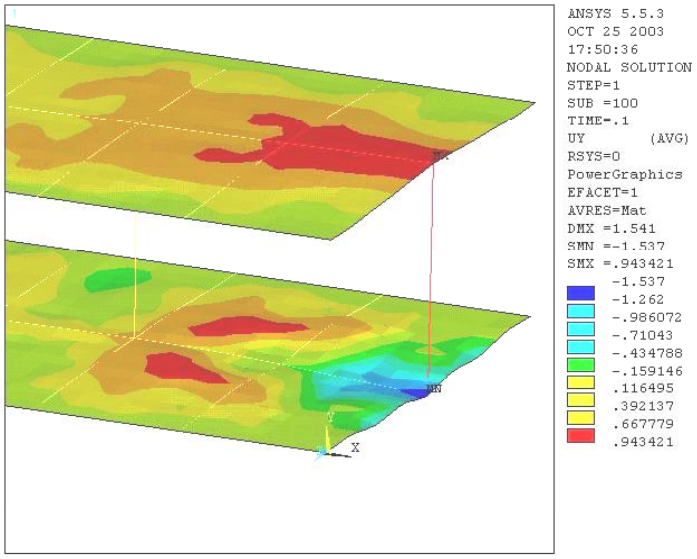

Figura 10. Desplazamientos verticales. Condición 1

Los esfuerzos de Von Mises máximos se localizaron en la misma zona de las deformaciones unitarias máximas y resultaron del orden de 663053 psi y teniendo en cuenta que esfuerzo ultimo a la rotura del acero astm GRADO A 131 es de 58263 psi el material ya ha fallado en esa zona.

