

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA
DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA
VICERRECTORADO**

**CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**



**ANÁLISIS NO LINEAL DE ESTRUCTURAS DE BARRAS
CON ELEMENTOS FINITOS**

TESIS DE INVESTIGACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PETER CONDE FLORES

Santa Cruz - Junio de 2014

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito previo para la obtención del Título de Magister en Ingeniería Estructural de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

Peter Conde Flores.

Santa Cruz, Junio de 2014

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más profundos agradecimientos

A Dios por darme la fuerza para alcanzar esta meta,

A mis padres por el apoyo que siempre me brindan,

A mi esposa por su constante comprensión, paciencia y apoyo,

A mis hermanos y amigos, siempre presentes con sugerencias y observaciones,

Y muy especialmente a la Universidad San Francisco Xavier, por su esfuerzo y

emprendimiento para la superación académica y profesional

de sus estudiantes de post-grado.

Peter Conde Flores

"*Scientia est Potentia*" ("el conocimiento es poder") [**Thomas Hobbes: *De Homine*, 1658**]

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
I.1.- Antecedentes.	2
I.2.- Situación problemática	5
I.3.- Formulación del problema de investigación.....	6
I.4.- Justificación.....	7
I.5.- Objeto de Estudio.....	8
I.6.- Campo de acción	9
I.7.- Formulación de la construcción teórica	10
I.8.- Objetivos general y específico.....	11
I.9.- Aporte Teórico.....	12
I.10.- Significación práctica.....	12
I.11.- Pertinencia Social.....	12
I.12.- Actualidad y novedad científica.	13
I.13.- Diseño metodológico.....	15
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL.....	18
1.1.- El contexto del estudio.	18
1.1.1.- La mecánica computacional.....	18
1.1.2.- La estática y la dinámica.....	20
1.1.3.- El análisis lineal y el análisis no-lineal.....	20
1.1.4.- Métodos de discretización.....	21
1.2.- Conceptos preliminares.....	22
1.2.1.- Rebote hacia adelante	24
1.2.2.- Rebote hacia atrás.....	24
1.2.3.- Colapso frágil.....	24

1.2.4.- Colapso dúctil	25
1.3.- Herramientas numéricas para trazar el Camino de Equilibrio.	25
1.3.1.- Control de Carga.	26
1.3.2.- Control de Longitud de Arco.	38
CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL.....	44
2.1.- Teoría general basada en la energía potencial elástica.....	44
2.2.- Identificación de puntos singulares.....	48
2.2.1.- El parámetro de rigidez actual.	48
2.2.2.- El pivote mínimo.	50
2.3.- Captura de puntos singulares.....	50
CAPÍTULO III: INTRODUCCIÓN A LA NO-LINEALIDAD GEOMÉTRICA CON UN ELEMENTO DE CERCHA	53
3.1.- Análisis de un elemento de cercha con un grado de libertad.....	53
3.2.- Análisis de un elemento de cercha con dos grados de libertad.	60
3.3.- Análisis de un elemento de cercha con n grados de libertad.....	64
CAPITULO IV: FUNCIONES DE MEDIDAS DE DEFORMACIÓN PARA GRANDES DESPLAZAMIENTOS Y GRANDES DEFORMACIONES	69
4.1.- Introducción.....	69
4.2.- Deformación Ingenieril.	71
4.3.- Deformación de Green.	73
4.4.- Deformación Logarítmica.	75
CAPÍTULO V: PROPUESTA DEL ESTUDIO	77
5.1.- Programa AMBAR.....	77
5.2.- Ejemplos desarrollados con AMBAR.....	79
5.2.1.- Cercha "baja" bidimensional de dos barras.....	79
5.2.2.- Cercha "alta" bidimensional de dos barras.....	85

5.2.3.- Domo tridimensional.	89
5.2.4.- Arco circular bidimensional.	91
5.2.5.- Torre tridimensional de tres patas con carga lateral.	94
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
Conclusiones del estudio.....	102
Recomendaciones generales.	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS.....	107
ANEXO I: Lista de variables utilizadas en AMBAR.	107
ANEXO II: Listado de instrucciones de Programación de AMBAR.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I. 1. Izquierda: Ejemplo de estudio de impacto de un avión militar, necesita de un marcado comportamiento no lineal geométrico y físico [1]. Derecha: Ejemplo de modelo de un disco artificial para implante intervertebral de espina analizado con comportamiento no lineal del material del disco y su entorno de vértebras (hueso), cartílagos, ligamentos y músculos [2].....	3
Figura I. 2. Problema físico: Fundación con carga excéntrica. a) geometría, materiales, cargas. b) Discretización en un modelo de elementos finitos. c) Análisis e interpretación de resultados en modelo con grandes deformaciones plásticas del suelo [3].	4
Figura I. 3. Estructura de barras: celosía espacial [F.P.: Fuente propia]	5
Figura I. 4. Estructura de barras esquelética espacial. Izq.: domo, vista exterior, Der.: interior [F.P.].....	6
Figura I. 5. Respuesta global. Comportamiento lineal y comportamiento No-lineal [4].	7

Figura I. 6. Hospital Olive View después del terremoto de San Fernando de 1971, en California. Centro: columna con comportamiento dúctil. Derecha: columna con comportamiento frágil [4].....	8
Figura I. 7. Ejemplo de celosía espacial ó estructura estereométrica [F.P.]	9
Figura I. 8. Ejemplo de estructura aporticada con diagonales de arriostramiento [F.P.]	9
Figura I. 9. Torres colapsadas por viento. Izq.: de transmisión. Der.: de telecomunicaciones [5]	13
Figura I. 10. Pandeo de una botella plástica. Los lados colapsan por presión interna negativa [6]	13
Figura I. 11. Izquierda: estudio del colapso de una columna circular hueca [6]. Derecha: innovador diseño de un soporte esbelto para una pasarela peatonal [7].....	14
Figura 1. 1. Camino de Equilibrio y Ley Constitutiva en Análisis Estático Lineal	22
Figura 1. 2. Camino de Equilibrio y Ley Constitutiva en Análisis No-Lineal Geométrico	23
Figura 1. 3. Camino de Equilibrio y Ley Constitutiva en Análisis No-Lineal Material.....	23
Figura 1. 4. Camino de Eq. y Ley Constitutiva en Análisis No-Lineal Geométrico y Material.	24
Figura 1. 5. Algunos tipos de comportamiento Carga-Desplazamiento o Caminos de Equilibrio.....	25
Figura 1. 6. Procedimiento Incremental-Iterativo para trazar el Camino de Equilibrio.....	26
Figura 1. 7. Falla en la Convergencia de los Métodos de Control de Carga	27
Figura 1. 8. Salto en el trazado en los Métodos de Control de Carga	28
Figura 1. 9. Obtención del predictor incremental.....	29
Figura 1. 10. Corrección iterativa Newton-Raphson.....	31
Figura 1. 11. Predictor incremental de la Línea de Búsqueda.	33
Figura 1. 12. Longitud de Paso para la Línea de Búsqueda.....	34
Figura 1. 13. Energía versus Longitud de Paso para Línea de Búsqueda.....	36
Figura 1. 14. Línea de Búsqueda por Interpolación para la Longitud de Paso.....	37
Figura 1. 15. Trazado del Camino de Equilibrio en el Método de Control de Longitud de Arco	39
Figura 1. 16. Desarrollo del Método de Control de Longitud de Arco	42
Figura 2. 1. Puntos Límite en el Camino de Equilibrio.....	46
Figura 2. 2. Punto de Bifurcación en el Camino de Equilibrio.....	46

Figura 2. 3. Respuesta del parámetro de rigidez actual C_s y el pivote mínimo D_{min} en puntos límite y bifurcación. (a) Punto límite. (b) Punto de bifurcación [10].	49
Figura 2. 4. Procedimiento de captura: puntos de captura [10].	51
Figura 2. 5. (a) Obtención del parámetro de control. (a) Bisección, (b) Interpolación [10].	51
Figura 3. 1. Elemento de cercha con un solo grado de libertad, sin carga.	53
Figura 3. 2. Elemento de cercha con carga vertical.	54
Figura 3. 3. Interpretación física de la ecuación (3.5): inicio sin carga.	55
Figura 3. 4. Interpretación física de la ecuación (3.5): compresión máxima en la barra.	56
Figura 3. 5. Interpretación física de la ecuación (3.5): falla por compresión en la barra.	56
Figura 3. 6. Interp. de la ecuación (3.5): reacomodo geométrico y nuevo estado de equilibrio.	57
Figura 3. 7. Matriz de Rigidez y Matriz de Rigidez Tangente.	58
Figura 3. 8. Valores tabulados de desplazamiento, carga, fuerza normal, y rigidez.	59
Figura 3. 9. Variantes de diseño para el elemento de un grado de libertad.	60
Figura 3. 10. Elemento de cercha con dos grados de libertad.	61
Figura 3. 11. Elemento de cercha en sistema local y global.	64
Figura 4. 1. Elemento de cercha	69
Figura 4. 2. Elemento de cercha: geometría y coordenada adimensional [9]	70
Figura 5. 1. Diagrama de flujo para el programa principal AMBAR.	79
Figura 5. 2. Dimensiones para el ejemplo de cercha baja bidimensional.	80
Figura 5. 3. Vista de la pantalla principal para el ejemplo de cercha baja bidimensional.	80
Figura 5. 4. Pantalla de introducción de datos del ejemplo 5.2.1.	81
Figura 5. 5. Mensaje de error indicando la salida obligada del programa.	82
Figura 5. 6. Mensaje indicando que ya no se puede reducir más el paso de incremento de carga.	82
Figura 5. 7. Camino de equilibrio del ejemplo 5.2.1 bajo control de carga con incrementos automáticos. Vertical: factor de carga; Horizontal: Desplazamiento vertical del nudo central cargado.	83
Figura 5. 8. Estructura original y deformada del problema 5.2.1.	84
Figura 5. 9. Mensaje comunicando que se ha cambiado al método de longitud de arco.	84

Figura 5. 10. Camino de equilibrio del ejemplo 5.2.1 desde el inicio con el método de longitud de arco. Vertical: factor de carga; Horizontal: desplazamiento vertical de nudo central cargado.....	85
Figura 5. 11. Dimensiones y cargas para el ejemplo 5.2.2.	86
Figura 5. 12. Datos para el ejemplo 5.2.2.	87
Figura 5. 13. Camino de equilibrio para el desplazamiento horizontal en el ejemplo 5.2.2. ...	88
Figura 5. 14. Camino de equilibrio para el desplazamiento vertical en el ejemplo 5.2.2.	88
Figura 5. 15. Datos para el domo del ejemplo 5.2.3.	89
Figura 5. 16. Vista de la pantalla principal para el ejemplo 5.2.3.	90
Figura 5. 17. Camino fundamental y ramificaciones para el ejemplo 5.2.3.	91
Figura 5. 18. Datos para ejemplo 5.2.4.	91
Figura 5. 19. Camino de equilibrio para el ejemplo 5.2.4.....	92
Figura 5. 20. Estructura deformada en puntos específicos del camino de equilibrio del ejemplo 5.2.4.	93
Figura 5. 21. Vista de la pantalla principal de AMBAR con el ejemplo de la torre tridimensional.....	95
Figura 5. 22. Configuraciones deformadas de la torre del ejemplo 5.2.5.	95
Figura 5. 23. Desplazamiento horizontal en "y" de un nudo superior de la torre del ejemplo 5.2.5.	96
Figura 5. 24. Desplazamiento vertical de un nudo superior de la torre del ejemplo 5.2.5.	96
Figura 6. 1. Comparación entre AMBAR y ANSYS para control de carga, del ejemplo 5.2.1.	98
Figura 6. 2. Comparación entre AMBAR y ANSYS para control de longitud de arco, del ejemplo 5.2.1.	98
Figura 6. 3. Comparación entre AMBAR y ANSYS, longitud de arco, Despl. horizontal, del ejemplo 5.2.2.	99
Figura 6. 4. Comparación entre AMBAR y ANSYS, longitud de arco, Despl. vertical, del ejemplo 5.2.2.	99
Figura 6. 5. Configuraciones de prueba. Izquierda, inicial u opción 1. Derecha, opción 2. ...	100
Figura 6. 6. Análisis de la opción 2 para la torre del ejemplo 5.2.5. Izq.: figura deformada en el nivel de carga de fallo (punto límite). Der.: deformada final.	101

RESUMEN

El presente estudio aborda el análisis de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en estructuras de barras articuladas con un modelo matemático que lleva en cuenta la no-linealidad geométrica, es decir grandes desplazamientos y grandes deformaciones, con un comportamiento de material elástico. Inicialmente se presentan algunos métodos numéricos de solución de sistemas no-lineales como el procedimiento incremental, el procedimiento iterativo Newton Raphson completo, Newton Raphson modificado, las líneas de búsqueda, y el control de longitud de arco. Se ingresa en el estudio de la estabilidad estructural y se aborda el concepto de los puntos singulares (puntos límite y puntos de bifurcación). Seguidamente se presenta una teoría simplificada de cercha con pequeña inclinación respecto a la horizontal (teoría de cercha baja) con la finalidad de exponer conceptualmente la formación de la rigidez lineal del sistema, más la rigidez debida a los desplazamientos, más la rigidez debida a la estabilidad del sistema (pandeo). Continuando a esto, se presentan algunas medidas de deformación que han sido desarrolladas especialmente para el manejo de grandes desplazamientos y deformaciones, se tiene a saber la medida de deformación ingenieril, la deformación de Green, y la deformación logarítmica. Con estas nuevas herramientas de medidas de deformaciones se conduce hacia el desarrollo de las formulaciones de elementos finitos para elementos de cercha generales. Se presenta en el final una propuesta de programa de computadora que incluye todas estas herramientas numéricas mostrando sus características con algunos ejemplos.

INTRODUCCIÓN

En el campo del diseño general de estructuras resistentes a cargas de cualquier tipo, la práctica común en la actualidad sigue generalmente cuatro pasos cronológicamente ordenados, aunque retroalimentables, que son: La definición de las formas, el análisis estructural, el diseño de los elementos resistentes (según recomendaciones normalizadas), y finalmente la construcción o fabricación.

En el primer paso, debe considerarse la selección de una forma geométrica que sea funcional, segura, estética y económica. A veces se necesita de varios estudios independientes de diferentes tipos de soluciones antes de decidir cuál es la forma más apropiada. Una vez tomada esta decisión, se debe especificar las cargas que actuarán, los materiales de los componentes, la disposición de los miembros y sus dimensiones de conjunto.

Luego, como segundo paso (análisis estructural), se debe analizar el comportamiento tensional y de estabilidad de la estructura, para esto deben hacerse ciertas idealizaciones o simplificaciones sobre como están soportados y conectados los miembros entre sí, y sobre el modo en el que se comportan los materiales involucrados. Una vez que se ha definido esto y se tienen especificadas las cargas estimadas que actuarán, se procede a encontrar los desplazamientos de los miembros, sus deformaciones, y sus tensiones siguiendo los procedimientos de la mecánica estructural.

El siguiente paso es el diseño de cada uno de los miembros, que consiste en determinar su tamaño o dimensiones de manera de satisfacer los criterios de resistencia, estabilidad, y serviciabilidad que se encuentren asentados en las normas y códigos de diseño y construcción en vigencia.

Finalmente, el último paso requiere ordenar los diversos componentes de la estructura y planear las actividades que implica el montaje real de esta. Es muy importante resaltar que todas las fases de la construcción deben inspeccionarse para garantizar que la estructura esté siendo construida de acuerdo con los planos de diseño especificados.

I.1.- Antecedentes.

En el mundo real la mayoría de los fenómenos que capturan el interés de las ciencias son en realidad fenómenos muy complejos, tanto que, para su entendimiento y manejo práctico ha sido necesario someterlos a simplificaciones matemáticas convencionales por parte de los investigadores especializados de cada rama específica. De este modo, en la mecánica estructural, se manejan dos conceptos generales de tipos de análisis: el análisis lineal, y el análisis no lineal.

El análisis lineal básicamente considera que un cuerpo sometido a la acción de cargas externas sufre desplazamientos y deformaciones muy pequeñas hasta alcanzar su estado de equilibrio, siendo posible, sin incurrir en un gran error, analizarlo bajo la misma configuración geométrica inicial, es decir la que tenía antes de la aplicación de las cargas. Además se considera que para tan pequeñas variaciones geométricas el material se comporta elásticamente lineal, lo que significa que hay proporcionalidad entre las tensiones y deformaciones en el interior del cuerpo. Se considera también que las zonas de la estructura restringidas al movimiento denominadas “apoyos”, mantienen un comportamiento de tipo constante, lo que implica que no cambian durante la aplicación de las cargas.

Avanzando más en la complejidad del fenómeno, al alcanzarse desplazamientos grandes en el proceso de cargado, deformaciones grandes en los componentes de la estructura, o una relación desproporcionada entre tensiones y deformaciones, entonces se asume que el problema ha ingresado en el campo de comportamiento de NO-LINEALIDAD, y se debe estudiar la estructura bajo el enfoque del análisis no-lineal.

Desde hace algunos años, el análisis de tipo no-lineal ha sido de especial interés para las comunidades científicas en los países desarrollados que estudian mejoras en el aprovechamiento de las formas y de los materiales para diversas aplicaciones sobre todo en los campos civil, militar, industrial, aeroespacial, e inclusive el campo de la medicina con la investigación bio-mecánica, con aportes directos en avances tecnológicos.

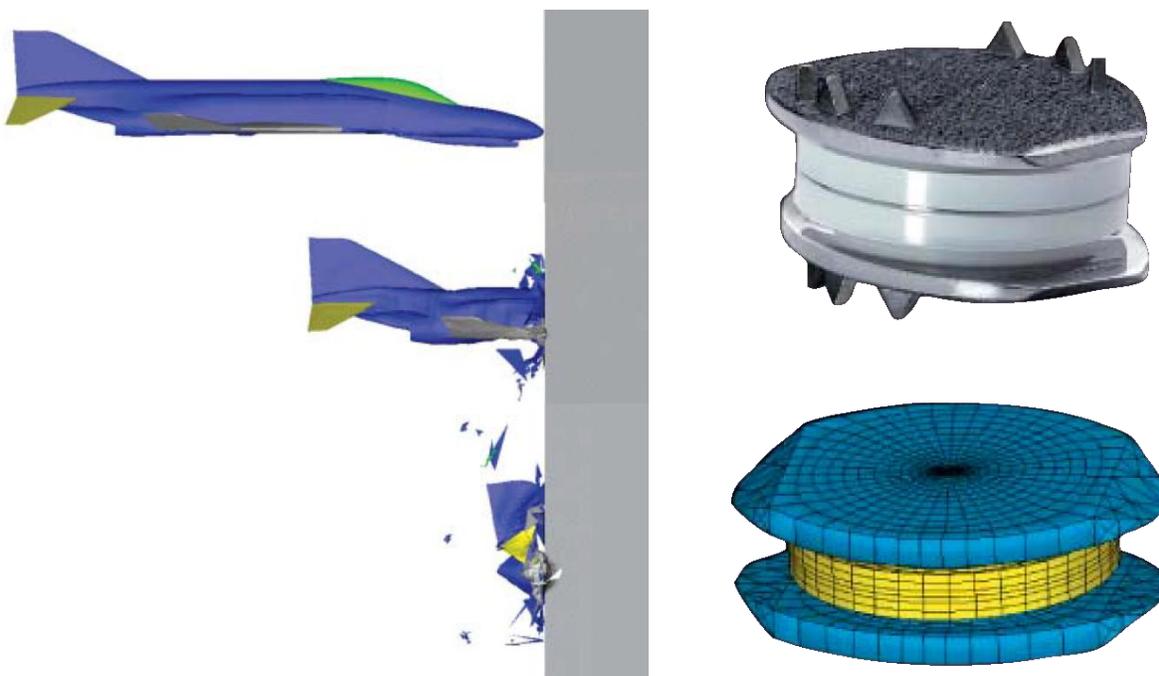


Figura I. 1. Izquierda: Ejemplo de estudio de impacto de un avión militar, necesita de un marcado comportamiento no lineal geométrico y físico [1]. Derecha: Ejemplo de modelo de un disco artificial para implante intervertebral de espina analizado con comportamiento no lineal del material del disco y su entorno de vértebras (hueso), cartílagos, ligamentos y músculos [2].

En nuestro medio, sin embargo, el estudio y la comprensión detallada y profunda del comportamiento no-lineal de la geometría y de los materiales se ha mantenido con un interés marcadamente modesto, probablemente por la alta complejidad de los conceptos y métodos matemáticos que se requiere en conjunto con algunas bases teóricas de mecánica estructural que son muy poco profundizadas a nivel de pre-grado, esto se debe a que el análisis no-lineal de estructuras no es un método relativamente práctico de aplicación, e inclusive no es necesario aplicarlo rigurosamente durante el ejercicio profesional más o menos normal del ingeniero de estructuras estándar. Sin embargo, si se pretende generar estructuras innovadoras, de alta tecnología, óptimas y seguras, se torna imprescindible avanzar más allá de los conceptos básicos hacia métodos, conceptos, e investigaciones más actuales en el entorno científico.

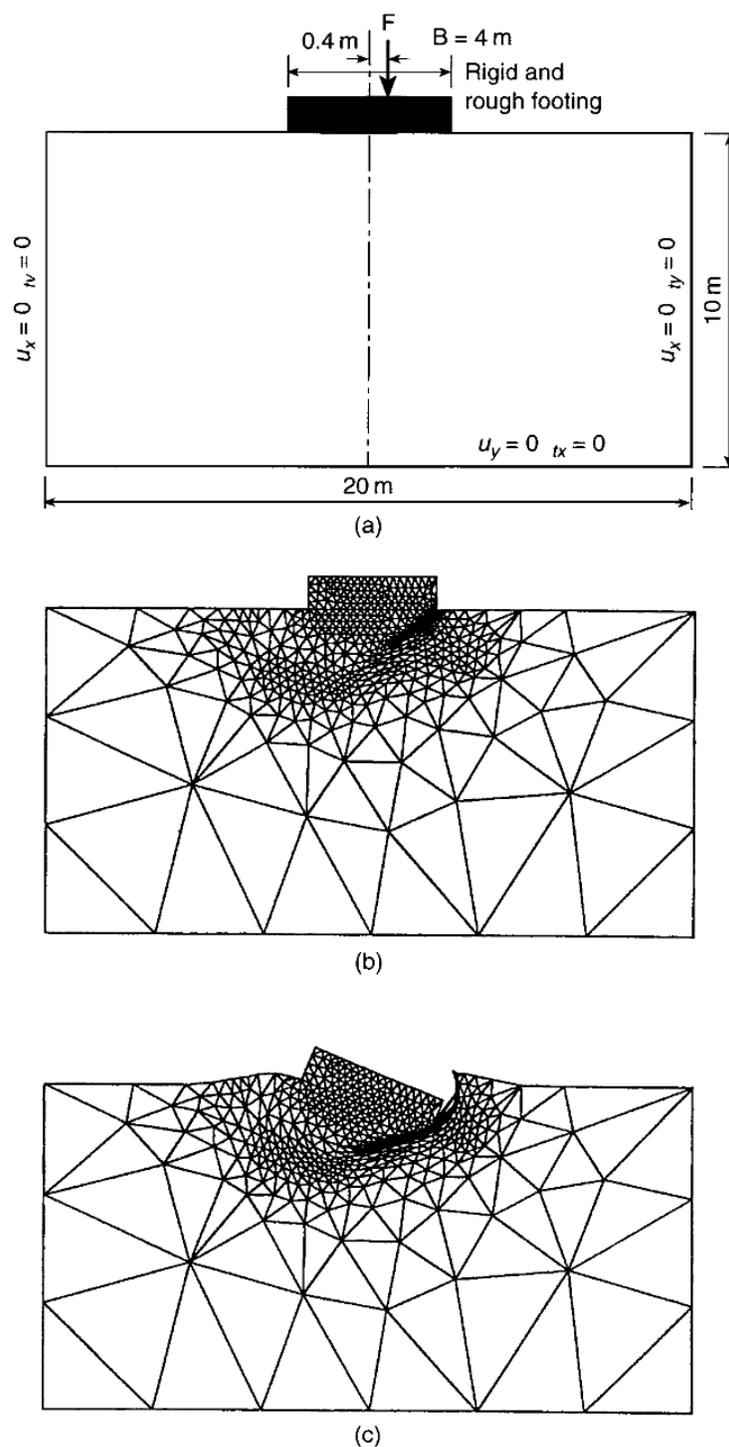


Figura I. 2. Problema físico: Fundación con carga excéntrica. a) geometría, materiales, cargas. b) Discretización en un modelo de elementos finitos. c) Análisis e interpretación de resultados en modelo con grandes deformaciones plásticas del suelo [3].

I.2.- Situación problemática.

En el caso de que las estructuras proyectadas vayan a estar sometidas a cargas muy severas pero que tienen una baja probabilidad de ocurrir, como por ejemplo sismos severos o tormentas extraordinarias de viento, la incorporación de estas cargas muy grandes en un análisis y diseño estándar conduciría como resultado hacia estructuras muy caras y sobredimensionadas respecto a su uso normal.

En el caso de estructuras existentes que no hayan tomado en consideración durante su diseño la ocurrencia de fenómenos de cargas extraordinarias, surge la incertidumbre acerca de su seguridad estructural frente a nuevas amenazas de cargas superiores provenientes principalmente de la naturaleza.

La posibilidad de analizar estructuras en general, varía sustancialmente según varíe su modo de comportamiento, es decir, su modelo matemático de comportamiento, lo que hace que la diversidad del análisis sea tan extensa como modelos matemáticos se puedan plantear. Además de existir una gran variedad de modelos para describir configuraciones estructurales geométricas, existe también una gran variedad de modelos para describir comportamientos físicos como tensiones y deformaciones. Como una vía de iniciación hacia el análisis profundo de estructuras se presenta el modelo matemático de barras, considerando como material constitutivo al acero. El modelo de barras es ampliamente aplicado a configuraciones estructurales en nuestro medio.

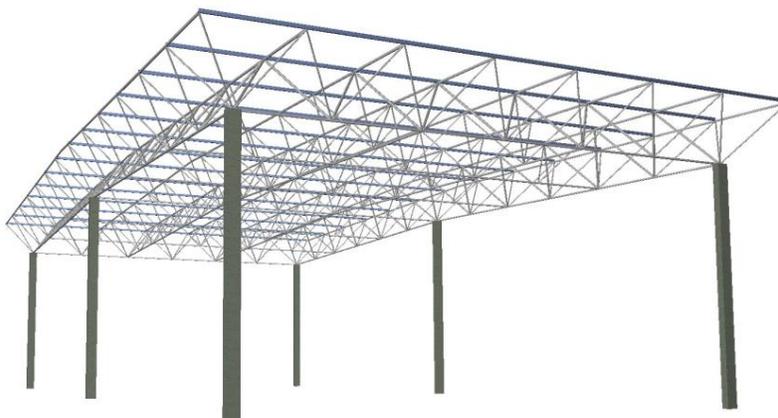


Figura I. 3. Estructura de barras: celosía espacial [F.P.: Fuente propia]



Figura I. 4. Estructura de barras esquelética espacial. Izq.: domo, vista exterior, Der.: interior [F.P.]

Identificación del Problema de Investigación

El hecho de incorporar grandes desplazamientos, deformaciones, y distorsiones, además de la posibilidad de aprovechar el rango plástico del material acero en el análisis, permite conocer con mayor profundidad el comportamiento de las estructuras de barras hasta llegar a simular el modo de colapso, teniendo así la información necesaria para tomar las previsiones respectivas. Este tipo de análisis es el que se denomina ANÁLISIS NO-LINEAL.

El punto de interés general se centra en observar el comportamiento que sigue una estructura de barras cargándola paulatinamente hasta valores extraordinarios y obtener su colapso final, identificando las opciones que se puedan tener para optimizar el material de los miembros y a la vez mantener un grado de seguridad preestablecido ante el colapso.

I.3.- Formulación del problema de investigación.

Considerando todo lo anteriormente expuesto es que se plantea la siguiente interrogante como formulación del problema de la presente investigación:

¿Cómo mostrar que el análisis no-lineal geométrico de estructuras de barras sometidas a cargas extraordinarias permite mejorar el aprovechamiento de las formas y del material acero manteniendo un grado de seguridad preestablecido?

I.4.- Justificación.

La Ingeniería Estructural busca, en esencia, el óptimo comportamiento de las estructuras, esto significa obtener el mayor aprovechamiento de las formas estructurales y de las propiedades de los materiales manteniendo siempre como principal prioridad la seguridad de la vida humana. De esta manera el presente estudio nace a causa de dos motivaciones que son: La optimización estructural, y la profundización en el estudio de los mecanismos de falla en estructuras para innovaciones de diseño.

Optimización estructural.

El hecho de manejar el análisis estructural ingresando en el comportamiento no lineal geométrico para el caso de solicitaciones extraordinarias permite obtener estructuras más baratas que con el diseño bajo comportamiento lineal. Esto implica que al someter a una estructura a esfuerzos límites se pueda aproximar con bastante precisión el daño que sufre y evaluar el grado de seguridad que ofrece.

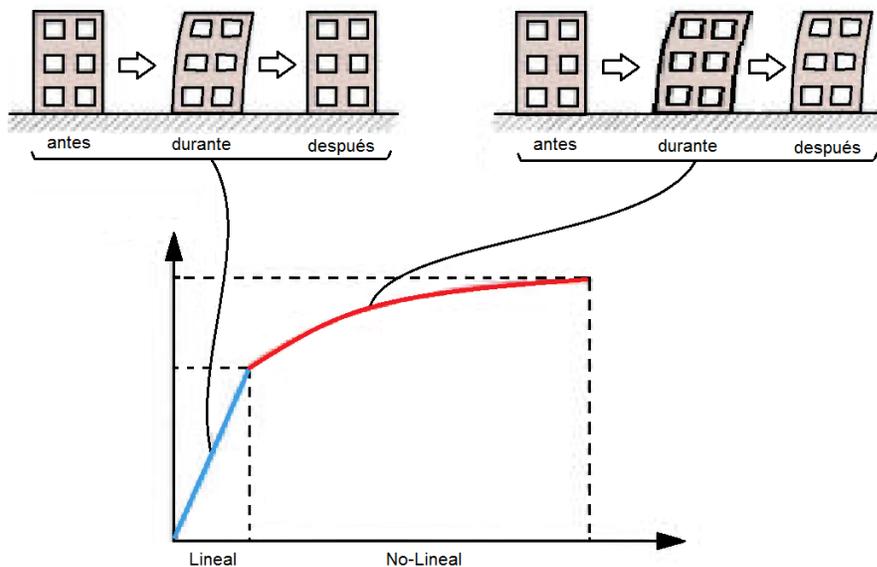


Figura I. 5. Respuesta global. Comportamiento lineal y comportamiento No-lineal [4].

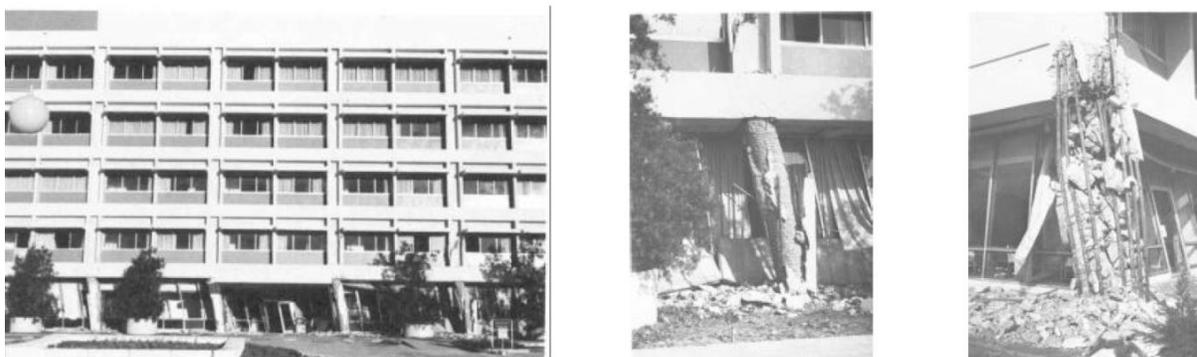


Figura I. 6. Hospital Olive View después del terremoto de San Fernando de 1971, en California. Centro: columna con comportamiento dúctil. Derecha: columna con comportamiento frágil [4].

Estudio de mecanismos de falla para innovaciones de diseño

Se puede analizar el comportamiento de nuevas y variadas configuraciones estructurales o formas resistentes hasta estimar el mecanismo de colapso mediante simulación numérica, de esa manera se podrá contar con un amplio rango de modificaciones y mecanismos hasta llegar a definir un modelo de estructura satisfactorio en términos de morfología, resistencia, economía y seguridad, para luego pasar a pruebas reales físicas de un primer prototipo construido.

I.5.- Objeto de Estudio.

Dentro de la gama de materiales que se emplean comúnmente en estructuras están: El hormigón armado, el acero, el hierro fundido, la madera, la mampostería, el aluminio, fibra de carbono, fibra de vidrio, plásticos, polímeros reforzados, etc.

Dentro de la gama de modelos de elementos que se emplean comúnmente en estructuras están: los cables, las barras, las vigas, las placas, las láminas, las cáscaras, y los volúmenes tridimensionales.

El objeto de esta investigación se centra en el análisis no-lineal geométrico de estructuras de barras empleando como material constitutivo el acero.

I.6.- Campo de acción.

El campo de acción se enfoca en el análisis de estabilidad y resistencia de estructuras de acero tipo armaduras o cerchas bidimensionales o tridimensionales, celosías espaciales o estructuras estereométricas, pudiendo también analizarse estructuras de pórticos intraslacionales, siempre que se considere la libre rotación en los nudos de unión.



Figura I. 7. Ejemplo de celosía espacial ó estructura estereométrica [F.P.]

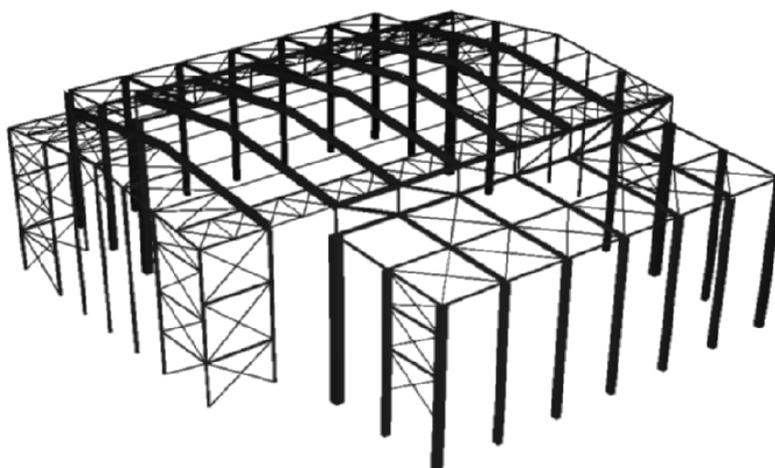


Figura I. 8. Ejemplo de estructura aporticada con diagonales de arriostramiento [F.P.]

I.7.- Formulación de la construcción teórica.

Tipo de Investigación

Basándose en las diferentes formas de clasificación de una investigación (Barrantes 2004) puede concluirse que según la finalidad, el presente estudio corresponde a un estudio de investigación aplicada (cuyo fin es el de solucionar problemas prácticos de optimización de estructuras de barras), mientras que según su profundidad u objetivo es de tipo descriptivo y experimental (pues describe el fenómeno físico natural del camino hacia el colapso de una tipología de estructura, y compara resultados con los efectos producidos en modelos hechos en reconocidos programas de investigación científica).

Hipótesis del Estudio

El análisis no-lineal geométrico de diferentes configuraciones de estructuras de barras sometidas a cargas extraordinarias permite mejorar el aprovechamiento de las formas y del material acero manteniendo un grado de seguridad preestablecido.

Definición de Variables

1.- Variables Independientes. Como variables independientes se tienen: La geometría inicial de la estructura, las cargas externamente aplicadas, las características mecánicas de los materiales.

La geometría o configuración geométrica de la estructura, tiene directa incidencia desde el comienzo del recorrido del comportamiento tensional y de deformaciones, una geometría mal proyectada involucra la presencia de problemas en etapas tempranas de cargado.

Las cargas externamente aplicadas se presentan relacionadas con un tiempo ficticio de duración en la aplicación de cada etapa de carga, estas relaciones no envuelven la presencia de efectos dinámicos que pudieran modificar la respuesta tanto de la geometría como del material de la estructura. Este tiempo ficticio de aplicación define cada intervalo de

tiempo que tomará cada incremento de carga, es decir, hace referencia a un velocidad ficticia de aplicación de la carga.

Las características mecánicas de los materiales se refieren al modelo matemático de comportamiento que relaciona a las deformaciones y distorsiones de las fibras del material con su estado tensional. Estas características no dependen de ningún factor en el presente estudio (existen modelos matemáticos de materiales que dependen de factores como la velocidad de aplicación de las cargas, de la temperatura circundante, etc.).

2.- Variables Dependientes. Se tienen: los desplazamientos sufridos por la estructura, las deformaciones de los elementos y sus estados tensionales. Los desplazamientos sufridos por la estructura son los cambios de posición en el espacio que sufren los elementos componentes de la estructura. Como producto de estos cambios de posición se generan deformaciones y distorsiones en las fibras materiales de los elementos, y como producto de estas deformaciones y distorsiones se generan tensiones en el material que deben ser revisadas para controlar la integridad de cada elemento y de la estructura en conjunto. Adicionalmente, debe revisarse que la configuración geométrica de la estructura no se torne inestable por pandeo local de algunos elementos o del conjunto completo.

I.8.- Objetivos general y específico.

Objetivo General.

Exponer y aplicar las herramientas matemáticas y algoritmos actuales que existen para modelar el análisis estructural con comportamiento no-lineal geométrico de estructuras de barras presentando en detalle la complejidad matemática y física de este fenómeno.

Objetivo Específico.

Diseñar un programa computacional de simulación numérica para análisis no-lineal geométrico de estructuras barras.

I.9.- Aporte Teórico.

Esta investigación hará posible conocer en mayor profundidad el comportamiento estructural de las variables que intervienen en una configuración cualquiera de una estructura de barras hechas de acero. Ofrece la posibilidad de una exploración enriquecida de nuevas formas estructurales mediante su modelación matemática con no-linealidad geométrica, con gastos nulos de experimentación física real.

I.10.- Significación práctica.

En nuestro medio, en lo referente a construcciones metálicas, existe la tendencia a construir estructuras de barras, pero sin un conocimiento profundo de los modos de falla que se pueden presentar ante esfuerzos extraordinarios, a raíz de esto, las estructuras que se diseñan comúnmente en la práctica actual aparecen sobredimensionadas (caras) con respecto a sus cargas normales de utilización debido a que llevan en cuenta en su diseño aquellas cargas extraordinarias de baja probabilidad de ocurrencia.

I.11.- Pertinencia Social.

La importancia social de esta investigación se fija en el aspecto de la seguridad de la vida humana, es decir que se pueda estimar el nivel de seguridad de las estructuras de barras ya construidas ante sollicitaciones extremas de cargas que pudieran presentarse, mientras que para las estructuras nuevas proyectadas se pueda llevar en cuenta el efecto de estas fuertes cargas pero con un menor sacrificio económico, gracias a un mejor aprovechamiento de las formas estructurales y de las propiedades del material acero.

El comportamiento de las fuerzas de la naturaleza (tempestades, huracanes, terremotos, tsunamis, etc.) revela la necesidad de conocer en profundidad las condiciones de seguridad y estabilidad de las estructuras civiles, industriales, militares, etc. De este modo el presente estudio expone un desarrollo paulatino, claro y conciso del fenómeno del comportamiento no

lineal en estructuras de barras además de una herramienta informática sencilla para simular la formación del mecanismo de falla colapsante en tales estructuras.



Figura I. 9. Torres colapsadas por viento. Izq.: de transmisión. Der.: de telecomunicaciones [5]

I.12.- Actualidad y novedad científica.



Figura I. 10. Pandeo de una botella plástica. Los lados colapsan por presión interna negativa [6]

En la época actual en que el desarrollo de las ciencias y la tecnología se acelera con rapidez se torna necesario profundizar en el estudio de los temas que hace tiempo atrás eran impracticables por el pesado manejo de grandes cantidades de información en períodos cortos de tiempo, lo que evidentemente ha cambiado con el desarrollo de la tecnología informática que trae constantemente herramientas cada vez más poderosas para la manipulación de simulaciones numéricas de modelos complejos de la realidad física que rodea al ser humano. El análisis no lineal en general es un planteamiento matemático que tiene muchas prestaciones para diversos campos de estudio de las ciencias exactas. En la ingeniería de estructuras tiene aplicaciones muy importantes como la optimización de materiales, el estudio de nuevas formas geométricas resistentes, la estimación de los mecanismos de falla en estructuras que hayan colapsado, los factores de seguridad contra el colapso de estructuras existentes frente a cargas extraordinarias que no hayan sido consideradas en el diseño inicial, etc.

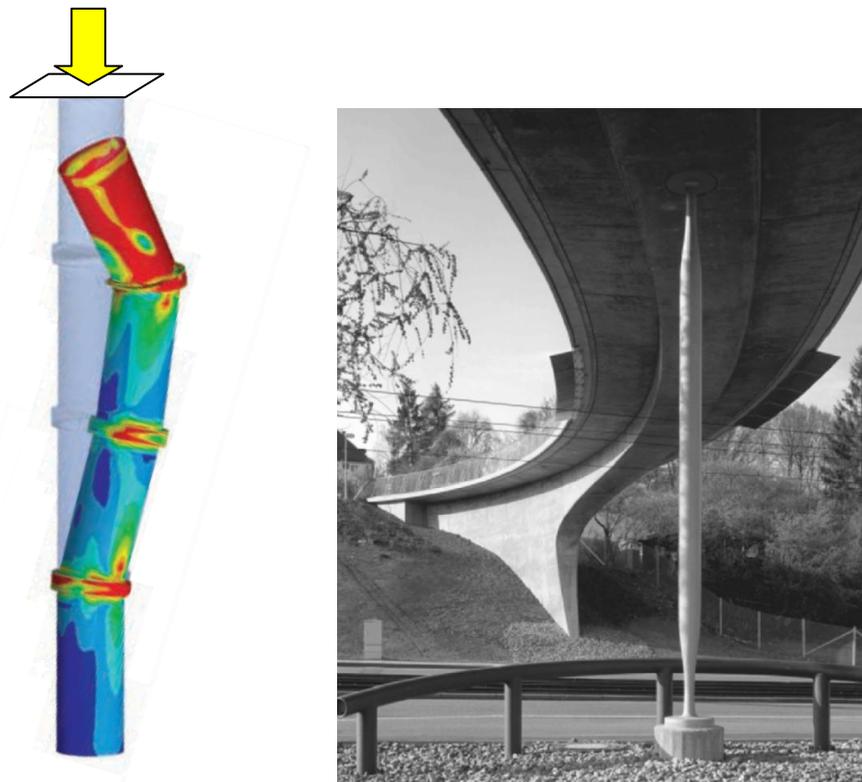


Figura I. 11. Izquierda: estudio del colapso de una columna circular hueca [6]. Derecha: innovador diseño de un soporte esbelto para una pasarela peatonal [7].

I.13.- Diseño metodológico.

Enfoque y Paradigma de Investigación.

El paradigma de investigación del presente estudio es positivista (analítico racionalista) y comprende al conjunto de teorías científicas del análisis de estructuras de barras. Dentro de este conjunto de teorías se encuentran dos grandes enfoques de análisis, cada uno bien definido en sus requisitos y alcance, estos son: El análisis lineal, y el análisis no-lineal.

El análisis lineal de estructuras de barras considera esencialmente que bajo la acción de un estado (o estados) de carga exterior los desplazamientos de la estructura son pequeños, tanto como asumir el equilibrio con la configuración final deformada igual a la inicial sin deformar sin inducir en gran error. Las deformaciones de los elementos componentes de la estructura también son pequeñas, y las tensiones en el material de estos elementos permanecen por debajo de su límite de fluencia, dentro del rango que se conoce como rango elástico lineal. Las condiciones de vínculo o apoyos de la estructura se mantienen invariantes a través de la aplicación de la carga.

En el análisis no-lineal de estructuras de barras los desplazamientos de la estructura deformada son grandes y ya no es posible establecer el equilibrio con la configuración inicial de la estructura sin deformar sin cometer errores apreciables, además, las relaciones entre tensiones y deformaciones no se mantienen proporcionales al aplicar la carga, de este modo, la rigidez de la estructura se va modificando a medida que se desplaza la estructura. Las condiciones de vínculo pueden variar durante el cargado.

El presente estudio utiliza el enfoque cuantitativo del análisis no-lineal de estructuras de barras aplicado a estructuras de acero.

Métodos de Investigación.

Los métodos de investigación empleados en este estudio son de dos tipos: Métodos teóricos, y métodos empíricos.

Métodos Teóricos. En un primer momento de la investigación se emplea el método del análisis documental (en su nivel más extenso y variado de tipos de documentación) para desarrollar la matriz de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, para decantar el tema central de interés, y luego para construir las bases teóricas de la investigación (en un nivel de documentación mucho más científico y técnico).

Se emplea también el método histórico-lógico especialmente en la construcción de los antecedentes del estudio, así como para referenciar las bases teóricas de importantes investigadores del pasado que desarrollaron teorías acerca del tema de investigación.

El método hipotético-deductivo es usado para la observación y comparación cuando se hace la implementación de los modelos virtuales de estructuras deduciendo el comportamiento de falla según los estudios teóricos desarrollados.

El método sistémico es necesario para transmitir la vinculación de los eventos tanto del desarrollo de la teoría necesaria para encarar el estudio como de las modelaciones virtuales de sencillas estructuras de barras de manera organizada e integral.

El método causal es aplicado en el estudio y clasificación de las variables, estableciéndolas como independientes (causa) y como dependientes (efecto).

El método de la modelación se hace presente en la necesidad de reproducir a la estructura física real con sus características geométricas y mecánicas, de una manera simplificada e ideal a través de expresiones matemáticas que describen su comportamiento ante las cargas aplicadas y los desplazamientos y deformaciones consecuentes. La modelación en este estudio es abordada con la aplicación del método de los elementos finitos, basado principalmente en conceptos energéticos de rigidez y deformación.

Métodos Empíricos. El método de la observación hace presencia desde los primeros pasos del estudio en la construcción del diagnóstico del problema, llegando a acompañar al

proceso investigativo hasta el análisis de los resultados observados, momento en el cual se hace evidente la comprobación de la hipótesis de inicio.

De igual manera que el método de la observación, el método de la medición acompaña todo el proceso del estudio pues permanece siempre la necesidad de obtener y operar información numérica de las propiedades y del comportamiento de cada uno de los elementos componentes y de la estructura como conjunto.

Instrumentos de Manejo de Información

En el desarrollo de esta investigación, debido a la manipulación de una cantidad extensa de datos y operaciones numéricas se hace necesario el uso de sistemas de automatización informáticos, sin los cuales la aplicación del análisis no lineal de estructuras de barras sería poco práctico o simplemente impráctico.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL

1.1.- El contexto del estudio.

Se inicia este trabajo presentando los conceptos generales más relevantes del contexto del área en estudio: el Análisis Estructural, el cual pertenece al campo de la Mecánica.