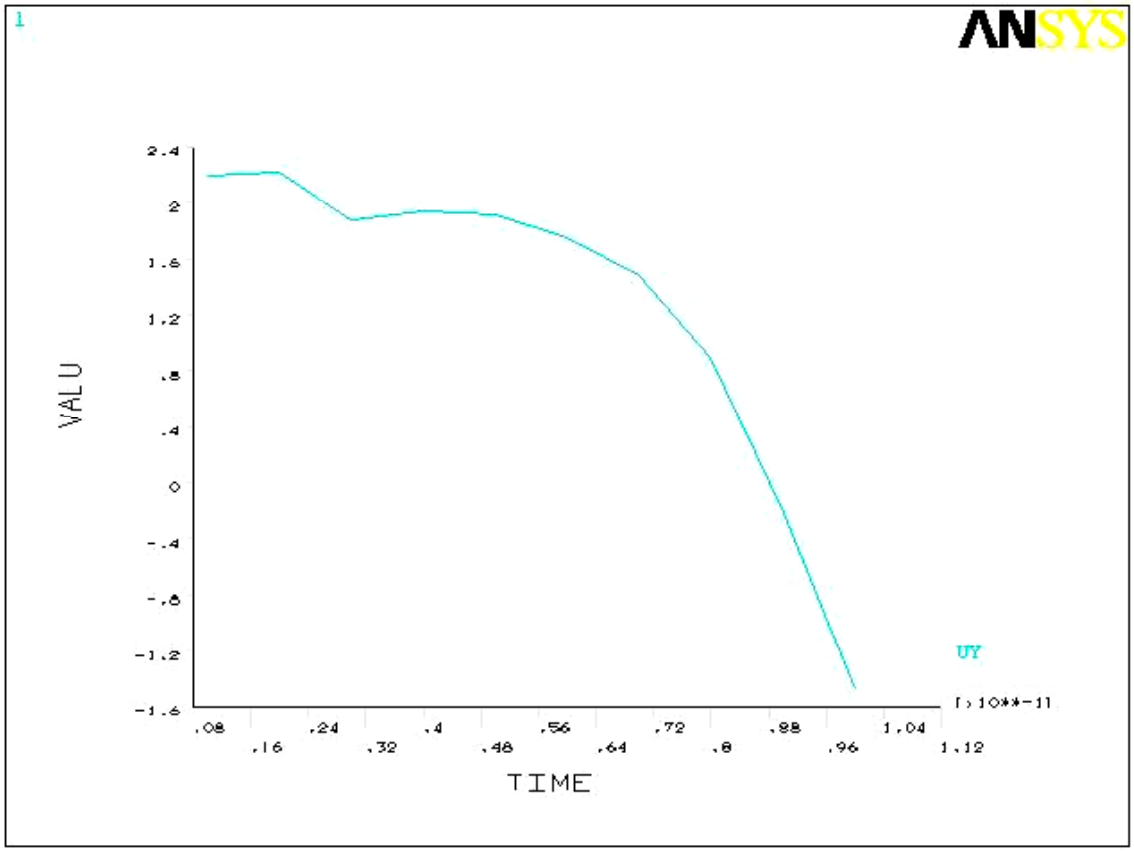

Figura 11. Curva desplazamiento contra tiempo. Condición 1.

La gráfica de la figura 11 nos muestra los desplazamientos verticales a través del tiempo en el centro de la zona donde ocurre el evento explosivo y donde se a colocado la condición inicial de velocidad máxima. Observamos que en un tiempo aproximado de 0.088 segundos el punto vuelve a su posición inicial para

posteriormente presentar un desplazamiento negativo hasta el final del evento; luego podríamos deducir que la estructura no se ha estabilizado.

2.2.2 Desarrollo del evento con condiciones iniciales y de borde 2.

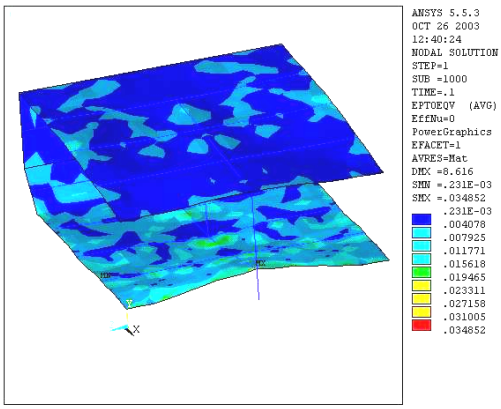

Figura 12. Deform. Unitarias. Condición 2.

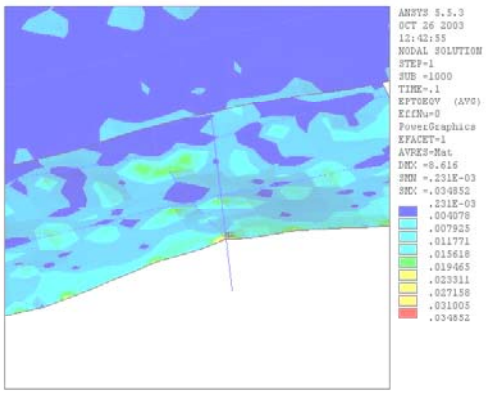

Figura 13. Detalle deform. Unitarias. Condición 2.

La gráfica mostradas en las figuras 12 y 13 muestran el resultado final de la explosión, con una condición inicial de velocidad de 300in/s sobre la estructura, representada por las deformaciones unitarias totales equivalentes que se presentaron. Observamos que la deformaciones unitarias máximas, del orden del 3.1% al 3.48% se localizaron en pequeñas zonas que se muestran en color rojo en la lámina inferior, lo cual nos aportaría una señal de que el material ubicado en esta región tenderá a fallar primero, luego entonces bajo estas condiciones de

carga y desde el punto de vista del límite de deformación unitaria no estaría en lo absoluto cerca de fallar.

Los desplazamientos verticales máximos resultaron con valores del orden de 8.59 in en la zona central del corte longitudinal. Los desplazamientos verticales en la zona donde se aplicaron las condiciones iniciales de velocidad resultaron positivos, como era de esperarse, con valores del orden de 3.6 in a 4.6 in, como se muestra en la figura 14.

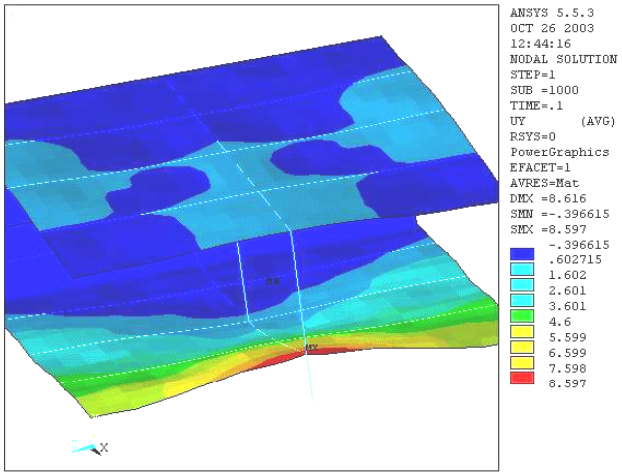

Figura 14. Desplazamientos verticales. Condición 2.