El estudio del campo de la Mecánica puede ser dividido [8] en tres grandes áreas:

- Mecánica Teórica,
- Mecánica Aplicada, y
- Mecánica Computacional

La **mecánica teórica** trata de leyes fundamentales y principios de mecánica estudiados por su valor científico intrínseco. La **mecánica aplicada** transfiere este conocimiento teórico hacia aplicaciones científicas y de ingeniería, especialmente las referidas a la construcción de modelos matemáticos de fenómenos físicos. La **mecánica computacional** resuelve problemas específicos mediante la simulación con métodos numéricos implementados en computadoras digitales.

1.1.1.- La mecánica computacional.

Pueden distinguirse las siguientes ramas de la mecánica computacional de acuerdo con la escala física del foco de atención [8]:

- Nanomecánica y micromecánica
- Mecánica de medios continuos
- Mecánica de sistemas.

La **nanomecánica** trata de los fenómenos a nivel atómico y molecular de la materia. Como tal, está cercanamente inter-relacionada con la física de partículas y la química. La

micromecánica apunta a los niveles granular y cristalográficos de la materia, y su principal aplicación tecnológica está en el diseño y la fabricación de materiales y micro-dispositivos.

La **mecánica del medio continuo** estudia a los cuerpos a nivel macroscópico usando modelos continuos en los cuales la microestructura está homogeneizada mediante promedios fenomenológicos. Sus dos áreas tradicionales de aplicación son la mecánica de sólidos y estructuras y la mecánica de fluidos, y una tercer área: la multifísica.

La *mecánica computacional de sólidos* tiene un enfoque de ciencia aplicada, mientras que la *mecánica computacional estructural* se enfatiza en aplicaciones tecnológicas para el análisis y diseño de estructuras. La *mecánica computacional de fluidos* trata de los problemas que involucran el equilibrio y el movimiento de líquidos y gases. Entre sus áreas más desarrolladas están la hidrodinámica, la aerodinámica, la física atmosférica, la combustión etc. Tanto la mecánica de sólidos como la mecánica estructural abordan sus problemas bajo el enfoque Lagrangeano (llamado también enfoque material), mientras que la mecánica de fluidos lo hace bajo el enfoque Euleriano (o enfoque espacial).

La *multifísica* es un área creada para incluir sistemas mecánicos que trascienden los límites clásicos de la mecánica de sólidos y la mecánica de fluidos, como en una interacción de fluidos y sólidos. Como ejemplo se tienen los problemas de cambio de fase, como el derretimiento del hielo o la solidificación del metal derretido, así como el estudio de interacción de sistemas mecánicos y electromagnéticos.

La **mecánica de sistemas** identifica objetos mecánicos, ya sean naturales o artificiales, que desempeñen una función bien específica. Algunos ejemplos de sistemas (hechos por el hombre) son los aviones, edificios, puentes, motores, automóviles, microchips, robots, etc. También están incluidos los sistemas biológicos como una ballena, una ameba, o un árbol, si se los estudia desde el punto de vista de la biomecánica. Las entidades ecológicas, y las astronómicas también se consideran sistemas.

En esta progresión, el *sistema* es el concepto más general. Los sistemas se estudian por descomposición, su comportamiento es el de sus componentes más la interacción entre ellos mismos. Los componentes se descomponen en subcomponentes y así sucesivamente. Este

proceso jerárquico continúa hasta que los componentes individuales sean lo suficientemente simples para ser tratados por disciplinas individuales, aunque su interacción pueda y deba ser tratada de una manera más compleja.

1.1.2.- La estática y la dinámica.

Los problemas de la mecánica del medio continuo pueden ser sub-divididos de acuerdo a si se tomará o no en cuenta los efectos de inercia, esta sub-división [8] es:

- Mecánica del medio continuo estática
- Mecánica del medio continuo dinámica

En los problemas de dinámica la dependencia del tiempo está explícitamente considerada debido a que el cálculo de las fuerzas inerciales y de amortiguamiento requieren de las derivadas respecto al tiempo real en que se toman.

Los problemas en estática también pueden ser dependientes del tiempo (pseudot tiempo) pero cuidando que las fuerzas de inercia sean descartadas o ignoradas. De esta manera se puede tener la clasificación en estrictamente estático y cuasi-estático. Para el caso estático el tiempo no necesitará ser considerado explícitamente, cualquier parámetro histórico de respuesta ordenada con un pseudot tiempo será suficiente. Para casos cuasi-estáticos como asentamiento de fundaciones, deformación por fluencia, plasticidad tasa-dependiente, ciclos de fatiga, etc., será requerida una estimación más realista del tiempo, pero considerando que las fuerzas de inercia permanecen ignoradas (descartadas).

1.1.3.- El análisis lineal y el análisis no-lineal.

Los problemas estáticos pueden ser clasificados [8] en:

- Análisis Estático Lineal
- Análisis Estático No-Lineal

El análisis estático lineal trata a los problemas estáticos en los que la respuesta es lineal en el sentido causa-efecto. Por ejemplo, si las fuerzas aplicadas se duplican, entonces los desplazamientos y las tensiones internas también se duplican. Todos los problemas que caen fuera de este dominio se clasifican como problemas no-lineales. Se puede también hacer una distinción especial entre dos áreas de no-linealidad:

- *No-linealidad suave*, como las deflexiones finitas o no-linealidades geométricas, la elasticidad no-lineal, las fuerzas perseguidoras que son funciones no-lineales de los desplazamientos de la estructura, etc. Este tipo de no-linealidad se aborda generalmente bajo el concepto de continuación o análisis incremental-iterativo.

- *No-linealidad abrupta*, caracterizada por relaciones entre campos discontinuos, como la plasticidad con regla de flujo, análisis de contactos, análisis de fricción, análisis de impacto, etc. Este tipo de no-linealidad se aborda generalmente bajo métodos puramente incrementales.

1.1.4.- Métodos de discretización.

En el análisis estático de la mecánica estructural computacional existe una clasificación basada en el método de discretización por medio del cual el modelo matemático continuo se discretizará en el espacio, es decir se convertirá en un modelo discreto con un número finito de grados de libertad. El método de discretización espacial puede ser [8]:

- Método de elementos finitos
- Método de elementos de contorno
- Método de las diferencias finitas
- Método del volumen finito

Para problemas lineales el método de elementos finitos es el más popular, con el método de elementos de contorno como una segunda opción en algunas áreas de aplicación específicas. Para problemas no-lineales el método de los elementos finitos domina el

escenario. El método de las diferencias finitas prácticamente ha desaparecido del uso en la mecánica de sólidos y estructuras, sin embargo este método de discretización continua dominando en la mecánica de fluidos. El método del volumen finito se utiliza en problemas de alta no-linealidad en mecánica de fluidos.

1.2.- Conceptos preliminares.

Dentro de los conceptos básicos del análisis estructural necesarios para entender el comportamiento de una estructura se tiene dos primordiales que son: el Camino de Equilibrio (o "equilibrium path" en inglés) y la Ley Constitutiva del material ("constitutive law"). El **Camino de Equilibrio** expresa la relación que existe entre las cargas aplicadas a la estructura y los desplazamientos de los grados de libertad libres. La **Ley Constitutiva** expresa la relación que modela el comportamiento entre las tensiones en las fibras del material (dentro de un medio continuo o elemento discreto de la estructura) y las deformaciones de estas fibras producto de haberse sufrido desplazamientos en el conjunto de la estructura. En el caso de un análisis estructural estático lineal tanto el Camino de Equilibrio como la Ley Constitutiva tienen comportamientos lineales rectos (proporcionales) tal como se puede apreciar en la figura 1.1.

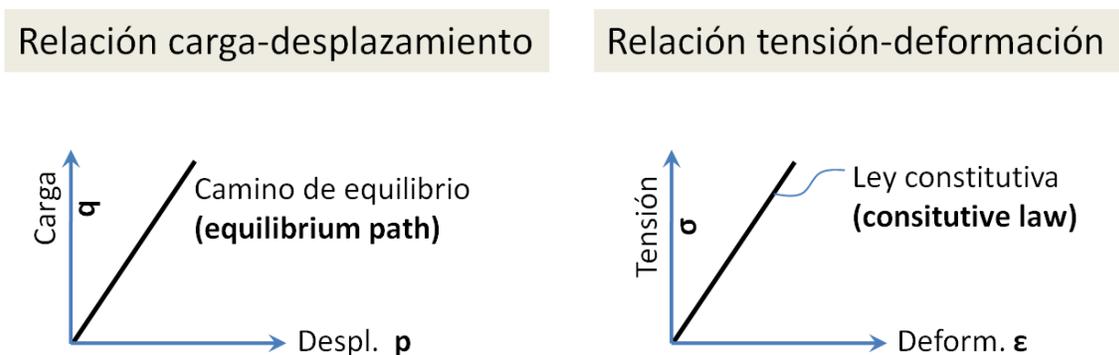
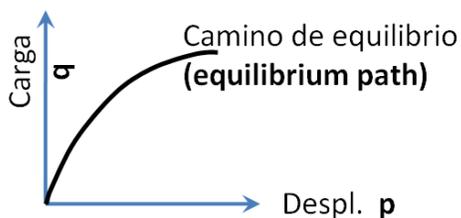


Figura 1. 1. Camino de Equilibrio y Ley Constitutiva en Análisis Estático Lineal

Es posible que en un análisis estructural estático se quiera investigar la respuesta de grandes desplazamientos de la estructura durante el cargado, mientras la relación tensión - deformación de sus elementos se mantenga dentro de un rango lineal proporcional, como

ocurriría por ejemplo, con estructuras de barras esbeltas hechas de acero, en este caso se tendrá la falla por inestabilidad en niveles de tensiones elásticas muy por debajo del límite de fluencia del material. Este tipo de estudio es el que se aborda en el presente trabajo, y se puede visualizar en la figura 1.2. Se lo denomina Análisis No-Lineal Geométrico.

Relación carga-desplazamiento



Relación tensión-deformación

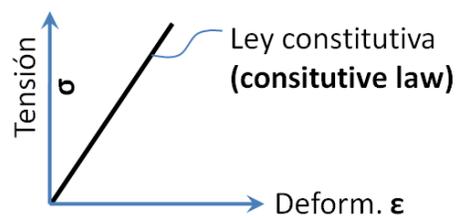
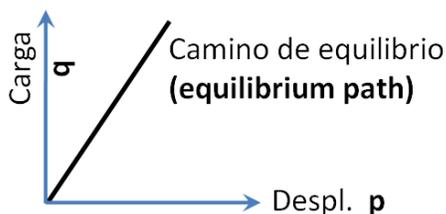


Figura 1. 2. Camino de Equilibrio y Ley Constitutiva en Análisis No-Lineal Geométrico

Dentro de los varios tipos de materiales resistentes se tiene aquellos cuya respuesta tensión-deformación es no-lineal desde etapas tempranas del cargado, en tal caso aunque la relación carga-desplazamiento pueda considerarse a fines prácticos como lineal para pequeños desplazamientos, la relación tensión-deformación es no-lineal. Este tipo de análisis se denomina No-Lineal Físico, ó No-lineal Material, y corresponde con la figura 1.3.

Relación carga-desplazamiento



Relación tensión-deformación

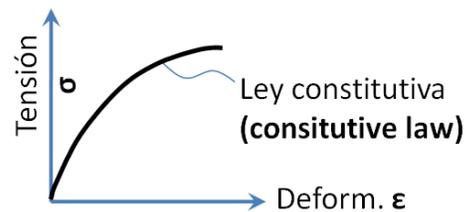


Figura 1. 3. Camino de Equilibrio y Ley Constitutiva en Análisis No-Lineal Material

Finalmente se puede mencionar al análisis no-lineal estático de carácter más general que encierra los dos últimos casos descritos, según se aprecia en la figura 1.4.

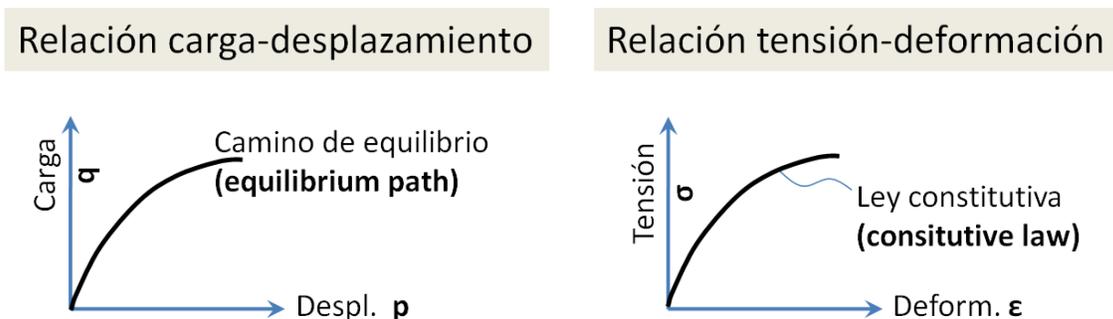


Figura 1. 4. Camino de Eq. y Ley Constitutiva en Análisis No-Lineal Geométrico y Material

Dentro del Análisis No-Lineal Geométrico pueden presentarse una variedad de *tipos de comportamientos carga-desplazamiento*, es decir una variedad de formas de Caminos de Equilibrio, entre las cuales pueden destacarse las siguientes:

1.2.1.- Rebote hacia adelante (llamado "*snap through*" en inglés), que consiste en una súbita pérdida de estabilidad geométrica con un movimiento que continúa hasta que la estructura encuentra otra posición geométrica estable. Este tipo de comportamiento se presenta generalmente en cúpulas de paredes finas.

1.2.2.- Rebote hacia atrás ("*snap back*"), que se parece al caso del rebote hacia adelante, pero con un efecto más exagerado en el cual el camino de equilibrio vuelve hacia atrás en sí mismo para luego avanzar hacia adelante hasta encontrar una nueva posición geométrica de equilibrio.

1.2.3.- Colapso frágil ("*brittle collapse*"), presente cuando se ha perdido definitivamente la rigidez estructural y ya no es posible que la estructura soporte carga. Es un colapso inminente y repentino que debería ser cuidadosamente evaluado para evitarse en lo posible.

1.2.4.- Colapso dúctil ("ductile collapse"), consistente en la redistribución de esfuerzos entre los diferentes elementos de la estructura de manera que aunque el colapso es inminente, no sea súbito y la estructura rote y se desplace cantidades grandes (posiblemente con grandes deformaciones en sus elementos) antes de perder por completo su integridad. Este tipo de comportamiento se prefiere sobre el de tipo frágil, pues permite que la estructura alerte a través de sus grandes desplazamientos y deformaciones a las personas para su evacuación.

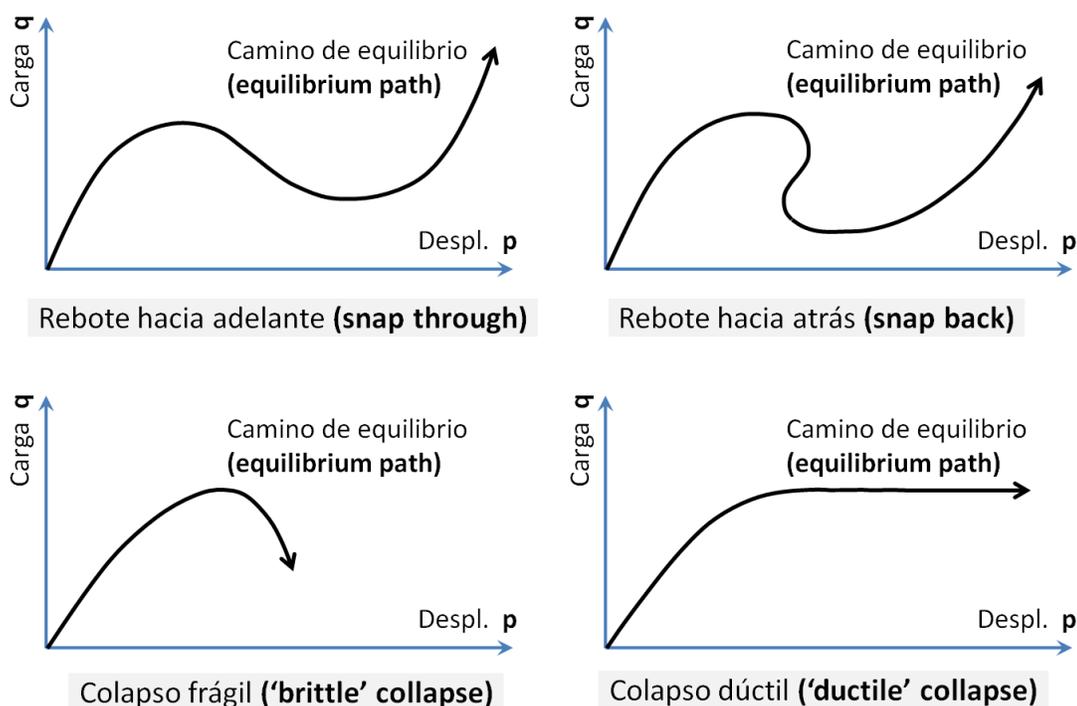


Figura 1. 5. Algunos tipos de comportamiento Carga-Desplazamiento o Caminos de Equilibrio

1.3.- Herramientas numéricas para trazar el Camino de Equilibrio.

Según se describió líneas arriba, el esfuerzo de este trabajo se concentra en trazar el camino de equilibrio de una estructura de barras sometida a un patrón de cargas bajo el enfoque de un análisis no-lineal geométrico. La metodología general para el propósito referido consiste en aplicar un procedimiento incremental-iterativo (llamado también método de continuación).

Existe una gran variedad de métodos de continuación de entre los cuales se ha tomado en cuenta en este estudio dos grandes divisiones: el procedimiento incremental-iterativo por control de carga, y el procedimiento incremental-iterativo por control de longitud de arco. Ambos procedimientos apuntan a establecer puntos "pertenecientes" al camino de equilibrio y como resultado lo que se obtiene es un camino poligonal tan próximo como se quiera al camino no-lineal curvo. En la figura 1.6 puede apreciarse que la solución pasa por algunos puntos de la curva negra, y que uniendo estos puntos se obtiene la solución aproximada poligonal de color verde.

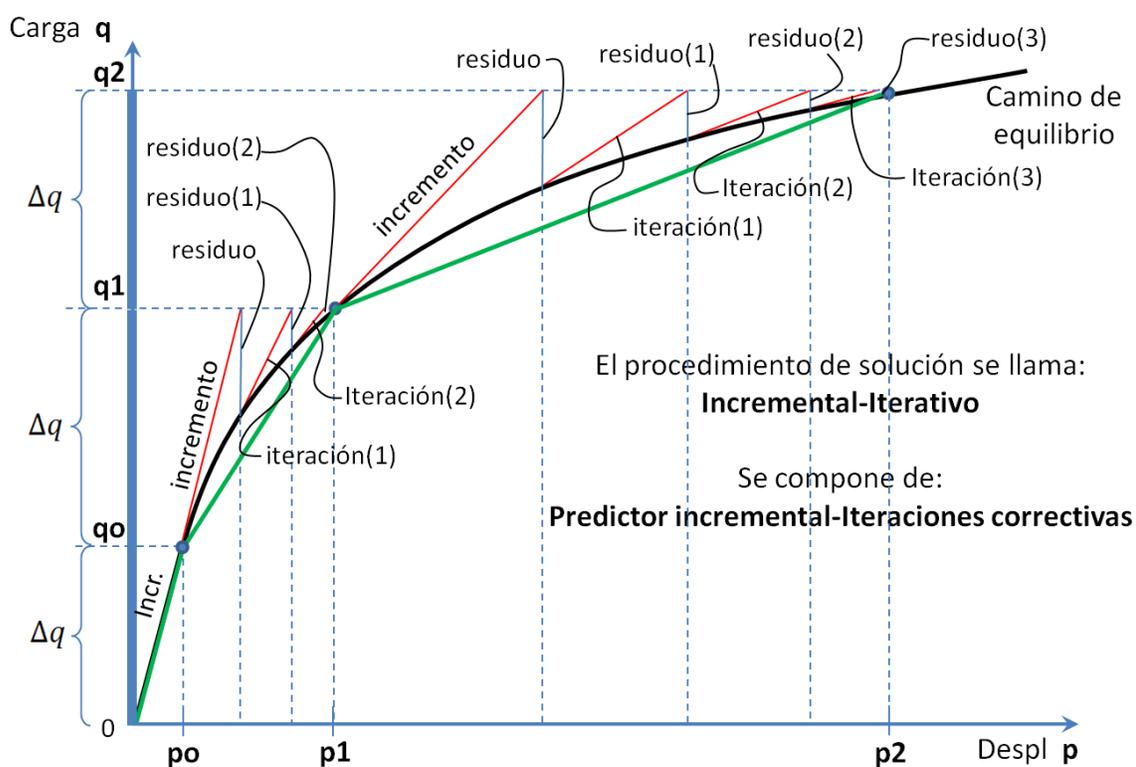


Figura 1. 6. Procedimiento Incremental-Iterativo para trazar el Camino de Equilibrio

1.3.1.- Control de Carga. Este método consiste en aplicar la carga externa por incrementos (llamados etapas de carga o pasos de carga, "load step", en inglés) y de este modo asegurar la convergencia de la solución en el incremento actual a través de iteraciones de equilibrio (dentro de un marco de tolerancia numérica) antes de pasar al siguiente incremento de carga. El método de control de carga permite trazar sin problemas el camino

de equilibrio curvo hasta etapas muy próximas a puntos máximos (ó mínimos) donde la rigidez de la estructura se anula y el nivel de carga ya no intersecta a la curva solución. En términos numéricos esto se evidencia por la falla a la convergencia en un número elevado de iteraciones correctivas, ver figura 1.7.

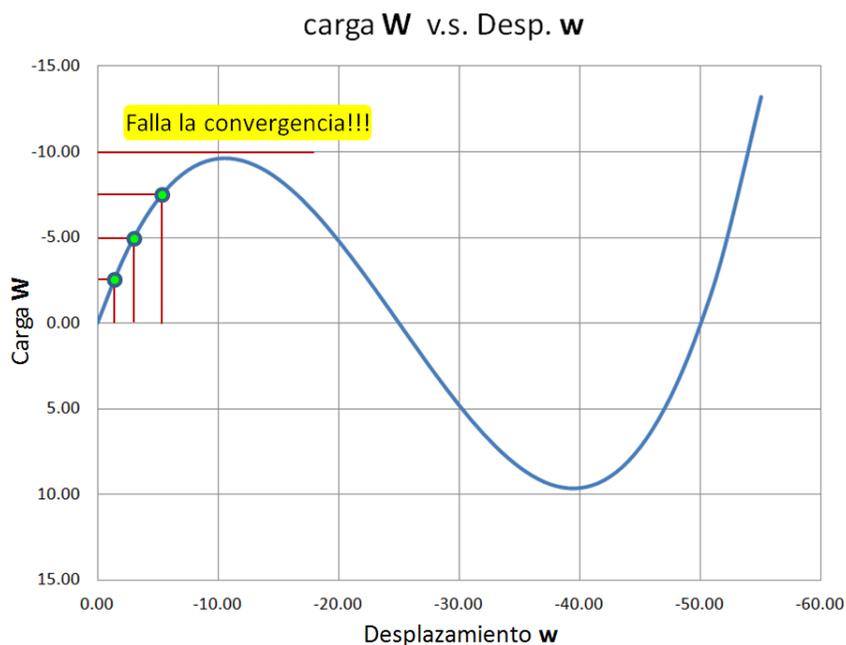


Figura 1. 7. Falla en la Convergencia de los Métodos de Control de Carga

A veces, sin embargo, el método de control de carga logra "saltar" hacia un nuevo estado de equilibrio, si es que existe, en el camino solución, esto es desde el punto A hasta el punto C en la figura 1.8.

Se presentan aquí los siguientes métodos de control de carga:

- (a). Método Newton-Raphson
- (b). Método Newton-Raphson Modificado
- (c). Método de Línea de Búsqueda

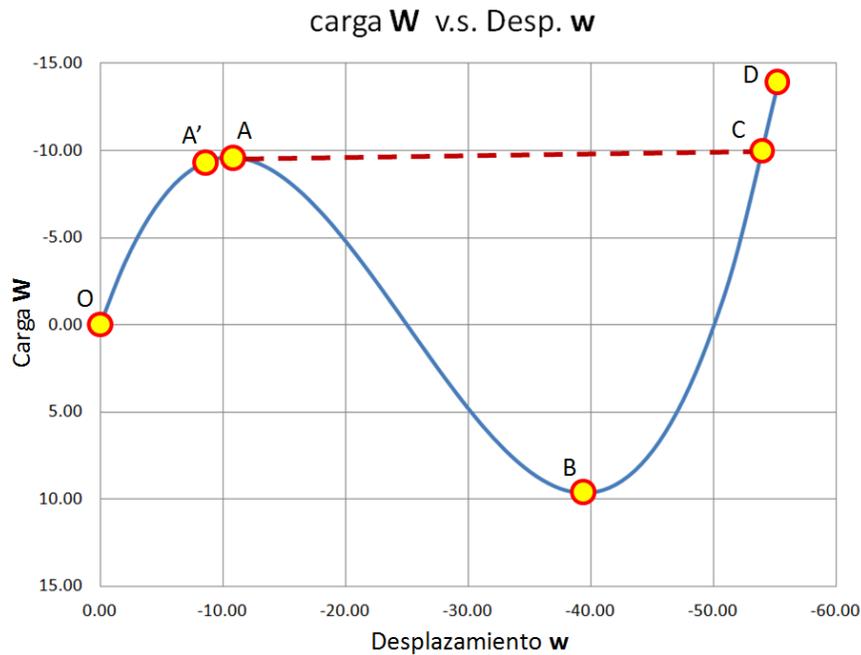


Figura 1. 8. Salto en el trazado en los Métodos de Control de Carga

El Método Newton-Raphson. Como este es un método incremental-iterativo, el punto de inicio para su estudio es el análisis incremental. En este desarrollo la carga se denotará por q y el desplazamiento por p . El esquema de solución incremental (llamado también esquema de Euler) consiste en aplicar la ecuación:

$$\Delta p = \left(\frac{dq}{dp} \right)^{-1} \Delta q = Kt^{-1} \Delta q \quad (1.1)$$

La cual se obtiene al observar en la figura 1.9 que para un valor pequeño de incremento de desplazamiento Δp (igual a un diferencial de desplazamiento dp), el incremento en la función de carga Δq será aproximadamente igual al diferencial de carga dq . De este modo, a la recta tangente en el punto de equilibrio (al inicio del incremento) se le denomina "rigidez tangente", y en un contexto de elementos finitos donde se trabaja con muchas variables, es decir muchos grados de libertad, se le denomina "matriz de rigidez tangente" (corresponde a la línea recta de color rojo en la figura 1.9, indicada como Kt). En conclusión, la matriz de rigidez tangente es la variación de la función de carga con respecto al desplazamiento.

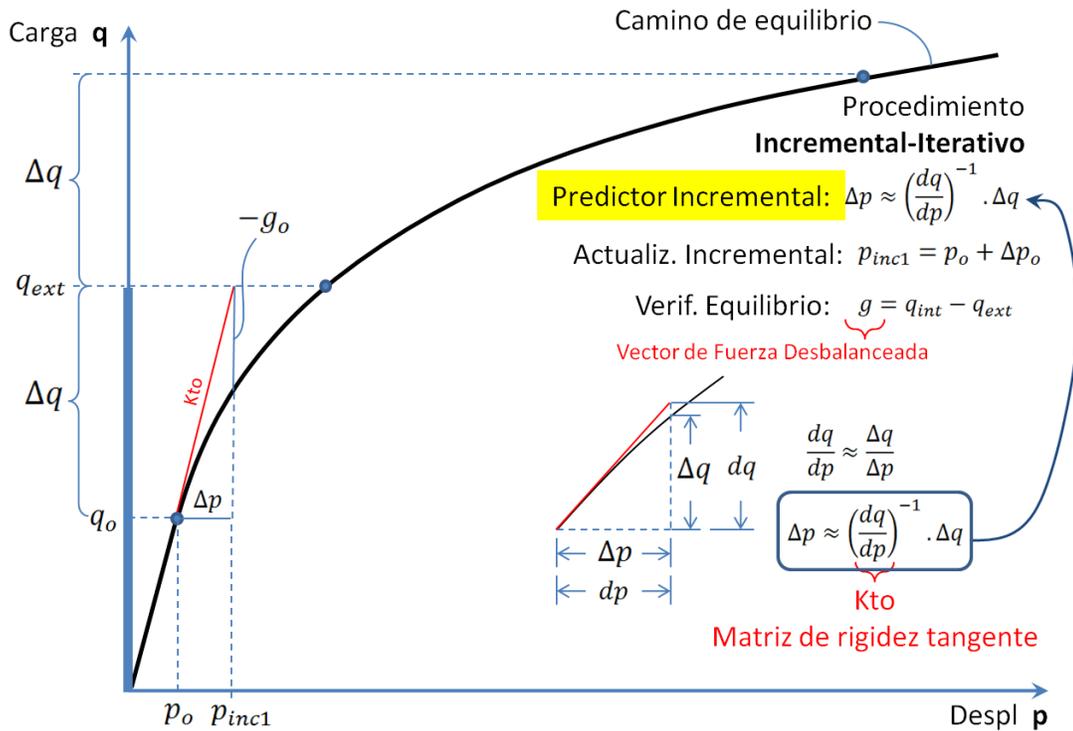


Figura 1. 9. Obtención del predictor incremental

A continuación debe actualizarse el desplazamiento total p_{inc1} simplemente adicionando al desplazamiento actual p_o el desplazamiento incremental Δp_o obtenido con la ecuación (1.1). Con el desplazamiento actualizado debe calcularse la fuerza interna en los elementos y compararse esta fuerza con el nivel actual de carga externa q_{ext} , la diferencia entre ambas toma el nombre de "fuerza desbalanceada", o en forma más general "vector de fuerza desbalanceada" (aparece como g_o en la figura 1.9).

La tarea que sigue consiste en aumentar (iterativamente) el desplazamiento para reducir el vector de fuerza desbalanceada g hasta aproximarlos a cero, lo cual indicaría que para este valor de desplazamiento la fuerza interna de los elementos se iguala (o al menos se aproxima con la precisión requerida) con la fuerza externa (carga) aplicada hasta este incremento, y por consiguiente todo el sistema está en equilibrio. Considerando al vector de fuerza desbalanceada como una función del desplazamiento, se intenta explorar el

comportamiento de su entorno (g_n), es decir en el entorno de g_o . Esta exploración puede aproximarse con una expansión de Taylor truncada [9] tal como:

$$g_n \cong g_o + \frac{dg_o}{dp} \delta p + \left(\frac{1}{2} \frac{d^2 g_o}{dp^2} (\delta p)^2 \right) + \dots \quad (1.2)$$

La intención es aproximar a cero el valor de g_n , por lo tanto si se hace $g_n = 0$, y además se descartan los términos de segundo orden y superiores, se tendrá para δp :

$$\delta p_o = - \left(\frac{dg_o}{dp} \right)^{-1} g_o \quad (1.3)$$

La expresión $\frac{dg_o}{dp}$ es ahora la matriz de rigidez tangente (Kt1 en la figura 1.10). Para continuar se actualiza el desplazamiento total añadiéndosele este desplazamiento iterativo δp_o encontrado:

$$p_{it1} = p_{inc1} + \delta p_o \quad (1.4)$$

Con este nuevo desplazamiento actualizado p_{it1} debe calcularse la fuerza interna en los elementos y compararse esta fuerza con la carga externa, la diferencia entre ambas toma nuevamente el nombre "vector de fuerza desbalanceada" (aparece como g_1 en la figura 1.10). Debe ahora chequearse la convergencia de la solución, esto se hace comparando la norma del vector de fuerza desbalanceada con la norma del vector de carga externa multiplicado por un escalar β llamado tolerancia de convergencia:

$$\| \mathbf{g} \| = (\mathbf{g}^T \mathbf{g})^{1/2} < \beta \| \mathbf{q}_e \| \quad (1.5)$$

Si se ha alcanzado la convergencia deseada, se considera que se tiene un punto solución contenido en el camino de equilibrio, por lo tanto se avanza hacia un nuevo incremento de carga (load step). Si la convergencia no ha sido alcanzada, entonces se procede a realizar una siguiente iteración; esto es, se calcula nuevamente la matriz de rigidez tangente como $\frac{dg_1}{dp}$. Se calcula un nuevo desplazamiento iterativo:

$$\delta p_1 = -\left(\frac{dg_1}{dp}\right)^{-1} g_1 \tag{1.6}$$

Se actualiza el desplazamiento total,

$$p_{it2} = p_{it1} + \delta p_1 \tag{1.7}$$

Con este desplazamiento actualizado se calcula la fuerza interna, luego el nuevo vector de carga desbalanceada g_2 , y finalmente se vuelve a chequear la convergencia como en (1.5). Este proceso iterativo se repite hasta que se alcanza la convergencia requerida, y solo así se pasa al siguiente incremento de carga.

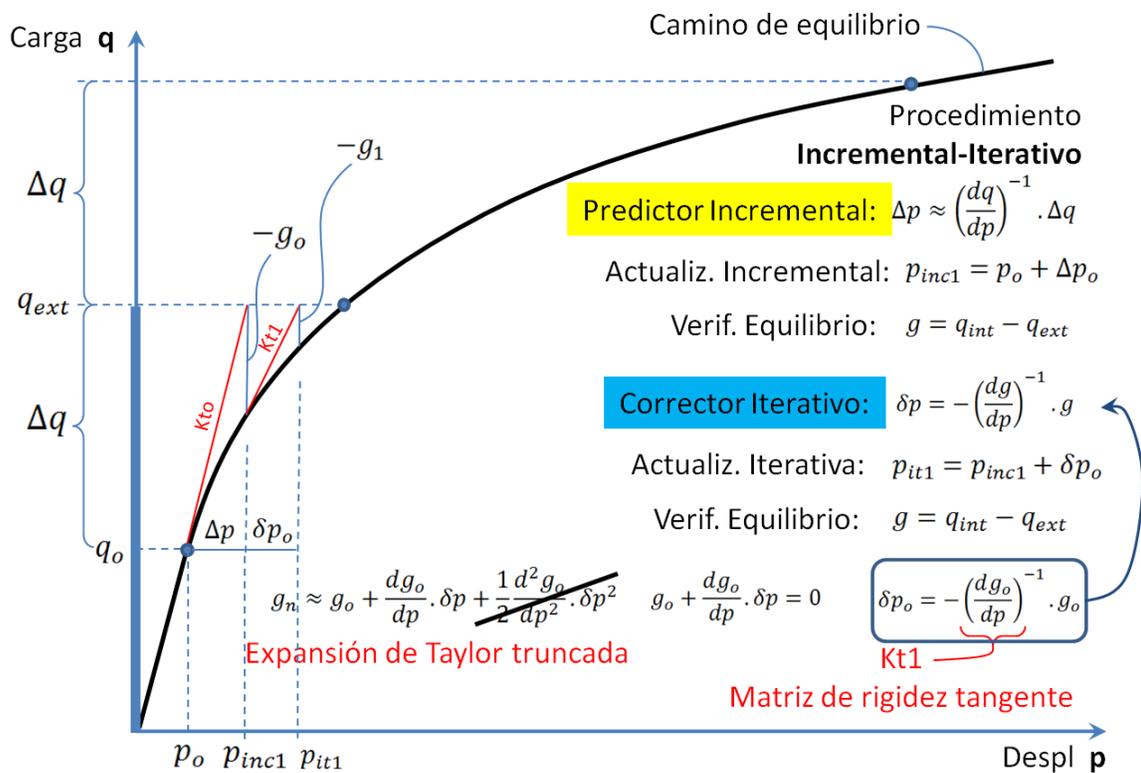


Figura 1. 10. Corrección iterativa Newton-Raphson.

El Método Newton-Raphson Modificado. La formación de la matriz de rigidez involucra un elevado costo en recursos de computadora, este costo es inevitable cuando se calcula la rigidez del predictor incremental en el inicio del incremento de carga, pero al calcularse una nueva matriz de rigidez cada vez que se inicia un nuevo ciclo iterativo se evidencia que los recursos disponibles absorberán una cuantiosa cantidad de trabajo. Surge entonces como posibilidad la opción de utilizar dentro del incremento de carga actual solamente la matriz de rigidez calculada para el predictor incremental, es decir utilizar esta matriz en cada uno de los ciclos iterativos, lo que reduce enormemente la utilización de recursos, y por lo tanto acelera la velocidad de cálculo aunque aumente el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia requerida. Esta metodología de trabajo es la que se conoce como el "método de Newton-Raphson Modificado".

El Método de la Línea de Búsqueda. Lo primero que hay que mencionar de este método es que se aplica a sistemas conservativos donde existe energía potencial elástica, es decir cuando el camino de equilibrio no es camino dependiente (path following), o sea que no hay deformaciones permanentes (no recuperables) en las fibras del material.

El procedimiento de la línea de búsqueda es como se describe a continuación: El punto de partida es un punto de equilibrio, es decir un punto perteneciente al camino de equilibrio, tal como el punto $(p_o, \lambda_o q)$ en la figura 1.11 . Se aplica el incremento de carga $\Delta q = \Delta \lambda \cdot q$, donde $\Delta \lambda$ es un factor de carga incremental, se calcula la matriz de rigidez K_t del predictor incremental (la cual es efectivamente tangente al camino de equilibrio en el inicio de este incremento), y con esto se calcula el desplazamiento incremental Δp . Se actualiza el desplazamiento total p_{ol} como:

$$p_{ol} = p_o + \Delta p \quad (1.8)$$

Con este desplazamiento actualizado se inicia el bucle iterativo. Se obtiene la fuerza interna en los elementos y posteriormente el vector de fuerza desbalanceada g_o , tal como se puede ver en la figura 1.11. Se verifica la convergencia. Se debe calcular ahora el desplazamiento iterativo direccional $\delta \bar{p}$ con la ecuación (1.9) utilizando la matriz de rigidez ya calculada K_t , (es decir que se está trabajando con el procedimiento Newton-Raphson Modificado):

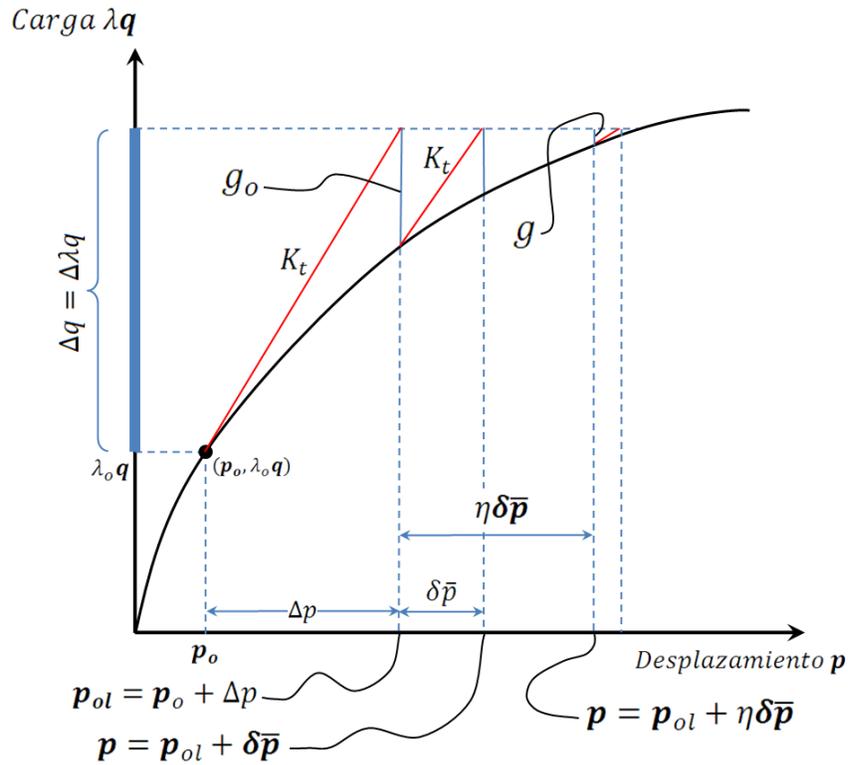


Figura 1. 12. Longitud de Paso para la Línea de Búsqueda.

Al igual que como ocurre en el análisis lineal elástico, el análisis no-lineal elástico puede ser interpretado como la minimización de la energía potencial total que es una función del desplazamiento total p . Partiendo de una expansión de Taylor truncada para la energía [9] ϕ cuando el desplazamiento p sufre una variación δp se tiene:

$$\phi_n(p + \delta p) = \phi_o(p) + \frac{\partial \phi}{\partial p} \delta p + \frac{1}{2} \delta p^T \frac{\partial^2 \phi}{\partial p^2} \delta p + \dots \quad (1.11)$$

En esta expresión, el gradiente de la energía con respecto al desplazamiento $\frac{\partial \phi}{\partial p}$ corresponde a las fuerzas desbalanceadas g , mientras que el gradiente de g con respecto al desplazamiento p es la rigidez K_t del sistema, por lo tanto:

$$\phi_n(p + \delta p) = \phi_o(p) + g(p)^T \delta p + \frac{1}{2} \delta p^T K_t(p) \delta p + \dots \quad (1.12)$$

Para que exista equilibrio en el desplazamiento p , la fuerza desbalanceada tiene que ser igual a cero:

$$g(p) = \frac{\partial \phi^T}{\partial p} = 0 \quad (1.13)$$

También, por el principio de energía potencial estacionaria, para que este equilibrio sea estable se requiere que la variación de g con respecto al desplazamiento p sea mayor que cero, es decir:

$$\delta p^T K_t(p) \delta p = \delta p^T \frac{\partial g}{\partial p} \delta p > 0 \quad (1.14)$$

Lo que significa que K_t tiene que ser definida positiva en el punto de equilibrio.

Ahora para que la energía ϕ sea mínima en un valor específico de la longitud de paso η , se debe escribir la ecuación (1.11) en función de η , es decir:

$$\phi_o(\eta + \delta\eta) = \phi_o(\eta) + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \delta\eta + \dots = \phi_o + \frac{\partial \phi \partial p}{\partial p \partial \eta} \delta\eta + \dots = \phi_o + (g(\eta)^T \delta \bar{p}) \delta\eta + \dots \quad (1.15)$$

Puesto que $\frac{\partial \phi}{\partial p} = g$ y de la ecuación (1.10) $\frac{\partial p}{\partial \eta} = \delta \bar{p}$. Para que el valor de η haga la solución estacionaria se requiere que:

$$s(\eta) = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} = \delta \bar{p}^T g(\eta) = 0 \quad (1.16)$$

A $s_{(\eta)}$ se le llama pendiente o producto interno. Para $\eta = 0$ se tendrá:

$$s_o = s(\eta = 0) = \delta \bar{p}^T g(\eta = 0) = \delta \bar{p}^T g_o \quad (1.17)$$

Y como $g_o = -K_t \delta \bar{p}$:

$$s_o = -g_o^T \bar{K}_t^{-1} g_o = -\delta \bar{p}^T \bar{K}_t \delta \bar{p} \quad (1.18)$$

Suponiéndose que el último estado de equilibrio convergido es estable, K_t es positivo definida, y por lo tanto de (1.18) el signo de s_o es negativo y la pendiente de la energía es descendente como se ve en la figura 1.13.

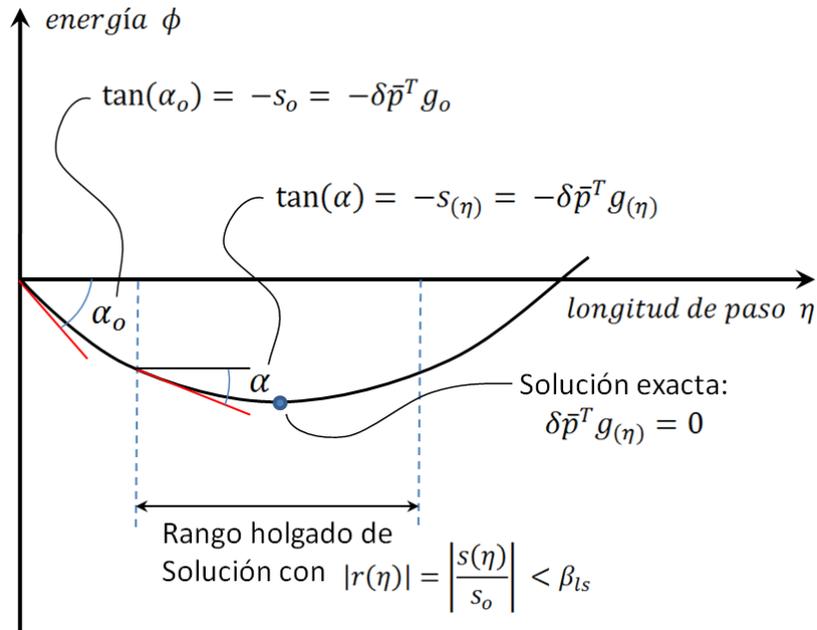


Figura 1. 13. Energía versus Longitud de Paso para Línea de Búsqueda.

Al aplicar una línea de búsqueda lo que se quiere es obtener un valor de longitud de paso η que haga que la norma de $s_{(\eta)}$ sea pequeña en relación con s_o , esto es:

$$|r(\eta)| = \left| \frac{s(\eta)}{s_o} \right| < \beta_{ls} \quad (1.19)$$

donde β_{ls} es llamada "tolerancia de la línea de búsqueda" con un valor razonable de 0.8 [9], y a $r(\eta)$ se le llama "proporción entre pendientes".

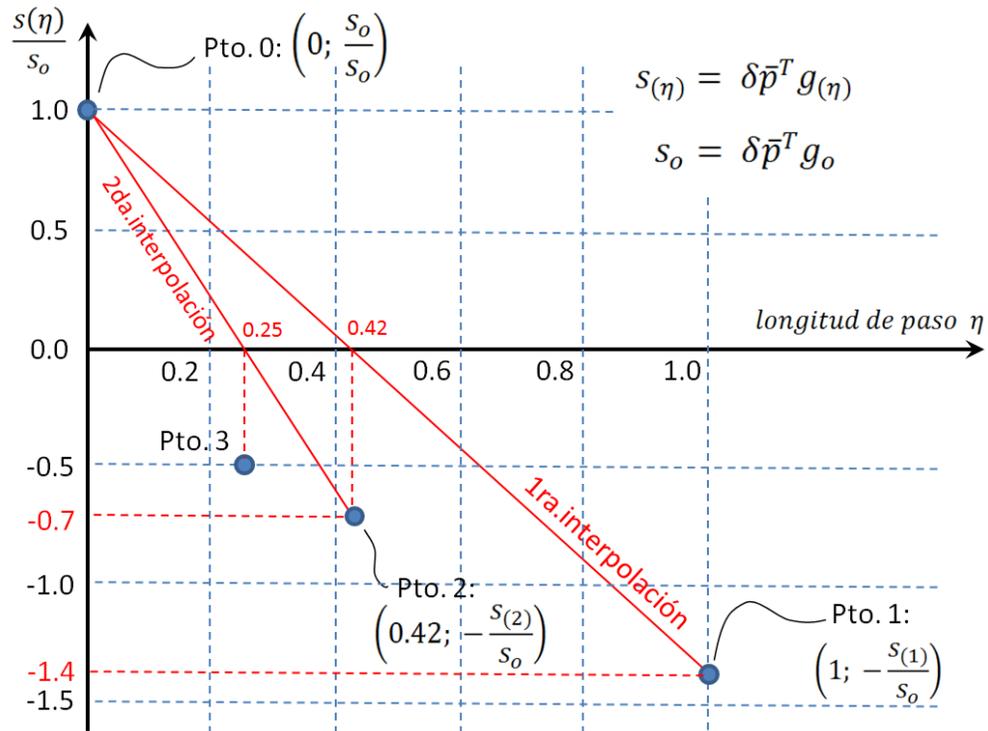


Figura 1. 14. Línea de Búsqueda por Interpolación para la Longitud de Paso.

Para encontrar la longitud de paso η se describe a continuación un ejemplo tomado de la referencia [9] y que se muestra en la figura 1.14. En el inicio del procedimiento para obtener la nueva longitud de paso η , ya se tiene calculado el valor de $g_{(1)}$ con $\eta = 1$ en la ecuación (1.10), se calcula luego la pendiente $s_{(1)}$ y se verifica la proporción $r_{(\eta)}$ de (1.19) lo que arroja un valor de -1.4 y que en conjunto con $\eta = 1$ forma el punto 1 $(1; -1.4)$. A continuación se interpola entre el punto 0 y el punto 1 con la expresión

$$\eta_2 = \frac{-s_o}{s_1 - s_o} = \frac{-1}{r(\eta = 1) - 1} \quad (1.20)$$

para obtener el valor de $\eta_2 = 0.42$. Con este valor y la ecuación (1.10) se recalcula un nuevo desplazamiento iterativo que actualiza al desplazamiento total y con este se calcula la fuerza interna y la nueva fuerza desbalanceada $g_{(2)}$. Ahora se calcula $s_{(2)}$ con (1.16) y se obtiene la

proporción $r_{(\eta)}$ de (1.19) igual a -0.7, lo que forma el punto 2 (0.42; -0.7). Seguidamente se interpola entre el punto 0 y el punto 2 con la expresión generalizada

$$\eta_{j+1} = \eta_j \left(\frac{-s_0}{s_j - s_0} \right). \quad (1.21)$$

para conseguir el valor de $\eta_3 = 0.25$. Con este valor y la ecuación (1.10) se recalcula un nuevo desplazamiento iterativo que actualiza al desplazamiento total y con este se calcula la fuerza interna y la nueva fuerza desbalanceada $g_{(3)}$. Luego se calcula $s_{(3)}$ con (1.16) y se obtiene la proporción $r_{(\eta)}$ de (1.19) igual a -0.5, lo que forma el punto 3 (0.25; -0.5). Este proceso iterativo de la línea de búsqueda se repite hasta que la proporción $r_{(\eta)}$ consigue satisfacer la tolerancia de línea de búsqueda de la expresión (1.19).

1.3.2.- Control de Longitud de Arco. En este método se aplica la carga externa por incrementos pero se busca una vinculación o compromiso entre el valor del incremento de carga y la intersección del camino de equilibrio con una superficie de restricción que puede ser una superficie esférica ó cilíndrica [12] tomando el método el nombre de longitud arco esférico ó cilíndrico, respectivamente. La convergencia de la solución en el incremento actual se realiza a través de iteraciones de equilibrio las cuales refinan el valor del incremento de carga (dentro de un marco de tolerancia numérica) que gracias a la intersección con la superficie de restricción, puede tomar valores de incremento positivo o negativo (carga o descarga), antes de pasar al siguiente incremento de carga. De este modo el trazado del camino de equilibrio es completo y no tiene problemas numéricos de convergencia en los valores máximos ni mínimos de la curva, como se aprecia en la figura 1.15. Este trazado del camino de equilibrio permite conocer de una manera más profunda la formación de los mecanismos en el nivel de falla de la estructura, permite así mismo estimar si la falla tiene un comportamiento dúctil o frágil, y por supuesto permite también identificar con suficiente precisión los puntos límites superiores e inferiores de carga, rebotes hacia adelante, rebotes hacia atrás, etc. como también los puntos donde el camino de equilibrio pueda cambiar bruscamente de dirección (modos de pandeo). La comprensión de todo este conjunto de información ayuda al ingeniero analista a tomar los recaudos que se consideren necesarios.

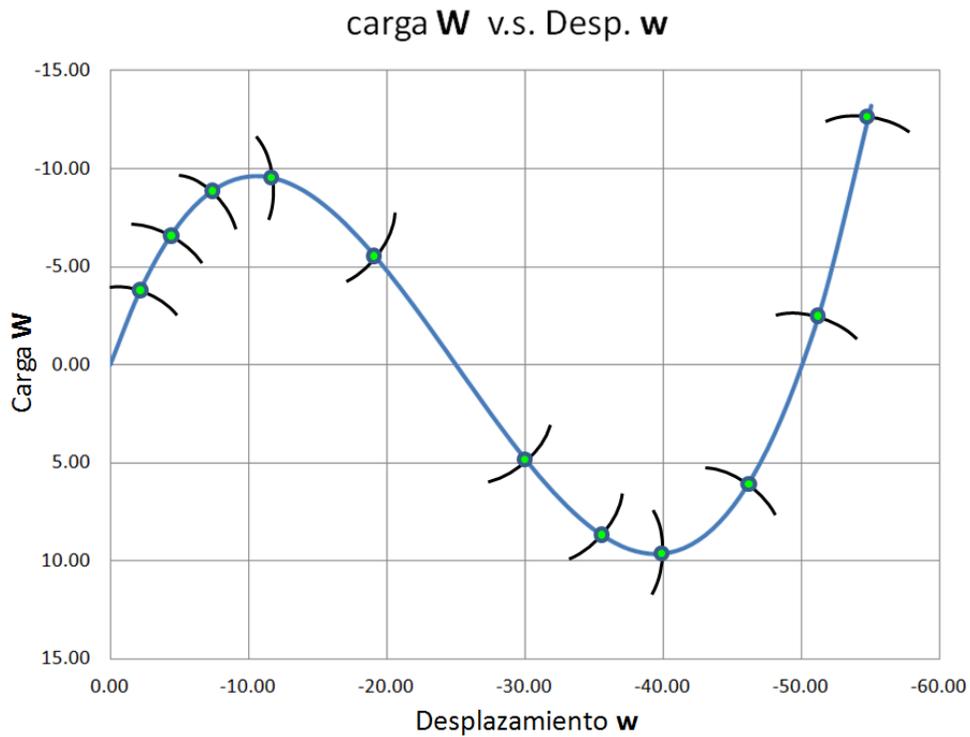


Figura 1. 15. Trazado del Camino de Equilibrio en el Método de Control de Longitud de Arco

Para iniciar el desarrollo teórico del método se debe expresar el equilibrio como:

$$g(p, \lambda) = q_i(p) - \lambda q_{ef} = 0 \quad (1.22)$$

donde el vector q_i representa la fuerza interna como función del desplazamiento p , el vector q_{ef} es un vector de carga externa fija, y el escalar λ es un parámetro del nivel de carga. El método de longitud de arco busca encontrar la intersección de la ecuación (1.22) con una longitud de arco s definida como:

$$s = \int ds \quad (1.23)$$

donde

$$ds = \sqrt{(dp^T dp + d\lambda^2 \psi^2 q_{ef}^T q_{ef})}. \quad (1.24)$$

El parámetro ψ es necesario debido a que la contribución de carga depende de la escala adoptada entre los términos de carga y desplazamiento. Reemplazándose la forma diferencial de (1.24) con una forma incremental:

$$(\Delta p^T \Delta p + \Delta \lambda^2 \psi^2 q_{ef}^T q_{ef}) - \Delta l^2 = 0 \quad (1.25)$$

siendo Δl el radio de la intersección deseada, que es una aproximación a la longitud del arco de la curva de equilibrio buscada. Tanto Δp como $\Delta \lambda$ son incrementales.

Para analizar el desplazamiento iterativo δp en el nuevo nivel de carga incógnita $\lambda_n = \lambda_0 + \delta \lambda$ debe dividírsele en dos partes:

$$\delta p = -K_t^{-1} g(p_o, \lambda) = -K_t^{-1} (q_i(p_o) - \lambda_n q_{ef}) = -K_t^{-1} (g(p_o, \lambda_o) - \delta \lambda q_{ef}). \quad (1.26)$$

La forma final de (1.26) puede expresarse como:

$$\delta p = -K_t^{-1} g_o + \delta \lambda K_t^{-1} q_{ef} = \delta \bar{p} + \delta \lambda \delta p_t \quad (1.27)$$

donde $\delta \bar{p}$ es desplazamiento iterativo direccional en el nivel de carga λ_o , mientras que $\delta p_t = K_t^{-1} q_{ef}$ es llamado el vector de desplazamiento tangencial debido a la carga externa fija q_{ef} . Ahora el nuevo desplazamiento incremental es:

$$\Delta p_n = \Delta p_o + \delta p = \Delta p_o + \delta \bar{p} + \delta \lambda \delta p_t \quad (1.28)$$

con $\delta \lambda$ todavía desconocido. Ahora se debe expresar la ecuación (1.25) como

$$(\Delta p_o^T \Delta p_o + \Delta \lambda_o^2 \psi^2 q_{ef}^T q_{ef}) = (\Delta p_n^T \Delta p_n + \Delta \lambda_n^2 \psi^2 q_{ef}^T q_{ef}) = \Delta l^2 \quad (1.29)$$

Sustituyendo (1.28) en la segunda forma de (1.29) se obtiene la siguiente ecuación cuadrática en términos de $\delta\lambda$:

$$a_1\delta\lambda^2 + a_2\delta\lambda + a_3 = 0 \quad (1.30)$$

Donde

$$a_1 = \delta p_t^T \delta p_t + \psi^2 q_{ef}^T q_{ef} \quad (1.31.a)$$

$$a_2 = 2\delta p_t (\Delta p_o + \delta \bar{p}) + 2\Delta\lambda_o \psi^2 q_{ef}^T q_{ef} \quad (1.31.b)$$

$$a_3 = (\Delta p_o + \delta \bar{p})^T (\Delta p_o + \delta \bar{p}) - \Delta l^2 + \Delta\lambda_o^2 \psi^2 q_{ef}^T q_{ef} \quad (1.31.c)$$

Solucionando esta ecuación cuadrática para $\delta\lambda$ el cambio de desplazamiento completo en el nuevo nivel de carga queda ya definido.

La superficie de restricción expuesta líneas arriba corresponde a la formulación del método de longitud de arco esférico, mientras que si se hace igual a cero el parámetro de escalado ψ , entonces el método resultante se denomina método de longitud de arco cilíndrico [ver referencia 12].

A continuación se expone el proceso que sigue la obtención de un punto del camino de equilibrio utilizando el método de longitud de arco y en referencia a la figura 1.16. El punto de partida es el punto de equilibrio $(p_o, \lambda_o q_{ef})$. Se calcula la matriz de rigidez tangente en este punto, y luego se obtiene el desplazamiento iterativo direccional $\delta \bar{p} = -K_t^{-1} g_o$ junto con el desplazamiento tangencial debido a la carga externa fija $\delta p_t = K_t^{-1} q_{ef}$. Se debe establecer una superficie de vínculo de un radio Δl adoptado. Se aplica un predictor incremental tangencial $(\Delta p_1, \Delta \lambda_1)$ utilizando

$$\Delta \lambda_1 = \pm \frac{\Delta l}{\sqrt{(\delta p_t^T \delta p_t)}} \quad (1.32)$$

y

$$\Delta p_1 = K_t^{-1} \Delta q_e = \Delta \lambda_1 K_t^{-1} q_{ef} = \Delta \lambda_1 \delta p_t \quad (1.33)$$

Con esto se ha conseguido llegar al punto $(p_1, \lambda_1 q_{ef})$

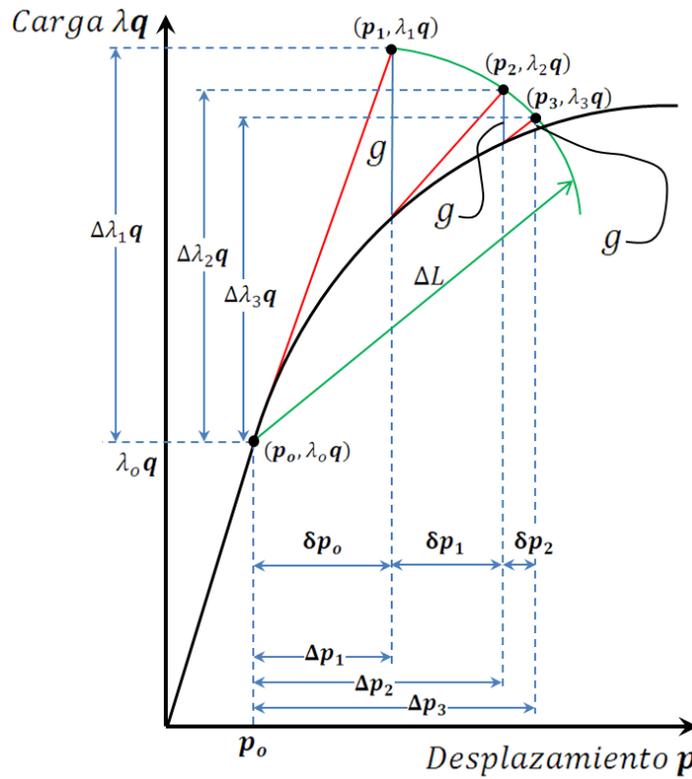


Figura 1. 16. Desarrollo del Método de Control de Longitud de Arco

Se inicia ahora el bucle iterativo con la verificación de la convergencia de g_0 . En la primera iteración, con (1.30) y (1.31) se obtiene $\delta\lambda_1$ y luego con (1.27) se obtiene δp_1 . Se actualiza el factor de carga incremental $\Delta\lambda_2$ y el desplazamiento incremental Δp_2 con

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 + \delta p_1, \quad \Delta\lambda_2 = \Delta\lambda_1 + \delta\lambda_1. \quad (1.34)$$

Añadiendo (4.28) al punto de partida $(p_0, \lambda_0 q_{ef})$ se llega al punto $(p_2, \lambda_2 q_{ef})$. Aquí se debe verificar la convergencia de g_1 . Si no hay convergencia se pasa a la segunda iteración. con (1.30) y (1.31) se obtiene $\delta\lambda_2$ y luego con (1.27) se obtiene δp_2 . Se actualiza el factor de carga incremental $\Delta\lambda_3$ y el desplazamiento incremental Δp_3 con (1.34).

Se adiciona Δp_3 y $\Delta \lambda_3$ al punto de partida $(p_0, \lambda_0 q_{ef})$ para llegar al punto $(p_3, \lambda_3 q_{ef})$. Aquí se debe verificar la convergencia de g_2 . Si no hay convergencia se pasa a la siguiente iteración y así sucesivamente.

Cada vez que se verifica la convergencia se emplea:

$$\| \mathbf{g} \| = (\mathbf{g}^T \mathbf{g})^{1/2} < \beta \| \lambda \mathbf{q}_{ef} \| \quad (1.35)$$

donde el factor de tolerancia a la convergencia β puede tomar valores como 0.001, 0.0001, o menores de acuerdo al nivel de precisión que se quiera conseguir en el análisis.

CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

El análisis de teoría de estabilidad que se aborda en este capítulo es aplicable solamente a sistemas conservativos donde existe energía potencial elástica, es decir cuando el camino de equilibrio no es camino dependiente, o sea que no hay deformaciones permanentes o no recuperables en los elementos estructurales.

2.1.- Teoría general basada en la energía potencial elástica

Sea el funcional de energía elástica:

$$\phi(p, \lambda) = \varphi(p) - \lambda p^T q \quad (2.1)$$

En esta expresión ϕ es la energía potencial total, φ es la energía de deformación como una función de los desplazamientos p , q es un vector de carga fija y λ es un factor escalar multiplicador de la carga.

Si se aplica una expansión truncada en serie de Taylor (sin términos superiores) se puede hallar el cambio en la energía, esto es

$$\delta\phi = \frac{\partial\phi}{\partial p} \delta p + \frac{1}{2} \delta p^T \frac{\partial^2\phi}{\partial p^2} \delta p \quad (2.2)$$

y sabiendo que el gradiente de la energía con respecto al desplazamiento $\frac{\partial\phi}{\partial p}$ corresponde a las fuerzas desbalanceadas g , mientras que el gradiente de g con respecto al desplazamiento p es la rigidez K_t del sistema, se tiene entonces

$$\delta\phi = g^T \delta p + \frac{1}{2} \delta p^T K_t \delta p \quad (2.3)$$

Para que exista equilibrio, el cambio de energía en (2.3) debe ser estacionario independientemente de δp , por lo tanto, las ecuaciones de equilibrio resultan:

$$\frac{\partial \phi^T}{\partial p} = g(p, \lambda) = 0 \quad (2.4)$$

Para que el equilibrio sea estable, se requiere que el pequeño cambio de energía sea positivo para cualquier pequeña perturbación δp , alrededor del punto de equilibrio. Por lo tanto, se requiere que:

$$\delta p^T K_t \delta p > 0 \quad \text{para todo } \delta p \quad (2.5)$$

Es decir que K_t tiene que ser definida positiva (con todos sus eigen valores positivos). Cuando se presenta la situación de equilibrio inestable, por el contrario, el cambio en la energía es negativo, y por lo tanto

$$\delta p^T K_t \delta p < 0 \quad \text{para algún } \delta p \quad (2.6)$$

En este caso la matriz de rigidez no es positivo definida y tiene al menos un eigen valor negativo. Finalmente, se puede presentar el caso en que

$$\delta p^T K_t \delta p = 0 \quad \text{para algún } \delta p \quad (2.7)$$

donde la matriz de rigidez K_t tiene un eigen valor igual a cero. Esta condición implica también que

$$\det(K_t) = 0 \quad (2.8)$$

En el desarrollo del análisis incremental iterativo expuesto en el capítulo anterior, se observa que el predictor incremental tangencial involucra la aplicación de

$$\Delta p = \Delta \lambda K_t^{-1} q \quad (2.9)$$

Si para este predictor se presenta la situación dada por (2.8), no es posible calcular Δp y se dice que se tiene un **punto singular** en el camino de equilibrio. Este punto singular puede ser un **punto límite** (figura 2.1) o un **punto de bifurcación** (figura 2.2)

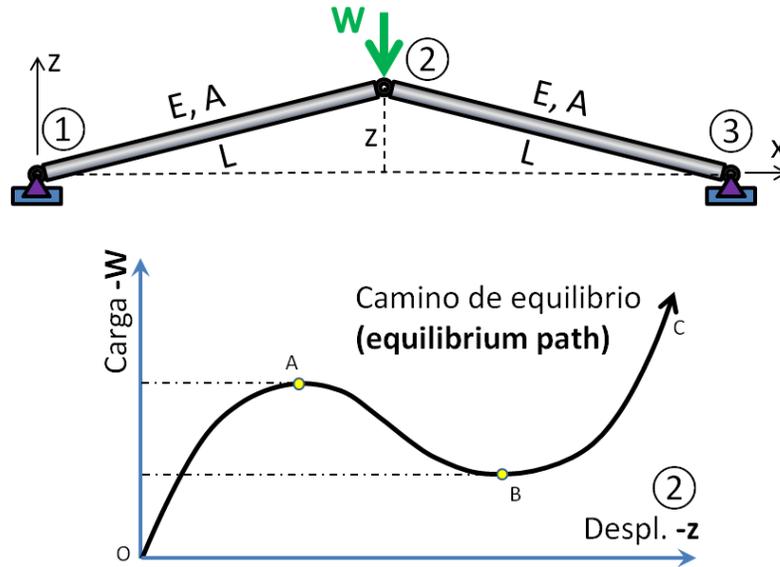


Figura 2. 1. Puntos Límite en el Camino de Equilibrio.

En el caso de la figura 2.1 se muestra un camino de equilibrio con dos puntos límite (puntos A y B). El trayecto desde O hasta A es estable, mientras que desde A hasta B es inestable, y desde B hacia C vuelve a ser estable (rebote hacia adelante).

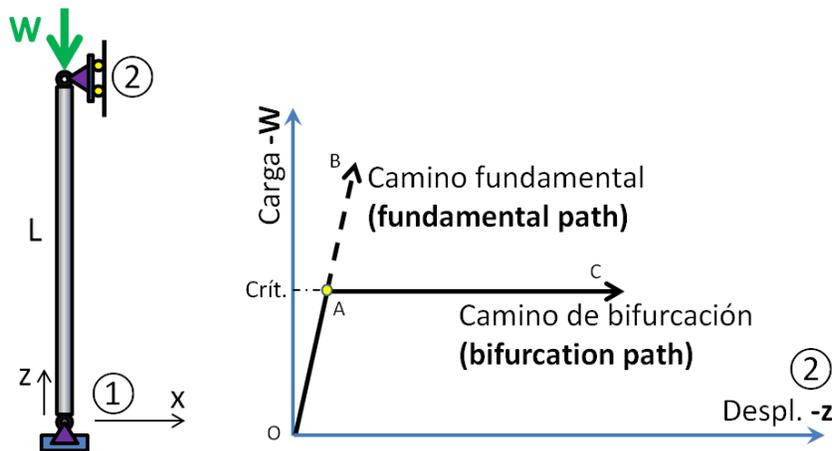


Figura 2. 2. Punto de Bifurcación en el Camino de Equilibrio.

En la configuración de la figura 2.2 se incrementa gradualmente la carga $-W$ hasta que se alcanza un valor conocido como carga crítica (punto A: punto de bifurcación), y en subsiguientes incrementos existen dos posibles caminos que el comportamiento puede seguir: el primero, en línea segmentada, se conoce como camino fundamental o camino primario, es el trayecto que se seguiría si el fenómeno de inestabilidad elástica no se presentase. El segundo camino se conoce como camino de bifurcación, camino secundario, o simplemente ramificación, y es el camino que físicamente tiende a seguir la relación carga-desplazamiento en una situación real.

De la condición (2.8) se deben obtener los eigen-valores θ_i y eigen-vectores z_i de la matriz de rigidez para la inestabilidad, esto es:

$$(K_t - \theta_i I)z_i = 0 \quad (2.10)$$

siendo θ_i la proporción escalar entre el vector $K_t z_i$ y el vector z_i , es decir, de (2.10):

$$\begin{aligned} K_t z_i - \theta_i z_i &= 0 \\ K_t z_i &= \theta_i z_i \end{aligned} \quad (2.11)$$

El vector ortogonal z_i debe estar normalizado, o sea

$$z_i^T z_j = \delta_{ij} = 1, \quad \text{si } i = j; = 0 \text{ si } i \neq j \quad (2.12)$$

Los eigen-valores θ_i deben estar ordenados de manera que θ_1 sea el menor eigen-valor

$$\theta_n > \theta_{n-1} > \dots > \theta_1 \quad (2.13)$$

Justo en el punto singular el menor eigen-valor se iguala a cero, por lo tanto de (2.11)

$$K_t z_1 = 0 \quad (2.14)$$

Si se multiplica a (2.9) por z_1 y se iguala a cero:

$$\Delta p^T K_t z_1 - \Delta \lambda q^T z_1 = 0 \quad (2.15)$$

Como se tiene la condición (2.14) en el punto singular, entonces

$$\Delta \lambda q^T z_1 = 0 \quad (2.16)$$

Si el punto singular es un **punto límite**, de (2.16)

$$\Delta \lambda = 0; \quad q^T z_1 \neq 0 \quad (2.17)$$

Mientras que si es un **punto de bifurcación**, de (2.16)

$$q^T z_1 = 0 \quad (2.18)$$

con $\Delta \lambda$ siendo indeterminado.

2.2.- Identificación de puntos singulares.

Cuando se avanza en el trazado del camino de equilibrio con un procedimiento incremental-iterativo como el control de longitud de arco, en alguna etapa este procedimiento converge en un punto de equilibrio que se encuentra más allá del primer punto singular. El algoritmo matemático de un programa de cálculo tiene que tener la capacidad de indicar si este punto singular que se acaba de atravesar es un punto límite o un punto de bifurcación. Para este efecto debe tenerse en cuenta el manejo de dos conceptos fundamentales: el *parámetro de rigidez actual* (current stiffness parameter) y el *pivote mínimo*.

2.2.1.- El parámetro de rigidez actual. Es en realidad un índice de rigidez que se utiliza para tener alguna medida escalar del grado de no-linealidad del camino de equilibrio. Este parámetro mide la rigidez del sistema y la compara con la del predictor tangencial el cual tiene la forma:

$$'k' = \frac{\Delta q^T \Delta p}{\Delta p^T \Delta p} = \frac{q_{ef}^T \delta p_t}{\delta p_t^T \delta p_t} \quad (2.19)$$

Para la obtención del parámetro de rigidez actual C_s se escala el valor actual de ' k ' con el valor inicial ' k_o ' lo que da:

$$C_s = \frac{'k'}{'k_o'} \quad (2.20)$$

Hay muchos tipos de estructuras que exhiben un tipo de respuesta en la cual pierden rigidez a medida que se aplica la carga, muy especialmente según se aproxime un punto límite, y cuando la solución coincide exactamente con el punto límite, el parámetro de rigidez actual se iguala a cero. Cuando la solución atraviesa el punto límite, este parámetro cambia de signo (de positivo a negativo) como se aprecia en la figura 2.3.a. Si el punto singular que se ha atravesado es un punto de bifurcación, el parámetro de rigidez actual no cambia de signo.

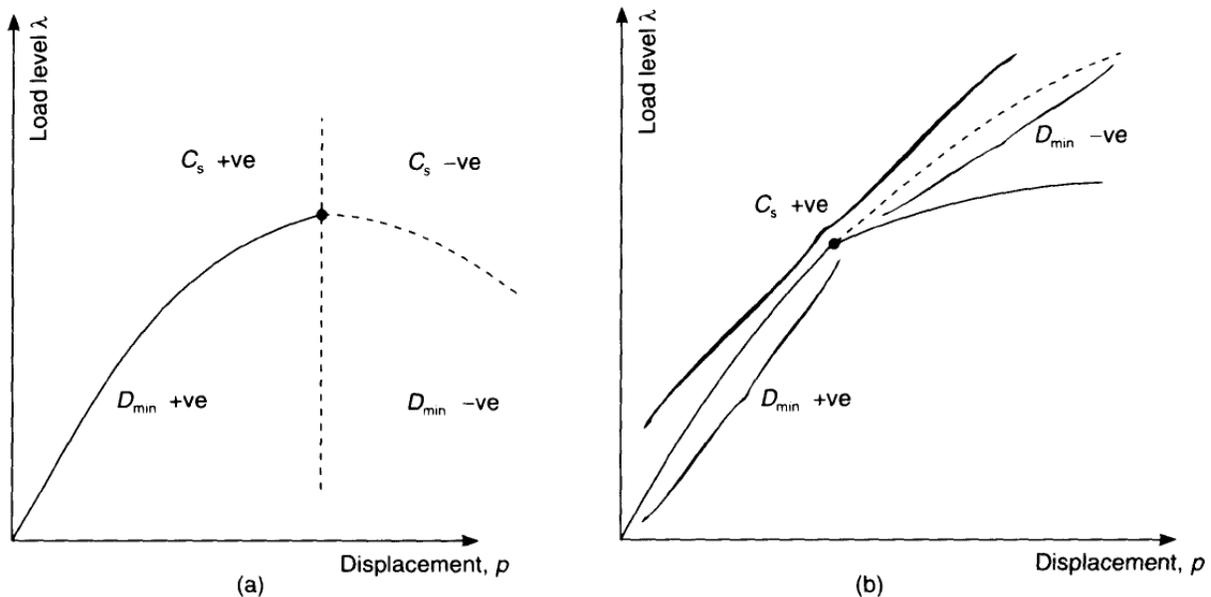


Figura 2. 3. Respuesta del parámetro de rigidez actual C_s y el pivote mínimo D_{min} en puntos límite y bifurcación. (a) Punto límite. (b) Punto de bifurcación [10].

2.2.2.- El pivote mínimo. Cuando se realiza la factorización de la matriz de rigidez tangente se emplea el método de Crout llamado también Método LDL(T) que es especialmente útil cuando no se tiene seguridad sobre si una matriz simétrica es definida positiva o no. Con este método se expresa la rigidez factorizada como el producto de tres matrices: una matriz triangular inferior, una matriz diagonal y la transpuesta de la misma matriz triangular inferior. La matriz diagonal es clave para detectar la presencia de puntos singulares, a sus elementos diferentes de cero se les llama pivotes. Cuando en el trazado del camino de equilibrio se ha atravesado un punto límite, el pivote mínimo contenido en la matriz diagonal cambia de signo (de positivo a negativo), y de manera análoga, cuando un punto de bifurcación ha sido atravesado, el pivote mínimo también cambia de signo positivo a negativo. Estas características pueden apreciarse en la figura 2.3.

Entonces de manera resumida se puede expresar que si tanto el parámetro de rigidez actual como el pivote mínimo cambian de signo el punto singular atravesado es un punto límite, mientras que si el parámetro de rigidez actual mantiene su signo pero el pivote mínimo cambia de signo, entonces el punto singular atravesado es un punto de bifurcación.

2.3.- Captura de puntos singulares.

Se describe aquí un algoritmo simple para la implementación de un procedimiento de captura de punto singular en el caso de que durante el trazado del camino de equilibrio se hubiese atravesado uno.

Se define una función de prueba que cambie de signo cuando el punto singular haya sido atravesado, esta función es:

$$\tau = \det(K_t) \quad (2.21)$$

Se normaliza esta función de prueba mediante:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{(|\tau_1 \tau_2|)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.22)$$

donde τ_1 y τ_2 son los valores más cercanos de la función de prueba a cada lado del punto singular una vez que el procedimiento de captura ha empezado.

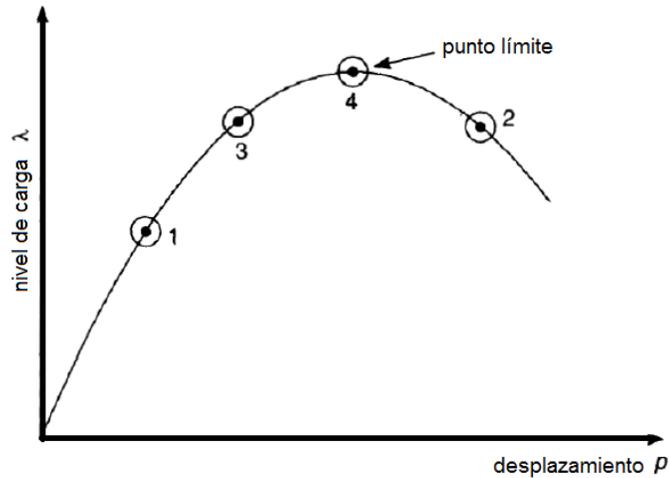


Figura 2. 4. Procedimiento de captura: puntos de captura [10].

Para el proceso de captura siempre se usa los valores más cercanos a cada lado del punto singular, por ejemplo en la figura 2.4, τ_{i-2} sería positivo, mientras que τ_{i-1} sería negativo.

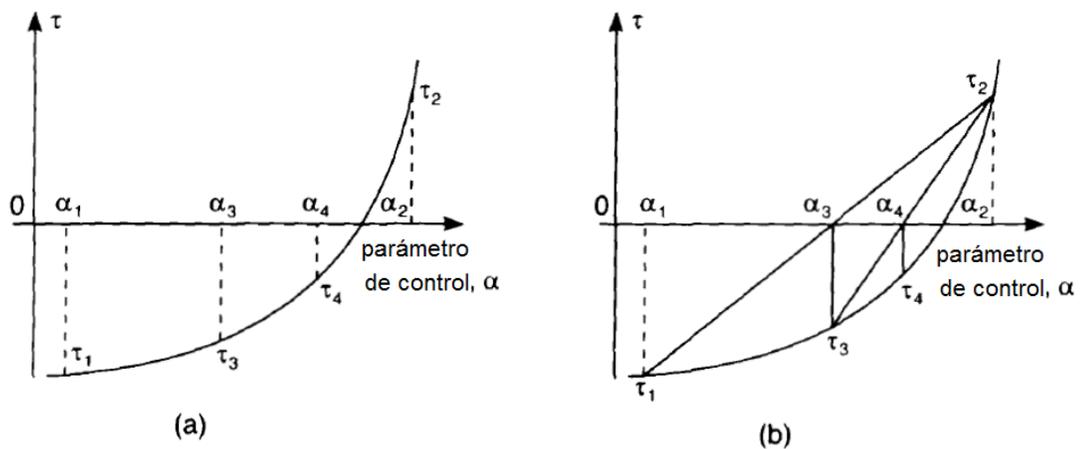


Figura 2. 5. (a) Obtención del parámetro de control. (a) Bisección, (b) Interpolación [10].

Para aplicar la captura se debe establecer un parámetro de control, este podría ser el 'parámetro de carga' λ , o podría ser la longitud de arco. Para conseguir afinar este parámetro de control se puede proceder con la técnica de bisección como en caso de la figura 2.5.a, donde el parámetro de carga se denota por α , o también se podría proceder con una técnica de interpolación como se puede apreciar en la figura 2.5.b, en este último caso se tiene:

$$\alpha_i = \alpha_{i-2} - \tau_{i-2} \frac{(\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2})}{(\tau_{i-1} - \tau_{i-2})} \quad (2.23)$$

Para establecer un criterio de finalización para la captura, se puede utilizar tanto el valor de la función de prueba como el tamaño de la captura ($\Delta\alpha_i$) adoptando un pequeño valor para la tolerancia η (como 10^{-4}):

$$\eta = (|\bar{\tau}\Delta \alpha_i/\alpha_i|)^{1/2} = (|\bar{\tau}\Delta \lambda_i/\lambda_i|)^{1/2} \quad \text{para control de carga} \quad (2.24.a)$$

$$\eta = (|\bar{\tau}\Delta \alpha_i/\alpha_0|)^{1/2} = (|\bar{\tau}\Delta l_i/\Delta l_0|)^{1/2} \quad \text{control de longitud de arco} \quad (2.24.b)$$

donde, λ_i es el valor actual del parámetro de carga, y Δl_0 es el valor del incremento de longitud de arco justo antes de la implementación del procedimiento de captura.

CAPÍTULO III: INTRODUCCIÓN A LA NO-LINEALIDAD GEOMÉTRICA CON UN ELEMENTO DE CERCHA

El desarrollo del presente capítulo está basado en la relación de deformación de una "cercha baja", lo que significa que se hacen simplificaciones sobre los desplazamientos y deformaciones al ser estos pequeños, sin embargo aún con estas simplificaciones es posible exponer un desarrollo de los principales conceptos de la no-linealidad geométrica.

3.1.- Análisis de un elemento de cercha con un grado de libertad.

Sea la siguiente figura la representación de un elemento simple de cercha sin carga:

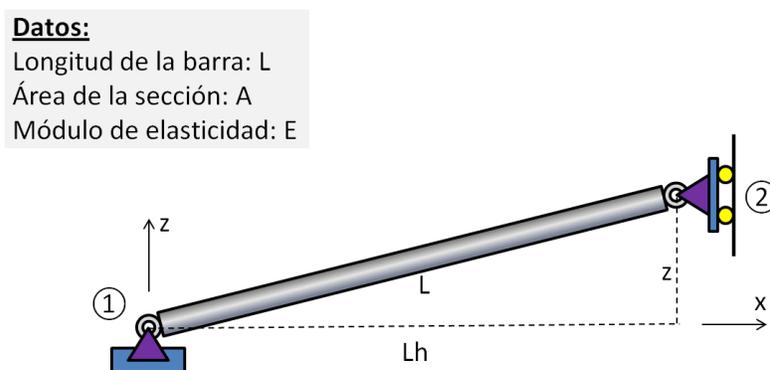


Figura 3. 1. Elemento de cercha con un solo grado de libertad, sin carga.

Si se aplica una carga vertical hacia arriba en el nudo 2, como se aprecia en la figura 3.2, aparecen las fuerzas normales N de tracción en el interior de la barra. Por la simplicidad del problema la solución partirá desde el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio del sistema. Es decir, para que exista equilibrio vertical y siempre que el ángulo θ se mantenga pequeño debe cumplirse que:

$$W = N \cdot \sin\theta = \frac{N(z+w)}{L''} \approx \frac{N(z+w)}{L} \quad (3.1)$$

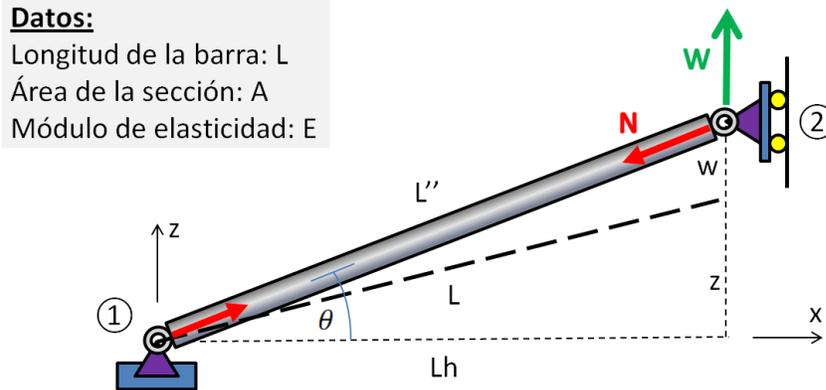


Figura 3. 2. Elemento de cercha con carga vertical.

Para estimar la deformación de la barra se puede recurrir al teorema de Pitágoras:

$$\varepsilon = \frac{((z + w)^2 + \bar{L}^2)^{1/2} - (z^2 + \bar{L}^2)^{1/2}}{(z^2 + \bar{L}^2)^{1/2}} \quad (3.2)$$

Mediante una aproximación por serie de Taylor, este valor de la deformación puede ser expresado de una manera simplificada como

$$\varepsilon = \left(\frac{z}{\bar{L}}\right)\left(\frac{w}{\bar{L}}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{w}{\bar{L}}\right)^2 \approx \left(\frac{z}{\bar{L}}\right)\left(\frac{w}{\bar{L}}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{w}{\bar{L}}\right)^2 \quad (3.3)$$

De la mecánica de los materiales se sabe que la fuerza normal en una barra está expresada por

$$N = EA\varepsilon = EA\left(\left(\frac{z}{\bar{L}}\right)\left(\frac{w}{\bar{L}}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{w}{\bar{L}}\right)^2\right) \quad (3.4)$$

Finalmente reemplazando (3.4) en (3.1) se tiene la relación matemática que gobierna el comportamiento de la carga W en función del desplazamiento w , es decir:

$$W = \frac{EA}{L^3}\left(z^2w + \frac{3}{2}zw^2 + \frac{1}{2}w^3\right) \quad (3.5)$$

Para ganar entendimiento acerca del significado físico de esta última expresión matemática se asigna a continuación en la figura 3.3 algunos datos numéricos al problema, también se ha dibujado la ecuación (3.5) para su interpretación. Inicialmente la barra se encuentra sin carga por lo que no tiene fuerza interna y presenta un color verde según el mapa de tensiones en colores de la zona inferior derecha de la figura (3.3) (no hay tracción ni compresión en la barra)

Datos:

Longitud de la barra, $L = 2500$
 Altura vertical, $z = 25$ mm
 Módulo E x Área: $E.A = 5e7$ N
 Increm. de despl. = -7.5 mm

$$W = \frac{EA}{L^3} \left(z^2 w + \frac{3}{2} z w^2 + \frac{1}{2} w^3 \right)$$

Desplz. w	Carga W
0.00	0.00
-7.50	-8.93
-15.00	-8.40
-22.50	-2.48
-30.00	4.80
-37.50	9.38
-45.00	7.20
-54.50	-11.58

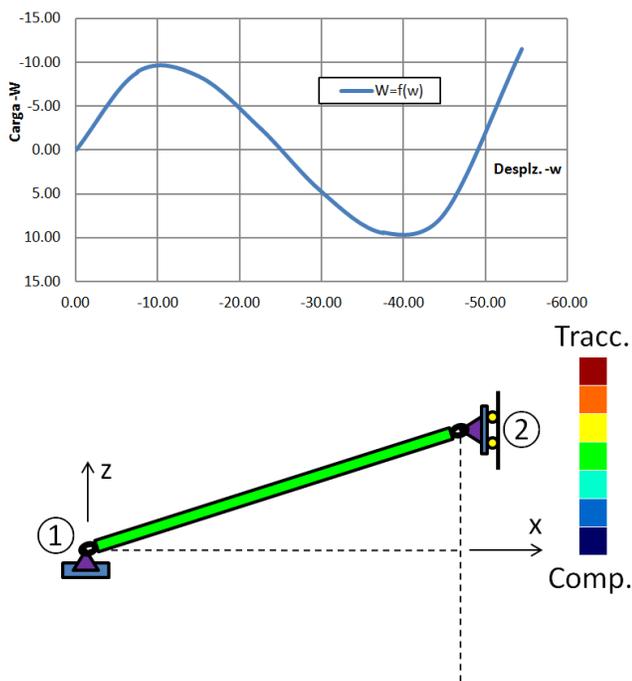


Figura 3. 3. Interpretación física de la ecuación (3.5): inicio sin carga.

Se aplica una carga de signo negativo, es decir hacia abajo en el nudo de la derecha donde está el único grado de libertad libre. Se incrementa esta carga hasta que se alcanza un valor muy cerca al valor de falla de la barra, en la figura 3.4 este valor se halla muy cerca del punto límite superior. La barra se encuentra muy comprimida (color azul fuerte) y corresponde con la figura 3.4. Al incrementarse la carga un poco más, la barra falla por compresión, en el gráfico de la ecuación (3.5) esto se evidencia como un punto límite, el cual una vez atravesado involucra la pérdida de soporte de carga, figura 3.5.

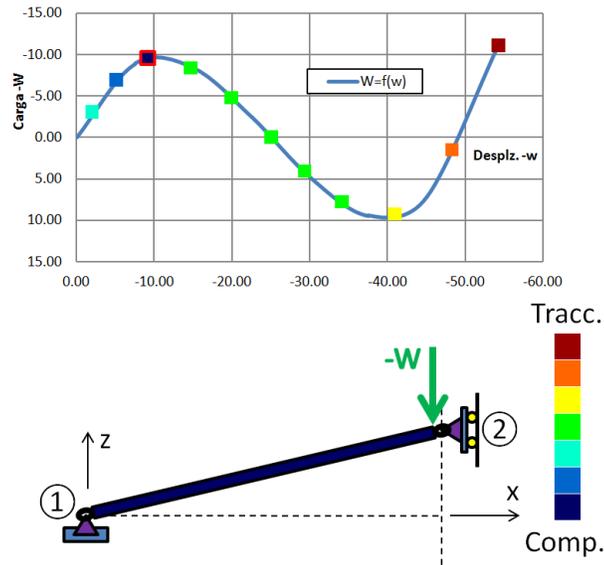


Figura 3. 4. Interpretación física de la ecuación (3.5): compresión máxima en la barra.

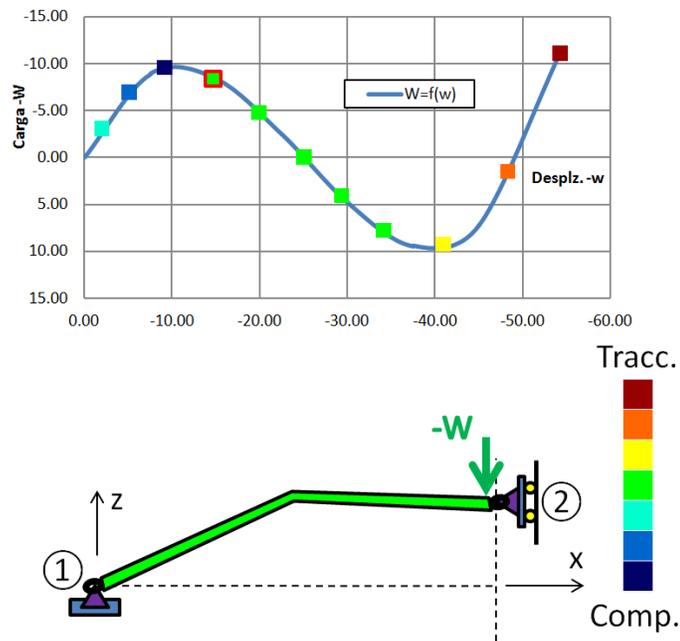


Figura 3. 5. Interpretación física de la ecuación (3.5): falla por compresión en la barra.

La estructura sufre un gran desplazamiento (puntos de color verde en la figura 3.6) y un reacondo geométrico hasta que encuentra una nueva posición de equilibrio, esto se aprecia en la figura 3.6 lado izquierdo. A partir de allí, la barra (que ahora está en tracción) vuelve a ganar capacidad para soportar carga, ver figura 3.6 lado derecho.

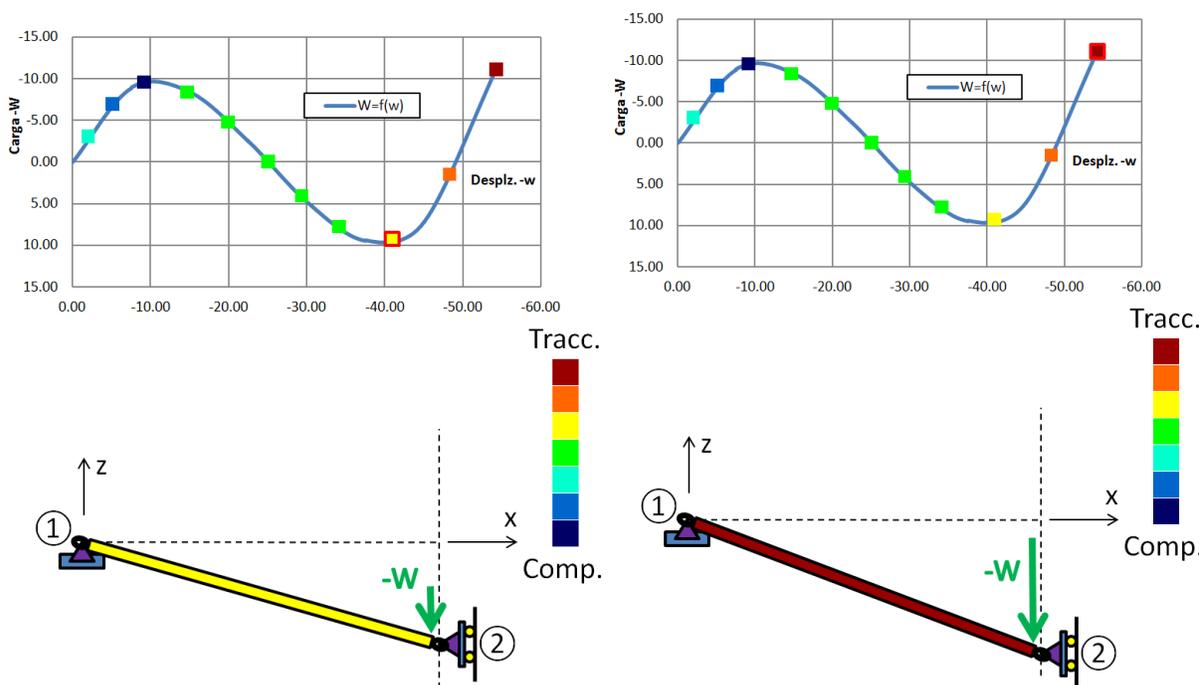


Figura 3. 6. Interp. de la ecuación (3.5): reacondo geométrico y nuevo estado de equilibrio.