Los esfuerzos de Von Mises máximos que se localizados en la zona del evento explosivo varían en el rango comprendido entre 5157 psi y 90969 psi, y teniendo en cuenta que el esfuerzo ultimo a la rotura del acero astm GRADO A 131 es de 58263 psi, se deduce que el material ya ha fallado en esa zona.

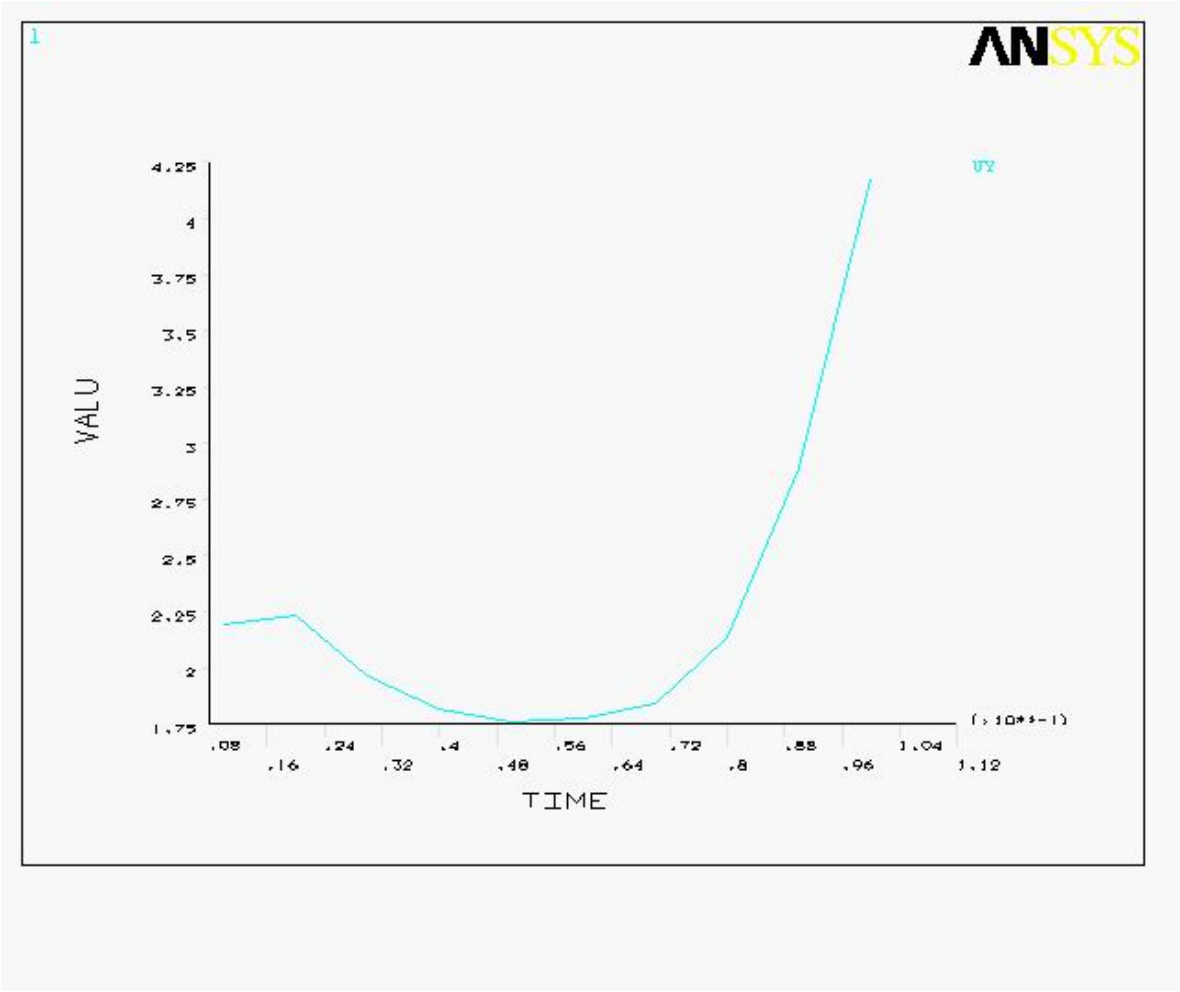

Figura 15. Curva desplazamiento contra tiempo. Condición 2.