En atención con la figura 3.7 se puede decir que así como en el análisis lineal la **matriz de rigidez** relaciona los cambios en la carga con los cambios en desplazamiento, en el análisis no-lineal se tiene a la **matriz de rigidez tangente** que relaciona pequeños cambios en la carga con pequeños cambios en desplazamiento. Para el presente ejemplo, partiendo de la ecuación (3.1) se puede obtener la matriz de rigidez tangente como:

$$K_t = \frac{dW}{dw} = \frac{(z+w)}{L} \frac{dN}{dw} + \frac{N}{L} \quad (3.6)$$

o en forma desarrollada:

$$K_t = \frac{EA}{L} \left(\frac{z}{L}\right)^2 + \frac{EA}{L} \left(\frac{2zw + w^2}{L^2}\right) + \frac{N}{L} \quad (3.7)$$

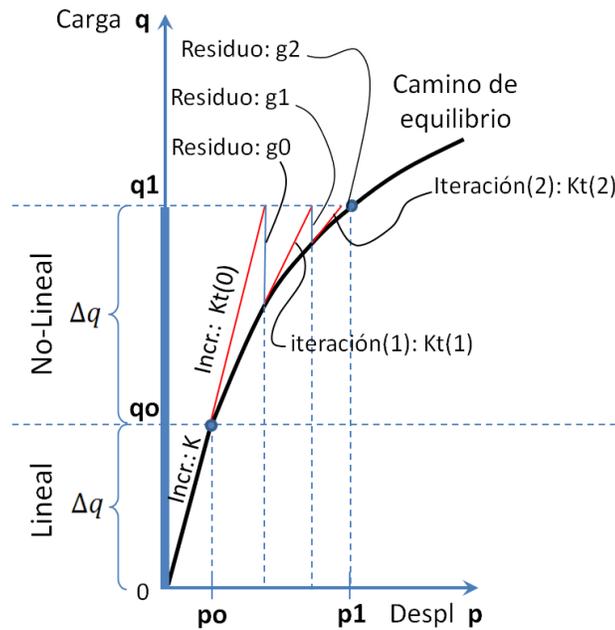


Figura 3. 7. Matriz de Rigidez y Matriz de Rigidez Tangente.

Si se hace la consideración de que esta rigidez es una matriz de rigidez, entonces ésta estará compuesta de la suma algebraica de tres matrices: el primer término corresponde a la matriz de rigidez lineal, el segundo término corresponde a la matriz de rigidez de grandes desplazamientos, y el último término se conoce como matriz de rigidez geométrica o de tensión inicial.

A continuación en la figura 3.8 se presenta en forma de tabla cada uno de los valores de las expresiones expuestas arriba dependientes del desplazamiento y el nivel de carga, donde se han adoptado valores numéricos para apreciar mejor la incidencia que tiene cada una de las matrices de rigidez que en conjunto suponen la matriz de rigidez tangente de la estructura, además se tiene una columna con los valores de la fuerza normal interna en la barra con lo que se puede comparar la carga límite a compresión de la ecuación (3.5) con el valor de la carga crítica obtenida mediante la formulación de pandeo elástico de Euler.

$$W = \frac{EA}{L^3} \left(z^2 w + \frac{3}{2} z w^2 + \frac{1}{2} w^3 \right)$$

$$N = EA \left(\left(\frac{z}{L} \right) \left(\frac{w}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L} \right)^2 \right)$$

$$Kt = \frac{EA}{L} \left(\frac{z}{L} \right)^2 + \frac{EA}{L} \left(\frac{2zw + w^2}{L^2} \right) + \frac{N}{L}$$

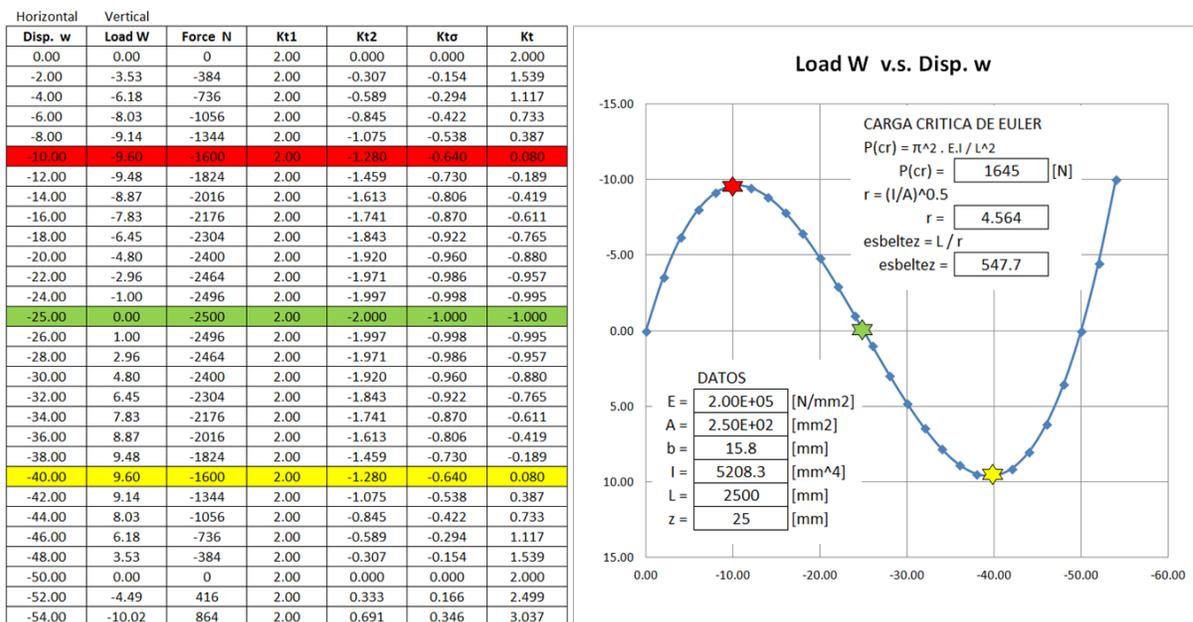


Figura 3. 8. Valores tabulados de desplazamiento, carga, fuerza normal, y rigidez.

Evidentemente el valor de la carga límite a compresión en la barra será algo mayor que 1,600 N como se muestra en la fila de color rojo de la tabla, que corresponde a la estrella roja del gráfico en el lado derecho de la figura 3.8. Esto coincide con el valor calculado con el enfoque de la carga crítica de Euler que arroja el valor de 1,645 N (efectivamente algo mayor que 1,600 N).

Una conclusión importante sobre este ejemplo es mencionar que a través del conocimiento profundo del comportamiento resistente de una estructura se pueden establecer variantes de diseño para perseguir mejorar el desempeño tanto pre-crítico como post-crítico. En la figura 3.9 se ha establecido una variante de diseño con la adición de un resorte lineal en el grado de libertad libre (resorte de color amarillo). Al observar que mejora el comportamiento hasta disminuir considerablemente el rebote hacia adelante se decide probar como una nueva

variante, un resorte más rígido (resorte de color púrpura) y se aprecia que se ha eliminado por completo la inestabilidad (se eliminó el rebote hacia adelante).

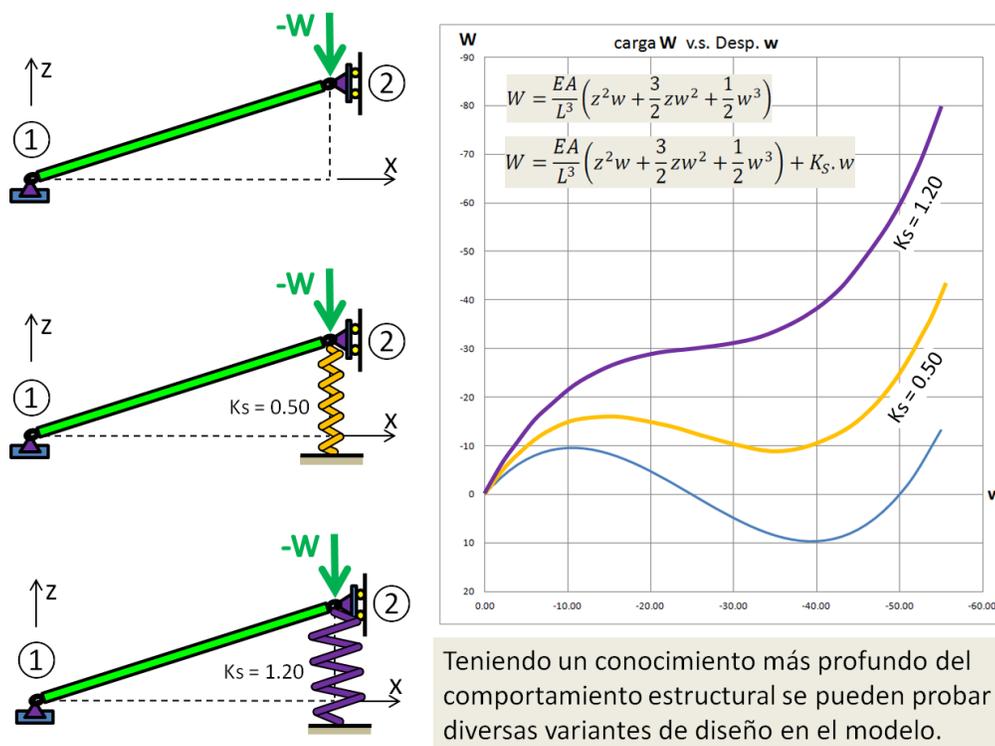


Figura 3. 9. Variantes de diseño para el elemento de un grado de libertad.

3.2.- Análisis de un elemento de cercha con dos grados de libertad.

Para continuar con el estudio, se tiene en la figura 3.10 la representación del mismo elemento simple de cercha del ejercicio anterior, pero ahora se ha liberado el movimiento horizontal en el nudo 1 (el nudo de la izquierda), de manera que se vuelve necesario adicionar al modelo el resorte vertical lineal del nudo 2.

Sea el vector de desplazamientos

$$\mathbf{P}^T = (u, w) \quad (3.8)$$

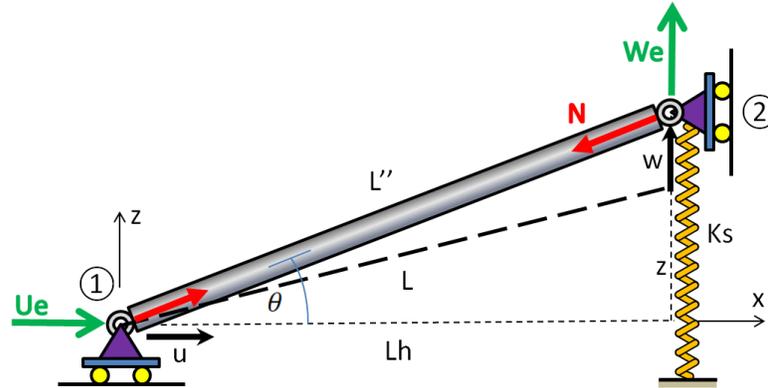


Figura 3. 10. Elemento de cercha con dos grados de libertad.

La deformación en la barra estará dada ahora por

$$\varepsilon = -\frac{u}{L} + \left(\frac{z}{L}\right)\left(\frac{w}{L}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{w}{L}\right)^2 \quad (3.9)$$

Se debe plantear las ecuaciones de equilibrio del sistema. Haciendo una sumatoria de fuerzas horizontales se obtiene

$$U_e + N \cos \theta \cong U_e + N = 0 \quad (3.10)$$

Y haciendo una sumatoria de fuerzas verticales

$$W_e = N \sin \theta + K_s w \cong \frac{N(z+w)}{L} + K_s w \quad (3.11)$$

Se puede expresar vectorialmente este equilibrio como

$$\mathbf{g} = \mathbf{q}_i - \mathbf{q}_e = \frac{N}{L} \begin{pmatrix} -L \\ z+w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ K_s w \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_e \\ W_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_i \\ W_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_e \\ W_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Donde \mathbf{g} es un “vector de fuerza desbalanceada”, \mathbf{q}_i es un vector de fuerza interna, y \mathbf{q}_e es el vector de fuerza externa. La fuerza axial N en la ecuación (3.12) se obtiene como

$$N = EA\varepsilon \quad (3.13)$$

donde ε se obtiene de la ecuación (3.9). Para la obtención del **predictor incremental** la fuerza interna $q_i(p)$ puede ser expandida por medio de una serie de Taylor

$$\mathbf{q}_i(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) = \mathbf{q}_i(\mathbf{p}) + \frac{\partial \mathbf{q}_i(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} \Delta\mathbf{p} \quad (3.14)$$

que puede ser expresado como

$$\mathbf{q}_i(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) - \mathbf{q}_i(\mathbf{p}) = \frac{\partial \mathbf{q}_i(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} \Delta\mathbf{p} \quad (3.15)$$

Se supone que existe equilibrio perfecto tanto en la configuración inicial \mathbf{p} como en la final $\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}$ por lo tanto esto se puede expresar como

$$\mathbf{q}_i(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) - \mathbf{q}_i(\mathbf{p}) = \mathbf{q}_e(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) - \mathbf{q}_e(\mathbf{p}) \quad (3.16)$$

y como $\mathbf{q}_e(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) - \mathbf{q}_e(\mathbf{p}) = \Delta\mathbf{q}_e$ se tendrá:

$$\Delta\mathbf{q}_e = \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial \mathbf{p}} \Delta\mathbf{p} = \mathbf{K}_t \Delta\mathbf{p} \quad (3.17)$$

vectorialmente:

$$\begin{pmatrix} \Delta U_e \\ \Delta W_e \end{pmatrix} = \mathbf{K}_t \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta w \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

donde la matriz de rigidez resulta ser:

$$K_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_{i1}}{\partial p_1} & \frac{\partial q_{i1}}{\partial p_2} \\ \frac{\partial q_{i2}}{\partial p_1} & \frac{\partial q_{i2}}{\partial p_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_i}{\partial u} & \frac{\partial U_i}{\partial w} \\ \frac{\partial W_i}{\partial u} & \frac{\partial W_i}{\partial w} \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -\beta \\ -\beta & \beta^2 + K_s L / EA \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & N/L \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

con

$$\beta = \frac{z + w}{L} \quad (3.20)$$

La primera parte del último miembro en la ecuación (3.19) representa la matriz de rigidez lineal en conjunto con la matriz de rigidez de desplazamiento inicial, y la segunda parte representa la matriz de rigidez geométrica o de tensión inicial. El procedimiento incremental requiere entonces (partiendo de (3.17)) la aplicación de:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{K}_t^{-1} \Delta \mathbf{q}_e \quad (3.21)$$

Ahora, para obtener el **corrector iterativo**, se parte de una expansión de Taylor truncada aplicada al vector de fuerza desbalanceada

$$\mathbf{g}_n = \mathbf{g}_o + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{p}} \delta \mathbf{p} = \mathbf{g}_o + \mathbf{K}_t \delta \mathbf{p} \quad (3.22)$$

En forma desarrollada:

$$\mathbf{g}_n = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}_o + \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial p_1} & \frac{\partial g_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial p_1} & \frac{\partial g_2}{\partial p_2} \end{bmatrix}_o \begin{pmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Este vector de fuerza desbalanceada debe igualarse a cero, es decir $g_n = 0$, con lo cual se obtiene el desplazamiento iterativo corrector:

$$\delta \mathbf{p} = - \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{p}} \right)^{-1} \mathbf{g}_o = -\mathbf{K}_t^{-1} \mathbf{g}_o \quad (3.24)$$

Con la matriz de rigidez tangente siendo:

$$K_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial p_1} & \frac{\partial g_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial p_1} & \frac{\partial g_2}{\partial p_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_{i1}}{\partial p_1} & \frac{\partial q_{i1}}{\partial p_2} \\ \frac{\partial q_{i2}}{\partial p_1} & \frac{\partial q_{i2}}{\partial p_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_i}{\partial u} & \frac{\partial U_i}{\partial w} \\ \frac{\partial W_i}{\partial u} & \frac{\partial W_i}{\partial w} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Es decir que la matriz de rigidez tangente queda igual que aquella desarrollada para el predictor incremental.

3.3.- Análisis de un elemento de cercha con n grados de libertad.

Para el caso de que se tenga n grados de libertad, simplemente debe hacerse una extensión de los casos anterior expresando todo en lenguaje matricial y vectorial. El elemento de cercha al que se refiere el presente desarrollo aparece en la figura 3.11.

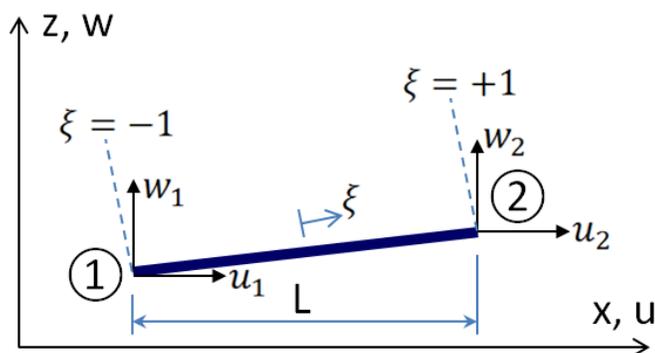


Figura 3. 11. Elemento de cercha en sistema local y global.

Sea el vector de desplazamientos nodales:

$$p^T = (u_1 \quad u_2 \quad w_1 \quad w_2) \quad (3.26)$$

La geometría del elemento puede obtenerse por interpolación de funciones de forma lineales que obedecen a la coordenada natural ξ mostrada en la figura 3.11.

$$GEOMETRIA: \quad x = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - \xi \\ 1 + \xi \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad z = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - \xi \\ 1 + \xi \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

De igual manera el campo de desplazamientos en el elemento se obtiene por interpolación con las mismas funciones de forma anteriores, esto es:

$$DESPLAZAMIENTOS: \quad u = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - \xi \\ 1 + \xi \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad w = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - \xi \\ 1 + \xi \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Lo que significa que se está usando una formulación isoparamétrica.

La fuerza interna en la barra está nuevamente expresada por:

$$N = EA\varepsilon \quad (3.29)$$

Pero ahora la deformación ε de la barra está dada por

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} + \left(\frac{dz}{dx} \right) \left(\frac{dw}{dx} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \quad (3.30)$$

Un incremento en esta deformación correspondiente a un incremento en desplazamiento resulta:

$$\Delta\varepsilon = \frac{d\Delta u}{dx} + \left(\frac{dz}{dx} + \frac{dw}{dx} \right) \frac{d\Delta w}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\Delta w}{dx} \right)^2 \quad (3.31)$$

De las expresiones de interpolación se puede obtener

$$\frac{dx}{d\xi} = \frac{(x_2 - x_1)}{2} = \frac{L}{2} \quad (3.32)$$

De (3.28) aplicando la regla de la cadena y la ecuación (3.32) se tiene:

$$\frac{du}{dx} = \frac{du}{d\xi} \frac{d\xi}{dx} = \frac{(u_2 - u_1)}{L} = \frac{u_{21}}{L} \quad (3.33)$$

Y de manera análoga:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{w_{21}}{L}, \quad \frac{dz}{dx} = \frac{z_{21}}{L} \quad (3.34)$$

Reemplazando (3.33) y (3.34) en (3.30) se llega a

$$\varepsilon = \frac{u_{21}}{L} + \left(\frac{z_{21}}{L}\right)\left(\frac{w_{21}}{L}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{w_{21}}{L}\right)^2 \quad (3.35)$$

El incremento de deformación de (3.31) resulta

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{L}\Delta u_{21} + \frac{1}{L^2}(z_{21} + w_{21})\Delta w_{21} + \frac{1}{2L^2}\Delta w_{21}^2 \quad (3.36)$$

Si se aplica el conjunto de desplazamientos nodales virtuales

$$\delta\mathbf{p}_v^T = (\delta u_{v1}, \delta u_{v2}, \delta w_{v1}, \delta w_{v2}) \quad (3.37)$$

La variación en la deformación queda

$$\delta\varepsilon_v = \frac{1}{L}\delta u_{v21} + \frac{1}{L^2}(z_{21} + w_{21})\delta w_{v21} = \mathbf{b}^T \delta\mathbf{p}_v \quad (3.38)$$

Donde

$$\mathbf{b}^T = \frac{1}{L}(-1, 1, -\beta, \beta) \quad (3.39)$$

Con

$$\beta = \frac{z_{21} + w_{21}}{L} \quad (3.40)$$

Se puede ahora emplear la expresión del trabajo virtual para establecer las ecuaciones de equilibrio del sistema:

$$TV = \int \sigma \delta \varepsilon_v dV - \mathbf{q}_e^T \delta \mathbf{p}_v = 0 \quad (3.41)$$

Y expresando este trabajo virtual en función del desplazamiento (3.37) se tiene:

$$TV = \delta \mathbf{p}_v^T \mathbf{g} \Leftrightarrow \delta \mathbf{p}_v^T (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_e) \Leftrightarrow \delta \mathbf{p}_v^T \left(\int \sigma \mathbf{b} dV - \mathbf{q}_e \right) = 0 \quad (3.42)$$

Lo cual significa que

$$\mathbf{q}_i = \int \sigma \mathbf{b} dV = NL\mathbf{b} \quad (3.43)$$

Para que exista equilibrio, el vector de fuerza desbalanceada debe ser cero para cualquier desplazamiento virtual, luego

$$\mathbf{g} = \mathbf{q}_i - \mathbf{q}_e = 0 \quad (3.44)$$

Aplicando una expansión de Taylor truncada para \mathbf{g}

$$\mathbf{g}_n = \mathbf{g}_o + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{p}} \delta \mathbf{p} = \mathbf{g}_o + \mathbf{K}_t \delta \mathbf{p} \quad (3.45)$$

Por lo tanto

$$\mathbf{K}_t = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial \mathbf{p}} \quad (3.46)$$

$$\mathbf{K}_t = L\mathbf{b} \frac{dN}{d\mathbf{p}} + LN \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \mathbf{p}} \quad (3.47)$$

$$\mathbf{K}_t = EAL\mathbf{b}\mathbf{b}^T + LN \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \mathbf{p}} \quad (3.48)$$

Que en forma desarrollada sería

$$\mathbf{K}_t = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 & \beta & -\beta \\ -1 & 1 & -\beta & \beta \\ \beta & -\beta & \beta^2 & -\beta^2 \\ -\beta & \beta & -\beta^2 & \beta^2 \end{bmatrix} + \frac{N}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

En el segundo miembro la primera parte corresponde a la matriz de rigidez lineal combinada con la matriz de rigidez de grandes desplazamientos, mientras que la segunda parte corresponde a la matriz de rigidez geométrica o de tensión inicial.

CAPITULO IV: FUNCIONES DE MEDIDAS DE DEFORMACIÓN PARA GRANDES DESPLAZAMIENTOS Y GRANDES DEFORMACIONES

4.1.- Introducción

En el desarrollo expuesto en el capítulo anterior se mantuvo siempre la suposición de que la coordenada z del nudo de la derecha era pequeña (figura 4.1), es decir la inclinación de la barra denotada por el ángulo con la horizontal (el ángulo θ en la figura 4.1) es pequeña, y por lo tanto no existe una gran diferencia efectiva entre la longitud inicial sin deformar y la longitud final deformada (longitudes L_o y L_n respectivamente en la figura 4.1).

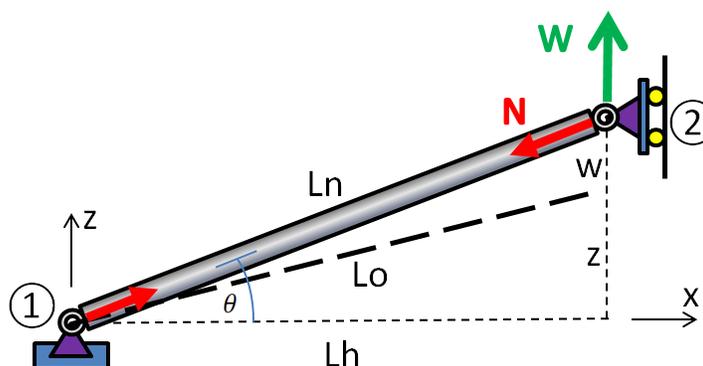


Figura 4. 1. Elemento de cercha

La expresión de deformación

$$\varepsilon = \frac{L_n - L_o}{L_o} \quad (4.1)$$

involucra una pequeña diferencia entre dos números relativamente grandes, lo cual no es lo más recomendable en análisis numérico. Si en el análisis se estima tener grandes desplazamientos o grandes deformaciones es conveniente definir funciones de medidas de deformación que computacionalmente tengan un mejor desempeño, y que permanezcan

válidas para cualquier valor que puedan adoptar las cantidades mostradas en la figura 4.1 (principalmente z , w y θ).

Para el desarrollo siguiente debe definirse previamente algunos elementos:

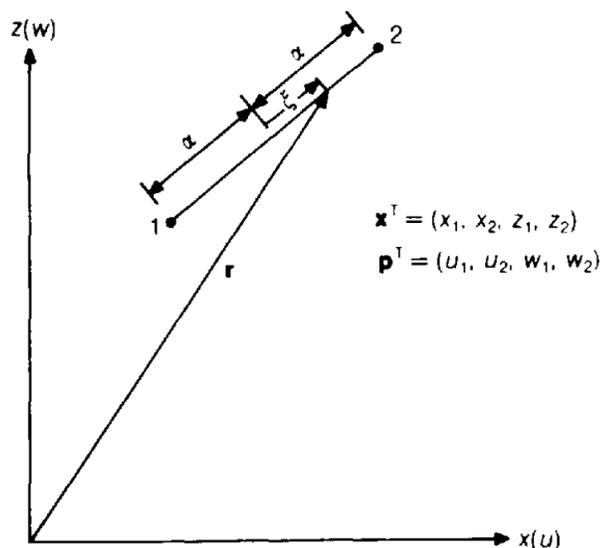


Figura 4. 2. Elemento de cercha: geometría y coordenada adimensional [9]

Sea el vector de coordenadas iniciales:

$$\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, z_1, z_2) \quad (4.2)$$

y sea el vector de desplazamientos nodales

$$\mathbf{p}^T = (u_1, u_2, w_1, w_2) \quad (4.3)$$

Las coordenadas nodales equivalentes serán:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{p} \quad (4.4)$$

Para las diferencias de coordenadas se tiene:

Tesis de Maestría -Capítulo IV: Medidas de Deformación para
Grandes Desplazamientos y Grandes Deformaciones-

$$x_{21} = x_2 - x_1, \quad z_{21} = z_2 - z_1 \quad (4.5)$$

O colectivamente

$$\mathbf{x}_{21}^T = (x_{21}, z_{21}) \quad (4.6)$$

Y para las diferencias en desplazamientos

$$u_{21} = u_2 - u_1, \quad w_{21} = w_2 - w_1 \quad (4.7)$$

Es igual que en el caso anterior

$$\mathbf{p}_{21}^T = (u_{21}, w_{21}) \quad (4.8)$$

La longitud inicial o antigua (al cuadrado) de la barra es

$$L_o^2 = (x_{21}^2 + z_{21}^2) = \mathbf{x}_{21}^T \mathbf{x}_{21} \quad (4.9)$$

Y la longitud final, actual o nueva (al cuadrado) de la barra es

$$L_n^2 = (x_{21} + u_{21})^2 + (z_{21} + w_{21})^2 = (\mathbf{x}_{21} + \mathbf{p}_{21})^T (\mathbf{x}_{21} + \mathbf{p}_{21}) \quad (4.10)$$

Sea el cociente de alargamiento unidireccional [13]:

$$\Lambda = \frac{L_n}{L_o} \quad (4.11)$$

Serán definidas ahora algunas medidas de deformación como funciones del cociente de alargamiento unidireccional.

4.2.- Deformación Ingenieril. Llamada también deformación nominal o deformación de Biot. Se utiliza para pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones. Está definida como:

$$\varepsilon_E = f_E(\Lambda) = (\Lambda - 1) \quad (4.12)$$

Es decir

$$\varepsilon_E = \frac{L_n - L_o}{L_o} \quad (4.13)$$

Definiendo para la longitud inicial y para la longitud final:

$$L_o^2 = 4\alpha_o^2 = (x_{21}^2 + z_{21}^2) = \mathbf{x}_{21}^T \mathbf{x}_{21} \quad (4.14)$$

$$L_n^2 = 4\alpha_n^2 = (x_{21} + u_{21})^2 + (z_{21} + w_{21})^2 = (\mathbf{x}_{21} + \mathbf{p}_{21})^T (\mathbf{x}_{21} + \mathbf{p}_{21}) \quad (4.15)$$

Se puede expresar la deformación como

$$\varepsilon = \frac{\alpha_n - \alpha_o}{\alpha_o} \quad (4.16)$$

Luego con coordenadas actualizadas

$$\alpha_n^2 = (\mathbf{x} + \mathbf{p})^T \mathbf{A}(\mathbf{x} + \mathbf{p}) = \mathbf{x}'^T \mathbf{A} \mathbf{x}' \quad (4.17)$$

y la variación de la deformación queda

$$\mathbf{b} = \frac{\partial \varepsilon^T}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{\alpha_o} \frac{\partial \alpha_n^T}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{\alpha_o \alpha_n} \mathbf{A} \mathbf{x}' = \frac{1}{4\alpha_o \alpha_n} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \quad (4.18)$$

Para la obtención del vector de fuerza interna se parte del principio del trabajo virtual aplicado a la configuración original o de referencia y se llega a:

$$\mathbf{q}_i = \int \sigma \frac{\partial \varepsilon^T}{\partial \mathbf{p}} dV_o = 2A_o \alpha_o \sigma \mathbf{b} = \frac{\sigma A_o}{2\alpha_n} \mathbf{c}(\mathbf{x}') = \lambda \frac{A_o \sigma}{2\alpha_o} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \quad (4.19)$$

con

$$\lambda = \left(\frac{\alpha_o}{\alpha_n} \right). \quad (4.20)$$

Y finalmente para obtener la matriz de rigidez tangente se tiene

$$\Delta \varepsilon = \mathbf{b}_1(\mathbf{x}')^T \Delta \mathbf{p} + \frac{1}{2\alpha_o^2} \Delta \mathbf{p}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{p} \quad (4.29)$$

Si se aplica una pequeña variación virtual de desplazamiento δp_v en lugar de Δp , y se descarta el último término (por ser la variación muy pequeña):

$$\delta \varepsilon_v = \mathbf{b}_1(\mathbf{x}')^T \delta \mathbf{p}_v. \quad (4.30)$$

Para la obtención del vector de fuerza interna se parte del principio del trabajo virtual aplicado a la configuración original o de referencia:

$$\sum_e \delta \mathbf{p}_v^T \mathbf{q}_i = \sum_e \int \sigma_G \delta \varepsilon_v dV_o = \sum_e \delta \mathbf{p}_v^T \int \sigma_G \mathbf{b} dV_o \quad (4.31)$$

$$\mathbf{q}_i = \int \sigma_G \mathbf{b}_1(\mathbf{x}') dV_o = 2A_o \sigma_G \alpha_o \mathbf{b}_1(\mathbf{x}') \quad (4.32)$$

La tensión σ_G es trabajo conjugada con la variación de deformación de Green $\delta \varepsilon_G$. esta tensión es conocida como la "segunda tensión de Piola-Kirchhoff" en el contexto de medios continuos. Finalmente, para la matriz de rigidez tangente se tiene:

$$\mathbf{K}_t = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial \mathbf{p}} \quad (4.33)$$

$$\mathbf{K}_t = 2\alpha_o A_o \mathbf{b} \frac{\partial \sigma_G}{\partial \mathbf{p}} + 2\alpha_o A_o \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \mathbf{p}} \sigma_G \quad (4.34)$$

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{K}'_{t1} + \mathbf{K}_{t\sigma} \quad (4.35)$$

Siendo la rigidez lineal más la rigidez debida a grandes desplazamientos:

$$\mathbf{K}'_{t1} = \frac{EA_o}{8\alpha_o^3} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \mathbf{c}(\mathbf{x}')^T \quad (4.36)$$

y la rigidez geométrica ó de tensión inicial:

$$\mathbf{K}_{t\sigma} = \frac{2A_o \sigma_G}{\alpha_o} \mathbf{A} \quad (4.37)$$

4.4.- Deformación Logarítmica. Llamada también deformación de Hencky. Se la emplea sobre todo en problemas de grandes deformaciones, como plasticidad de metales, etc [13]. Se define como

$$\varepsilon_L = f_L(\Lambda) = Ln(\Lambda) \quad (4.38)$$

$$\varepsilon_L = Ln\left(\frac{L_n}{L_o}\right) \quad (4.39)$$

Con las definiciones introducidas por (4.14) y (4.15) esto es

$$\varepsilon = Log_e\left(\frac{\alpha_n}{\alpha_o}\right). \quad (4.40)$$

La variación de esta deformación resulta

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\partial \alpha_n}{\partial \mathbf{p}} = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{p}} \quad (4.41)$$

con

$$\frac{\partial \varepsilon^T}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{b} = \frac{1}{\alpha_o} \frac{\partial \alpha_n^T}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{\alpha_o \alpha_n} \mathbf{A} \mathbf{x}' = \frac{1}{4\alpha_o \alpha_n} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \quad (4.42)$$

Para la obtención del vector de fuerza interna se parte del principio del trabajo virtual aplicado a la configuración nueva o actual:

$$\mathbf{q}_i = \int \sigma \frac{\partial \varepsilon^T}{\partial \mathbf{p}} dV_n = \frac{\lambda A_n \sigma}{2\alpha_o} \mathbf{c}(\mathbf{x}') = \lambda^{1+2\nu} \frac{A_o \sigma}{2\alpha_o} \mathbf{c}(\mathbf{x}'). \quad (4.43)$$

Se ha asumido que

$$\frac{A_n}{A_o} = \left(\frac{\alpha_o}{\alpha_n}\right)^{2\nu} = \lambda^{2\nu}. \quad (4.44)$$

Con lo cual la solución puede no incluir cambio de volumen (con $\nu = 0.5$) o puede sí incluirlo (si $\nu \neq 0.5$).

Finalmente para la obtención de la matriz de rigidez tangente, la diferenciación de (4.43) lleva a

$$K_t = K_{t1} + K_{t\sigma1} + K_{t\sigma2} \quad (4.45)$$

siendo

$$K_{t1} = \frac{EA_o \lambda^{3+2\nu}}{8\alpha_o^4} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \mathbf{c}(\mathbf{x}')^T = \frac{EA_n \lambda^3}{8\alpha_o^3} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \mathbf{c}(\mathbf{x}')^T. \quad (4.46)$$

$$K_{t\sigma1} = \frac{2\sigma A_o \lambda^{1+2\nu}}{\alpha_o} \mathbf{A} = \frac{2\sigma A_n \lambda}{\alpha_o} \times \mathbf{A}. \quad (4.47)$$

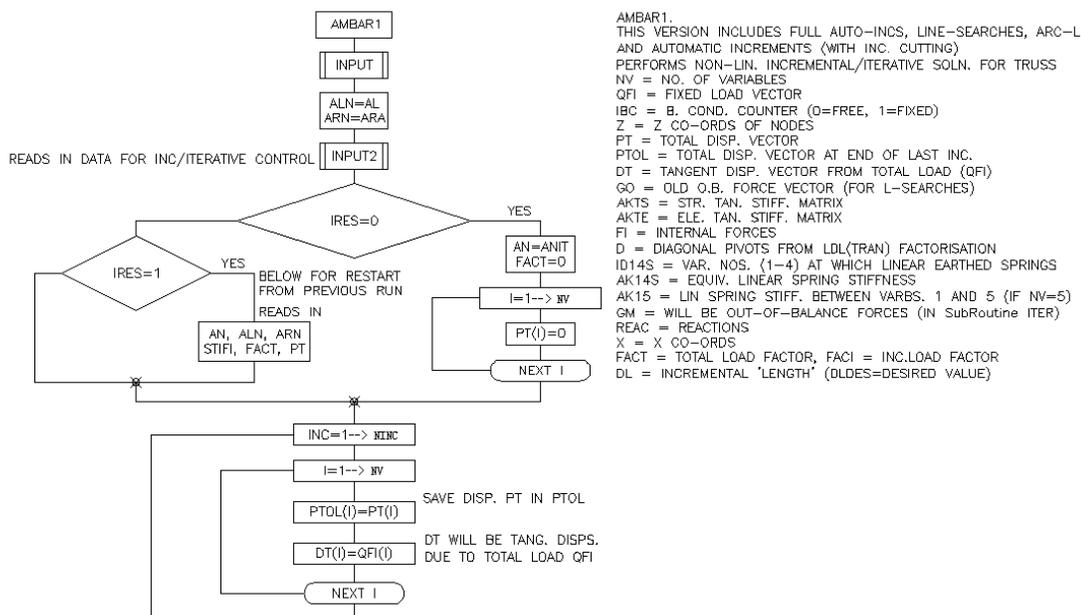
$$K_{t\sigma2} = -\frac{(1+2\nu)\sigma A_o^{3+2\nu}}{8\alpha_o^3} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \mathbf{c}(\mathbf{x}')^T = -\frac{(1+2\nu)\sigma A_n \lambda^3}{8\alpha_o^3} \mathbf{c}(\mathbf{x}') \mathbf{c}(\mathbf{x}')^T. \quad (4.48)$$

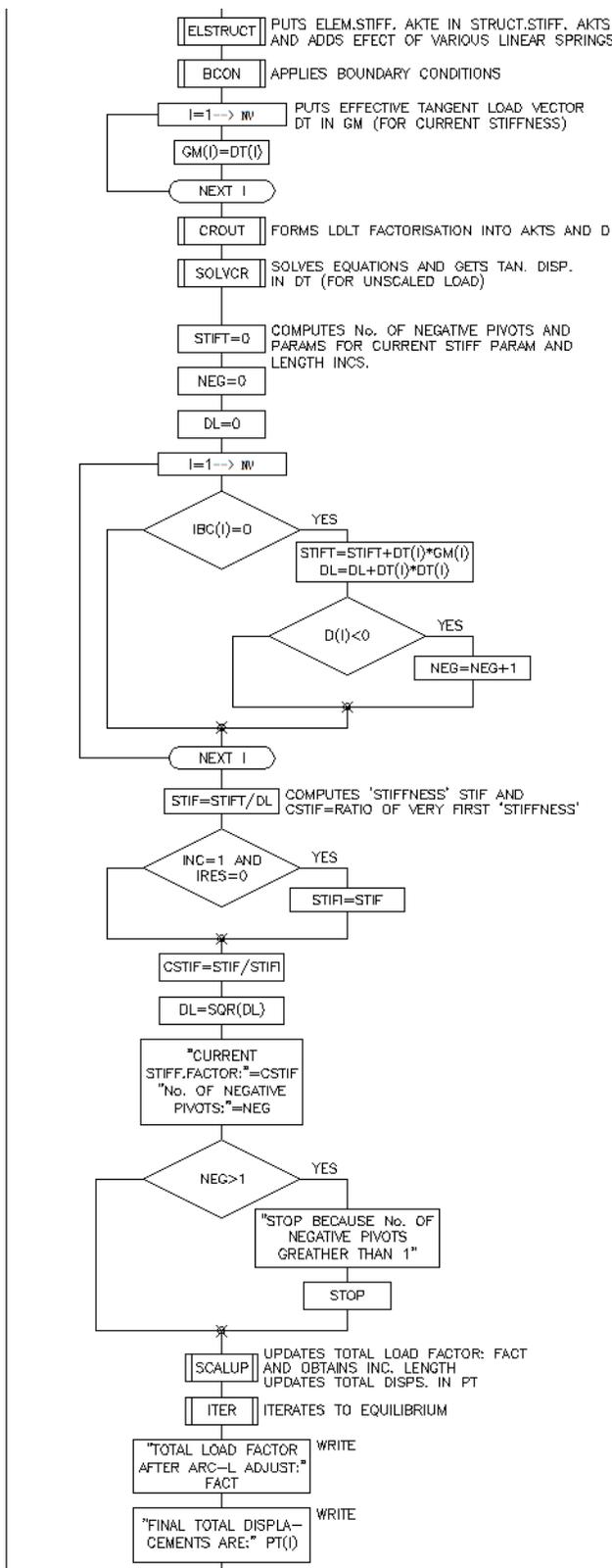
CAPÍTULO V: PROPUESTA DEL ESTUDIO

5.1.- Programa AMBAR

El presente trabajo ha sido construido bajo la perspectiva de organizar todas las teorías expuestas a lo largo de los capítulos I, II, III y IV, y conseguir de esta manera un programa de computadora que permita observar el desempeño de todas las herramientas matemáticas estudiadas. El módulo del programa principal se llama AMBAR (Análisis de Modelos de Barras Articuladas). Este programa (figura 5.1) incluye:

1. Método Newton-Raphson (Completo y Modificado)
2. Método de Líneas de Búsqueda
3. Método de Longitud de Arco
4. Incrementos automáticos
5. Corte de incremento automático
6. Parámetro de Rigidez Actual
7. Cambio automático hacia el Método de Longitud de Arco
8. Aceleraciones para el método Newton Raphson Modificado
9. Captura de Puntos Singulares
10. Cambio de Ramificación en puntos de Bifurcación
11. Reinicio desde una corrida previa





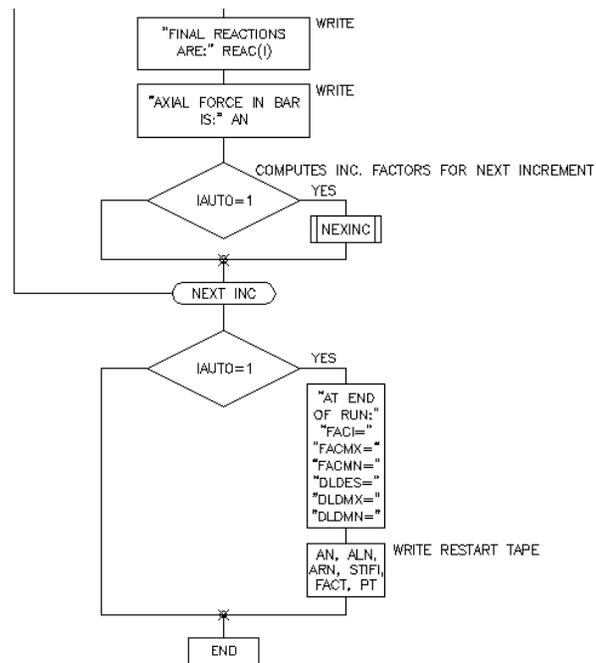


Figura 5. 1. Diagrama de flujo para el programa principal AMBAR.

El programa está escrito en lenguaje VBA y se ejecuta dentro del entorno del conocido programa MS Excel. Se aprovecha de este modo a los objetos que vienen dentro del Excel como son los gráficos tipo "chart" y las hojas electrónicas "worksheets".

5.2.- Ejemplos desarrollados con AMBAR.

Se desarrollan un total de cinco ejemplos con el fin de apreciar las diferentes características del programa propuesto.

5.2.1.- Cercha "baja" bidimensional de dos barras.

Como primer paso hacia el desarrollo de este ejemplo, se aplica inicialmente sólo el método de Newton-Raphson completo (ITERTY=1), y para la carga propuesta se aprecia el desempeño en base a la cantidad de iteraciones que se requieren para la convergencia en diferentes niveles de incremento de la carga.

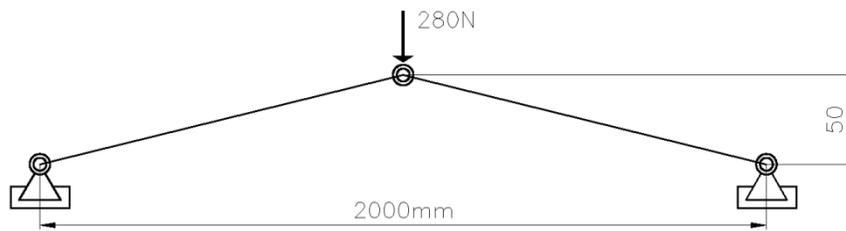


Figura 5. 2. Dimensiones para el ejemplo de cercha baja bidimensional.

La vista de la pantalla principal se muestra en la figura 5.3, mientras que los datos necesarios se introducen como en la figura 5.4.

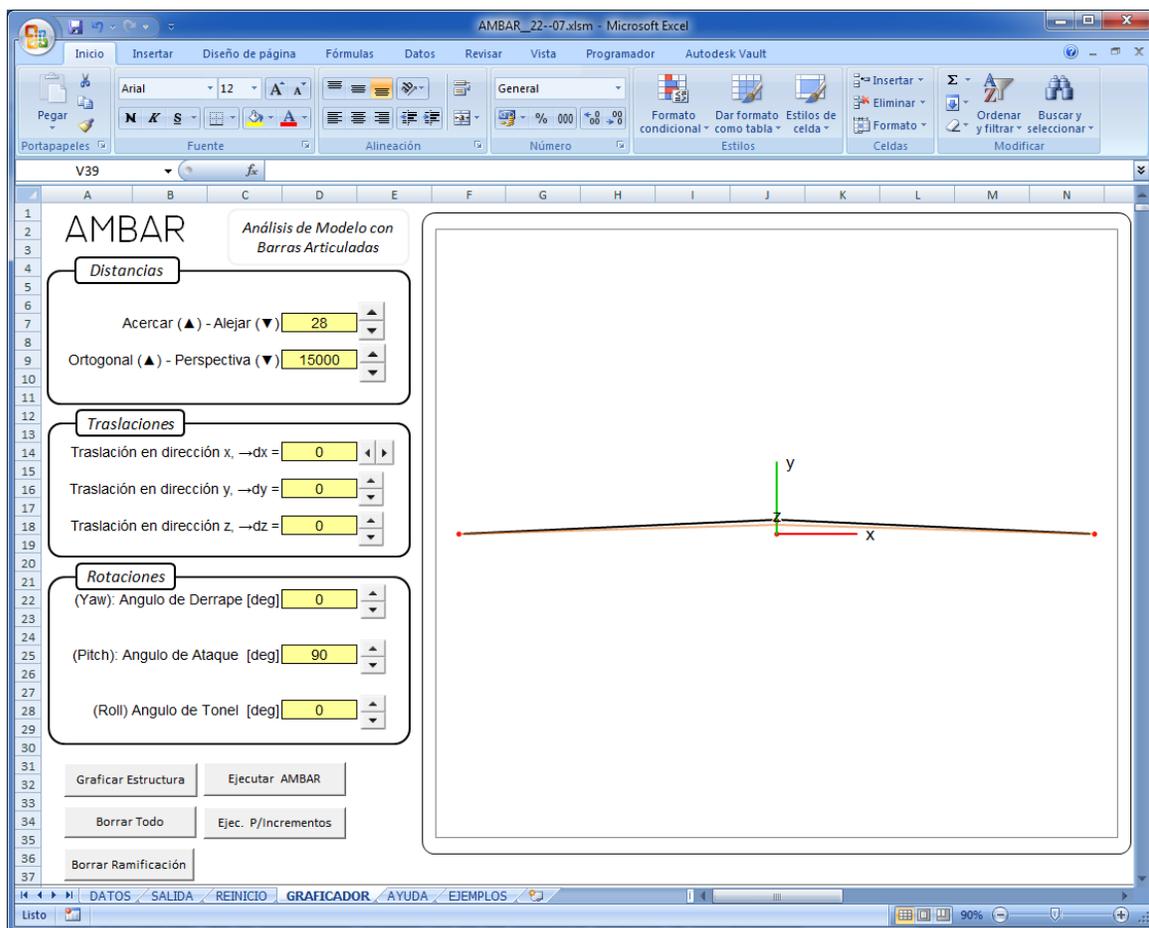


Figura 5. 3. Vista de la pantalla principal para el ejemplo de cercha baja bidimensional.