La gráfica de la figura 15 nos muestra los desplazamientos verticales a través del tiempo en el centro de la zona donde ocurre el evento explosivo y donde se a colocado la condición inicial de velocidad máxima. Observamos que en un tiempo aproximado de 0.02 segundos hasta 0.052 segundos el punto describe un desplazamiento negativo, y posteriormente vuelve su desplazamiento a ser positivo; luego podríamos deducir que la estructura no se ha estabilizado aun.

3. CONCLUSIONES

Se ha presentado un proceso de modelación de una explosión sobre una estructura naval, y se ha planteado una metodología de solución por elementos finitos. dicho modelo puede ser aplicado igualmente al modelamiento del mismo evento en cualquier otra geometría.

La prueba preliminar valida el procedimiento realizado en la simulación de una abolladura generada por una carga altamente dinámica. Los resultados obtenidos en la distribución de los desplazamientos verticales concuerdan satisfactoriamente con los resultados esperados.

La corrida con condiciones iniciales 1 no muestra resultados muy satisfactorios ya que los desplazamientos verticales resultantes en la zona del evento explosivo fueron negativos, los esfuerzos de Von Mises muy elevados y las deformaciones unitarias muy pequeñas.

Al igual que la corrida con condiciones iniciales 1, la corrida con condiciones iniciales 2 no muestra resultados muy satisfactorios con respecto a los esfuerzos de Von Mises y las deformaciones unitarias, aunque los desplazamientos resultantes describen aparentemente un comportamiento más acorde a los resultados esperados.

Las curvas deformación contra tiempo, para ambas condiciones, nos muestra que el comportamiento de la estructura , en el lapso de tiempo analizado, no logra aun alcanzar un estado de equilibrio, es decir, la estructura posiblemente se encuentra oscilando.

Finalmente aunque el modelo no arrojó datos que permitieran predecir con respecto a las zonas propensas a fallar, ya que nuestra limitada capacidad de computo no permitió corridas con velocidades iniciales superiores, la formulación presentada y la estrategia de solución implementada permite obtener resultados suficientemente ajustados.

4. RECOMENDACIONES

Para modelamientos futuros se recomienda:

- Corridas con condiciones de velocidad inicial superiores.
- Utilizar un equipo de superior de cómputo.
- Emplear un malla más fina para la zona del evento explosivo.
- Modelar la geometría completa del casco de la embarcación en cuestión.

BIBLIOGRAFIA

BEER y JOHNSTON. Mecánica de materiales, 2 ed. Colombia: Mc Graw Hill, 1993. 738p.

CHANDRUPATLA, T. R., y A. D. Belegundu, Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería, 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 462p

SHIGLEY y MISCHKE. Diseño en ingeniería mecánica, 5 ed. México: Mc Graw Hill, 1999. 871p

USECHE, Jairo. Respuesta dinámica no lineal de tuberías curvas bajo cargas explosivas mediante una formulación por elementos finitos. En: ROSALES, M. B., V. H. Cortínez, y D. V. Bambill. Mecánica computacional Vol. XXII. Bahía Blanca, Argentina.

USECHE, Jairo, Implementación de un modelo por elementos finitos para evaluación de esfuerzos y deformaciones residuales en abolladuras producidas por cargas explosivas, tesis de maestría MIM - 2001 – 13, departamento de ingeniería mecánica, universidad de los andes, Bogotá, 2001.

GLOSARIO

ANSYS: herramienta computacional que nos permite realizar análisis de esfuerzos por medio del método del elemento finito.

COMPORTAMIENTO TRANSIENTE: también llamado transitorio, es la respuesta dinámica de una estructura bajo la acción de cualquier carga dependiente del tiempo.

DEFORMACION PLASTICA: deformación que se presenta cuando el valor del esfuerzo excede el limite elástico o limite de fluencia, y en la cual el material no retorna a su posición inicial.

DEFORMACIÓN UNITARIA: alargamiento producido por unidad de longitud original de una barra sometida a una carga de tensión.

ESFUERZO DE FLUENCIA: también conocido como esfuerzo cedente y es el esfuerzo correspondiente al punto de cedencia plástica.

ESFUERZO DE VON MISES: el esfuerzo de von mises se usa como un criterio para determinar la aparición de una falla en materiales dúctiles. El criterio de falla establece que el esfuerzo de von mises (σvm) debe ser menor que el esfuerzo de fluencia (σy) del material.

ESFUERZO ÚLTIMO: esfuerzo máximo que un material, sometido a una carga, puede soportar antes de fallar.

LEY DE HOOKE: ley que establece que, dentro de ciertos limites, el esfuerzo en un material es directamente proporcional a la deformación que lo produce. Los materiales que obedecen la ley de hooke son materiales elásticos.

MATERIAL HOMOGÉNEO: material que supone sus propiedades mecánicas independientes del punto estudiado.

MATERIAL ISOTRÓPICO: material cuyas propiedades son constantes en cualquier dirección.

METODO DEL ELEMENTO FINITO: método utilizado en la solución numérica de problemas de ingeniería.. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas

elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento (condiciones de borde). Un proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento aproximado del continuo.

MODULO DE ELASTICIDAD: constante que determina la relación existente entre el esfuerzo y la deformación de un material en su zona elástica como lo enuncia la ley de hooke.

MÓDULO DE POISSON: relación existente entre la deformación unitaria lateral (estrechamiento) y la deformación unitaria axial (alargamiento) cuando un cuerpo se somete a tensión.

MODULO TANGENCIAL: constante que determina la relación existente entre el esfuerzo y la deformación de un material en su zona plástica, asumiendo lineal dicha relación.

RESISTENCIA RESIDUAL: la resistencia residual de una pieza es la resistencia que queda después de una situación de carga determinada que ha causado cierta cantidad de “daño”.

ANEXOS

Anexo A. Elemento tipo SHELL63

Shell63 tiene seis grados de libertad en cada nodo: traslación en los nodos y direcciones x, y y z y rotación alrededor del los ejes x, y, y z. Incluye la capacidad para calcular esfuerzos de rigidez y deflexiones.

Datos de Entrada

La geometría, las localizaciones del nodo, y el sistema de ejes coordenados para este elemento se muestran en la figura 16. El elemento es definido por cuatro nodos, cuatro espesores, y las propiedades ortotrópicas del material.

se asume que el espesor variar suavemente sobre el área del elemento.

Las presiones se pueden incorporar como cargas superficiales en las caras del elemento según lo que se muestra en la figura 16. Las presiones positivas actúan en el elemento. Las presiones del eje se incorporan como fuerza por unidad de longitud.