Input Program AMBAR
7.2.1.-Cercha Baja Bidimensional de Dos Barras
START

0

GENERAL DATA

NV	NE	NBCON	NLOAD	NMATE	NANIT	NDIM	NOUT
6	2	2	1	0	0	2	1

SPECIFIC DATA

ITYEL	POISS	E	ANIT	NDSP
2	0	200000	0	0

ELEMENTS WITH DIFERENT MATERIAL

0	0
---	---

ELEMENTS WITH DIFERENT INITIAL INTERNAL FORCE

0	0
---	---

NODAL COORDINATES

1	-1000	0	
2	0	50	
3	1000	0	

ELEMENT CONNECTIVITY AREA

1	1	2	25
2	2	3	25

LOADINGS

2	0	-280	
---	---	------	--

BOUNDARY CONDITIONS

1	1	1	
3	1	1	

OUTPUT VARIABLES

4							
---	--	--	--	--	--	--	--

EARTHED SPRING

--	--

FACI	NINC	IWRIT	IAUTO	IARC	ILOAD
0.04	90	0	0	0	1

IACC	IRES	IBRAC	ICRIT	IBRSW	IROW
0	0	0	0	0	0

ICVCK	BETOK	ITERTY	NITMAX	NLSMX	EPSI	SHIF
1	1.00E-06	1	21	0	1.00E-05	0

IDES	FACMX	FACMN	ISWCH	ICORT	IPRED
3	0.08	0.01	0	0	0

CSTIFFS

0.7

DLDES	DLMAX	DLMIN
0.5	3	1

PERMLS	AMPMX	ETMXA	ETMNA
0.8	5	25	0.01

R1C	R2C
3.5	0.3

Figura 5. 4. Pantalla de introducción de datos del ejemplo 5.2.1.

La carga total de 280N se pretende aplicar mono tónicamente en un total de 25 incrementos (con FACI=0.04). En el incremento número 22 no se consigue alcanzar la convergencia requerida (BETOK=1E-6) dentro de la cantidad máxima de iteraciones de equilibrio permitidas que es 21 para este ejemplo (NITMAX=21). El programa advierte esta situación

mostrando un mensaje crítico (figura 5.5) que obliga a abortar el análisis debido a que en esta primer corrida no se ha considerado la característica de incrementos automáticos (IAUTO=0) la cual también realiza el recorte de un incremento en situaciones como esta. El factor de carga alcanzado hasta antes de la falla de convergencia es $\lambda = 0.84$.

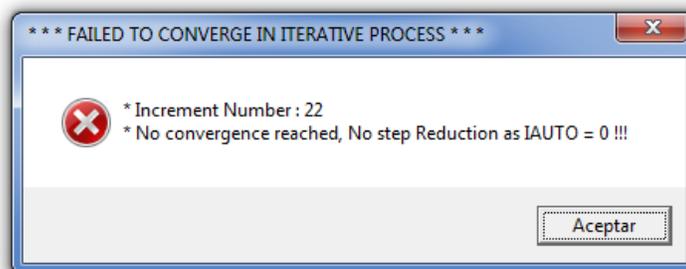


Figura 5. 5. Mensaje de error indicando la salida obligada del programa.

En la siguiente corrida se activa la opción de incrementos automáticos (IAUTO=1) considerando un factor de incremento máximo de 0.08 y uno mínimo de 0.01 (FACMX y FACMN respectivamente) con un número de iteraciones necesarias de 3 en lo posible (IDES=3). En esta corrida, no se alcanza la convergencia en el incremento número 12 y se realiza un recorte con lo que se puede seguir adelante, hasta que en el incremento número 14, (con el anterior $\lambda = 0.857$) se produce un nuevo recorte, pero incluso con el factor de incremento mínimo no se alcanza la convergencia, por lo que el programa advierte con un mensaje que ya no es posible reducir más el paso del factor de carga y la corrida se cancela.

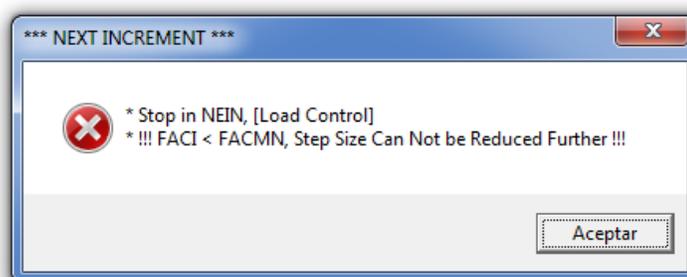


Figura 5. 6. Mensaje indicando que ya no se puede reducir más el paso de incremento de carga.

El siguiente recurso obvio es aumentar el número de iteraciones permitidas por incremento, pero se corre el riesgo de que la convergencia sea alcanzada en algún punto de un camino

de equilibrio falso, según se ha visto en el capítulo II. De esta manera, en la siguiente corrida, con NITMAX=50 se consigue sobrepasar el factor de carga anterior y finalmente se alcanza (la convergencia) $\lambda = 1$, lo que significa que se ha aplicado toda la carga de 280N.

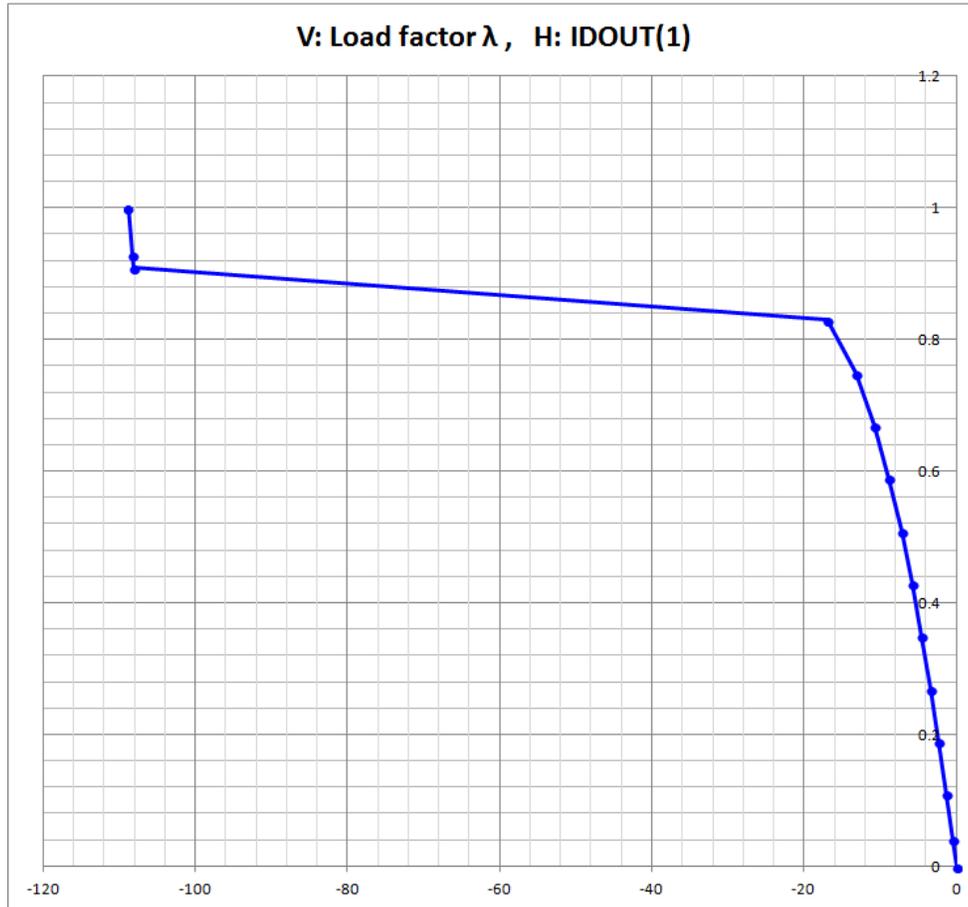


Figura 5. 7. Camino de equilibrio del ejemplo 5.2.1 bajo control de carga con incrementos automáticos.
Vertical: factor de carga; Horizontal: Desplazamiento vertical del nudo central cargado.

En la figura 5.7 se aprecia el camino de equilibrio obtenido en la última corrida, donde se plotea en el eje vertical el factor de carga λ y en el eje horizontal el desplazamiento vertical en mm del nudo central cargado. Cuando la carga se aplica en **incrementos de tiempo**, la gráfica toma el nombre de "respuesta tiempo-historia" ("Time-History Response" en inglés), sin embargo, en este trabajo el análisis se considera independiente del tiempo y la carga se aplica simplemente en **incrementos de carga**. El gran "salto" de más de 90mm en el desplazamiento se explica como la súbita pérdida de rigidez del sistema y su precipitación

hacia una nueva configuración de equilibrio, en la cual las barras que inicialmente estaban en compresión, ahora están sometidas a tracción. En la figura 5.8 se aprecia en líneas negras la estructura sin carga, y en líneas cafés la estructura deformada con $\lambda = 1$.

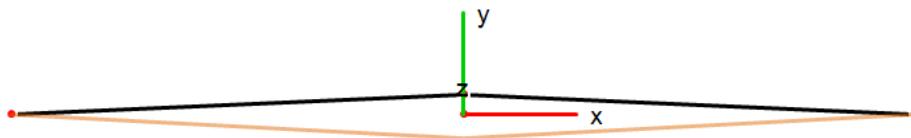


Figura 5. 8. Estructura original y deformada del problema 5.2.1.

La siguiente característica por apreciar es el cambio automático hacia el método de longitud de arco (ISWCH=1), para lo cual se establece un valor de parámetro de rigidez comparativa de 0.4 (CSTIFS=0.4) por debajo del cual el programa cambiará automáticamente desde un control de carga hacia el método de longitud de arco. Al correr el programa en el incremento número 11 se activa el cambio automático y se muestra un mensaje comunicándolo (figura 5.9). El proceso continúa hasta alcanzar el factor $\lambda = 1$.

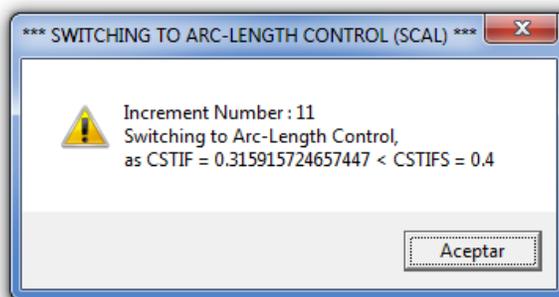


Figura 5. 9. Mensaje comunicando que se ha cambiado al método de longitud de arco.

En una corrida final se comienza desde el inicio de la solución con el método de longitud de arco (IARC=1), con una longitud de arco incremental de 0.5, una longitud máxima de 3 y una mínima de 1 (DLDES, DLMAX, DLMIN respectivamente). Se obtiene el camino de equilibrio de la figura 5.10, donde se aprecia una solución continua completa (hasta $\lambda = 1$).

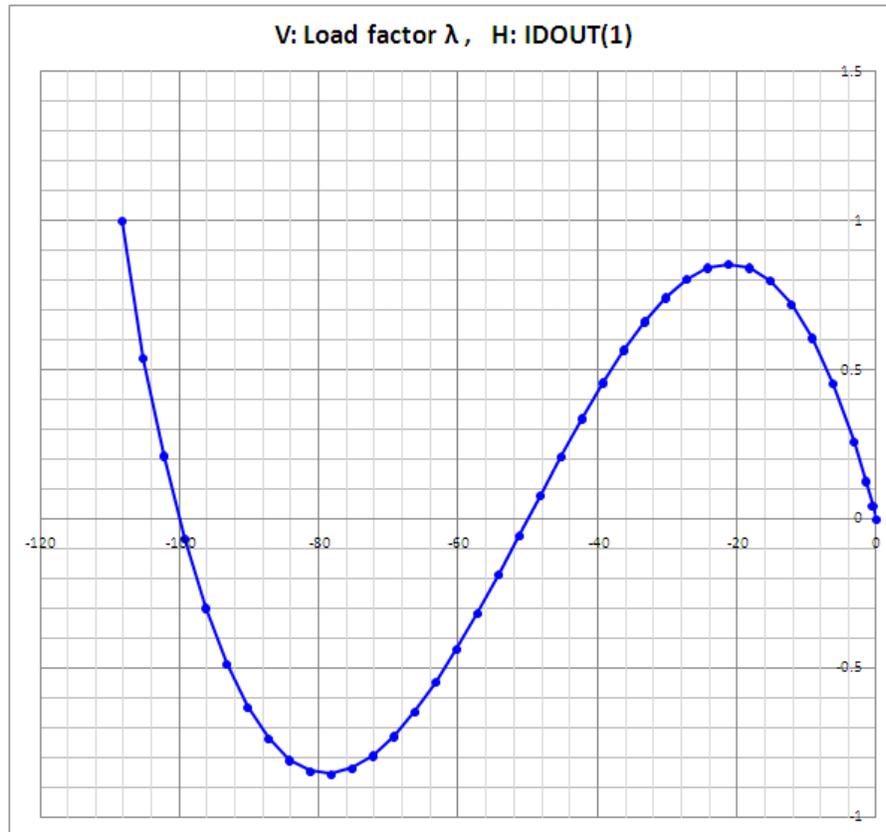


Figura 5. 10. Camino de equilibrio del ejemplo 5.2.1 desde el inicio con el método de longitud de arco.
Vertical: factor de carga; Horizontal: desplazamiento vertical de nudo central cargado.

5.2.2.- Cercha "alta" bidimensional de dos barras.

Este ejemplo es útil para apreciar el comportamiento de inestabilidades elásticas (puntos límite) donde algún elemento (o varios) sufren el fenómeno de pandeo. Las dimensiones y cargas se dan en la figura 5.11. Se aborda el problema bajo control de carga considerando incrementos automáticos de carga (IAUTO=1) junto con un cambio automático hacia longitud de arco (ISWCH=1) si el parámetro de rigidez del sistema cae por debajo del valor 0.80 (CSTIFS), según se aprecia en los datos de entrada de la figura 5.12. La carga vertical total de 12000N no se logra alcanzar y la estructura colapsa con un factor de carga λ un poco superior a 0.90.

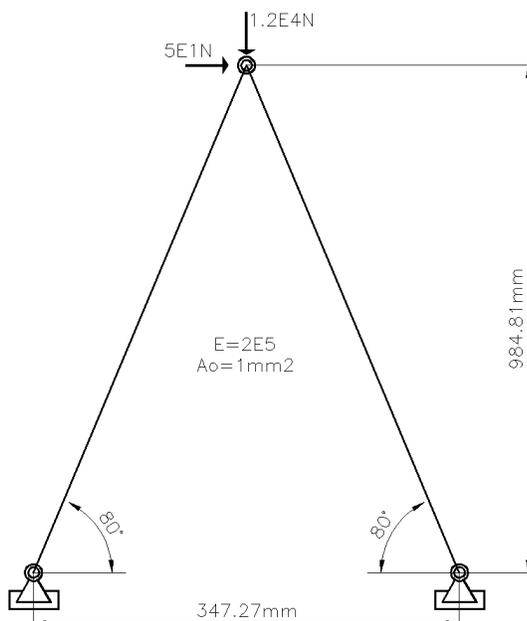


Figura 5. 11. Dimensiones y cargas para el ejemplo 5.2.2.

Para encontrar el valor más cercano a la carga de colapso, dentro de una tolerancia $EPSI=0.0001$, se activa en una siguiente corrida la opción de captura de punto singular con $IBRAC=1$ además de $ICRIT=1$ (captura por bisección del primer punto singular encontrado). El factor de carga alcanzado luego de 16 bisecciones ($INBR=16$) es de $\lambda = 0.935$, lo que significa que la carga vertical de colapso es 12155N.

```

Input Program AMBAR
22.2. THE VON MISES TRUSS
START
0
GENERAL DATA
  NV   NE   NBCON  NLOAD  NMATE  NANIT  NDIM  NOUT
  6    2    2       1     0      0     2    2
SPECIFIC DATA
  ITYEL  POISS  E      ANIT  NDSP
  1      0     2.00E+05  0     0
ELEMENTS WITH DIFERENT MATERIAL
  0      0
ELEMENTS WITH DIFERENT INITIAL INTERNAL FORCE
  0      0
NODAL COORDINATES
  1      -173.6481  0
  2      0      984.8077
  3      173.6481  0
    
```

ELEMENT CONNECTIVITY				AREA		
1	1	2	1			
2	2	3	1			
LOADINGS						
2	5.00E+01	-1.20E+04				
BOUNDARY CONDITIONS						
1	1	1				
3	1	1				
OUTPUT VARIABLES						
3	4					
EARTHED SPRING						
FACI	NINC	IWRIT	IAUTO	IARC	ILOAD	
0.2	75	0	1	0	1	
IACC	IRES	IBRAC	ICRIT	IBRSW	IROW	
0	0	0	0	0	0	
ICVCK	BETOK	ITERTY	NITMAX	NLSMX	EPSI	SHIF
1	1.00E-06	1	21	0	1.00E-04	0
IDES	FACMX	FACMN	ISWCH	ICORT	IPRED	
3	0.5	0.1	1	0	0	
CSTIFFS						
0.8						
DLDES	DLMAX	DLMIN				
0.05	0.1	0.01				
PERMLS	AMPMX	ETMXA	ETMNA			
0.8	5	25	0.01			
R1C	R2C					
3.5	0.3					

Figura 5. 12. Datos para el ejemplo 5.2.2.

El camino de equilibrio se traza en esta oportunidad para dos variables por separado. En la figura 5.13 se plotea el factor de carga λ en el eje vertical contra el desplazamiento horizontal del nudo central cargado en el eje horizontal. En la figura 5.14 se plotea igualmente el factor de carga en el eje vertical contra el desplazamiento vertical del nudo central en el eje horizontal.

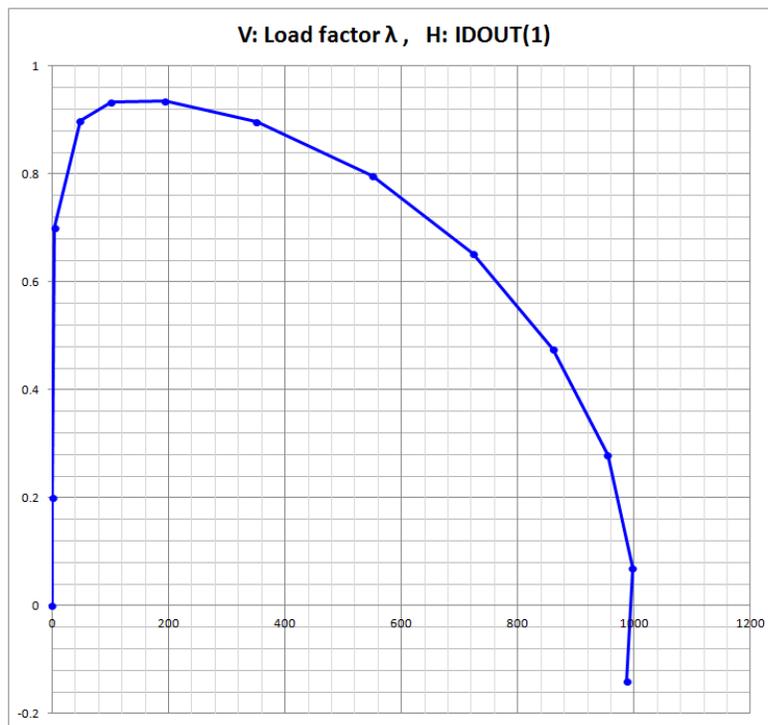


Figura 5. 13. Camino de equilibrio para el desplazamiento horizontal en el ejemplo 5.2.2.

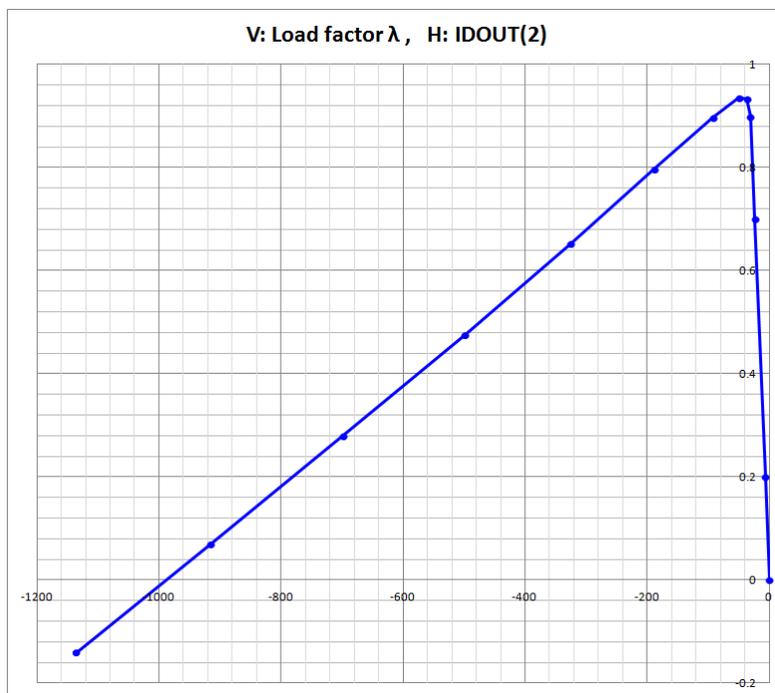


Figura 5. 14. Camino de equilibrio para el desplazamiento vertical en el ejemplo 5.2.2.

5.2.3.- Domo tridimensional.

Con este ejemplo se pretende observar el desempeño del programa para una estructura tridimensional. Se trata de un domo cuyas dimensiones se presentan en la figura 5.15, y para el cual las cargas aplicadas son las siguientes: en el nudo central se tiene una carga de 500N en -y, mientras que en los seis nudos circundantes al central se tienen cargas de 1000N (también en -y) en cada uno. En la primer corrida se consideran incrementos fijos de 0.10 veces la carga y se encuentran tres puntos singulares antes de que la convergencia falle. Para el primer punto singular el cual es un punto de bifurcación en $\lambda = 28.318$, fueron necesarias 12 bisecciones, el segundo punto singular en $\lambda = 33.826$, necesitó 17 bisecciones, mientras que el tercer punto singular en $\lambda = 52.406$ necesitó 8 bisecciones. Con incrementos automáticos y con un cambio automático hacia longitud de arco se encuentra que la falta de convergencia de la primer corrida se debe a un punto singular en $\lambda = 62.955$ el cual es un punto límite, y para el que se necesitaron 12 bisecciones. Para todas las capturas se empleó una tolerancia $\text{EPSI}=0.001$.

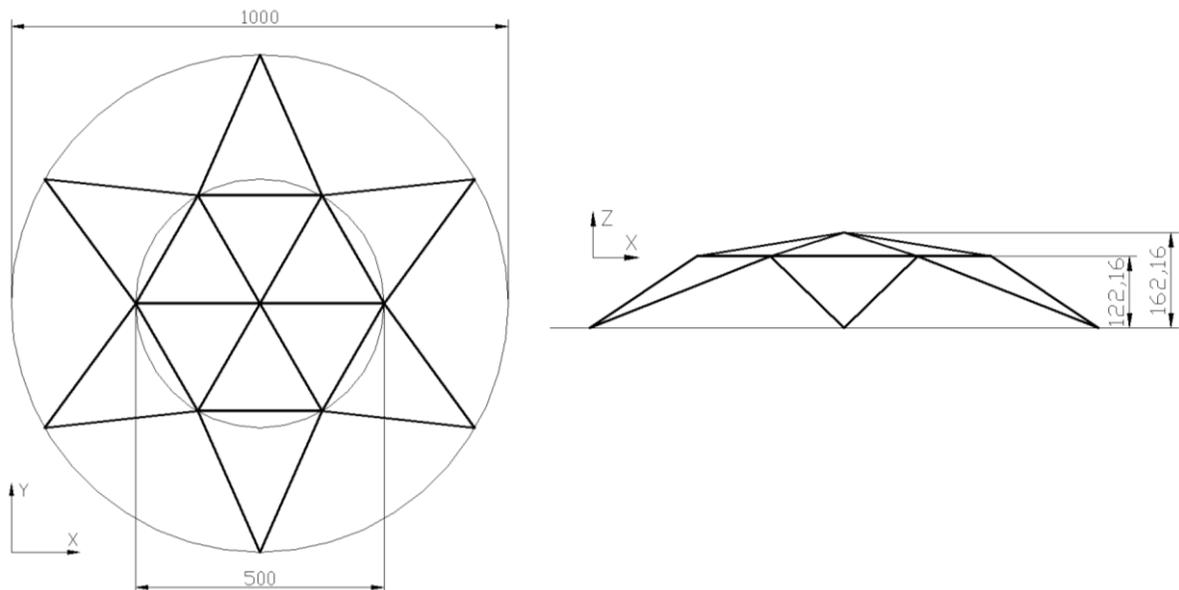


Figura 5. 15. Datos para el domo del ejemplo 5.2.3.

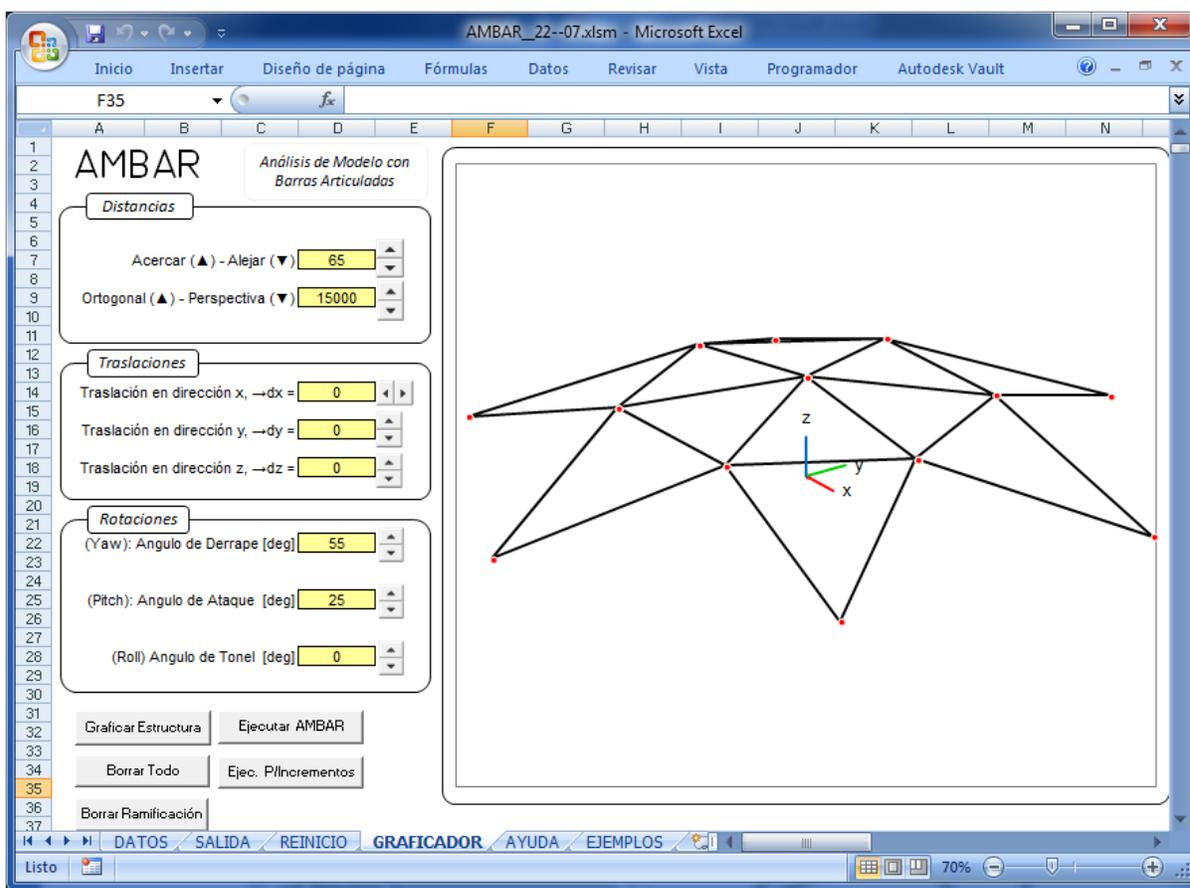


Figura 5. 16. Vista de la pantalla principal para el ejemplo 5.2.3.

En la figura 5.16 se muestra la pantalla principal de este ejemplo con una vista espacial de la estructura. En la figura 5.17 se plotea el camino de equilibrio (Despl. vertical) mostrando el camino fundamental ("fundamental path" en inglés) llamado también camino primario y una serie de ramificaciones, bifurcaciones o caminos secundarios ("branching or bifurcation path" en inglés). El camino fundamental está en color azul, mientras que en color rojo se presenta la primer bifurcación, en color verde la segunda y en púrpura la tercera bifurcación encontrada. El comportamiento físico real de la estructura debería iniciar en el origen del gráfico y avanzar sobre el camino fundamental hasta el primer punto singular (denominado pre-pandeo, hasta $\lambda = 28.318$) en donde la estructura alcanza su carga de colapso y se cambia hacia el camino de bifurcación de color rojo (post-pandeo). En el gráfico se ha trazado una gran extensión del camino fundamental (ILOAD=1 para no oscilar en puntos de bifurcación) así como de los varios caminos de bifurcación solamente con carácter didáctico.

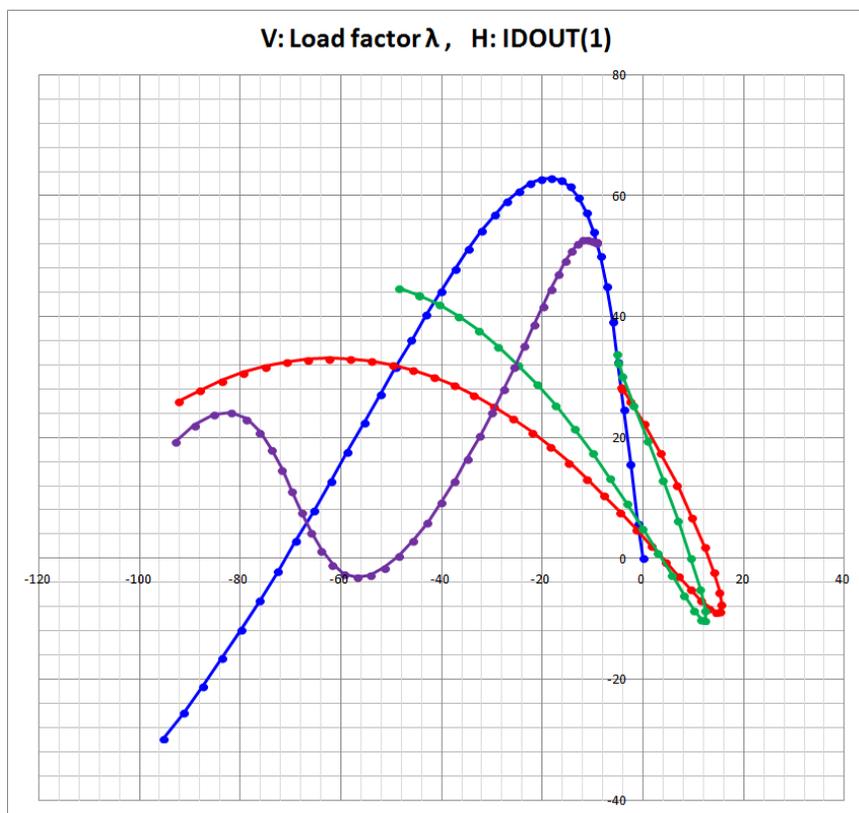


Figura 5. 17. Camino fundamental y ramificaciones para el ejemplo 5.2.3.

5.2.4.- Arco circular bidimensional.

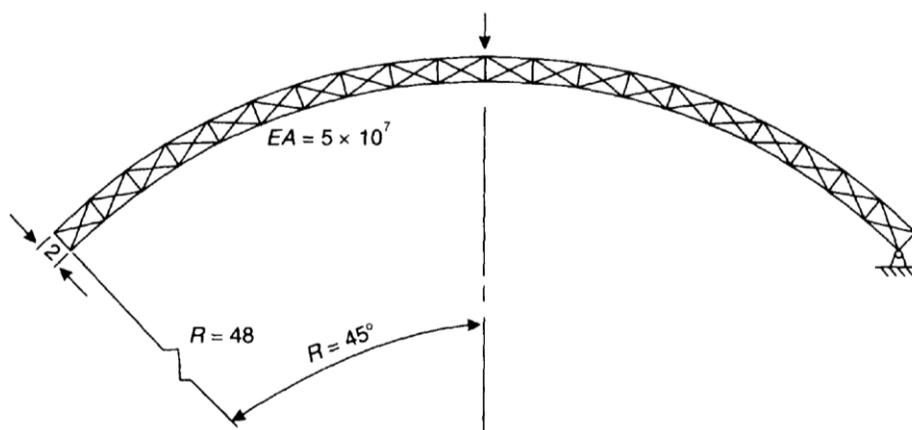


Figura 5. 18. Datos para ejemplo 5.2.4.

La carga vertical para este ejemplo es de $-1E5$. Se aborda el análisis desde el inicio con el método de longitud de arco, obteniéndose dos puntos singulares sobre el camino fundamental. El primero resulta ser un punto de bifurcación y se lo captura con un número de 14 bisecciones en el nivel de carga $\lambda = 6.291$. El siguiente punto singular resulta ser un punto límite en $\lambda = 6.910$. En la figura 5.19 se grafica en el eje vertical el factor de carga λ , mientras que en el eje horizontal está el desplazamiento vertical del nudo central superior del arco, donde está aplicada la carga. Se ha trazado una extensa porción tanto del camino fundamental como del camino de bifurcación (post-pandeo) solamente con fines didácticos.

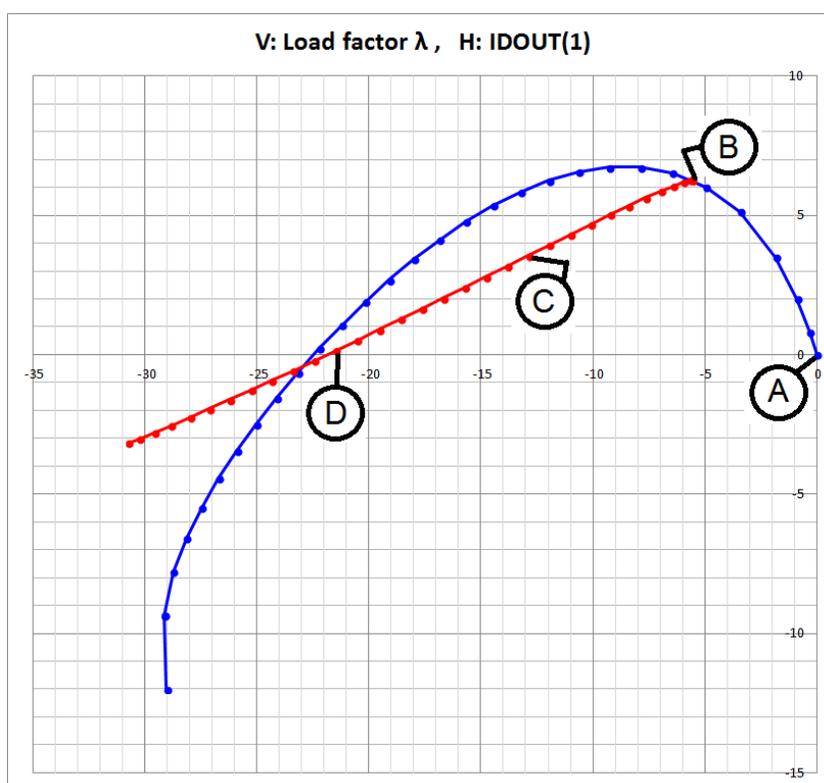


Figura 5. 19. Camino de equilibrio para el ejemplo 5.2.4.

El comportamiento físico real de la estructura iniciaría en el origen de coordenadas (punto A), y avanzaría por el camino fundamental (de color azul) hasta el primer punto singular (punto B) donde se presenta una bifurcación simétrica y el correspondiente colapso de la estructura (recorrido B-C-D...).

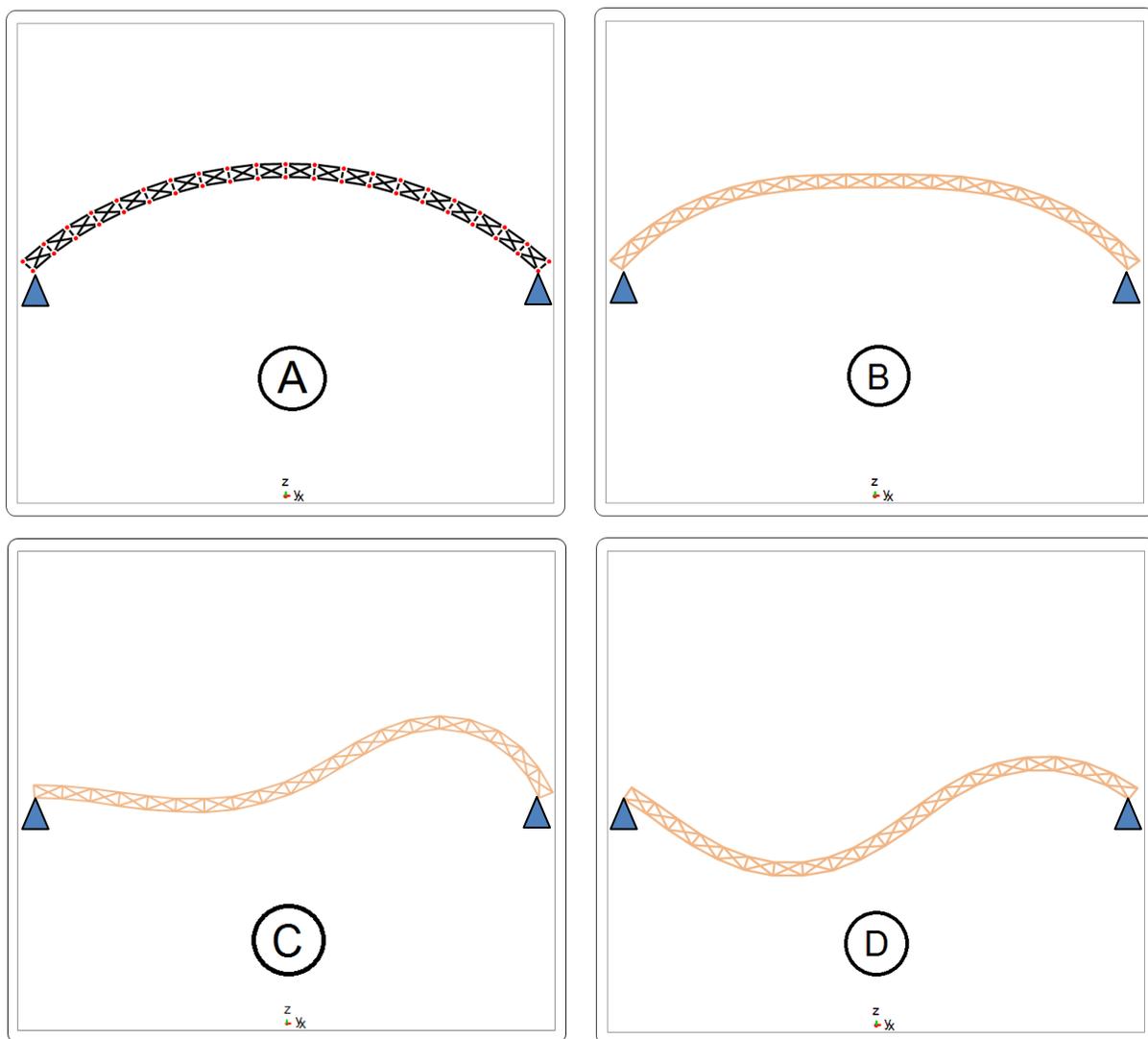


Figura 5. 20. Estructura deformada en puntos específicos del camino de equilibrio del ejemplo 5.2.4.

La figura 5.20 debe verse en conjunto con la figura 5.19 pues refleja la configuración deformada de la estructura en diferentes puntos específicos del camino de equilibrio. Debido a que la bifurcación en el punto B es simétrica, se ha adoptado arbitrariamente el lado izquierdo para reflejar el colapso.

5.2.5.- Torre tridimensional de tres patas con carga lateral.

Para este ejemplo se ha elegido una torre auto soportada como las que se emplean en telecomunicaciones, y se la somete a un conjunto de cargas incrementales laterales y verticales hasta alcanzar el colapso. La carga inicial aplicada es de 980N en cada uno de los tres nudos superiores en dirección "y", además de dos cargas verticales en "-z" de 980N y una de 9800N en el nudo superior que apunta hacia el eje "y". Estas cargas se incrementan para conocer el factor que las amplifica λ en el punto de falla (colapso). En la figura 5.21 se muestra la pantalla principal del ejemplo, mientras que en la figura 5.22 se aprecia la configuración deformada de la torre en el punto de máxima carga (izquierda) y luego de que se ha producido el colapso (derecha). El colapso se produce en el punto singular del nivel de carga $\lambda = 23.12$ el cual es un punto límite. Desde el inicio se encara el problema con el método de longitud de arco (IARC=1) en conjunto con incrementos automáticos (IAUTO=1) con una longitud de arco estimada de 400 (DLDES), una longitud máxima de 600 (DLMAX) y una mínima de 300 (DLMIN).

El camino de equilibrio se traza para dos variables por separado. En la figura 5.23 se plotea el factor de carga λ en el eje vertical contra el desplazamiento horizontal de un nudo superior (el que está orientado al eje y) en el eje horizontal. En la figura 5.24 se plotea igualmente el factor de carga en el eje vertical contra el desplazamiento vertical del mismo nudo anterior en el eje horizontal. El camino de equilibrio en ambos casos refleja la súbita pérdida de estabilidad en la estructura, es decir un colapso de tipo frágil. Con esta información debería de encararse otras diferentes configuraciones para establecer alguna que presente una forma de colapso menos abrupta.

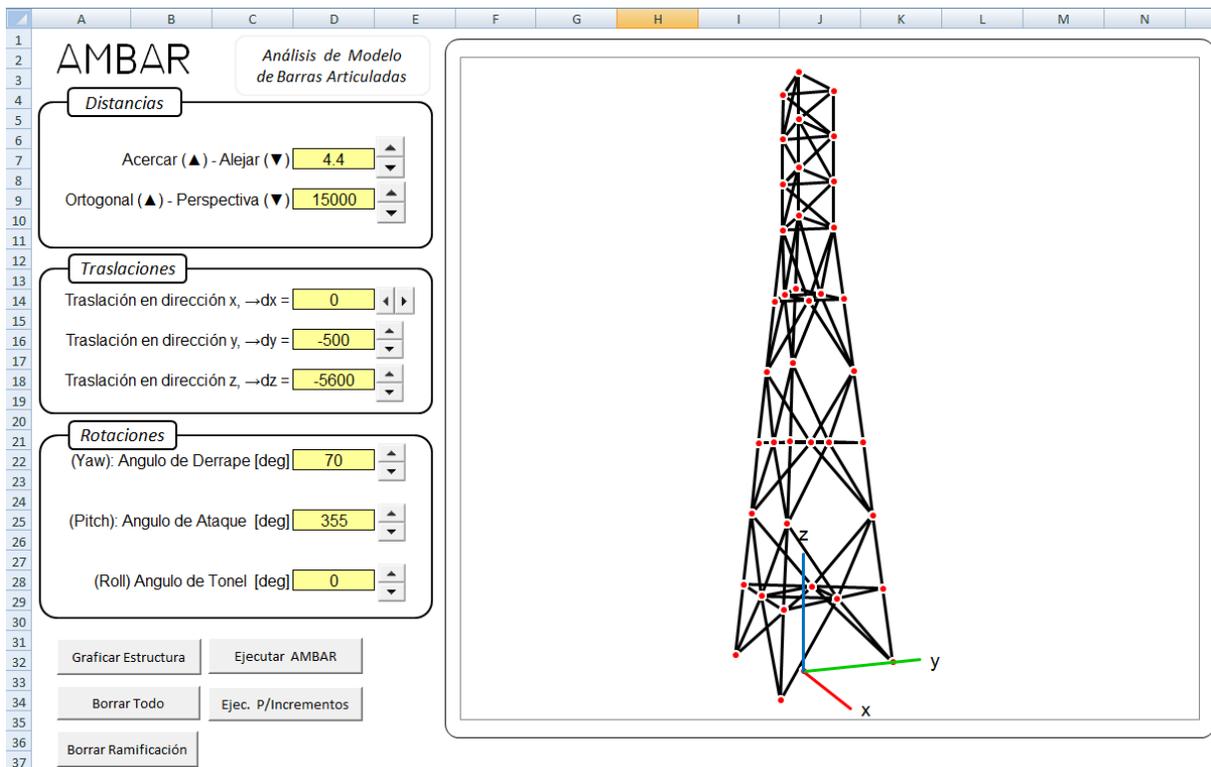


Figura 5. 21. Vista de la pantalla principal de AMBAR con el ejemplo de la torre tridimensional.

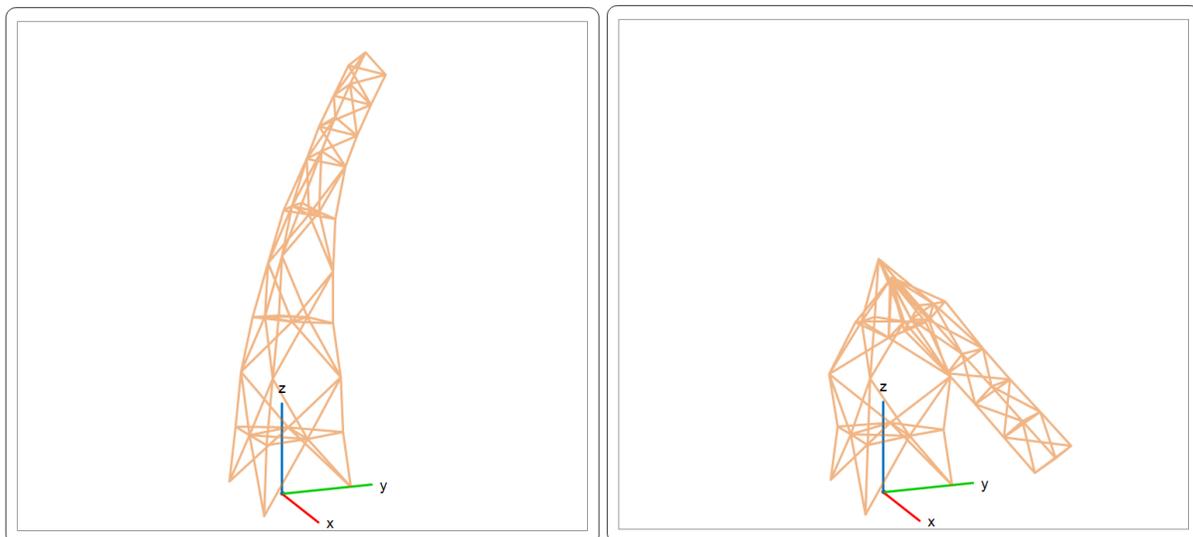


Figura 5. 22. Configuraciones deformadas de la torre del ejemplo 5.2.5.