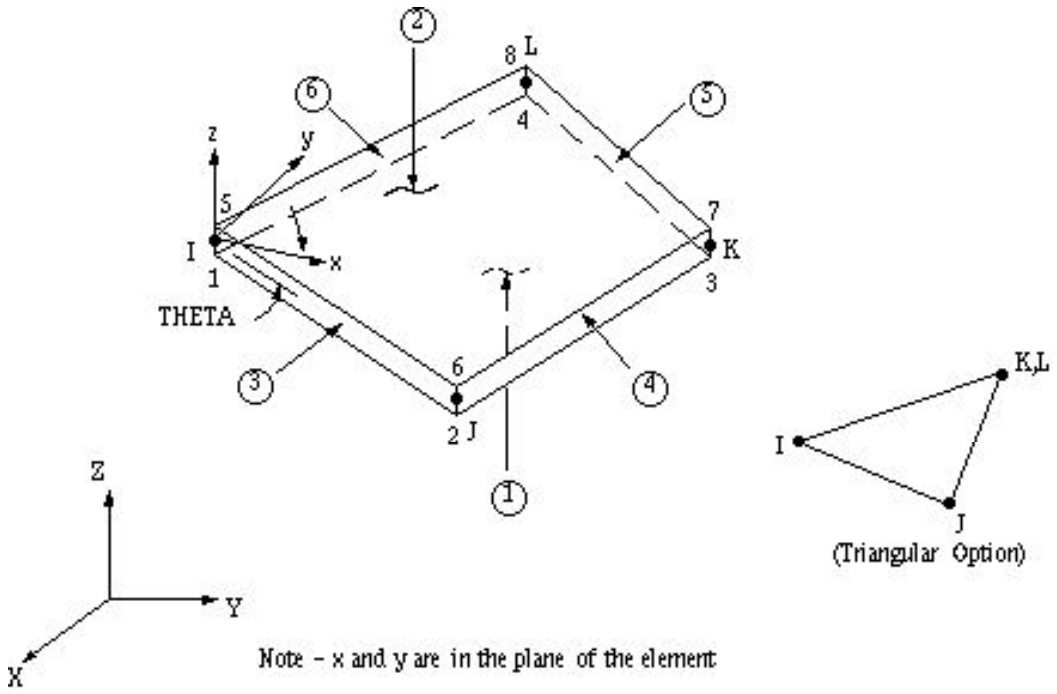

Figura 16. Elemento SHELL63

Varios artículos se ilustran en la figura 17. La figura incluye los momentos sobre la cara x (mx), los momentos sobre la cara y (my), y el momento de giro (mxy). Los momentos se calculan por unidad de longitud en el sistema del coordenada del elemento. Las direcciones de los esfuerzos del elemento son paralelas al sistema de coordenada del elemento.

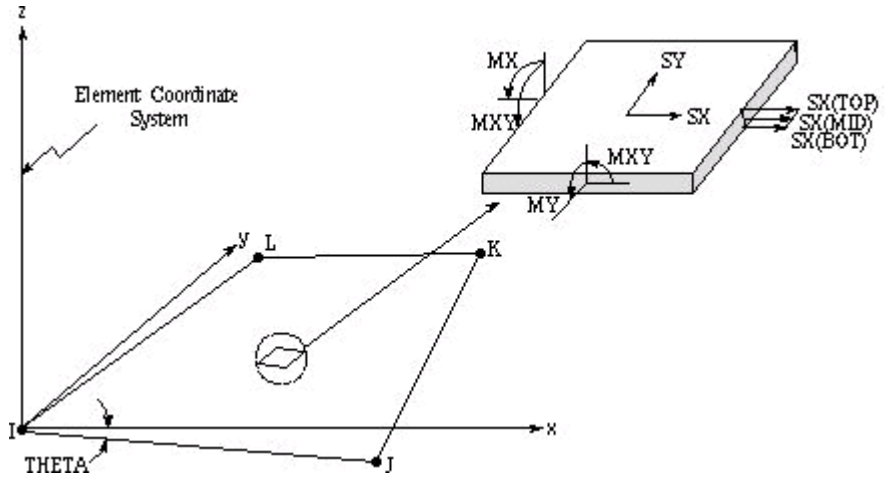

Figura 17. **Elemento SHELL63**

Suposiciones y restricciones

Los elementos de área cero no se permiten. Los elementos de espesor cero no se permiten. Un ensamblaje de los elementos planos de la cáscara puede producir una buena aproximación a una superficie curvada de la cáscara a condición de que cada elemento plano no se extienda mas allá de un arco de 15° grados. El esfuerzo de deflexión no se incluye en este elemento de cascara delgada. El elemento en el eje de las X puede rotar.

Los cuatro nodos que definen el elemento deben descansar en un mismo plano; sin embargo, se permite una tolerancia pequeña de modo que el elemento pueda tener una forma levemente combada. Un elemento moderadamente combado producirá un mensaje de alerta en el listado. Si el curvado es demasiado grande, aparecerá un mensaje de error y se debería utilizar un elemento triangular.

Anexo B. Elemento tipo BEAM4 3 – D

BEAM4 es un elemento uniaxial con tensión, compresión, torsión y capacidad de flexión. El elemento tiene seis grados de libertad en cada nodo: traslación en la dirección X, Y, y Z; y rotaciones al rededor de los ejes X, Y, y Z. Incluye gran capacidad de deflexión y esfuerzo de tensión.