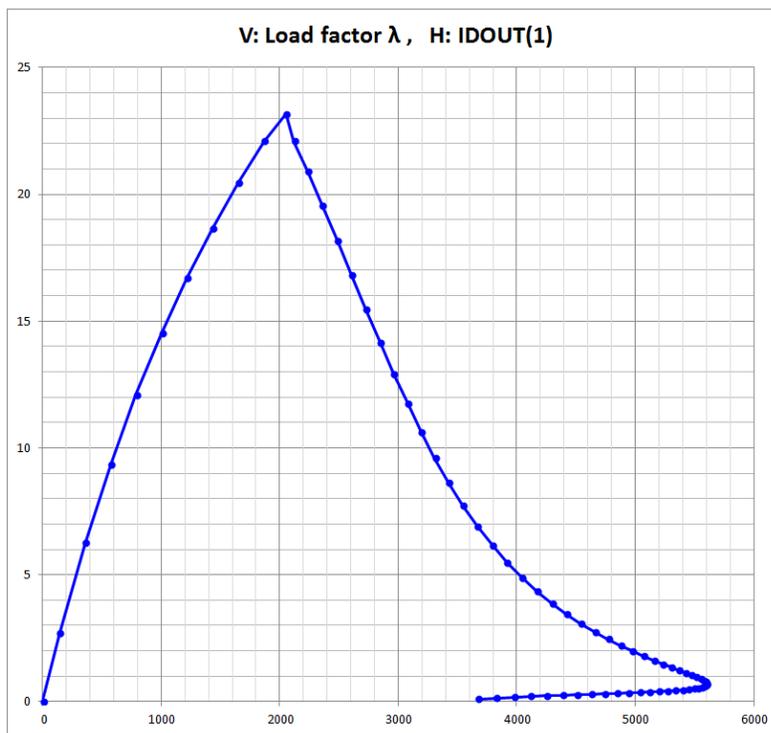


Figura 5. 23. Desplazamiento horizontal en "y" de un nudo superior de la torre del ejemplo 5.2.5.

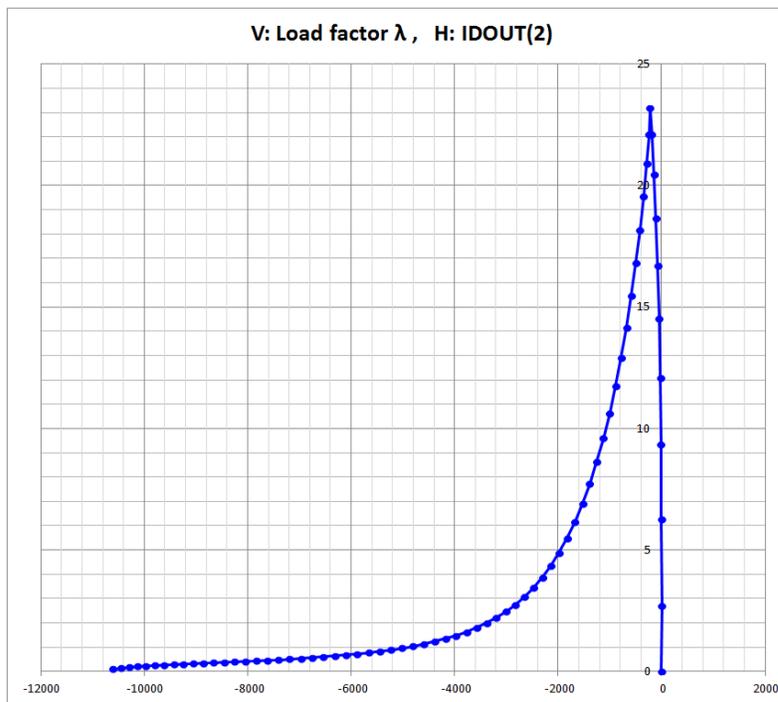


Figura 5. 24. Desplazamiento vertical de un nudo superior de la torre del ejemplo 5.2.5.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Con los ejemplos desarrollados en el capítulo anterior se puede reafirmar claramente las ideas expresadas en los capítulos I, II, III y IV acerca del alcance de los diferentes métodos de solución expuestos para sistemas no-lineales. El ejemplo 5.2.1 analiza el caso sencillo de grandes desplazamientos con pequeñas deformaciones, y como se ha visto en detalle en el capítulo I, es posible arribar al camino de equilibrio más allá del primer punto singular utilizando solamente un control de carga pero con el riesgo de cambiar hacia algún estado de equilibrio ficticio o con el riesgo de que el método iterativo no logre la convergencia en el "salto" del primer punto singular (un punto límite en este caso). Se ha planteado en este ejemplo el desplazamiento vertical del nudo central V.S. el factor de carga λ , primero bajo un control de carga, y luego bajo control de longitud de arco.

Como una medida de comparación entre el programa desarrollado y un programa comercial plenamente establecido y claramente reconocido en el ámbito internacional de análisis y diseño de ingeniería, se ha elegido para este trabajo al ANSYS en su versión 12.0, el cual presenta una amplia gama de herramientas que incluyen el análisis de sólidos con no-linealidad tanto geométrica como física. Se ha corrido el ejemplo 5.2.1 en el ANSYS y se ha planteado el desplazamiento vertical del nudo central inicialmente bajo control de carga (figura 6.1) y luego bajo control de longitud de arco (figura 6.2). El trazado del camino de equilibrio en ambos casos es coincidente y su grado de aproximación en similitud depende del nivel de tolerancia a la convergencia que se quiera adoptar tanto para AMBAR como para el ANSYS. Bajo control de carga, aumentando el número de iteraciones de equilibrio (por cada incremento de carga o "sub-step") por defecto que presenta el ANSYS, se logra "saltar" el primer punto singular, el cual es un punto límite, y converger sobre el camino de equilibrio tal como se logra con AMBAR (ver figura 6.1). Bajo control de longitud de arco, en ANSYS se debe realizar preliminarmente algunas corridas tentativas hasta ajustar un valor razonable de longitud de arco incremental, y nuevamente se traza el camino de equilibrio que coincide con el camino trazado con AMBAR, el cual en lugar de presentar el "salto" en el primer punto singular, simplemente continua con suavidad el trazado del camino y deja ver la progresiva pérdida de rigidez del sistema una vez atravesado el punto límite hasta que la estructura

alcanza su nueva posición estable y vuelve a incrementarse su rigidez y por lo tanto su capacidad de soportar carga (ver figura 6.2).

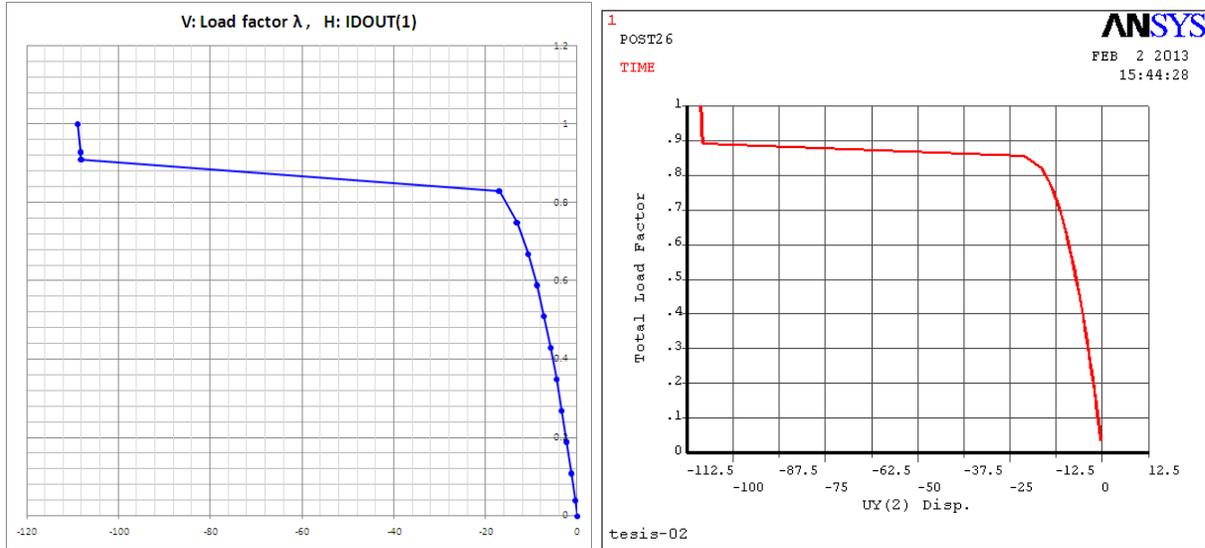


Figura 6. 1. Comparación entre AMBAR y ANSYS para control de carga, del ejemplo 5.2.1.

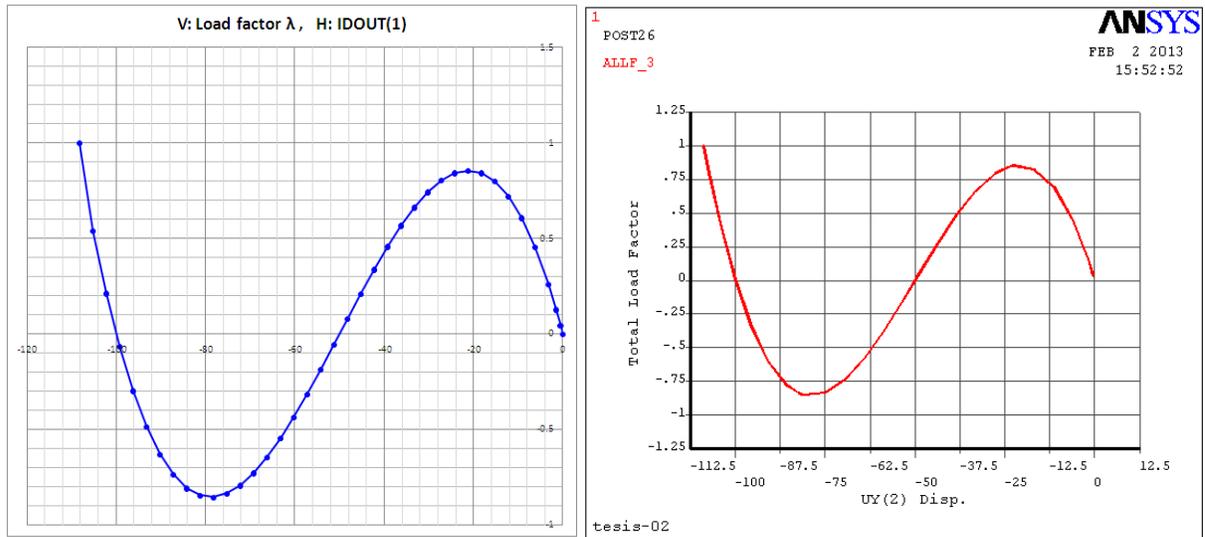


Figura 6. 2. Comparación entre AMBAR y ANSYS para control de longitud de arco, del ejemplo 5.2.1.

El ejemplo 5.2.2 presenta un comportamiento distinto al primer ejemplo, al ser la cercha de gran altura, debe elegirse inicialmente una medida de deformaciones (deformación de Green en este caso) y prestar especial atención al fenómeno de pandeo elástico, el cual es propio de estructuras con elementos esbeltos como en este caso.



Figura 6. 3. Comparación entre AMBAR y ANSYS, longitud de arco, Despl. horizontal, del ejemplo 5.2.2.

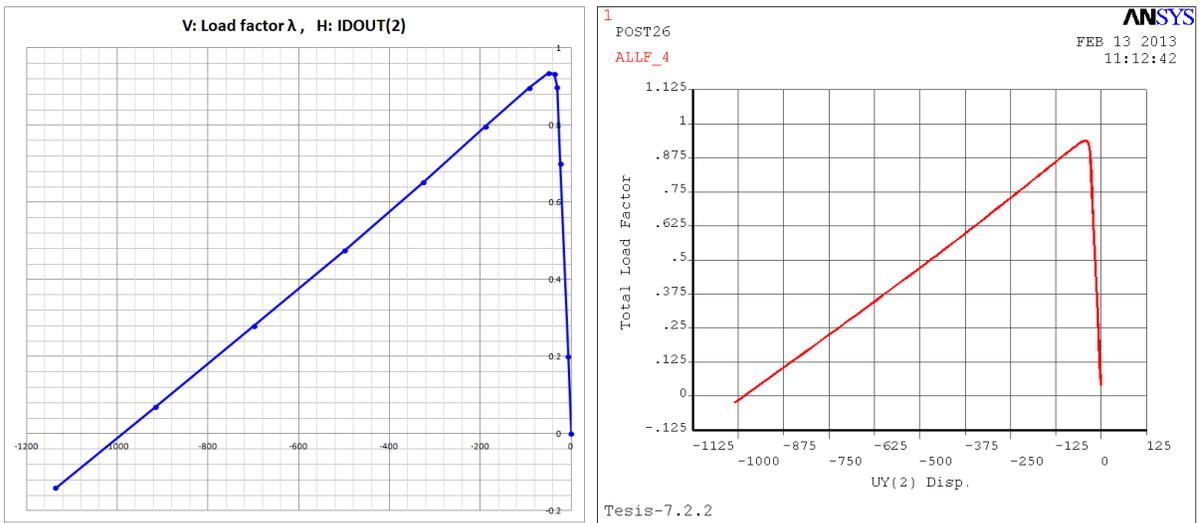


Figura 6. 4. Comparación entre AMBAR y ANSYS, longitud de arco, Despl. vertical, del ejemplo 5.2.2.

Igual que en el ejemplo anterior, se modela la estructura en ANSYS y se obtienen los gráficos del camino de equilibrio para dos variables diferentes en este caso. En la figura 6.3 se observa el desplazamiento horizontal del nudo central V.S. el factor de carga λ . Este desplazamiento es forzado hacia el lado derecho (en "x" positivo) debido a la carga horizontal aplicada en el nudo central para evitar el fenómeno de bifurcación simétrica. En la figura 6.4 se presenta el desplazamiento vertical del nudo central V.S. el factor de carga λ . Nuevamente se aprecia con claridad la similitud en las soluciones del camino de equilibrio obtenidas mediante AMBAR y mediante ANSYS.

El análisis del ejemplo 5.2.5 arrojó como resultado un factor de carga $\lambda = 23.12$ en el nivel de carga de colapso de la estructura (punto límite), y como consecuencia se pretende investigar una nueva configuración que resulte en un mejor comportamiento ante las mismas solicitaciones. Se cambia entonces la disposición de las barras en la zona inferior de la torre, donde se ha observado el inicio de la inestabilidad y la consecuente falla global. En la figura 6.5 se aprecia ambas configuraciones de un lado cualquiera de la torre.

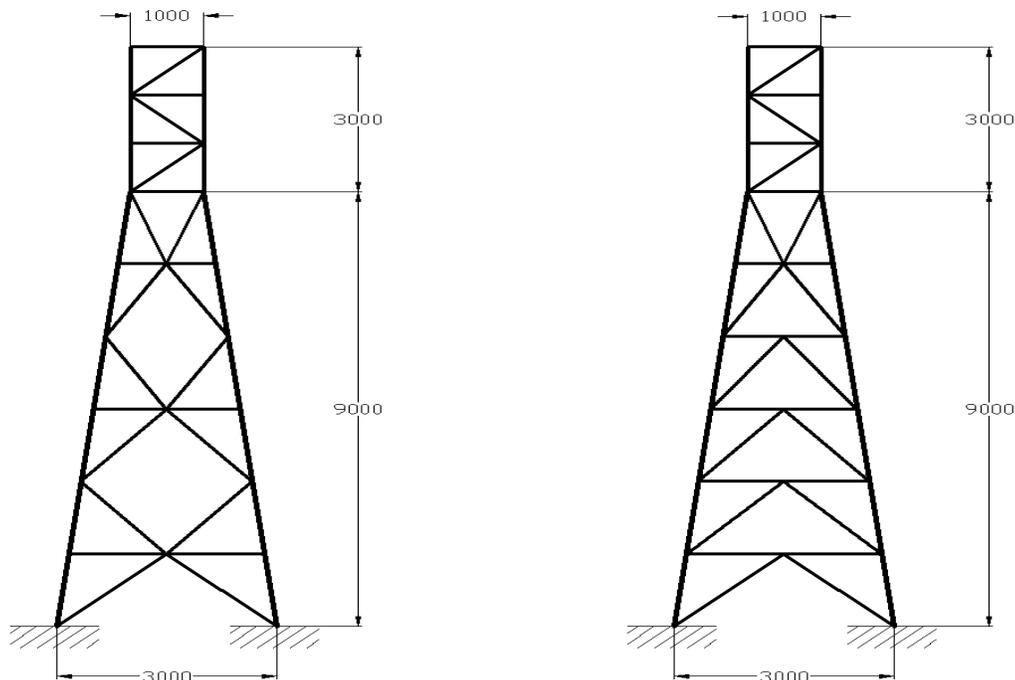


Figura 6. 5. Configuraciones de prueba. Izquierda, inicial u opción 1. Derecha, opción 2.

Se corre el análisis en AMBAR para la opción 2 de la figura 6.5 y se alcanza un punto límite con un factor de carga $\lambda = 37.10$ el cual desencadena la falla de la estructura. Haciendo la relación entre el factor de carga de fallo y la cantidad de material en cada caso se tiene:

Opción inicial, u opción (1) $23.12/153.70 = 0.150$

Opción (2): $37.10/172.90 = 0.214$

Y relacionando ambos valores se tiene que $0.214/0.150 = 1.426$, lo que indica que bajo este criterio, la opción 2 es aproximadamente 1.4 veces más eficiente en términos de resistencia V.S. cantidad de material que la opción 1. En la figura 6.6 se aprecia la vista de la torre deformada en el nivel de carga de fallo y la configuración deformada luego de la falla.

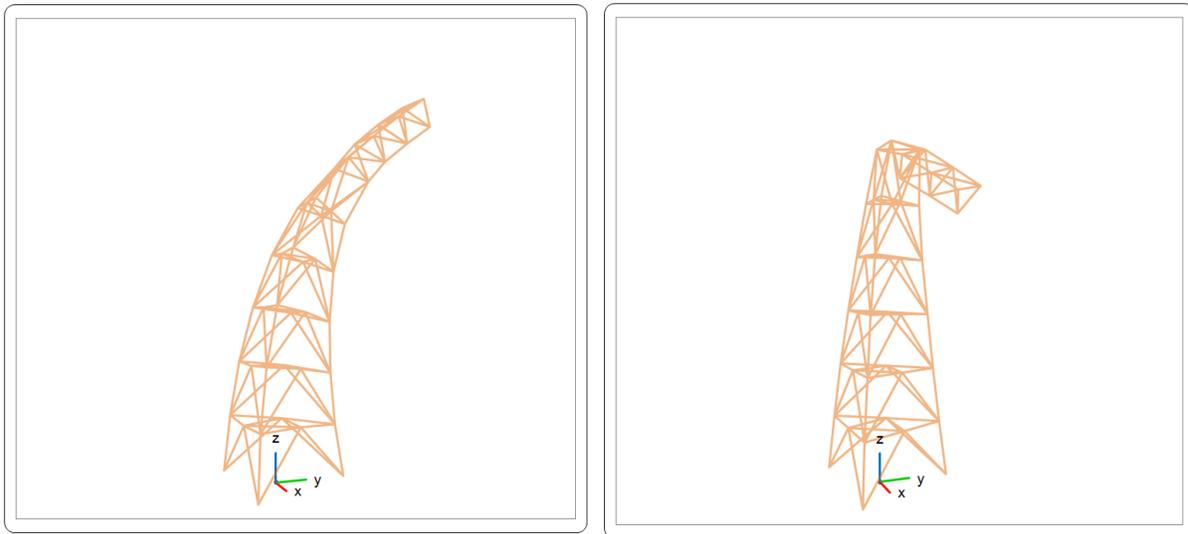


Figura 6. 6. Análisis de la opción 2 para la torre del ejemplo 5.2.5. Izq.: figura deformada en el nivel de carga de fallo (punto límite). Der.: deformada final.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones del estudio.

Finalizando el estudio se puede señalar que mientras mejor se conoce el comportamiento estructural de una configuración, tanto en la etapa pre-crítica como en la etapa post-crítica, mayores serán las oportunidades de mejorar dicha configuración y obtener mejores comportamientos en términos de modos de fallo convenientemente previstos. Esto significa obtener mejores diseños de ingeniería, mejorar la calidad, disminuir costos, y posiblemente enriquecer el lenguaje morfológico con opciones innovadoras. El sencillo programa de computadora desarrollado a través del presente estudio se constituye en una herramienta útil para observar paso a paso el deterioro en la rigidez del sistema estructural, incluido el fenómeno de la inestabilidad elástica (pandeo) en los elementos.

Recomendaciones generales.

El establecimiento de un apropiado modelo matemático para el análisis de un problema de ingeniería está basado principalmente en el suficiente entendimiento que se tenga del problema en consideración así como de un razonable conocimiento de los procedimientos disponibles de elementos finitos para su solución. Esta observación es particularmente aplicable en el análisis no-lineal porque se necesita seleccionar correctamente las formulaciones cinemáticas no-lineales apropiadas, los modelos de material, y las estrategias numéricas de solución.

En un análisis de ingeniería real, se recomienda enfáticamente que un análisis no-lineal de un problema sea siempre precedido por un análisis lineal, de este modo el análisis no-lineal es considerado como una extensión del proceso completo de análisis más allá de las suposiciones del análisis lineal. Basándose en la respuesta de la solución lineal se debe poder ser capaz de predecir las no-linealidades que serán significativas y la manera de como tomar en cuenta estas no-linealidades más apropiadamente. Concretamente, los resultados del análisis lineal indican las regiones donde pueden ser significativas las no-linealidades

geométricas y donde el material tiende a exceder su límite elástico. Desafortunadamente cuando se desarrolla un análisis no-lineal puede existir la tendencia a seleccionar de inmediato un gran número de elementos y las formulaciones no-lineales más generales disponibles para el modelado del problema. Si es así, el tiempo de ingeniería utilizado para preparar el modelo es grande, el tiempo de computadora que se necesita para el análisis del modelo es también muy significativo, y generalmente una cantidad muy voluminosa de información es generada que difícilmente puede ser completamente absorbida e interpretada. También, si hay errores significativos en el modelado o en las entradas del programa, se presenta el hecho de que el análisis conduzca a situaciones de frustración, sin que se tenga una estimación de cuánto más pueda llegar a costar el estudio hasta producir resultados significativos. Lo que se debe hacer es establecer primero un modelo lineal que contenga las más importantes características del problema de análisis. Después de que algunos cuantos análisis lineales hayan sido ejecutados que provean una indagación dentro del problema bajo consideración, entonces puede adoptarse la inclusión de algunas no-linealidades (no necesariamente de todas las no-linealidades que pueden ser anticipadas) eligiendo apropiadamente formulaciones no-lineales y modelos de material. Concluyentemente, [11] el proceso completo de análisis puede ser comparado con una serie de experimentos de laboratorio en los cuales diferentes suposiciones se hacen en cada experimento, en el análisis de elementos finitos estos experimentos se efectúan en la computadora con un programa de elementos finitos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pilz Steve, Birnbaum Naury. AUTODYN explicit dynamics software simulates short duration, highly nonlinear transient events such as high-speed impact. Ansys Solutions. Spring 2005: Pgs. 10-12.
- [2] DePuy Spine Inc. Simulation Aids Researchers Studying Spinal Disc Implants. Ansys Solutions. Spring 2005: Pgs. 6-9.
- [3] Zienkiewicz O.C., Taylor RL. *The Finite Element Method, 5th.Ed.*, Volume 2: Solid Mechanics, Butterworth Heinemann, 2000.
- [4] Llopiz Carlos Ricardo. Filosofía del diseño para estructuras de hormigón armado. Mendoza, Argentina. 2001.
- [5] Tuoi Tre. TV tower collapses due to failure to meet standards. Tuoitrennews.vn. 2012. Disponible en: <http://tuoitrennews.vn/cmlink/tuoitrenews/society/tv-tower-collapses/>
- [6] Imaoka Sheldon. Analyzing Buckling in ANSYS Workbench Simulation. Ansys Advantage TM, Vol II. 2008. Pgs. 41-43
- [7] Hartmann Friedel & Katz Casimir. *Structural Analysis with Finite Elements*. Berlin Heidelberg. Springer, 2007.
- [8] Felippa Carlos A. *Non-Linear Finite Element Methods*, Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Space Structures and Controls, University of Colorado. Boulder Colorado, 2001.
- [9] Crisfield M.A. *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, Volume 1: Essentials, Department of Aeronautics, Imperial College of Science, Technology and Medicine. London UK. John Wiley & Sons, 2000.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [10] Crisfield M.A. *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, Volume 2: Advanced Topics, Department of Aeronautics, Imperial College of Science, Technology and Medicine. London UK. John Wiley & Sons, 2000.
- [11] Bathe Klaus-Jürgen. *Finite Element Procedures*, Massachusetts Institute of Technology. Prentice Hall, 1996.
- [12] Javier Molina y Enrique Alarcón. *Un Nuevo Método de Longitud de Arco para Estructuras No-Lineales*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 4, págs. 369 - 384, Departamento de Mecánica Estructural, Universidad Politécnica de Madrid, 1988.
- [13] Beltrán F. - '*Teoría General del Método de los Elementos Finitos*', ETS Madrid, 1999.

BIBLIOGRAFÍA

Belytschko T., Wing Kam Liu, Moran B. - '*Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*', John Wiley & Sons, 2001.

Bonet J. & Wood R. D. - '*Non-Linear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*', Cambridge University Press, 1997.

Chaves Eduardo W. - '*Mecánica del Medio Continuo: Tensores*', Ediciones UPC, 2005.

Cook Robert D. - '*Finite Element Modeling for Stress Analysis*', John Wiley & Sons, 1995.

Kung-Ching Chang - '*Methods in Nonlinear Analysis*', Springer, 2005.

Moaveni S. - '*Finite Element Analysis Theory & Application with ANSYS*', Prentice Hall, 1999.

Olivella X.O. & De Saracibar C.A. - '*Mecánica de Medios Continuos para Ingenieros*', Ediciones UPC, 2002.

Reddy J.N. - '*An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*', Oxford University Press.

Tirupathi R. Chandrupatla & Ashok D. Belegundu - '*Introduction to Finite Elements in Engineering*', Prentice Hall, 1999.

ANEXOS

ANEXO I: Lista de variables utilizadas en AMBAR.

El principal objetivo del presente anexo es presentar una descripción clara y sencilla de las variables que intervienen tanto en el desarrollo como en el uso de AMBAR.

ALOD(3), factor de carga total, (3) último, (2) penúltimo, (1) antepenúltimo.

NPIV(3), número de pivotes negativos, de la factorización LDLT, (3) último, (2) penúltimo, (1) antepenúltimo.

ITEST, 1 para carga, -1 para descarga. Indicador para captura en conjunto con control de longitud de arco.

INBR, contador para el número de (incrementos) capturas.

IPAST, número de puntos críticos encontrados.

ICRIT, el número del punto crítico donde se desea ejecutar la captura.

ICRTY, el tipo de punto crítico encontrado. 0 para punto límite, 1 para bifurcación.

ILOAD, 1 para incremento de carga decidido por el parámetro de rigidez actual, 2 para incremento de carga decidido por el número de pivotes negativos.

NEGO, el número de pivotes negativos justo después de atravesar el punto crítico.

CSTIFO, el parámetro de rigidez actual, en el último incremento si todavía no se ha atravesado el punto crítico, o justo antes de atravesar el punto crítico si ya se ha atravesado.

AMP(10), amplitudes para eigenmodos en caso de bifurcación múltiple.

- AKTS(N,N), matriz de rigidez tangente de la estructura.
- AK14S(NSP), rigidez de resorte lineal equivalente.
- D(NV), pivotes diagonales de la factorización LDLT.
- DL, longitud de arco incremental, para control de longitud de arco.
- DLDES, valor deseado para longitud de arco incremental.
- DLMAX, longitud de arco incremental máxima permitida.
- DLMIN, longitud de arco incremental mínima permitida.
- DT(NV), vector de desplazamientos tangentes debidos a la carga total QFI.
- FACT, factor de carga total.
- FACI, factor de carga incremental.
- FI(NV), vector de fuerza interna.
- GM(NV), vector de fuerza desbalanceada en subrutina ITER.
- GO(NV), vector de fuerza desbalanceada para línea de búsqueda.
- IBC(NV), identificador de condición de contorno, 0 para libre, 1 para restringido.
- ID, números nodales de elemento.
- ISPRD, 0 si hay convergencia y no se necesita reducción del incremento. 1 si no se ha conseguido convergencia y es necesario aplicar una reducción del paso de carga.

IDOUT(10),	grados de libertad elegidos para salida de resultados.
NDIM,	dimensión del problema, 2 ó 3.
NE,	número de elementos en la estructura.
NN,	número de nudos en la estructura.
NOOUT,	número de variables de salida.
NDSP,	número de resortes de fijación.
NV,	número de variables (ó grados totales de libertad).
PT(NV),	vector de desplazamientos total.
PTOL(NV)	vector de desplazamientos total en el final del último incremento.
QFI(NV),	vector de carga externa fija.
X(NN),	coordenadas x de los nudos.
Y(NN),	coordenadas y de los nudos.
Z(NN),	coordenadas z de los nudos.

ANEXO II: Listado de instrucciones de Programación de AMBAR.

Se presenta a continuación el código de programación de AMBAR escrito en lenguaje Visual Basic for Applications y referido a hojas electrónicas Excel.

Sub A_M_B_A_R_()

```

'*****
'*****
' CARACTERISTICAS PRINCIPALES:
'      [a] AUTO-INCREMENTOS, LINEAS DE BUSQUEDA (LINE-SEARCHES), LONGITUD
DE ARCO
'      [b] INCREMENTO AUTOMATICO CON RECORTE DE INCREMENTO
'      [c] SOLUCION NO-LINEAL INCREMENTAL/ITERATIVA PARA SERCHAS
'      [d] CAPTURA DE PUNTO SINGULAR
'      [e] RAMIFICACIONES A CAMINOS SECUNDARIOS

' VARIABLES PRINCIPALES:
' AKTS = MATRIZ DE RIGIDEZ TANGENTE DE LA ESTRUCTURA
' AK14S = RIGIDEZ DE RESORTE LINEAL EQUIVALENTE
' AK15 = RIGIDEZ DE RESORTE LINEAL ENTRE LAS VARIABLE 1 Y NV
' ALOD = FACTORES DE CARGA TOTAL; 3-ACTUAL;2-ULTIMO;1-PENULTIMO
' NPIV = No. DE PIVOTES NEGATIVOS; 3-ACTUAL;2-ULTIMO;1-PENULTIMO
' D = PIVOTES DIAGONALES DE LA FACTORIZACION LDL (TRAN)
' DL = 'LONGITUD' INCREMENTAL (DLDES = VALOR DESEADO)
' DT = VECTOR DE DESP. TANG. DE CARGA TOTAL (QFI)
' FACT = FACTOR DE CARGA TOTAL
' FACI = FACTOR DE CARGA INCREMENTAL
' FI = FUERZAS INTERNAS
' GM = FUERZAS DES-BALANCEADAS (EN SUB-RUTINA ITER)
' GO = VECTOR DE FUERZA DES-BALANCEADA ANTIGUO (PARA LINEAS DE BUSQUEDA)
' IBC = CONTADOR DE CONDICION DE CONTORNO (0=LIBRE, 1=FIJO)
' ID14S = NUMEROS DE VARIABLES (1-4) CON RESORTES LINEALES ANCLADOS
' ID = NUMEROS NODALES DE ELEMENTO
' ISPRD = 0: SIN REUDCCION DE PASO; 1: REDUCCION DE PASO
' IDOUT = D.O.F PARA SALIDA (DEGREE OF FREEDOM)
' NDIM = DIMENSION DEL PROBLEMA (2 O 3)
' NE = No. DE ELEMENTOS (NO MAYOR A NELM )
' NN = No. DE NUDOS (NV/NDIM)
' NOUT = No. DE VARIABLES DE SALIDA (NO MAYOR A 10)
' NDSP = No. DE RESORTES ANCLADOS
' NV = No. DE VARIABLES (NO MAYOR A NDOF)
' PT = VECTOR DE DESPLAZAMIENTOS TOTALES
' PTOL = VECTOR DE DESPL. TOTALES EN EL FINAL DEL ULTIMO INCREMENTO
' QFI = VECTOR DE CARGAS FIJAS
' REAC = REACCIONES
' X = COORDENADAS X DE LOS NUDOS
' Y = COORDENADAS Y DE LOS NUDOS
' Z = CORRDENADAS Z DE LOS NUDOS

```

```

!*****
*****
Dim AK14S(600) As Double, AKTS(600, 600) As Double, AKTSO(600, 600) As
Double
Dim ARO(200) As Double, ARN(200) As Double, ALO(200) As Double, ALN(200) As
Double
Dim AN(200) As Double, ANIT(200) As Double, ANOL(200) As Double, AMP(10) As
Double
Dim AK15(20) As Double
'-----
-----
Dim B4S(4) As Double, BETOK As Double, BETOKO As Double, BRACKMESSAGE As
Integer
'-----
-----
Dim CSTIFO As Double, CSTIF As Double, CSTIFS As Double
'-----
-----
Dim D(600) As Double, DT(600) As Double, DELO(600) As Double
Dim DLDEEO As Double, DLDESO As Double, DLDES As Double, DLDMX As Double
Dim DLDMN As Double, DL As Double
'-----
-----
Dim E(200) As Double, EPSI As Double
'-----
-----
Dim FI(600) As Double, FACT As Double, FACI As Double, FACMX As Double
Dim FACMN As Double, FACTOL As Double
'-----
-----
Dim GOO(600) As Double, GO(600) As Double, GM(600) As Double
'-----
-----
Dim ID(200, 2) As Double, ID14S(600) As Double, IBC(600) As Double
Dim IDOUT(10) As Double, IRE As Integer, IDSP As Double, IWR As Integer
Dim IARC As Integer, ITYEL As Integer, ICHEK As Integer, IDES As Integer
Dim ISWCH As Integer, ITERTY As Integer, IWRIT As Integer, IRES As Integer
Dim IBRAC As Integer, IBRSW As Integer, IROW As Integer, ISPRD As Integer
Dim INC As Integer, INCC As Double, ICVCK As Integer, ILOAD As Integer
Dim ICORT As Integer, IPRED As Integer, ICRTY As Integer, INCMMSG As Integer
'-----
-----
Dim K As Integer
'-----
-----
Dim NDOF As Integer, NNODE As Integer, NELM As Integer, NV As Integer
Dim NDIM As Integer, NBCON As Integer, NLOAD As Integer, NDSP As Integer
Dim NINC As Integer, NMATE As Integer, NANIT As Integer, NOUT As Integer
Dim NEGO As Double, NEG As Integer, NE As Integer, NN As Integer
'-----
-----
Dim PT(600) As Double, PTOL(600) As Double, PIVS As Double, PIVB As Double
Dim PIVRAT As Double, PRBLM As String

```



```

'*****VERIF.CONVERGENCIA DE CAPTURA, SI ESTA OK CALC.LAS 4 CONST.DE
ESTAB.
If (IPAST = ICRIT And ISPRD <> 1 And IBRAC <> 0) Then
  TT = Abs((FACTOL - FACT) / FACT / EPSI) '.....VER(6.5.a)
  If (IARC <> 0) Then
    TT = DLDES / DLDEEO / EPSI '.....VER(6.5.b)
  End If
  TT = Sqr(TT * Abs(PIVRAT) / EPSI)
  If (Abs(IBRAC) = 7 And INBR > 0) Then
    If (BETOK > BETOKO) Then
      GoTo STEP150
    End If
  End If
  If (TT <= 1) Then
    Call STAB(AKTS, D, IWR, IRE, z1, FI, NV, NN, IWRIT, NITMAX, _
      EPSI, IBC, E, ARO, ALO, ARN, ALN, NE, PT, ID, x, _
      y, z, YY, B4S, ITYEL, AN, DT, QFI, x1, NDIM, IMULTI, _
      SHIF, NDSP, AK15, ID14S, AK14S, NDOF, NNODE)
    GoTo STEP200
  End If
End If
'*****TODAVIA NO SE HA ENCONTRADO NINGUN PUNTO SINGULAR
STEP150:
If (IBRAC <> 0 And INC = NINC) Then
  If (IPAST >= ICRIT) Then
    BRACKMESSAGE = MsgBox("!!! CAPTURA FALLIDA !!!", vbOKOnly _
      + vbExclamation, "*** * * REPORTE DE ERRORES EN LA
CAPTURA * * *")
    Stop
  End If
  If (IPAST < ICRIT) Then
    BRACKMESSAGE = MsgBox("!!! PUNTO SINGULAR NO ENCONTRADO !!!",
vbOKOnly _
      + vbExclamation, "*** * * REPORTE DE ERRORES EN LA
CAPTURA * * *")
    Stop
  End If
End If
'*****ENCONTAR INCREMENTO DE CARGA
Call SCAL(IAUTO, IARC, NEG, FACI, FACT, FACTOL, DL, DLDES, PT, PTOL, _
  DT, ISWCH, CSTIF, CSTIFS, NV, IWR, DLDMX, DLDMN, IBRAC, _
  IPAST, ICRIT, NPIV, ALOD, IBRSW, INBR, DERT, PIVR, PMIN, _
  QFI, DLDESO, NDIM, CSTIFO, NEG, ICRTY, ILOAD, IBC, NDOF, _
  K, IROW, INCC)
'*****CALCULAR PREDICTOR DE SEGUNDO ORDEN
If (IPRED = 1) Then
  Call SCPD(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRIT, IWR, ID, x, y, z,
  GM, ITYEL, AN, NDIM, NNODE, FACT, FACI, FACTOL, AKTS, D, _
  DT, NDOF, IARC, DLDES, PTOL, QFI, IBC, K, DL)
End If
'*****CALCULO DE PUNTO SINGULAR MODO SEMI-DIRECTO
If (Abs(IBRAC) = 7 And INBR > 0) Then
  If (INBR = 1) Then

```

```

      BETOKO = BETOK
    End If
    BETOK = BETOKO * (3.1415926 ^ (TT * TT - 1))
    If (TT <= 1) Then
      BETOK = BETOKO
    End If
  End If

'////////////////////////////////////
/////
'*****ITERACIONES DE EQUILIBRIO
Call ITER(PT, AN, BETOK, QFI, IBC, IWRT, IWR, AKTS, D, ITERTY, NV, _
          NN, NE, GM, FI, REAC, PTOL, DT, FACT, FACI, DL, IARC, ID, _
          x, y, z, E, ARO, ALO, AK14S, ANIT, AK15, ID14S, NDSP, _
          NDIM, ARN, POISS, ALN, ITYEL, GO, GOO, DELO, ISPRD, NDÖF, _
          NNODE, K, ICORT, IPRED, ICVCK, AKTSO, EPSI, INCC, IRES)

'////////////////////////////////////
/////
'*****SALIDA DE RESULTADOS CONVERGIDOS
If (ISPRD = 0) Then
  '*****CONTROL DE CARGA
  If (IDSP = 0) Then
    Call OUTP(IARC, FACT, IWR, NDIM, AN, NE, NV, NOUT, PT, _
             REAC, IDOUT, INCC, x, y, NN, z, NMATE, NANIT, IRES)
  End If
  '*****CONTROL DE DESPLAZAMIENTO
  If (IDSP > 0) Then
    Call OUTP(IARC, FI(IDSP), IWR, NDIM, AN, NE, NV, NOUT, PT, _
             REAC, IDOUT, INCC, x, y, NN, z, NMATE, NANIT, IRES)
  End If
End If
'*****FACTORES DE INCREMENTO PARA EL SGTE.INCREM.,SI NO HAY CAPTURA EN
PROCESO
If (IAUTO = 1 And Not (IPAST = ICRIT And IBRAC <> 0)) Then
  Call NEIN(IARC, ITE, ISPRD, FACI, FACMX, FACMN, DL, DLDES, DLDMX, _
           DLDMN, BETOK, BET, PT, PTOL, AN, ANOL, NV, NN, NE, IDES, _
           FACT, FACTOL, ALO, ALN, ARO, ARN, ID, NDIM, x, y, z, _
           ITYEL, NNODE, IWR, POISS)
End If
If (ISPRD = 1) Then
  INCC = INCC - 1
End If
'*****RESTABLECER IBRSW A CERO, ASEGURAR SGTE.INCREM. CON UN PREDICTOR
NORMAL
If (ISPRD <> 1) Then
  IBRSW = 0
End If
'*****PREGUNTAR AL ANALISTA SI DESEA CONTINUAR CON EL ANALISIS
If (INC = 15) Or (INC = 30) Or (INC = 45) Or (INC = 60) Or (INC = 75) Or
(INC = 90) Then
  INCMMSG = MsgBox("ACTUAL INCREMENTO : " & INC & Chr(13) & "DESEA UD.
CONTINUAR ?", _
                  vbYesNo + vbQuestion, "° ° ° AMBAR ° ° °")

```


Tesis de Maestría Anexo II: Listado de instrucciones AMBAR

```

'ESCRIBIR TITULO DEL PROGRAMA, TITULO DEL PROBLEMA EN LA SALIDA
'Worksheets(2).Cells(2, 1).Activate
Worksheets(2).Cells(1, 1).Value = "**** Salida de << AMBAR >> ****"
Worksheets(2).Cells(2, 1).Value = PRBLM

End Sub

Sub INPT(QFI, IBC, IRE, IWR, NV, NN, NE, POISS, ITYE, ID, IDOUT, NOUT, _
        ICHEK, x, y, z, E, ARO, ALO, AK14S, ANIT, AK15, ID14S, NDSP, _
        NDIM, NDOF, NNODE, NELM, IDSP, NBCON, NLOAD, NMATE, NANIT)

'*****
'ENTRADA DE DATOS DE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA ELEMENTOS SERCHA
'TW, NW, NW1 = ARREGLO LOCAL
'*****

Dim NW(100) As Double, TW(300) As Double, NW1(300) As Double
Dim EA As Double, AINFA As Double, I As Integer
Dim IT As Integer, I1 As Integer, I2 As Integer, I3 As Integer

ICHEK = Worksheets(1).Cells(4, 1).Value

'LEER No. DE DOF, No. DE ELEMENTOS, PROPIEDADES DE MATERIALES,
'AREAS INICIALES DE ELEMENTO Y FUERZAS INICIALES

NV = Worksheets(1).Cells(7, 1).Value
NE = Worksheets(1).Cells(7, 2).Value
NBCON = Worksheets(1).Cells(7, 3).Value
NLOAD = Worksheets(1).Cells(7, 4).Value
NMATE = Worksheets(1).Cells(7, 5).Value
NANIT = Worksheets(1).Cells(7, 6).Value
NDIM = Worksheets(1).Cells(7, 7).Value
NOUT = Worksheets(1).Cells(7, 8).Value
NN = Abs(NV / NDIM)
ITYE = Worksheets(1).Cells(10, 1).Value
POISS = Worksheets(1).Cells(10, 2).Value
EA = Worksheets(1).Cells(10, 3).Value
AINFA = Worksheets(1).Cells(10, 4).Value
NDSP = Worksheets(1).Cells(10, 5).Value
'ESCRIBIR
With Worksheets(2)
    '.Cells(9, 1).Activate
    .Cells(4, 1).Value = "RESUMEN DE DATOS DE ENTRADA"
    .Cells(5, 1).Value = "-----"
    .Cells(6, 1).Value = "No. DE VARIABLES = " & NV
    .Cells(7, 1).Value = "No. DE ELEMENTOS = " & NE
    .Cells(8, 1).Value = "REL. DE POISSON = " & POISS
    .Cells(9, 1).Value = "TIPO DE ELEMENTO ,ITYE = " & ITYE & _
        "; 1:GREEN; 2:INGENIERIL; 3:LOGARITMICO; 4:LOG. C/ CAMBIO DE VOL)"
End With
SH2 = 9
For I = 1 To Abs(NE)
    E(I) = EA
    'ARO(I) = 1

```

```

    ANIT(I) = AINFA
Next I
'LEER No. DE ELEMENTOS CON DIFERENTE E o ANIT
SH1 = 11
If (NMATE <> 0) Then
  'LEER NW(I), TW(I), I=1 TO NMATE
  For I = 1 To Abs(NMATE)
    NW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    TW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    E(NW(I)) = TW(I)
  Next I
  SH1 = SH1 - 1
End If
SH1 = SH1 + 2 + Abs(NMATE)
If (NANIT <> 0) Then
  For I = 1 To Abs(NANIT)
    NW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    TW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    ANIT(NW(I)) = TW(I)
  Next I
  SH1 = SH1 - 1
End If
'LEER COORD.NODALES, CONECTIV.DE ELEMENTOS, PATRON DE CARGA, CONDS.DE
CONTORNO,
'AÑADIR RESORTES, CONTROL DE SALIDA, Y CALCULO DE LONG.INICIAL DE ELEMENTOS
SH1 = SH1 + 2 + Abs(NANIT)
If (NDIM = 2) Then
  For I = 1 To Abs(NN)
    IT = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    x(IT) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    y(IT) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
  Next I
End If
If (NDIM = 3) Then
  For I = 1 To Abs(NN)
    IT = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    x(IT) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    y(IT) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
    z(IT) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 4).Value
  Next I
End If
SH1 = SH1 + 1 + Abs(NN)
'OBTENER CONECTIVIDAD DE ELEMENTOS
For I = 1 To Abs(NE)
  IT = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
  ID(IT, 1) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
  ID(IT, 2) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
  ARO(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 4).Value
Next I
'OBTENER LONGITUD ANTIGUA DE ELEMENTOS
For I = 1 To Abs(NE)
  I1 = ID(I, 1)
  I2 = ID(I, 2)
  ALO(I) = (x(I1) - x(I2)) ^ 2 + (y(I1) - y(I2)) ^ 2

```

```

ALO(I) = Sqr(ALO(I))
If (NDIM = 3) Then
  ALO(I) = Sqr(ALO(I) * ALO(I) + (z(I1) - z(I2)) ^ 2)
End If
Next I
'INTRODUCIR CARGAS
For I = 1 To NV
  QFI(I) = 0
Next I
SH1 = SH1 + 1 + Abs(NE)
If (NDIM = 2) Then
  'LEER Y CARGAR
  For I = 1 To Abs(NLOAD)
    NW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    TW(2 * (I - 1) + 1) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    TW(2 * (I - 1) + 2) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
    QFI(2 * (NW(I) - 1) + 1) = TW(2 * (I - 1) + 1)
    QFI(2 * (NW(I) - 1) + 2) = TW(2 * (I - 1) + 2)
  Next I
Else
  If (NDIM = 3) Then
    'LEER Y CARGAR
    For I = 1 To Abs(NLOAD)
      NW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
      TW(3 * (I - 1) + 1) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
      TW(3 * (I - 1) + 2) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
      TW(3 * (I - 1) + 3) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 4).Value
      QFI(3 * (NW(I) - 1) + 1) = TW(3 * (I - 1) + 1)
      QFI(3 * (NW(I) - 1) + 2) = TW(3 * (I - 1) + 2)
      QFI(3 * (NW(I) - 1) + 3) = TW(3 * (I - 1) + 3)
    Next I
  End If
End If
'INTRODUCIR CONDICIONES DE CONTORNO
For I = 1 To Abs(NV)
  IBC(I) = 0
Next I
SH1 = SH1 + 1 + Abs(NLOAD)
If (NDIM = 2) Then
  'LEER Y CARGAR
  For I = 1 To Abs(NBCON)
    NW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    NW1(2 * (I - 1) + 1) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    NW1(2 * (I - 1) + 2) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
    IBC(2 * (NW(I) - 1) + 1) = NW1(2 * (I - 1) + 1)
    IBC(2 * (NW(I) - 1) + 2) = NW1(2 * (I - 1) + 2)
  Next I
Else
  If (NDIM = 3) Then
    'LEER Y CARGAR
    For I = 1 To Abs(NBCON)
      NW(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
      NW1(3 * (I - 1) + 1) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
      NW1(3 * (I - 1) + 2) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value

```

```

NW1(3 * (I - 1) + 3) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 4).Value
IBC(3 * (NW(I) - 1) + 1) = NW1(3 * (I - 1) + 1)
IBC(3 * (NW(I) - 1) + 2) = NW1(3 * (I - 1) + 2)
IBC(3 * (NW(I) - 1) + 3) = NW1(3 * (I - 1) + 3)
Next I
End If
End If
'ESTABLECE IDSP=0 PARA CONTROL DE CARGA, IDSP=1 CONTROL DE DESPLAZAMIENTO
IDSP = 0
For I = 1 To Abs(NV)
  If (IBC(I) = -1) Then
    IDSP = I
  End If
Next I
'LEER No. DE VARIABLES DE SALIDA Y SUS D.O.F. GLOBALES
SH1 = SH1 + 1 + Abs(NBCON)
For I = 1 To Abs(NOUT)
  IDOUT(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, I).Value
Next I
'LEER RESORTES LINEALES ANCLADOS
SH1 = SH1 + 2 'sh1=29
If (NDSP <> 0) Then
  For I = 1 To Abs(NDSP)
    ID14S(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
    AK14S(I) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
    'ESCRIBIR
    SH2 = 9
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = _
      "RESORTE LINEAL DE RIGIDEZ: " & AK14S(I) & _
      " AÑADIDO A LA VAR. No.: " & ID14S(I)
  Next I
  SH1 = SH1 - 1
End If
'ESCRIBIR
SH2 = SH2 + 2 + Abs(NDSP)
'Worksheets(2).Cells(SH2 + 3, 1).Activate
With Worksheets(2)
  .Cells(SH2, 1).Value = "PROPIEDADES DE ELEMENTOS"
  .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "-----"
  .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "ELEM."
  .Cells(SH2 + 2, 2).Value = "NODOS"
  .Cells(SH2 + 2, 3).Value = "LONGTD"
  .Cells(SH2 + 2, 4).Value = "E"
  .Cells(SH2 + 2, 5).Value = "FUERZA INIC."
  .Cells(SH2 + 2, 6).Value = "AREA INIC."
End With
SH2 = SH2 + 2
'Worksheets(2).Cells(SH2 + Abs(NE), 1).Activate
For I = 1 To Abs(NE)
  With Worksheets(2)
    .Cells(SH2 + I, 1).Value = I
    .Cells(SH2 + I, 2).Value = "(" & ID(I, 1) & ")--(" & ID(I, 2) & ")"
    .Cells(SH2 + I, 3).Value = ALO(I)
    .Cells(SH2 + I, 4).Value = E(I)
  End With

```

```

        .Cells(SH2 + I, 5).Value = ANIT(I)
        .Cells(SH2 + I, 6).Value = ARO(I)
    End With
Next I
SH2 = SH2 + 2 + Abs(NE)
'Worksheets(2).Cells(SH2 + 2, 1).Activate
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "PROPIEDADES NODALES"
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = "-----"
SH2 = SH2 + 2
If (NDIM = 2) Then
    With Worksheets(2)
        '.Cells(SH2 + 1, 1).Activate
        .Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
        .Cells(SH2, 2).Value = "X"
        .Cells(SH2, 3).Value = "Y"
        .Cells(SH2, 4).Value = "Fx"
        .Cells(SH2, 5).Value = "Fy"
        .Cells(SH2, 6).Value = "BCx"
        .Cells(SH2, 7).Value = "BCy"
    End With
    For I = 1 To Abs(NN)
        I1 = 2 * I - 1
        I2 = 2 * I
        With Worksheets(2)
            '.Cells(SH2 + I + 1, 1).Activate
            .Cells(SH2 + I, 1).Value = I
            .Cells(SH2 + I, 2).Value = x(I)
            .Cells(SH2 + I, 3).Value = y(I)
            .Cells(SH2 + I, 4).Value = QFI(I1)
            .Cells(SH2 + I, 5).Value = QFI(I2)
            .Cells(SH2 + I, 6).Value = IBC(I1)
            .Cells(SH2 + I, 7).Value = IBC(I2)
        End With
    Next I
Else
    If (NDIM = 3) Then
        With Worksheets(2)
            '.Cells(SH2 + 1, 1).Activate
            .Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
            .Cells(SH2, 2).Value = "X"
            .Cells(SH2, 3).Value = "Y"
            .Cells(SH2, 4).Value = "Z"
            .Cells(SH2, 5).Value = "Fx"
            .Cells(SH2, 6).Value = "Fy"
            .Cells(SH2, 7).Value = "Fz"
            .Cells(SH2, 8).Value = "BCx"
            .Cells(SH2, 9).Value = "BCy"
            .Cells(SH2, 10).Value = "BCz"
        End With
        For I = 1 To Abs(NN)
            I1 = 3 * (I - 1) + 1
            I2 = 3 * (I - 1) + 2
            I3 = 3 * (I - 1) + 3
            With Worksheets(2)

```

```

        '.Cells(SH2 + I + 1, 1).Activate
        .Cells(SH2 + I, 1).Value = I
        .Cells(SH2 + I, 2).Value = x(I)
        .Cells(SH2 + I, 3).Value = y(I)
        .Cells(SH2 + I, 4).Value = z(I)
        .Cells(SH2 + I, 5).Value = QFI(I1)
        .Cells(SH2 + I, 6).Value = QFI(I2)
        .Cells(SH2 + I, 7).Value = QFI(I3)
        .Cells(SH2 + I, 8).Value = IBC(I1)
        .Cells(SH2 + I, 9).Value = IBC(I2)
        .Cells(SH2 + I, 10).Value = IBC(I3)
    End With
Next I
End If
End If
'CHEQUEO DE ERRORES
If (ICHEK = 0) Then Exit Sub
Call INCK(E, ID, ID14S, IBC, NV, NN, NE, NDSP, NDIM, NOUT, NBCON, _
        NLOAD, NMATE, NANIT, ITYE, POISS, IWR, NNODE)

End Sub

Sub INPT1(FACI, NINC, IARC, BETOK, ITERTY, IDES, FACMX, FACMN, DLDES, _
        DLDMX, DLDMN, ISWCH, CSTIFS, IRE, IWR, IWRIT, IRES, IBRAC, _
        ICRIT, IBRSW, EPSI, IROW, ILOAD, SHIF, ICHEK, ICORT, IDSP, _
        ICVCK, IPRED, NDSP, NN)

'*****
'INTRODUCIR CONTROL INCREMENTAL/ITERATIVO
'*****
'ESCRIBIR
SH2 = SH2 + 2 + NN
With Worksheets(2)
    '.Cells(SH2 + 2, 1).Activate
    .Cells(SH2, 1).Value = "PARAMETROS DE CONTROL DE LA SOLUCION"
    .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "-----"
End With
'LEER
SH1 = SH1 + 2 + Abs(NDSP)
FACI = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value
NINC = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
IWRIT = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 3).Value
IAUTO = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 4).Value
IARC = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 5).Value
ILOAD = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 6).Value
'ESCRIBIR
SH2 = SH2 + 1
With Worksheets(2)
    '.Cells(SH2 + 9, 1).Activate
    .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "FACTOR DE CARGA INCRMENTAL (FACI) = " & FACI
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "No. DE INCREMENTOS (NINC) = " & NINC
    .Cells(SH2 + 3, 1).Value = "TIPO DE SALIDA: IWRIT = " & IWRIT & "; 0==>
LIMITADA, 1==> COMPLETA"

```

```

.Cells(SH2 + 4, 1).Value = "TIPO DE INCS.: IAUTO = " & IAUTO & ";
0==>INCS. FIJOS, 1==> INCS. AUTOMATICOS"
.Cells(SH2 + 5, 1).Value = "IARC = " & IARC & "; 0==> CONTROL DE CARGA,
1==> LONG. DE ARCO CILINDRICO, 2==> LONG. DE ARCO DE PLANO ORTOGONAL,"
.Cells(SH2 + 6, 1).Value = ".... 3==> LONG. DE ARCO DE PLANO
ORTOG. ACTUALIZADO, 4==> LONG. DE ARCO DE TRAYECTORIA
ORTOGONAL,"
.Cells(SH2 + 7, 1).Value = ".... 5==> DESPLAZAMIENTO
ESPECIFICO, 6==> CONTROL DE TRABAJO
INCREMENTAL"
.Cells(SH2 + 8, 1).Value = "ILOAD = " & ILOAD & "; 1==> SOLN. GUIADA POR
CSTIFF., 2==> SOLN. GUIADA POR No. PIV. NEG."
End With
'LEER
SH1 = SH1 + 2
IACC = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value
IRES = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
IBRAC = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 3).Value
ICRIT = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 4).Value
IBRSW = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 5).Value
IROW = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 6).Value
'ESCRIBIR
SH2 = SH2 + 9
With Worksheets(2)
.Cells(SH2 + 9, 1).Activate
.Cells(SH2 + 1, 1).Value = "IACC = " & IACC & "; 0==> SIN ACEL., 1==>
ACEL. CON N-R MOD."
.Cells(SH2 + 2, 1).Value = "IRES = " & IRES & "; 0==> NO ES REINICIO,
1==> ES UN REINICIO"
.Cells(SH2 + 3, 1).Value = "IBRAC = " & IBRAC & "; 0==> SIN CAPTURA, 1==>
BISECCION ORIGINAL"
.Cells(SH2 + 4, 1).Value = "IBRSW = " & IBRSW & "; 0==> SIN RAMIFICACION,
1==> 1er. EIGEN-VECTOR INYECTIVO"
.Cells(SH2 + 5, 1).Value = "ICRIT = " & ICRIT & "; EL No. DE PTO. CRITICO
A SER CAPTURADO"
.Cells(SH2 + 6, 1).Value = "IROW = " & IROW & "; EL No. DE FILA DE Kt
REEMPLAZADO POR UN VEC. UNITARIO PARA OBTENER Seydel's"
.Cells(SH2 + 7, 1).Value = " EL PREDICTOR DE SEYDEL PARA RAMIFICACION
SI ABS(IBRSW)=4"
.Cells(SH2 + 8, 1).Value = " D.O.F. A SER ANCLADO EN EL CALC. DIRECTO
DE PTO. SINGULAR, SI ABS(IBRAC)=6"
End With
'LEER
SH1 = SH1 + 2
ICVCK = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value
BETOK = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
ITERTY = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 3).Value
NITMAX = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 4).Value
NLSMX = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 5).Value
EPSI = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 6).Value
SHIF = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 7).Value
'ESCRIBIR
SH2 = SH2 + 9
With Worksheets(2)

```

```

'.Cells(SH2 + 13, 1).Activate
.Cells(SH2 + 1, 1).Value = "PARAMETROS PARA CONVERGENCIA"
.Cells(SH2 + 2, 1).Value = "_____ "
.Cells(SH2 + 3, 1).Value = "TIPO DE CONTROL DE CONVERGENCIA, ICVCK = " &
ICVCK
.Cells(SH2 + 4, 1).Value = "          1==> FUERZA RESID. ESCALADA POR LA
FUERZA EXTERNA;"
.Cells(SH2 + 5, 1).Value = "          2==> FUERZA RESID. ESCALADA POR
REACCION;"
.Cells(SH2 + 6, 1).Value = "          3==> DESPL. ITER. ESCALADO POR
DESPL. TOTAL"
.Cells(SH2 + 7, 1).Value = "FACTOR DE TOLERANCIA A CONVERGENCIA, BETOK =
" & BETOK
.Cells(SH2 + 8, 1).Value = "TIPO DE SOLUCION ITERATIVA, ITERTY = " &
ITERTY & " (1=> N-R; 2=> N-R MOD.)"
.Cells(SH2 + 9, 1).Value = "MAXIMO NUMERO DE ITERACIONES, NITMAX = " &
NITMAX
.Cells(SH2 + 10, 1).Value = "MAXIMO NUMERO DE LINEAS DE BUSQUEDA, NLSMX =
" & NLSMX
.Cells(SH2 + 11, 1).Value = "TOLERANCIA DE CAPTURA EPSILON, EPSI = " &
EPSI
.Cells(SH2 + 12, 1).Value = "CAMBIO EN EIGEN-ANALISIS, SHIF = " & SHIF
End With
SH2 = SH2 + 13
'ESPECIFICACIONES PARA INCREMENTOS AUTOMATICOS
ISWCH = 0
ICORT = 0
IPRED = 0
'LEER
SH1 = SH1 + 2
IDES = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value
FACMX = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
FACMN = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 3).Value
ISWCH = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 4).Value
ICORT = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 5).Value
IPRED = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 6).Value
'ESCRIBIR
If ((IAUTO = 1) Or (ISWCH <> 0) Or (ICORT <> 0) Or (IPRED <> 0)) Then
  With Worksheets(2)
    '.Cells(SH2 + 9, 1).Activate
    .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "DATOS PARA INCREMENTO AUTOMATICO"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "_____ "
    .Cells(SH2 + 3, 1).Value = "No. DESEADO DE ITERACIONES, IDES = " & IDES
    .Cells(SH2 + 4, 1).Value = "MAXIMO INCREMENTO DE CARGA, FACMX = " &
FACMX
    .Cells(SH2 + 5, 1).Value = "MINIMO INCREMENTO DE CARGA, FACMN = " &
FACMN
    .Cells(SH2 + 6, 1).Value = "PARAM. PARA LONG. DE ARCO, ISWCH = " &
ISWCH & "; 0=>SIN CAMBIO, OTHER=>CON CAMBIO"
    .Cells(SH2 + 7, 1).Value = "TIPO DE CORRECTOR, ICORT = " & ICORT & ";
0=>NORMAL, 1=>2do ORDEN EXPLICITO, 2=>IMPLICITO"
    .Cells(SH2 + 8, 1).Value = "TIPO DE PREDICTOR, IPRED = " & IPRED & ";
0=>NORMAL, 1=>2do ORDEN"
  End With

```

```

SH2 = SH2 + 9
If (ISWCH <> 0 And IARC = 0) Then
  'LEER
  CSTIFS = Worksheets(1).Cells(SH1 + 3, 1).Value
  'ESCRIBIR
  SH2 = SH2 + 1
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
    "CAMBIO AUTOMATICO A LONG. DE ARCO CUANDO CSTIF < CSTIFS = " & CSTIFS
End If
End If
'ESPECIFICACIONES PARA LONG.DE ARCO
SH1 = SH1 + 4
If (IARC > 0 Or IBRSW <> 0 Or ISWCH = 6) Then
  'LEER
  DLDES = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value
  DLDMX = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
  DLDMN = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 3).Value
  'ESCRIBIR
  With Worksheets(2)
    '.Cells(SH2 + 6, 1).Activate
    .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "DATOS PARA CONTROL DE LONGITUD DE ARCO"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "-----"
    .Cells(SH2 + 3, 1).Value = "INC. DE LONGITUD DESEADA, DLDES = " & DLDES
    .Cells(SH2 + 4, 1).Value = "MAX. INC. DE LONGITUD, DLMX = " & DLDMX
    .Cells(SH2 + 5, 1).Value = "MIN. INC. DE LONGITUD, DLMN = " & DLDMN
  End With
  SH2 = SH2 + 6
End If
'ESPECIFICACIONES PARA LINEAS DE BUSQUEDA
SH1 = SH1 + 2
If NLSMX <> 0 Then
  'LEER
  PERMLS = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value
  AMPMX = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
  ETMXA = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 3).Value
  ETMNA = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 4).Value
  'ESCRIBIR
  With Worksheets(2)
    '.Cells(SH2 + 7, 1).Activate
    .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "PARAMETROS PARA LINEA DE BUSQUEDA"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "-----"
    .Cells(SH2 + 3, 1).Value = "TOLERANCIA EN LA REL., PERMLS = " & PERMLS
    .Cells(SH2 + 4, 1).Value = "MAX. AMPLITUD EN CUALQUIER PASO, AMPMX = "
& AMPMX
    .Cells(SH2 + 5, 1).Value = "MAX. LONG. DE PASO TOTAL, ETMXA = " & ETMXA
    .Cells(SH2 + 6, 1).Value = "MIN. LONG. DE PASO TOTAL, ETMNA = " & ETMNA
  End With
  SH2 = SH2 + 7
End If
'ESPECIFICACIONES PARA ACELERACION
SH1 = SH1 + 2
If IACC = 1 Then
  'LEER
  R1C = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 1).Value

```

```

R2C = Worksheets(1).Cells(SH1 + 1, 2).Value
'ESCRIBIR
With Worksheets(2)
  .Cells(SH2 + 5, 1).Activate
  .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "PARAMETROS DE RECORTES PARA ACELERACION"
  .Cells(SH2 + 2, 1).Value =
"-----"
  .Cells(SH2 + 3, 1).Value = "RECORTE INFERIOR, R1C = " & R1C
  .Cells(SH2 + 4, 1).Value = "RECORTE SUPERIOR, R2C = " & R2C
End With
SH2 = SH2 + 5
End If
'CHEQUEO DE ERRORES
If ICHEK = 0 Then Exit Sub
Call INCK1(NINC, IARC, BETOK, ITERTY, IDES, FACMX, FACMN, DLDES, _
          DLDMX, DLDMN, ISWCH, CSTIFS, IWR, IWRIT, IRES, IBRAC, _
          ICRIT, IBRSW, EPSI, ILOAD, IAUTO, IDSP, ICVCK)

End Sub

Sub INIT1(CSTIFO, NEG0, INCC, IRES, FACT, ANIT, AN, NE, ALO, ALN, _
         ARO, ARN, PT, NV, DT, z1, IBRAC, IBRSW, YY, AMP, NDOF, x1)

'*****
'
'          INICIALIZACION
'*****
'IPAST SE INCR.DE A UNO, LUEGO DE ALGUN CAMBIO EN EL No.DE PIVOTES NEG.
IPAST = 0
INBR = 0
ALOD(1) = 0
CSTIFO = 1
NEGO = 0
INCC = 0
If IRES = 0 Then
  FACT = 0
  Call VCCP(ANIT, AN, 1, NE)
  Call VCCP(ALO, ALN, 1, NE)
  Call VCCP(ARO, ARN, 1, NE)
  Call VCZR(PT, NV)
Else
  If IRES <> 0 Then
    'DATOS PARA RE-INICIO DESDE UNA CORRIDA PREVIA
    Call RSRW(FACT, CSTIFO, NEG0, AN, ALN, ARN, PT, DT, z1, NE, NV, _
            1, IBRAC, IBRSW, YY, AMP, NDOF, x1)

  End If
End If
End Sub

Sub INCK(E, ID, ID14S, IBC, NV, NN, NE, NDSP, NDIM, NOUT, _
        NBCON, NLOAD, NMATE, NANIT, ITYE, POSS, IWR, NNODE)
'*****
' CHEQUEAR DATOS DE ENTRADA LEIDOS DESDE INPT
'*****
Dim ERRORMESSAGE As Integer, IER As Integer, EX As Double, NT As Integer

```

```
Dim N1 As Double, N2 As Double, N3 As Double, N4 As Double, I As Integer
Dim AUXI(200) As Integer
```

```
'CHEQUEO DE ERRORES
IER = 0
If (NV < 0 Or NV > 100) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NV < 0 o NV > 100", vbOKOnly + vbCritical, _
    "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (NE < 0) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NE < 0", vbOKOnly + vbCritical, _
    "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (NBCON < 0 Or NBCON > NV) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NBCON < 0 o NBCON > NV", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (NLOAD < 0 Or NLOAD > NV) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NLOAD < 0 o NLOAD > NV", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (NMATE < 0 Or NMATE > NE) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NMATE < 0 o NMATE > NE", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (NANIT < 0 Or NANIT > NE) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NANIT < 0 o NANIT > NE", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (NDIM < 2 Or NDIM > 3) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("NDIM < 2 o NDIM > 3", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (ITYE < 1 Or ITYE > 4) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("ITYE < 1 o ITYE > 4", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
If (POSS < 0 Or POSS > 0.5) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("POSS < 0 o POSS > 0.5", vbOKOnly + _
    vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
  IER = 1
End If
Call MAMN(E, NE, EX, NT, 0, 0, 0, IBC)
If (EX < 0) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("E < 0", vbOKOnly + vbCritical, _
    "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
```

```

    IER = 1
End If
'CARGAR ID(NE,1) EN AUXI(NE)
For I = 1 To NE
    AUXI(I) = ID(I, 1)
Next I
Call IMAMN(AUXI, NE, N1, NT, 0, 0, 0, IBC)
Call IMAMN(AUXI, NE, N2, NT, 0, 1, 0, IBC)
'CARGAR ID(NE,2) EN AUXI(NE)
For I = 1 To NE
    AUXI(I) = ID(I, 2)
Next I
Call IMAMN(AUXI, NE, N3, NT, 0, 0, 0, IBC)
Call IMAMN(AUXI, NE, N4, NT, 0, 1, 0, IBC)
If (N1 < 0 Or N2 > NN Or N3 < 0 Or N4 > NN) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox("ID(*,*) < 0 o ID(*,*) > NN", vbOKOnly + _
        vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
    IER = 1
End If
If (NDSP > 0) Then
    Call IMAMN(ID14S, NDSP, N1, NT, 0, 0, 0, IBC)
    Call IMAMN(ID14S, NDSP, N2, NT, 0, 1, 0, IBC)
    If (N1 < 0 Or N2 > NV) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox("ID14S(*) < 0 o ID14S(*) > NV", vbOKOnly + _
            vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
        IER = 1
    End If
End If
If (NOUT < 0 Or NOUT > NV) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox("NOUT < 0 o NOUT > NV", vbOKOnly + _
        vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
    IER = 1
End If
If (NDSP < 0 Or NDSP > NV) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox("NDSP < 0 o NDSP > NV", vbOKOnly + _
        vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
    IER = 1
End If
Call IMAMN(IBC, NV, N1, NT, 0, 1, 0, IBC)
If (N1 > 1) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox("IBC(*) < -1 o IBC(*) > 1", vbOKOnly + _
        vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
    IER = 1
End If
If (IER = 1) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox("!!! SE ENCONTRARON ALGUNOS ERRORES EN DATOS DE
ENTRADA: " & _
        "PARTE-1 !!!" & Chr(13) & "POR FAVOR CORREGIRLOS, ANTES DE VOLVER A
INTENTAR", _
        vbOKOnly + vbCritical, "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-
1")
End
Else

```

```

    ERRORMESSAGE = MsgBox("!!! NO SE ENCONTRARON ERRORES EN LOS DATOS DE
ENTRADA: " &
    "PART-1 !!!", vbOKOnly + vbExclamation, _
    "REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-1")
End If

End Sub
Sub MAMN(A, N, x, INN, IABS, IMAMN, IIBC, IBC)
'*****
' ENCONTRAR EL MAXIMO o MINIMO COMPONENTE,X,DE UN VECTOR A(N)
' Y SU No. DE FILA INN
' IABS = 0: A(K)
'      1: ABS(A(K))
' IMAMN= 0: MINIMO
'      1: MAXIMO
' IIBC = 0: TOMA EN CUENTA TODO A(N)
'      1: SOLO LIBRES A(N)
'*****
Dim IND As Integer, I As Integer

'OPERAR SOBRE A(N)
BIG = 1E+50
IND = 999
INN = IND
If (IABS = 0) Then
    'MINIMO
    If (IMAMN = 0) Then
        x = BIG
        For I = 1 To N
            If (A(I) > x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
                GoTo STEP10
            End If
            x = A(I)
            INN = I
        Next I
        If (INN = IND) Then
            Exit Sub
        End If
    Else
        If (IMAMN = 1) Then
            'MAXIMO
            x = -BIG
            For I = 1 To N
                If (A(I) < x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
                    GoTo STEP20
                End If
                x = A(I)
                INN = I
            Next I
        End If
    End If
    If (INN = IND) Then
        Exit Sub
    End If
End If
STEP10:
STEP20:

```

```

    End If
  End If
  'OPERA SOBRE ABS(A(N))
Else
  If IABS = 1 Then
    'MINIMO
    If (IMAMN = 0) Then
      x = BIG
      For I = 1 To N
        If (Abs(A(I)) > x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
          GoTo STEP30
        End If
        x = Abs(A(I))
        INN = I
STEP30:
      Next I
      If (INN = IND) Then
        Exit Sub
      End If
    Else
      If (IMAMN = 1) Then
        'MAXIMO
        x = -BIG
        For I = 1 To N
          If (Abs(A(I)) < x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
            GoTo STEP40
          End If
          x = Abs(A(I))
          INN = I
STEP40:
        Next I
        If (INN = IND) Then
          Exit Sub
        End If
      End If
    End If
  End If
End If

End Sub

Sub IMAMN(A, N, x, INN, IABS, MAMN, IIBC, IBC)
'*****
' ENCUESTRA EL MAXIMO/MINIMO COMPONENTE,X,DE UN VECTOR A(N)
' Y SU No. DE FILA INN

' IABS = 0: A(K)
'       1: ABS(A(K))
' MAMN = 0: MINIMO
'       1: MAXIMO
' IIBC = 0: TOMA EN CUENTA TODO A(N)
'       1: SOLO LIBRES A(N)
'*****
Dim IBIG As Double, I As Integer, IND As Integer

```

```

'OPERA SOBRE A(N)
IBIG = 10000000
IND = 999
INN = IND
If (IABS = 0) Then
  'MINIMO
  If (MAMN = 0) Then
    x = IBIG
    For I = 1 To N
      If (A(I) > x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
        GoTo STEP10
      End If
      x = A(I)
      INN = I
STEP10:
    Next I
    If (INN = IND) Then
      Exit Sub
    End If
  Else
    If (MAMN = 1) Then
      'MAXIMO
      x = -IBIG
      For I = 1 To N
        If (A(I) < x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
          GoTo STEP20
        End If
        x = A(I)
        INN = I
STEP20:
      Next I
      If (INN = IND) Then
        Exit Sub
      End If
    End If
  End If
'OPERA SOBRE ABS(A(N))
Else
  If IABS = 1 Then
    'MINIMO
    If (MAMN = 0) Then
      x = IBIG
      For I = 1 To N
        If (Abs(A(I)) > x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
          GoTo STEP30
        End If
        x = Abs(A(I))
        INN = I
STEP30:
      Next I
      If (INN = IND) Then
        Exit Sub
      End If
    End If
  End If

```

```

Else
  If (MAMN = 1) Then
    'MAXIMO
    x = -IBIG
    For I = 1 To N
      If (Abs(A(I)) < x Or (IIBC = 1 And IBC(I) > 0)) Then
        GoTo STEP40
      End If
      x = Abs(A(I))
      INN = I
STEP40:
    Next I
    If (INN = IND) Then
      Exit Sub
    End If
  End If
End If
End If
End If

End Sub

Sub ACCE(DPB, GO, GOO, IBC, NV, DELO, SLOL, R1C, R2C, ITE, IWRT, IWR)
'*****
'   APLICA ACELERACION SECANTE AL METODO NEWTON-RAPHSON MODIF.
'   DPB = DESP. ITERATIVO A MODIFICARSE CON LA ACELERACION
'   GO = ACTUAL GRAD, GOO = ANTIGUO
'   DELO = ANT. CAMBIO EN DESP. (WITHOUT S-L), SLOL = OLD STEP-LENGTH
'   R1C Y R2C SON PARAMETROS DE RECORTE
'*****
Dim R1I As Double, R2E As Double, BAS As Double, TOP As Double
Dim TOP2 As Double, I As Integer, C As Double, A As Double
Dim B As Double, RAT As Double

'ESTABLECER VALORES DE RECORTE
R1I = 1 / R1C
R2E = -0.5 * R2C
If (ITE = 1) Then GoTo STEP100
'ACELERACION REAL
BAS = 0
TOP = 0
TOP2 = 0
For I = 1 To NV
  If (IBC(I) = 0) Then
    BAS = BAS + DELO(I) * (GO(I) - GOO(I))
    TOP = TOP + DELO(I) * GO(I)
    TOP2 = TOP2 + DPB(I) * (GO(I) - GOO(I))
  End If
Next I
If (Abs(BAS) < 0.000000001) Then GoTo STEP100
C = TOP / BAS
A = 1 - C
B = -C - (A * TOP2 / (SLOL * BAS))
If (A < R1I Or A > R1C) Then GoTo STEP100

```

```

RAT = B / A
If (RAT < R2E Or RAT > R2C) Then GoTo STEP100
For I = 1 To NV
  If (IBC(I) = 0) Then DPB(I) = A * DPB(I) + B * SL0L * DELO(I)
Next I
'FIN DE LA ACTUALIZACION DE ACELERACION
If (IWRIT = 1) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = _
  "      -NEWTON-RAPHSON MOD. ACELERADO-      con A = " & A
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 9).Value = _
  "      y B = " & B
End If
STEP100:
'GUARDAR VALORES ANTIGUOS
Call VCCP(DPB, DELO, 1, NV)
Call VCCP(GO, GOO, 1, NV)
End Sub

Sub ARCL(IARC, K, IWR, DT, DELBAR, PT, PTOL, IBC, NV, DL, FACT, _
        IFAIL, QFI, W1, ETA, IWRIT, ILS, SOL)
'*****
'      LONGITUD DE ARCO

'      IARC      = 1 : METODO DE LONGITUD DE ARCO CILINDRICO
'                2 : METODO DE LONGITUD DE ARCO ESFERICO

'      DT       = DESP.TANGENCIALES CON CARGAS FIJAS
'      DELBAR   = DESP.TANGENCIALES CON FUERZAS DESBALANCEADAS
'      DL       = LONGITUD INCREMENTAL DESEADA
'      ETA      = LONG. DE PASO DE LINEA DE BUSQUEDA (=1.0D0,IF NO L-S)
'      FACT     = FACTOR DE CARGA TOTAL
'      IFAIL    = 2 SI SE NECESITA CORTE DE INCREMENTO
'      ILS     = 0:NO HAY LINEA DE BUSQUEDA; 1:LINEA DE BUSQUEDA EN PROCESO
'      PT       = DESPLAZAMIENTOS TOTALES
'      PTOL    = DESPL.TOTALES AL FINAL DEL ULTIMO INCRMENTO
'      QFI     = PATRON DE CARGAS
'      WEIGHT   = FACTOR DE ESCALA ENTRE DESPLAZAMIENTOS Y CARGAS
'      W1      = SIN USO      , SI IARC = 1
'                = PREDICTOR TANGENCIAL, SI IARC = 2
'*****
Dim AA As Double, BB As Double, CC As Double, A4 As Double, A5 As Double
Dim I As Integer, DPBAR As Double, R1 As Double, R2 As Double
Dim RLIN As Double, COST1 As Double, COST2 As Double, T3 As Double
Dim T1 As Double, T2 As Double, TT As Double, T0 As Double

'METODO DE LONGITUD DE ARCO CILINDRICO
Worksheets(2).Cells(SH2, 7).Value = _
  ">>> LONGITUD DE ARCO EN PROCESO <<<<"
SH2 = SH2 + 1
If (IARC = 1) Then
  AA = 0
  BB = 0
  CC = -DL * DL
  A4 = 0

```

```

A5 = 0
For I = 1 To NV
  If (IBC(I) <> 1) Then
    AA = AA + ETA * ETA * DT(I) * DT(I)
    DPBAR = PT(I) - PTOL(I) + ETA * DELBAR(I)
    BB = BB + 2 * ETA * DT(I) * DPBAR
    CC = CC + DPBAR * DPBAR
    A4 = A4 + DPBAR * (PT(I) - PTOL(I))
    A5 = A5 + DT(I) * (PT(I) - PTOL(I))
  End If
Next I
Call QSOL(AA, BB, CC, R1, R2, RLIN, IFAIL)
'SE NECESITA CORTE DEL INCREMENTO
If (IFAIL = 2) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
  "* NO HAY RAICES EN LA RESTRICCION DE LONGITUD DE ARCO"
  SH2 = SH2 + 1
  Exit Sub
ElseIf (IFAIL = 1) Then
  'SOLO ES POSIBLE SOLUCION LINEAL
  SOL = R1
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
  "* SOLO ES POSIBLE LA SOLUCION LINEAL"
  SH2 = SH2 + 1
ElseIf (IFAIL = 0) Then
  COST1 = A4 + A5 * R1
  COST2 = A4 + A5 * R2
  SOL = R1
  If (COST2 > COST1) Then SOL = R2
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
  "* DOS RAICES, DOS POSIBLES SOLUCIONES"
  SH2 = SH2 + 1
End If
GoTo STEP500
'METODO DE LONGITUD DE ARCO ESFERICA
ElseIf (IARC = 2) Then
  GoTo STEP450
ElseIf (IARC = 3) Then
  For I = 1 To NV
    W1(I) = 0
    If (IBC(I) = 1) Then GoTo STEP310
    W1(I) = PT(I) - PTOL(I)
STEP310:
  Next I
ElseIf (IARC = 4) Then
  Call VCCP(DT, W1, 1, NV)
ElseIf (IARC = 5) Then
  SOL = -DELBAR(K) / DT(K)
  GoTo STEP500
ElseIf (IARC = 6) Then
  Call VCPD(QFI, DT, IBC, 1, T1, NV)
  Call VCPD(QFI, DELBAR, IBC, 1, T2, NV)
  SOL = -T2 / T1
  GoTo STEP500

```

```

End If
Call VCNM(W1, 1, IBC, NV, TT)
STEP450:
Call VCPD(W1, DT, IBC, 1, T0, NV)
Call VCPD(W1, DELBAR, IBC, 1, T3, NV)
SOL = -T3 / T0
'ACTUALIZAR FACTOR DE CARGA Y DESPLAZAMIENTOS LIBRES
STEP500:
FACT = FACT + SOL
For I = 1 To NV
  If (IBC(I) <> 0) Then GoTo STEP20
  PT(I) = PT(I) + DELBAR(I) + SOL * DT(I)
  If (ILS <> 1) Then DELBAR(I) = DELBAR(I) + SOL * DT(I)
STEP20:
Next I
If (IWRIT <> 0) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
    "* CAMBIO ITERATIVO DEL FACTOR DE CARGA = " & SOL
  SH2 = SH2 + 1
End If
End Sub

Sub ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, AK14S, _
  NDSP, FI, PT, IMOD, IWRIT, IWR, ID, AN, x, y, z, ITYEL, NDIM, _
  NDOF, NNODE)
'*****
' ENSAMBLE DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ DE ESTRUCTURA
' PARA IMOD=2 O 3
' COLOCA LA MATRIZ AKTE(6,6) DENTRO DE LA MATRIZ AKTS(NV,NV)
' AÑADE RESORTE LINEAL AK15 ENTRE VARIABLES 1&NV
' AÑADE RESORTES LINEALES ANCLADOS NDSP PARA VARIABLES ID14S
' PARA IMOD=1 O 3
' MODIFICA VECTOR DE FUERZA INTERNA, FI, PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE
' VARIOS RESORTES LINEALES USANDO DESPLAZAMIENTOS TOTALES, PT.
'*****
'***** INICIALIZA FUERZAS NODALES Y MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL
If (IMOD <> 2) Then
  Call VCZR(FI, NV)
End If
If (IMOD <> 1) Then
  For I = 1 To NV
    For J = 1 To NV
      AKTS(I, J) = 0
    Next J
  Next I

```

```

End If
'***** BUCLE SOBRE CADA ELEMENTO
For I = 1 To NE
  'COORDENADAS NODALES Y DESPLAZAMIENTOS
  I1 = ID(I, 1)
  I2 = ID(I, 2)
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, x, XE, 3)
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, y, YE, 3)
  If (NDIM = 3) Then Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, z, ZE, 3)
  I1 = NDIM * (I1 - 1) + 1
  I2 = NDIM * (I2 - 1) + 1
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, PT, PE, 1)
  Call ELEM(EFI, AKTE, AN(I), XE, YE, ZE, PE, E(I), ARO(I), ALO(I), IWRIT,
  -
      IWR, IMOD, ITYEL, ALN(I), ARN(I), I, NDIM, POISS)
  'OPERAR SOBRE FUERZAS
  If (IMOD <> 2) Then Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, FI, EFI, 2)
  'OPERAR SOBRE MATRIZ DE RIGIDEZ (triangular superior)
  If (IMOD <> 1) Then
    For K = 1 To NDIM
      For J = 1 To K
        AKTS(I1 + J - 1, I1 + K - 1) = AKTS(I1 + J - 1, I1 + K - 1) _
          + AKTE(J, K)
        AKTS(I2 + J - 1, I2 + K - 1) = AKTS(I2 + J - 1, I2 + K - 1) _
          + AKTE(J + NDIM, K + NDIM)
      Next J
      If (I1 > I2) Then
        For J = 1 To NDIM
          AKTS(I2 + J - 1, I1 + K - 1) = AKTS(I2 + J - 1, I1 + K - 1) _
            + AKTE(K, J + NDIM)
        Next J
      Else
        For J = 1 To NDIM
          AKTS(I1 + J - 1, I2 + K - 1) = AKTS(I1 + J - 1, I2 + K - 1) _
            + AKTE(J, K + NDIM)
        Next J
      End If
    Next K
  End If
Next I
'***** MODIFICA PARA RESORTES ANCLADOS
If (NDSP <> 0) Then
  If (IMOD <> 2) Then
    For I = 1 To NDSP
      IDS = ID14S(I)
      FI(IDS) = FI(IDS) + AK14S(I) * PT(IDS)
    Next I
  End If
  If (IMOD <> 1) Then
    For I = 1 To NDSP
      IDS = ID14S(I)
      AKTS(IDS, IDS) = AKTS(IDS, IDS) + AK14S(I)
    Next I
  End If

```

```

End If
If (IWRIT <> 0 And IMOD <> 2) Then
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + NV + 1, 1).Activate
  Worksheets(2).Cells(SH2, NV + 2).Value = "EL VECTOR DE FUERZA INTERNA DE
ESTRUCTURA ES:"
  For I = 1 To NV
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, NV + 2).Value = "FI(" & I & ")= " & FI(I)
  Next I
End If
If (IWRIT <> 0 And IMOD <> 1) Then
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + NV + 1, 1).Activate
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = " LA MATRIZ DE RIGIDEZ TANGENTE DE LA
ESTRUCTURA ES:"
  For I = 1 To NV
    For J = 1 To NV
      Worksheets(2).Cells(SH2 + I, J).Value = AKTS(I, J)
    Next J
  Next I
End If
If IWRIT <> 0 Then
  SH2 = SH2 + NV + 1
End If

End Sub

Sub B13E(x, y, z, P, E, ARA, ALO, ZZ, YY, B3E, IWRIT, IWR, II, _
  ITYEL, AN, ALN, NDIM, VEC, IMODE, AKTE)
'*****
' IMODE=0:
'   CALCULA CONTRIBS. DE ELEMENTO PARA CONSTANTES DE SEGUNDO ORDEN
'   B1,B2 Y B3 EN B3E(3) DESPUES DE LA CONVERGENCIA DE CAPTURA
' IMODE=1:
'   CALCULA ZZ*[d(Kt)/dP]*YY CALCULO DIRECTO DE PTO.SINGULAR
'   CALCULA dP*[d(Kt)/dP]*dP CORRECTOR DE SEGUNDO ORDEN EXPLICITO
'   CALCULA dP*[d(Kt)/dP]*dP PREDICTOR DE SEGUNDO ORDEN
'   (depende de la entrada)
' IMODE=2:
'   CALCULA AKTE=[d(Kt)/dP]*dP CORRECTOR DE SEGUNDO ORDEN IMPLICITO
'*****
Dim ABAR(6, 6) As Double, C(6) As Double, ALP As Double
Dim C1 As Double, C2 As Double, CBAR As Double, CDBAR As Double
Dim ALR As Double, ALR2 As Double, ALR3 As Double, ALR4 As Double
Dim X21D As Double, Y21D As Double, Z21D As Double
Dim I As Integer, J As Integer, K As Integer, NT As Integer

ALP = 0.5 * ALO
C1 = E * ARA / (8 * ALP ^ 3)
C2 = AN / ARA / (8 * ALP ^ 3)
If (ITYEL = 1) Then
  'DEFORMACION DE GREEN
  CBAR = C1
  CDBAR = 0
ElseIf (ITYEL = 2) Then
  'DEFORMACION DE INGENIERIA

```

```

ALR = ALO / ALN
ALR2 = ALR * ALR
ALR3 = ALR2 * ALR
ALR4 = ALR2 * ALR2
CBAR = ALR2 * C1 - ALR3 * C2
'CDBAR = C1 - ALR * C2
'CDBAR = -0.75 * ALR4 * CDBAR / (ALP * ALP)
CDBAR = -0.25 * ALR4 * (2 * C1 - 3 * C2 * ALR) / ALP / ALP
End If
'GUARDADO DEL VECTOR C
X21D = x(2) - x(1) + P(3) - P(1)
Y21D = y(2) - y(1) + P(4) - P(2)
C(1) = -X21D
C(2) = -Y21D
C(3) = X21D
C(4) = Y21D
If (NDIM = 3) Then
  X21D = x(2) - x(1) + P(4) - P(1)
  Y21D = y(2) - y(1) + P(5) - P(2)
  Z21D = z(2) - z(1) + P(6) - P(3)
  C(1) = -X21D
  C(2) = -Y21D
  C(3) = -Z21D
  C(4) = X21D
  C(5) = Y21D
  C(6) = Z21D
End If
'MATRIZ ABAR
For I = 1 To NDIM * 2
  For J = 1 To NDIM * 2
    ABAR(I, J) = 0
  Next J
Next I
ABAR(1, 1) = 1
ABAR(2, 2) = 1
ABAR(3, 3) = 1
ABAR(4, 4) = 1
If (NDIM = 2) Then
  ABAR(1, 3) = -1
  ABAR(2, 4) = -1
  ABAR(3, 1) = -1
  ABAR(4, 2) = -1
ElseIf (NDIM = 3) Then
  ABAR(1, 4) = -1
  ABAR(4, 1) = -1
  ABAR(2, 5) = -1
  ABAR(5, 2) = -1
  ABAR(3, 6) = -1
  ABAR(6, 3) = -1
  ABAR(5, 5) = 1
  ABAR(6, 6) = 1
End If
If (IMODE = 0) Then
  'CONSTANTES DE ESTABILIDAD

```

```

Call SCDR(CBAR, C, ABAR, ZZ, ZZ, VEC, CDBAR, NDIM)
B3E(1) = 0
For I = 1 To NDIM * 2
  B3E(1) = B3E(1) + ZZ(I) * VEC(I)
Next I
Call SCDR(CBAR, C, ABAR, ZZ, YY, VEC, CDBAR, NDIM)
B3E(2) = 0
For I = 1 To NDIM * 2
  B3E(2) = B3E(2) + ZZ(I) * VEC(I)
Next I
Call SCDR(CBAR, C, ABAR, YY, YY, VEC, CDBAR, NDIM)
B3E(3) = 0
For I = 1 To NDIM * 2
  B3E(3) = B3E(3) + ZZ(I) * VEC(I)
Next I
ElseIf (IMODE = 1) Then
  'COMPUTO DIRECTO DE PUNTO SINGULAR
  'PREDICTOR/CORRECTOR DE 2do ORDEN EXPLICITO
  Call SCDR(CBAR, C, ABAR, ZZ, YY, VEC, CDBAR, NDIM)
ElseIf (IMODE = 2) Then
  'CORRECTOR DE 2do ORDEN IMPLICITO
  NT = NDIM * 2
  For I = 1 To NT
    For K = 1 To NT
      AKTE(I, K) = 0
      For J = 1 To NT
        AKTE(I, K) = AKTE(I, K) + 0.5 * CBAR * (ABAR(I, J) * ZZ(J) * C(K) _
          + C(I) * ZZ(J) * ABAR(J, K) + ABAR(I, K) * C(J) * ZZ(J)) _
          + 0.5 * CDBAR * C(I) * C(K) * C(J) * ZZ(J)
      Next J
    Next K
  Next I
End If

End Sub

Sub B13S(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRT, IWR, ID, x, y, z, z1, _
  YY, B4S, ITYEL, AN, NDIM, W, IMODE, NNODE, AKTS, NDOF, IBC)
'*****
' IMODE=0:
'   CALC. COEF. ESTRUCTURALES B4S(1-3) USANDO EIGENMODO Z1 Y EL
'   VECT. ESTRUCTURAL YY DESPUES DE LA CONVERGENCIA DE CAPTURA
' IMODE=1:
'   CALC. ZZ*[d(Kt)/dP]*YY CALCULO DIRECTO DE PUNTO SINGULAR
'   CALC. dP*[d(Kt)/dP]*dP CORRECTOR DE SEGUNDO ORDEN EXPLICITO
'   CALC. dP*[d(Kt)/dP]*dP PREDICTOR DE SEGUNDO ORDEN
'   (depende de la entrada)
' IMODE=2:
'   CALC. [d(Kt)/dP]*dP CORRECTOR DE SEGUNDO ORDEN IMPLICITO
'*****
Dim I As Integer, J As Integer, K As Integer, I1 As Double, I2 As Double
Dim PE(6) As Double, XE(2) As Double, YE(2) As Double, ZE(2) As Double
Dim B3E(3) As Double, Z1E(6) As Double, YYE(6) As Double
Dim WE(6) As Double, AKTE(6, 6) As Double, B13MSG As Integer

```

```

Dim z1v(600) As Double

If (IMODE = 0) Then Call VCZR(B4S, 3)
If (IMODE = 1) Then Call VCZR(W, NV)

'***** BUCLE SOBRE CADA ELEMENTO PARA OBTENER PROPIEDADES DE ELEMENTO
For I = 1 To NE
  'COORDENADAS NODALES
  I1 = ID(I, 1)
  I2 = ID(I, 2)
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, x, XE, 3)
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, y, YE, 3)
  If (NDIM = 3) Then Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, z, ZE, 3)
  I1 = NDIM * (I1 - 1) + 1
  I2 = NDIM * (I2 - 1) + 1
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, PT, PE, 1)
  '>>> cambio de variable para z1
  For J = 1 To NV
    z1v(J) = z1(J, 1)
  Next J
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, z1v, Z1E, 1)
  Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, YY, YYE, 1)

  Call B13E(XE, YE, ZE, PE, E(I), ARO(I), ALO(I), Z1E, YYE, B3E, _
    IWRIT, IWR, I, ITYEL, AN(I), ALN(I), NDIM, WE, IMODE, AKTE)
  If (IMODE = 0) Then
    'CONSTANTES DE ESTABILIDAD PARA CHEQUEO DEL TIPO DE PTO.SINGULAR
    For J = 1 To 3
      B4S(J) = B4S(J) + B3E(J)
    Next J
  ElseIf (IMODE = 1) Then
    'OBTENER VECTORES PARA 1) CALCULO DIRECTO DE PUNTO SINGULAR
    '                               2) CORRECTOR DE 2do ORDEN EXPLICITO
    '                               3) PREDICTOR DE 2do ORDEN
    Call EXEL(I1, I2, NDIM, NV, W, WE, 2) 'W es un vector, WE es vector
  ElseIf (IMODE = 2) Then
    'MODIFICA MATRIZ PARA CORRECTOR DE 2do ORDEN IMPLICITO
    For K = 1 To NDIM
      For J = 1 To K
        AKTS(I1 + J - 1, I1 + K - 1) = AKTS(I1 + J - 1, I1 + K - 1) _
          + AKTE(J, K)
        AKTS(I2 + J - 1, I2 + K - 1) = AKTS(I2 + J - 1, I2 + K - 1) _
          + AKTE(J + NDIM, K + NDIM)
      Next J
      If (I1 > I2) Then
        For J = 1 To NDIM
          AKTS(I2 + J - 1, I1 + K - 1) = AKTS(I2 + J - 1, I1 + K - 1) _
            + AKTE(K, J + NDIM)
        Next J
      Else
        For J = 1 To NDIM
          AKTS(I1 + J - 1, I2 + K - 1) = AKTS(I1 + J - 1, I2 + K - 1) _
            + AKTE(J, K + NDIM)
        Next J
      End If
    Next K
  End If
Next I