Datos de entrada

La geometría, la localización de los nodos y el sistemas de ejes coordenados para este elemento se muestran en la figura 18. Este elemento esta definido por dos o tres nodos, el área de sección transversal, dos áreas de momento de inercia (IZZ e IYY), un ángulo de orientación (θ) sobre el eje X, el momento torsional de inercia (IXX), y las propiedades del material. Las propiedades no son un dato de entrada por “defecto”. Si IXX no se especifica o es igual a 0.0, se asume igual al momento polar de la inercia (IYY + IZZ); IXX debería ser positivo y es generalmente menor que el momento polar de inercia.

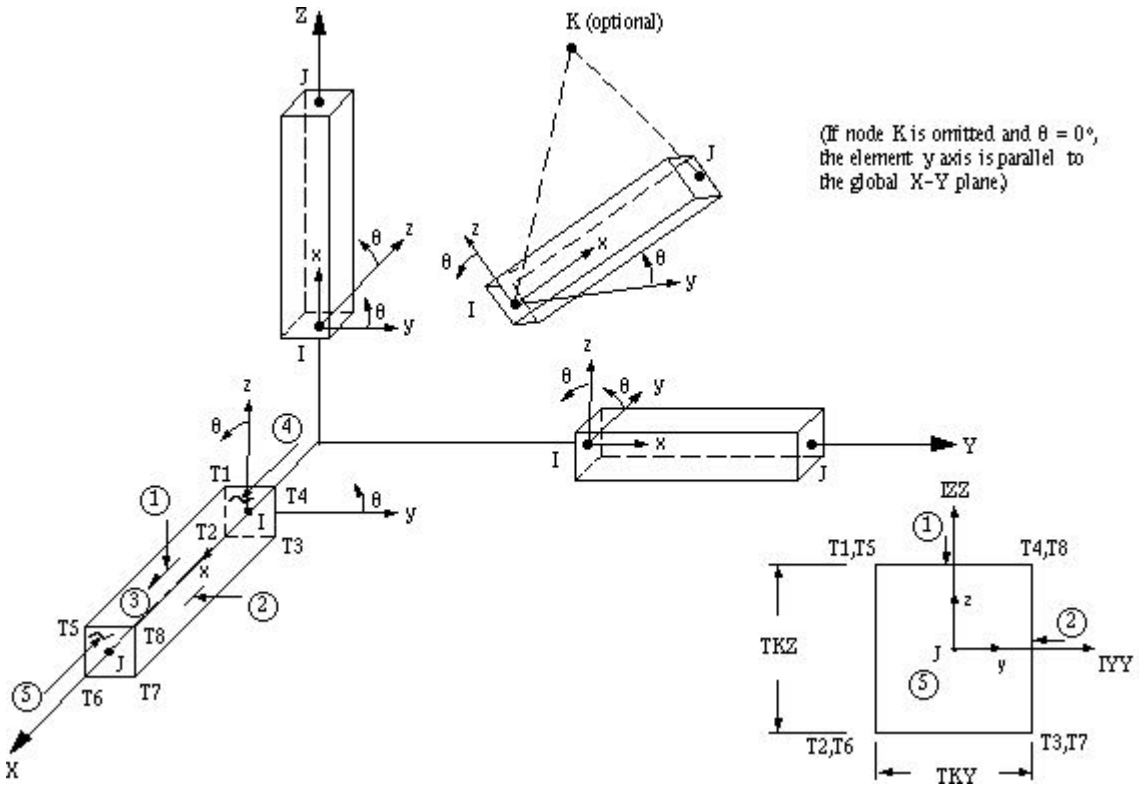

Figura 18. Elemento Beam4 3-D

Las presiones se pueden entrar como cargas superficiales en las caras del elemento según lo mostrado por los números circundados en la figura 18. Las presiones laterales se entran como fuerza por unidad de longitud. Las presiones finales se entran como fuerza.

Suposiciones y restricciones

La viga no debe tener un área o longitud cero. Los momentos de inercia, sin embargo, puede ser cero si no se usan deflexiones grandes. La viga puede tener cualquier forma de sección transversal para la cual puedan ser calculados los momentos de inercia. Las tensiones, sin embargo, se determinarán como si la distancia entre el eje neutral y la fibra extrema es la mitad del espesor correspondiente.