```

```

    End If
  Next K
Else
  B13MSG = MsgBox("STOP EN B13S" & Chr(13) & _
    "ERROR : IMODE DIFERENTE DE 0/1/2 !!!", _
    vbOKOnly + vbCritical, "CONSTANTES DE ESTABILIDAD B1,B2,B3")
  Stop
End If
Next I

End Sub

Sub BCON(AK, IBC, N, F, IWRT, IWR, NDOF, IMOD)
'*****
' 1) IMOD=1 O 3, APLICA COND.DE CONTORNO A LA MATRIZ AK
' 2) IMOD=2 O 3, ALTERA VECTOR DE CARGA, F PARA DESPL.PRESCRITOS
' HACIENDO DIAG=1. Y FILA AND COL = CERO SI HAY RESTRICCION
' USA EL CONTADOR IBC EL CUAL ES 0 SI ESTA LIBRE,
' 1 SI ESTA RESTRINGIDO A CERO,
' -1 SI RESTRING.A UN VALOR DIF.DE
CERO
' EN LA ENTRADA F CONTIENE CARGAS PARA LAS VARIABLES LIBRES Y
' DESPLAZAMIENTOS PARA LAS VARIABLES RESTRINGIDAS
'*****
Dim IDSP As Integer, I As Integer, II As Integer
Dim J As Integer, JJ As Integer

IDSP = 0
For I = 1 To N
  II = IBC(I)
  If (II < 0) Then IDSP = I
  If (II <> 0 And (IMOD = 1 Or IMOD = 3)) Then AK(I, I) = 1
  If (I = N) Then GoTo STEP10
  For J = (I + 1) To N
    JJ = IBC(J)
    If (II = 0 And JJ = 0) Then GoTo STEP20
    'ARRIBA AMBOS LIBRES, ABAJO AMBOS RESTRINGIDOS.
    If (II <> 0 And JJ <> 0) Then GoTo STEP25
    If (IMOD <> 2 And IMOD <> 3) Then GoTo STEP20
    'ABAJO I RESTRINGIDO O PRESCRITO
    If (II <> 0) Then
      F(J) = F(J) - AK(I, J) * F(I)
      'ABAJO J RESTRINGIDO O PRESCRITO
    ElseIf (JJ <> 0) Then
      F(I) = F(I) - AK(I, J) * F(J)
    End If
  Next J
STEP25:
  If (IMOD = 1 Or IMOD = 3) Then AK(I, J) = 0
STEP20:
  Next J
STEP10:
Next I
If (IWRT <> 0) Then
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + N + 1, 1).Activate

```

```

Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "LA MATRIZ DE RIGIDEZ DESPUES DE LAS
COND. DE CONTORNO ES:"
For I = 1 To N
  For J = 1 To N
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, J).Value = AK(I, J)
  Next J
Next I
If (IDSP > 0) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, N + 1).Value = "EL VECTOR DE CARGA MODIFICADA
DESPUES DE LAS COND. DE CONTORNO ES:"
  For I = 1 To N
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, N + 1).Value = "Qex(" & I & ")= " & F(I)
  Next I
End If
End If
If IWRIT <> 0 Then
  SH2 = SH2 + N + 1
End If

End Sub

Sub BRAC(FACI, FACT, DL, NPIV, ALOD, NEG, IBRAC, DERT, PIVR, _
        PMIN, IARC, DLDES, DLDESO, ITEST)
'*****
' 1) AISLA EL PUNTO SINGULAR
' 2) OBTIENE FACI = FACTOR DE INC.DE CARGA SIGUIENTE; SI ES CONTROL DE
CARGA
'          DLDES= LONGITUD DE ARCO SIGUIENTE          ; SI ES LONG.DE ARCO
' IBRAC = 1 : METODO DE BISECCION
'          2 : METODO DE SECCION DORADA 0.618
'          3 : INTERPOLACION BASADA EN EL DETERMINANTE

' ALOD = FACTORES DE CARGA TOTAL; 3:ACTUAL; 2:ULTIMO; 1:PENULTIMO
' NPIV = No. DE PIVOTES NEGATIVOS; 3:ACTUAL; 2:ULTIMO; 1:PENULTIMO
' ITEST= 1:CARGA ; -1:DESCARGA BANDERA PARA CAPTURA + LONG.DE ARCO
'*****

'CAPTURA BASADA EN EL METODO DE BISECCION
If (IBRAC = 1 Or IBRAC = 2 Or IBRAC = 7) Then
  If (IARC <> 0) Then
    If (IBRAC = 1 Or IBRAC = 7) Then DLDES = 0.5 * DLDESO
    If (IBRAC = 2) Then DLDES = 0.6180339 * DLDESO
    DLDESO = DLDES
  Else
    If (NEG = NPIV(2)) Then ALOD(2) = ALOD(1)
    If (IBRAC = 1 Or IBRAC = 7) Then FACI = 0.5 * (ALOD(2) - FACT)
    If (IBRAC = 2) Then FACI = 0.6180339 * (ALOD(2) - FACT)
  End If
ElseIf (IBRAC = 3) Then
  'CAPTURA POR INTERPOLACION BASADA EN DETERMINANTES
  Call INTP(IARC, DERT, NEG, NPIV, ALOD, FACT, FACI, DLDES, DLDESO)
End If
If (IARC = 0) Then
  DL = Abs(FACI) * DL

```

```

Else
  FACI = ITEST * DLDES / DL
  DL = DLDES
End If

End Sub

Sub BRSW(IBRSW, NV, x1, IBC, AKTS, D, DT, YY, z1, IMULTI, AMP, _
  NDOF)
'*****
' OBTIENE PREDICTOR CON CAMBIO DE RAMIFICACION
'   IBRSW = 1 : INYECTOR NORMAL DEL 1er EIGEN-VECTOR
'           2 : UTILIZA TERMINOS DE 2do ORDEN
'           3 : BIFURCACION MULTIPLE imulti MENOR EIGENVECTOR UNITARIO
'           : SU AMPLITUD ESTA EN amp(imulti)

'   EL SIGNO DE IBRSW DECIDE CUAL DE LAS DOS DIRECCIONES SEGUIR
'*****
Dim I As Integer, II As Integer, J As Integer
Dim TT As Double, T1 As Double, T2 As Double, T As Double
Dim z1v(600) As Double

'*** ESTABLECER BANDERA TEMPORAL
'***TFLAG = (Abs(IBRSW) <> 3) And (Abs(IBRSW) <> 5)
If ((Abs(x1) < 0.000001 And (Abs(IBRSW) <> 3) And (Abs(IBRSW) <> 5)) Or
(Abs(IBRSW) = 1)) Then
  '*** CAMBIO ESTANDAR CON EL PRIMER EIGENMODO SOLO
  'Cambio de variable para z1
  For I = 1 To NV
    z1v(I) = z1(I, 1)
  Next I
  Call VCCP(z1v, DT, 1, NV)
ElseIf ((Abs(x1) > 0.000001 And (Abs(IBRSW) <> 3) And (Abs(IBRSW) <> 5)) Or
(Abs(IBRSW) = 2)) Then
  '*** INYECCION ASIMETRICA
  For II = 1 To NV
    DT(II) = x1 * z1(II, 1) + YY(II)
  Next II
ElseIf (IBRSW = 3) Then
  '*** BIFURCACION MULTIPLE
  For J = 1 To NV
    TT = 0
    For I = 1 To IMULTI
      TT = TT + z1(J, I) * AMP(I + 1)
    Next I
    DT(J) = AMP(1) * DT(J) + TT
  Next J
ElseIf (Abs(IBRSW) = 4) Then
  Call SOLV(AKTS, D, DT, NV, 0, 0, NDOF)
ElseIf (Abs(IBRSW) = 5) Then
  Call VCPD(DT, DT, IBC, 1, T1, NV)
  'Cambio de variable para z1
  For I = 1 To NV
    z1v(I) = z1(I, 1)

```

```

Next I
Call VCPD(DT, z1v, IBC, 1, T2, NV)
TT = -T2 / T1
For I = 1 To NV
  DT(I) = TT * DT(I) + z1(I, 1)
Next I
End If
If (IBRSW < 0 And IBRSW <> -2) Then
  For II = 1 To NV
    DT(II) = -DT(II)
  Next II
End If
'*** HACER QUE EL PREDICTOR DT SEA DE LONGITUD UNITARIA
Call VCNM(DT, 1, IBC, NV, T)

End Sub

Sub CONV(A, B, C, x, F, BET, E, M, IMODE)
'*****
'      CHEQUEO DE CONVERGENCIA
'*****

'CALCULAR FUERZAS RESIDUALES F
For I = 1 To M
  If (IMODE = 1) Then
    F(I) = (1 - E) * (A(I, I, I) * x(I) * x(I) + B(I, I) * x(I) + C(I)) + E
  * C(I)
  ElseIf (IMODE = 2) Then
    If (A(I, I, I) * C(I) < 0) Then
      F(I) = (1 - E) * (A(I, I, I) * x(I) * x(I) + C(I)) + E * C(I)
    Else
      F(I) = (1 - E) * (A(I, I, I) * x(I) * x(I) - C(I)) + E * C(I)
    End If
  Else
    F(I) = (1 - E) * (x(I) * x(I) - DBLE(16 ^ (2 * I))) + E * C(I)
  End If
  For J = 1 To M
    F(I) = F(I) + E * B(I, J) * x(J)
    For K = 1 To M
      F(I) = F(I) + E * A(I, J, K) * x(J) * x(K)
    Next K
  Next J
Next I
Call VCPD(F, F, IBC, 0, TT, M)
BET = SQRT(TT)
'OBTENER EL SIGNO PARA LA ULTIMA CORRECCION
Call VCCP(F, F, -1, M)

End Sub

Sub CROT(AK, D, N, IWRT, IWR, NDOF)
'*****
'      FACTORIZACION DE CROUT: LDL^T
'      1) ENTRADA DE AK(N,N);

```

```

'      2) SALIDA DE TRIANG.SUP. EN AK Y PIVOTES DIAG. EN D(N)
'*****
Dim J As Integer, I As Integer, L As Integer

D(1) = AK(1, 1)
For J = 2 To N
  For I = 1 To (J - 1)
    If (I = 1) Then GoTo STEP20
    For L = 1 To (I - 1)
      AK(I, J) = AK(I, J) - AK(L, J) * AK(L, I)
    Next L
STEP20:
  Next I
  For I = 1 To (J - 1)
    AK(I, J) = AK(I, J) / AK(I, I)
  Next I
  For L = 1 To (J - 1)
    AK(J, J) = AK(J, J) - AK(L, J) * AK(L, J) * AK(L, L)
  Next L
  D(J) = AK(J, J)
Next J
If (IWRIT <> 0) Then
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + N + 1, 1).Activate
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "LA MATRIZ DE RIGIDEZ FACTORIZADA
ES:"
  For I = 1 To N
    For J = 1 To N
      Worksheets(2).Cells(SH2 + I, J).Value = AK(I, J)
    Next J
  Next I
  Worksheets(2).Cells(SH2, N + 2).Value = "LOS PIVOTES DIAGONALES SON:"
  For I = 1 To N
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, N + 2).Value = "D(" & I & ") = " & D(I)
  Next I
  SH2 = SH2 + N + 1
End If

End Sub

Sub EIGN(AK, D, IWR, QQ, QOO, N, IWRIT, ITEMAX, RTOL, _
        IFAC, IBC, IMULTI, SHIF, NDOF)
'*****
' ENCUENTRA LOS EIGENVECTORES MENORES (IMULTI) DE AK
'   USANDO ITERACIONES SIMULTANEAS
'   IFAC = 1: AK NECESITA FACTORIZACION; 0: NO NECESITA
'   ITEMAX = MAXIMO No. DE ITERACIONES POR SOLUCION DE EIGENVALOR (NITMAX)
'   EGG(IMULTI)= EIGENVALOR (MAXIMO 10)
'   EGGO(I)= EGG(I) DE LA ULTIMA ITERACION
'   IMULTI = No. DE EIGENVALORES REQUERIDOS (MAXIMO 10)
'   QQ(N,4)= VECTOR DE INICIO (PARA EL VECTOR DE ELEMENTO) z1(NV,IMULTI)
'   QOO(N) = ARREGLO LOCAL          FI(600)
'   N      = NV
'   RTOL   = TOLERANCIA DE CONVERGENCIA (EPSI)
'   SHIF   = SUBIDA EN EIGENVALOR

```

```

'*****
Dim EGG(10) As Double, EGR(10) As Double, EGGO(10) As Double
Dim I As Integer, II As Integer, ICONV As Double, BOT As Double
Dim IT As Integer, J As Integer, TT As Double, K As Integer
Dim QQPET(600) As Double, PET1 As Double, xp As Double
Dim IIN As Integer, JT As Integer, EIGNMSG As Integer
Dim QQJ(600) As Double, QQI(600) As Double

'Worksheets(2).Cells(SH2 + 8, 1).Activate
SH2 = SH2 + 1
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "SOLUCION PARA LOS MENORES EIGENVALORES
Y EIGENVECTORES :"
If (IMULTI = 1) Then
  With Worksheets(2)
    .Cells(SH2 + 1, 2).Value = "EL 1er EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "ITER. No."
    .Cells(SH2 + 2, 2).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 3).Value = "FACT.CONV."
  End With
End If
If (IMULTI = 2) Then
  With Worksheets(2)
    .Cells(SH2 + 1, 2).Value = "EL 1er EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 1, 4).Value = "EL 2do EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "ITER. No."
    .Cells(SH2 + 2, 2).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 3).Value = "FACT.CONV."
    .Cells(SH2 + 2, 4).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 5).Value = "FACT.CONV."
  End With
End If
If (IMULTI = 3) Then
  With Worksheets(2)
    .Cells(SH2 + 1, 2).Value = "EL 1er EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 1, 4).Value = "EL 2do EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 1, 6).Value = "EL 3er EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "ITER. No."
    .Cells(SH2 + 2, 2).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 3).Value = "FACT.CONV."
    .Cells(SH2 + 2, 4).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 5).Value = "FACT.CONV."
    .Cells(SH2 + 2, 6).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 7).Value = "FACT.CONV."
  End With
End If
If (IMULTI = 4) Then
  With Worksheets(2)
    .Cells(SH2 + 1, 2).Value = "EL 1er EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 1, 4).Value = "EL 2do EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 1, 6).Value = "EL 3er EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 1, 8).Value = "EL 4to EIGENVALOR"
    .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "ITER. No."
    .Cells(SH2 + 2, 2).Value = "EIG. EST."
    .Cells(SH2 + 2, 3).Value = "FACT.CONV."
  End With
End If

```

```

        .Cells(SH2 + 2, 4).Value = "EIG. EST."
        .Cells(SH2 + 2, 5).Value = "FACT.CONV."
        .Cells(SH2 + 2, 6).Value = "EIG. EST."
        .Cells(SH2 + 2, 7).Value = "FACT.CONV."
        .Cells(SH2 + 2, 8).Value = "EIG. EST."
        .Cells(SH2 + 2, 9).Value = "FACT.CONV."
    End With
End If
SH2 = SH2 + 2
'*** SI IFAC = 1 AK NECESITA FACTORIZACION
If (IFAC = 1) Then Call CROT(AK, D, N, IWRIT, IWR, NDOF)
Call VCZR(EGGO, IMULTI)
If (IMULTI = 1) Then
    For I = 1 To N
        QQ(I, 1) = 0
    Next I
    For I = 1 To N
        If (IBC(I) <> 1) Then QQ(I, 1) = 1
    Next I
Else
    '*** VECTOR DE ITERACION INICIAL (VECTORES DE ELEMS. CON LA FILA
CORRESPONDIENTE
    'A LOS DIAGONALES MENORES IMULTI SIENDO UNITARIOS)
    Call VCCP(D, QOO, 1, N)
        'QOO(N) = D(N)
    For I = 1 To IMULTI
        'Call VCZR(QQ(J, I), J=1,N)
        For J = 1 To N
            QQ(J, I) = 0
        Next J
        Call MAMN(QOO, N, xp, IIN, 1, 0, 1, IBC)
            'QOO(N)-> 0=MINIMO EN xp, POSICION EN IIN, 1=SOLO LIBRES
        QQ(IIN, I) = 1
        '*** ASEGURA QUE EL MINIMO QOO(IIN)=D(IIN) NO VOLVERA A SER ESCOGIDO
        QOO(IIN) = 10000000000#
    Next I
End If

'***** COMIEZO DE LAS ITERACIONES
For II = 1 To ITEMAX
    ICONV = 1
    For I = 1 To IMULTI
        '>>>>Cambio de variable-----
        For IT = 1 To N
            QQPET(IT) = QQ(IT, I)
        Next IT
        '-----
        Call VCCP(QQPET, QOO, 1, N)
        Call SOLV(AK, D, QQPET, N, 0, IWR, NDOF)
        Call VCNM(QQPET, 1, IBC, N, BOT)
        '***OBTENER ESTIMADO DEL EIGENVALOR
        Call VCPD(QOO, QQPET, IBC, 1, PET1, N)
        EGG(I) = PET1 / BOT
        EGR(I) = 100 * (EGG(I) - EGGO(I)) / EGG(I)
    
```

```

EGGO(I) = EGG(I)
If (Abs(EGR(I)) > RTOL) Then ICONV = 0
'>>>>Retorno del cambio de variable-----
For IT = 1 To N
  QQ(IT, I) = QQPET(IT)
Next IT
'-----
Next I
Worksheets(2).Cells(SH2 + II, 1).Value = II
For I = 1 To IMULTI
  Worksheets(2).Cells(SH2 + II, 2 * I).Value = EGG(I) - SHIF 'EIGEN
ESTIMADO
  Worksheets(2).Cells(SH2 + II, 2 * I + 1).Value = EGR(I) 'FACTOR DE
CONV.
Next I
If (ICONV = 1) Then '***** CONVERGENCIA ALCANZADA !!! *****
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + II + N + 2, 1).Activate
  SH2 = SH2 + II + 1
  Exit Sub 'RETORNO
End If
'*** ORTOGONALIZACION DE Gram-Schmidt PARA EIGENVALOR MULTIPLE
If (IMULTI = 1) Then GoTo STEP100
For I = 2 To IMULTI
  For J = 1 To (I - 1)
    '>>>>Cambio de variable-----
    For IT = 1 To N
      QQJ(IT) = QQ(IT, J)
      QQI(IT) = QQ(IT, I)
    Next IT
    '-----
    Call VCPD(QQJ, QQI, IBC, 1, TT, N)
    '>>>>Retorno del cambio de variable-----
    For K = 1 To N
      If (IBC(K) = 0) Then QQ(K, I) = QQ(K, I) - TT * QQ(K, J)
    Next K
  Next J
Next I
STEP100:
Next II
EIGNMSG = MsgBox("* Stop in EIGN" & Chr(13) & "* ITERACION FALLIDA EN
EIGEN-SOLUCION !!!", _
vbOKOnly + vbCritical, " *** ESTIMACION DE EIGEN VECTOR(ES) ***")
Stop 'STOP "!!!! FALLO LA ITERACION EN LA SOLUCION EIGEN !!!!"

End Sub

Sub ELEM(EFI, AKTE, ANE, XE, YE, ZE, PE, E, AROE, ALOE, IWRIT, _
IWR, IMOD, ITY, ALNE, ARNE, II, NDIM, POISS)
'*****
' PARA ELEMENTOS DE SERCHA GENERALES

' IMOD = 1 CALCULA EL VECTOR DE CARGA INTERNA FI
' IMOD = 2 CALCULA LA RIGIDEZ TANGENTE AKT (TRIANGULO SUPERIOR)
' IMOD = 3 CALCULA AMBOS

```

```

' ENTRADA:
'   AN  = FUERZA TOTAL EN LA BARRA
'   ALOE = LONG.ORIGINAL DEL ELEMENTO; ALNE(IN)=LONG.NUEVA
'   E    = MODULO DE ELASTICIDAD: ARNE=DATO=AREA ACTUAL
'   P    = VECTOR DE DESPLAZAMIENTOS TOTALES

'   ITY  = 1, GREEN:  =2, ING.,  =3, LOG:  =4 LOG C/CAMBIO DE VOL.
'*****
Dim C(6) As Double, ALAM As Double
Dim X21D As Double, Y21D As Double, Z21D As Double
Dim CON As Double, CON1 As Double, CON2 As Double, EA As Double
Dim I As Integer, J As Integer

If (ITY = 3) Then POISS = 0.5
ALAM = ALOE / ALNE
X21D = XE(2) - XE(1) + PE(3) - PE(1)
Y21D = YE(2) - YE(1) + PE(4) - PE(2)
If (NDIM = 3) Then
  X21D = XE(2) - XE(1) + PE(4) - PE(1)
  Y21D = YE(2) - YE(1) + PE(5) - PE(2)
  Z21D = ZE(2) - ZE(1) + PE(6) - PE(3)
End If
'*** CALCULO DEL VECTOR DE FUERZA INTERNA
If (IMOD <> 2) Then
  CON = ANE / ALOE
  If (ITY > 1) Then CON = ALAM * CON
  EFI(1) = -CON * X21D
  EFI(2) = -CON * Y21D
  EFI(3) = -EFI(1)
  EFI(4) = -EFI(2)
  If (NDIM = 3) Then
    EFI(3) = -CON * Z21D
    EFI(4) = -EFI(1)
    EFI(5) = -EFI(2)
    EFI(6) = -EFI(3)
  End If
End If
'*** CALCULO DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ TANGENTE (TRIANGULO SUPERIOR)
If (IMOD <> 1) Then
  C(1) = -X21D
  C(2) = -Y21D
  C(3) = X21D
  C(4) = Y21D
  If (NDIM = 3) Then
    C(3) = -Z21D
    C(4) = -C(1)
    C(5) = -C(2)
    C(6) = -C(3)
  End If
  EA = E * ARNE
  CON1 = 1 / (ALOE ^ 3)
  If (ITY = 1) Then CON1 = EA * CON1
  If (ITY = 2) Then CON1 = ALAM * ALAM * CON1 * (EA - ANE * ALAM)

```

```

    If (ITY >= 3) Then CON1 = CON1 * ALAM ^ 4 * (EA - (1 + 0.5 * POISS) *
ANE)
    For J = 1 To (NDIM * 2)
      For I = 1 To J
        AKTE(I, J) = CON1 * C(I) * C(J)
      Next I
    Next J
    CON2 = ANE / ALOE
    If (ITY >= 2) Then CON2 = CON2 * ALAM
    AKTE(1, 1) = AKTE(1, 1) + CON2
    AKTE(2, 2) = AKTE(2, 2) + CON2
    AKTE(3, 3) = AKTE(3, 3) + CON2
    AKTE(4, 4) = AKTE(4, 4) + CON2
    If (NDIM = 2) Then
      AKTE(1, 3) = AKTE(1, 3) - CON2
      AKTE(2, 4) = AKTE(2, 4) - CON2
    ElseIf (NDIM = 3) Then
      AKTE(1, 4) = AKTE(1, 4) - CON2
      AKTE(2, 5) = AKTE(2, 5) - CON2
      AKTE(3, 6) = AKTE(3, 6) - CON2
      AKTE(5, 5) = AKTE(5, 5) + CON2
      AKTE(6, 6) = AKTE(6, 6) + CON2
    End If
  End If
End Sub

Sub EXEL(I1, I2, NDIM, NV, A, AE, IMODE)
'*****
'  IMODE=1: EXTRAER PROPIEDADES DE ELEMENTO DEL ARREGLO A AL AE
'          2: ENSAMBLAR PROPIEDADES DE ELEMENTO AE EN A
'          3: EXTRAER DATOS NODALES DESDE EL ARREGLO A AL AE
'*****

If (IMODE = 1) Then
  AE(1) = A(I1)
  AE(2) = A(I1 + 1)
  AE(3) = A(I2)
  AE(4) = A(I2 + 1)
  If (NDIM = 3) Then
    AE(3) = A(I1 + 2)
    AE(4) = A(I2)
    AE(5) = A(I2 + 1)
    AE(6) = A(I2 + 2)
  End If

ElseIf (IMODE = 2) Then
  A(I1) = AE(1) + A(I1)
  A(I1 + 1) = AE(2) + A(I1 + 1)
  If (NDIM = 2) Then
    A(I2) = AE(3) + A(I2)
    A(I2 + 1) = AE(4) + A(I2 + 1)
  ElseIf (NDIM = 3) Then
    A(I1 + 2) = AE(3) + A(I1 + 2)

```

```

      A(I2) = AE(4) + A(I2)
      A(I2 + 1) = AE(5) + A(I2 + 1)
      A(I2 + 2) = AE(6) + A(I2 + 2)
    End If

  ElseIf (IMODE = 3) Then
    AE(1) = A(I1)
    AE(2) = A(I2)

  End If

End Sub

Sub EXTD(PT, AN, BETOK, QFI, IBC, IWRIT, IWR, IRE, AKTS, D, _
        ITERTY, NV, NN, NE, GM, FI, REAC, DT, FACT, DL, ID, _
        x, y, z, E, ARO, ALO, AK14S, ANIT, AK15, ID14S, NDSP, NDIM, _
        ARN, POISS, ALN, ITYEL, W1, W2, IROW, SHIF, z1, EPSI, _
        IBRAC, NOUT, IDOUT, NITMAX, NDOF, NNODE, ICVCK, IARC, INC, x1)
'*****
'  CALCULO DIRECTO DE PUNTOS SINGULARES POR EL SISTEMA EXTENDIDO
'  W1(NV) = GO(NV)
'  W2(NV) = GOO(NV)
'  z1(NV,1) => z1v(NV) Cambio de variable
'*****
Dim B4S(4) As Double, T As Double, I As Integer
Dim CSTIF As Double, NEG As Integer
Dim PIVRAT As Double, PIVS As Double, PIVB As Double
Dim DLAMDA As Double, EXTDMSG As Integer
Dim z1v(600) As Double

'OBTENER APROXIMACION INICIAL DEL 1er EIGENVECTOR
If (IROW = 0) Then Call MAMN(D, NV, T, IROW, 1, 0, 1, IBC)
If (IBRAC = -6) Then
  '1er EIGENVECTOR EN LA CONFIGURACION ACTUAL
  Call EIGN(AKTS, D, IWR, z1, FI, NV, IWRIT, NITMAX, BETOK, 0, IBC, _
          1, SHIF, NDOF)
  'Cambio de variable para z1
  For I = 1 To NV
    z1v(I) = z1(I, 1)
  Next I
  Call VCCP(z1v, W1, 1, NV)
  Call VCZR(PT, NV)
Else
  'APROXIMACION DE Seydel
  For I = 1 To NV
    z1v(I) = z1(I, 1)
  Next I
  Call SWPR(NV, IROW, IBC, D, z1v)
  Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, _
          AK14S, NDSP, FI, PT, 2, IWRIT, IWR, ID, AN, x, y, z, _
          ITYEL, NDIM, NDOF, NNODE)
  Call BCON(AKTS, IBC, NV, z1v, IWRIT, IWR, NDOF, 3)
  Call CROT(AKTS, D, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
  Call SOLV(AKTS, D, z1v, NV, IWRIT, IWR, NDOF)

```

```

    IBC(IROW) = 0
End If
'Retorno del cambio de variable
For I = 1 To NV
    z1(I, 1) = z1v(I)
Next I

'-INICIO DEL BUCLE ITERATIVO -----
For ITE = 1 To NITMAX
    'CALCULAR LA FUERZA EN LA BARRA (AN)
    Call FORC(AN, ANIT, E, ARO, ALO, x, y, z, PT, ID, IWRIT, IWR, _
            NV, NN, NE, ITYEL, ARN, ALN, POISS, ESTR, NDSP, _
            AK14S, ID14S, NDIM, NNODE)
    'CALCULAR MATRIZ DE RIGIDEZ TANG. (NR) Y VECTOR DE FUERZA INTERNA FI
    'COLOCAR MATRIZ DE RIGIDEZ DE ELEM., AKTE, EN MATRIZ DE ESTRUCT. AKTS Y
    'AÑADIR EFECTOS DE RESORTES LINEALES (NR)
    'MODIFICAR VECTOR DE FUERZA INTERNA FI POR EFECTO DE RESORTES.
    IMOD = 1
    If ((ITERTY = 1 And ITE <> 1) Or (ITE = 1 And IBRAC = 6)) Then IMOD = 3
    Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, _
            AK14S, NDSP, FI, PT, IMOD, IWRIT, IWR, ID, AN, x, y, z, _
            ITYEL, NDIM, NDOF, NNODE)
    'FORMS GM = OUT-OF-BALANCE FORCE VECTOR AND REACTION VECTOR
    'SAVES GO FOR LINE-SEARCHES
    Call VCZR(GM, NV)
    Call VCCP(FI, REAC, 1, NV)
    Call VCSC(GM, QFI, FI, IBC, 1, FACT, -1, NV)
    'OVERWRITE SPRING REACTION TERMS
    If (NDSP <> 0) Then
        For I = 1 To NDSP
            REAC(ID14S(I)) = -AK14S(I) * PT(ID14S(I))
        Next I
    End If
    'NEWTON-RAPHSON COMPLETO
    If ((ITERTY = 1 And ITE <> 1) Or (ITE = 1 And IBRAC = 6)) Then
        Call BCON(AKTS, IBC, NV, GM, IWRIT, IWR, NDOF, 3)
        Call CROT(AKTS, D, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
    End If

    '* * * CHEQUEAR CONVERGENCIA * * *
    Call VCPD(GM, GM, IBC, 1, GNORM, NV)
    GNORM = Sqr(GNORM)
    If (ICVCK = 1) Then
        Call VCPD(QFI, QFI, IBC, 1, FNORM, NV)
        FNORM = FACT * Sqr(FNORM)
        BET = GNORM / MAX(FNORM, SMALL)
    ElseIf (ICVCK = 2) Then
        Call VCPD(REAC, REAC, IBC, 2, RNORM, NV)
        RNORM = Sqr(RNORM)
        BET = GNORM / MAX(RNORM, SMALL)
    End If
    Call PARA(D, DT, CSTIF, FACT, NEG, PIVRAT, PIVS, PIVB, _
            DL, IBC, QFI, ITE, 0, NV, IWR, IBRAC)
    If (BET < BETOK And PIVRAT < EPSI) Then

```

```

'CHEQUEAR TIPO DE ESTABILIDAD
If (IBRAC = -6) Then IMULTI = 1
Call STAB(AKTS, D, IWR, IRE, z1, FI, NV, NN, IWRIT, NITMAX, _
        EPSI, IBC, E, ARO, ALO, ARN, ALN, NE, PT, ID, x, y, z, _
        W1, B4S, ITYEL, AN, DT, QFI, x1, NDIM, IMULTI, SHIF, _
        NDSP, AK15, ID14S, AK14S, NDOF, NNODE)
'ESCRIBIR DATOS PARA REINICIO
Call RSRW(FACT, 1, 0, AN, ALN, ARN, PT, DT, z1, NE, NV, _
        2, IBRAC, 0, W1, 0, NDOF, x1)
EXTDMSG = MsgBox("Calculo Directo de Punto Singular" & Chr(13) & _
        "Iteration Number :" & ITE & Chr(13) & _
        "!!! Captura finalizada exitosamente !!!", vbOKOnly +
vbInformation, _
        "SISTEMA EXTENDIDO")
'!!!! CAPTURA EXITOSAMENTE FINALIZADA !!!!!"
End
End If
'***** CAMBIO TANGENCIAL DT DEBIDO AL CARGADO
If (ITERTY = 1) Then
    Call VCCP(QFI, DT, 1, NV)
    Call SOLV(AKTS, D, DT, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
End If
'***** CAMBIOS DE DESPL. ITERATIVO EN GM DEBIDO A FUERZAS DESBL.
Call SOLV(AKTS, D, GM, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
'***** OBTENER CAMBIOS EN Z1
Call B13S(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRIT, IWR, ID, x, y, z, _
        z1, GM, B4S, ITYEL, AN, NDIM, W2, 1, NNODE, AKTS, NDOF, IBC)
Call SOLV(AKTS, D, W2, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
'***** OBTENER CAMBIOS EN Z1
Call B13S(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRIT, IWR, ID, x, y, z, _
        z1, DT, B4S, ITYEL, AN, NDIM, W1, 1, NNODE, AKTS, NDOF, IBC)
Call SOLV(AKTS, D, W1, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
'***** ACTUALIZAR DESPL. Y EIGENVECTOR
DLAMDA = (-z1(IROW, 1) - W2(IROW)) / W1(IROW)
FACT = FACT + DLAMDA
For I = 1 To NV
    If (IBC(I) = 1) Then GoTo STEP300
    PT(I) = PT(I) + GM(I) + DLAMDA * DT(I)
    z1(I, 1) = -W2(I) - DLAMDA * W1(I)
STEP300:
Next I

Next ITE 'IR A UNA NUEVA ITERACION
'-----
EXTDMSG = MsgBox("* Stop in EXTD" & Chr(13) & "!!! CAPTURA FALLIDA !!!",
vbOKOnly + vbCritical, _
        "**** SISTEMA EXTENDIDO ****")
Stop "!!!! FALLA EN LA CAPTURA !!!!"

End Sub

Sub FORC(AN, ANIT, E, ARO, ALO, x, y, z, PT, ID, IWRIT, IWR, NV, NN, NE, _
        ITY, ARN, ALN, POISS, ESTR, NDSP, AK14S, ID14S, NDIM, NNODE)
'*****

```

```

' PARA UN ELEMENTO DE SERCHA GENERAL, SE CALCULA:
'     A) FUERZA INTERNA,           AN
'     B) NUEVA LONGITUD DEL ELEMENTO, ALN
'     C) NUEVA AREA DEL ELEMENTO,   ARN
'     D) ENERGIA DE DEFORMACION,    ESTR
' ENTRADA;
'     E=MOD.ELASTIC., ARO=AREA ORIGINAL, ALO=LONGITUD ORIGINAL
'     POISS=REL.DE POISSON, X=COORDS.X, Y=COORDS.Y, Z=COORDS.Z
'     PT=DESPL.TOTALES
'     ITY=1 DEFORM.DE GREEN, =2 DEFORM.DE INGENIERIA, =3 DEF.LOG.
'     =4 DEFORM.LOGARITMICA C/CAMBIO DE VOLUMEN
'*****
Dim B1(6) As Double, I As Integer, I1 As Integer, I2 As Integer
Dim I3 As Integer, I4 As Integer, X21D As Double, Y21D As Double
Dim Z21D As Double, X21 As Double, Y21 As Double, U21 As Double
Dim V21 As Double, ALO2 As Double, Z21 As Double, W21 As Double
Dim EGR As Double, EST As Double, POW As Double, RAT As Double
Dim IT As Integer, J As Integer

ESTR = 0
For I = 1 To NE
  '*** CALCULO DE LA NUEVA LONGITUD
  I1 = ID(I, 1)
  I2 = ID(I, 2)
  I3 = NDIM * (I1 - 1) + 1
  I4 = NDIM * (I2 - 1) + 1
  X21D = x(I2) - x(I1) + PT(I4) - PT(I3)
  Y21D = y(I2) - y(I1) + PT(I4 + 1) - PT(I3 + 1)
  ALN(I) = Sqr(X21D * X21D + Y21D * Y21D)
  If (NDIM = 3) Then
    Z21D = z(I2) - z(I1) + PT(I4 + 2) - PT(I3 + 2)
    ALN(I) = Sqr(ALN(I) * ALN(I) + Z21D * Z21D)
  End If
  If (ITY <= 2) Then
    '*** DEFORMACION DE GREEN O DE INGENIERIA
    X21 = x(I2) - x(I1)
    Y21 = y(I2) - y(I1)
    U21 = PT(I4) - PT(I3)
    V21 = PT(I4 + 1) - PT(I3 + 1)
    ALO2 = ALO(I) * ALO(I)
    B1(1) = -X21 / ALO2
    B1(2) = -Y21 / ALO2
    B1(3) = -B1(1)
    B1(4) = -B1(2)
    If (NDIM = 3) Then
      Z21 = z(I2) - z(I1)
      W21 = PT(I4 + 2) - PT(I3 + 2)
      B1(3) = -Z21 / ALO2
      B1(4) = -B1(1)
      B1(5) = -B1(2)
      B1(6) = -B1(3)
    End If
    '*** PARTE LINEAL DE DEFORM. DE GREEN
    If (NDIM = 2) Then

```

```

      EGR = B1(1) * PT(I3) + B1(2) * PT(I3 + 1) + B1(3) * PT(I4) _
        + B1(4) * PT(I4 + 1)
    ElseIf (NDIM = 3) Then
      EGR = B1(1) * PT(I3) + B1(2) * PT(I3 + 1) + B1(3) * PT(I3 + 2) _
        + B1(4) * PT(I4) + B1(5) * PT(I4 + 1) + B1(6) * PT(I4 + 2)
    End If
    '*** ADICION DE PARTE NO-LINEAL
    EGR = EGR + 0.5 * (U21 * U21 + V21 * V21) / ALO2
    If (NDIM = 3) Then EGR = EGR + 0.5 * W21 * W21 / ALO2
    EST = EGR
    '*** DEFORMACION INGENIERIL ROTADA
    If (ITY = 2) Then EST = 2 * ALO(I) * EGR / (ALN(I) + ALO(I))
    ElseIf (ITY = 3) Then
      '*** DEFORMACION LOGARITMICA
      EST = Log(ALN(I) / ALO(I))
    End If
    ARN(I) = ARO(I)
    If (ITY = 4) Then
      '*** CAMBIO DE VOLUMEN
      POW = 2 * POISS
      RAT = ALO(I) / ALN(I)
      ARN(I) = ARO(I) * RAT ^ POW
    End If
    If (ITY = 4) Then
      AN(I) = ANIT(I) + E(I) * ARN(I) * EST
      ESTR = ESTR + 0.5 * AN(I) * ALN(I) * EST
    Else
      AN(I) = ANIT(I) + E(I) * ARO(I) * EST
      ESTR = ESTR + 0.5 * AN(I) * ALO(I) * EST
    End If
  Next I

  If (NDSP <> 0) Then
    For I = 1 To NDSP
      IT = ID14S(I)
      ESTR = ESTR + 0.5 * AK14S(I) * PT(IT) * PT(IT)
    Next I
  End If
  ' * * * LIMPIAR CELDAS PARA ITERACION ACTUAL * * *
  Worksheets(2).Select
  Worksheets(2).Range(Cells(SH2 + 1, 1), Cells(SH2 + 10 * NV, 2 * NV)).Value
  = ""
  Worksheets(4).Select
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "ELEM."
  Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "F.AXIAL"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "NUEVA Ln."
  Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "NUEVO Ar."
  For I = 1 To NE
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = I
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 2).Value = AN(I)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 3).Value = ALN(I)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 4).Value = ARN(I)
  Next I
  SH2 = SH2 + NE + 1

```

```

End Sub

Sub INCK1(NINC, IARC, BETOK, ITERTY, IDES, FACMX, FACMN, DLDES, _
          DLDMX, DLDMN, ISWCH, CSTIFS, IWR, IWRT, IRES, IBRAC, _
          ICRIT, IBRSW, EPSI, ILOAD, IAUTO, IDSP, ICVCK)
'*****
'   CHEQUEAR DATOS DE ENTRADA LEIDOS EN INPT1
'*****
Dim ERRORMESSAGE As Integer, IER As Integer

IER = 0

If (NINC < 0) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox(" NINC < 0 ", vbOKOnly + vbCritical, _
    "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IWRIT < 0 Or IWRIT > 1) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("IWRIT < 0 O IWRIT > 1", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IAUTO < 0 Or IAUTO > 1) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("IAUTO < 0 O IAUTO > 1", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IARC < 0 Or IARC > 6) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("IARC < 0 O IARC > 6", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (ILOAD < 1 Or ILOAD > 2) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("ILOAD < 1 O ILOAD > 2", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IRES < 0 Or IRES > 1) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("IRES < 0 O IRES > 1", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IBRAC <> -6 And IBRAC <> -7 And IBRAC < 0) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("(IBRAC <> -6 Y IBRAC <> -7)& IBRAC < 0)", _
    vbOKOnly + vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ***")
  IER = 1

```

```

End If

If (Abs(IBRAC) > 7) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("ABS(IBRAC) > 7", vbOKOnly + vbCritical, _
    "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IBRSW < -5 Or IBRSW > 5) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("IBRSW < -5 O IBRSW > 5", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IDSP > 0 And ICVCK = 1) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("IDSP > 0 Y ICVCK = 1", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (BETOK < 0 Or (EPSI < 0 And Abs(IBRAC) <> 0)) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("BETOK < 0 O (EPSI < 0 Y ABS(IBRAC) <> 0)", _
    vbOKOnly + vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (ITERTY < 1 Or ITERTY > 2) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("ITERTY < 1 O ITERTY > 2", vbOKOnly + _
    vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If ((IBRSW <> 0 Or IARC <> 0) And DLDES = 0) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("(IBRSW <> 0 O IARC <> 0) but DLDES = 0", _
    vbOKOnly + vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

'INCREMENTO AUTOMATICO
If (IAUTO = 1) Then
  If (IDES < 0) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox(" IDES < 0 ", vbOKOnly + vbCritical, _
      "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
    IER = 1
  End If
  If (FACMX < FACMN) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox(" FACMX < FACMN ", vbOKOnly + vbCritical, _
      "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
    IER = 1
  End If
  If (ISWCH < 0 Or ISWCH > 6) Then
    ERRORMESSAGE = MsgBox(" ISWCH < 0 O ISWCH > 6 ", vbOKOnly + _

```

```

        vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2
****")
        IER = 1
    End If
    If (ISWCH <> 0 And (CSTIFS < 0 Or CSTIFS > 1)) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox(" ISWCH <> 0 Y (CSTIFS < 0 O CSTIFS > 1) ", _
            vbOKOnly + vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ****")
        IER = 1
    End If
End If

'ITERACION CON ACELERACION
If (IACC = 1) Then
    'SIN ACELERACION PARA N-R COMPLETO O PARA LONG.DE ARCO
    If (ITERTY = 1 Or IARC > 0) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox(" NO SE PUEDE USAR ACEL. CON LONG.DE ARCO/ N-R ",
            vbOKOnly + vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ****")
        IER = 1
    End If
    If (R1C > 3 Or R1C < 2) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox(" R1C > 3 O R1C < 2 ", vbOKOnly + _
            vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2
****")
        IER = 1
    End If
    If (R2C > 1 Or R2C < 0.3) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox(" R2C > 1 O R2C < 0.3 ", vbOKOnly + _
            vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2
****")
        IER = 1
    End If
End If

'LINEA DE BUSQUEDA
If (NLSMX <> 0) Then
    If (NLSMX > 20 Or NLSMX < 0) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox(" NLSMX > 20 O NLSMX < 0 ", vbOKOnly + _
            vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2
****")
        IER = 1
    End If
    If (IARC = 6) Then
        ERRORMESSAGE = MsgBox(" NO SE PUEDE TENER LONG.DE ARCO CON LINEA DE
BUSQUEDA ", _
            vbOKOnly + vbCritical, "**** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ****")
        IER = 1
    End If
End If

'SIN USAR N-R MOD. O LONG.DE ARCO CON CONTROL DE DESPLAZAMIENTO

```

```

If ((IARC <> 0 Or ITERTY = 2) And IDSP > 0) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox(" NO SE PUEDE TENER DESPL. PRESC. CON LONG.DE ARCO/
N-R MOD. ", _
  vbOKOnly + vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

'LA RAMIFICACION DEBE HACERSE CON REINICIO + AUTO INCREMENTO
If (IBRSW <> 0 And (IAUTO = 0 Or IRES = 0)) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox(" IBRSW <> 0, PERO IAUTO = 0 O IRES = 0 ", _
  vbOKOnly + vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ***")
  IER = 1
End If

If (IER = 1) Then
  ERRORMESSAGE = MsgBox("!!! ALGUNOS ERRORES FUERON ENCONTRADOS EN DATOS DE
ENTRADA: PARTE-2 !!!"
  & Chr(13) & "PORFAVOR CORRIJALOS, ANTES DE VOLVER A INTENTAR", vbOKOnly
+
  vbCritical, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA: PARTE-2 ***")
  End
Else
  ERRORMESSAGE = MsgBox("!!! NO SE ENCONTRARON ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 !!!", _
  vbOKOnly + vbExclamation, "*** REPORTE DE ERRORES EN DATOS DE ENTRADA:
PARTE-2 ***")
End If

End Sub

Sub INTP(IARC, TW, NEG, NPIV, ALOD, FACT, FACI, DLDES, DLDESO)
'*****
' INTERPOLACION PARA FACI O DLDES BASADO EN TW:
'*****
Dim TT As Double, INTPMSG As Integer

'*** CONTROL DE CARGA,
' el parametro de control para biseccion o interpolacion es FACI
If (IARC = 0) Then
  If (NEG <> NPIV(2)) Then
    '*** EL PTO. CRITICO CAE ENTRE LA ULTIMA SOLUCION Y LA PENULTIMA
    FACI = (ALOD(2) - FACT) / (1 - TW(2) / TW(3))
  ElseIf (NEG <> NPIV(1)) Then
    '*** EL PTO. CRITICO CAE ENTRE LA ULTIMA SOLUCION Y LA ANTEPENULTIMA
    FACI = (ALOD(1) - FACT) / (1 - TW(1) / TW(3))
    ALOD(2) = ALOD(1)
    NPIV(2) = NPIV(1)
    TW(2) = TW(1)
  Else
    INTPMSG = MsgBox("* Stop in INPT" & Chr(13) & _
    "** CAPTURA POR INTERP. IMPOSIBLE!!! 3 SOL. EN EL MISMO LADO", _

```

```

        vbOKOnly + vbCritical, "**** ERROR EN LA CAPTURA POR INTERPOLACION
****")
        Stop 'IMPOSIBLE LA CAPTURA POR INTERPOLACION, 3 SOLNS. EN EL MISMO LADO
End If

'**** CONTROL DE LONGITUD DE ARCO,
'    el parametro de control para biseccion o interpolacion es DLDES
Else
    '**** EL PTO. CRITICO CAE ENTRE LA ULTIMA SOLUCION Y LA PENULTIMA
    If (NEG <> NPIV(2)) Then
        DLDESO = DLDES
        DLDES = DLDES / (1 - TW(2) / TW(3))
        '**** EL PTO. CRITICO CAE ENTRE LA ULTIMA SOLUCION Y LA ANTEPENULTIMA
    ElseIf (NEG <> NPIV(1)) Then
        DLDESO = DLDESO - DLDES
        DLDES = DLDESO / (1 - TW(1) / TW(3))
        NPIV(2) = NPIV(1)
        TW(2) = TW(1)
    Else
        INTPMSG = MsgBox("* Stop in INPT" & Chr(13) & _
            "* CAPTURA POR INTERP. IMPOSIBLE!!! 3 SOL. EN EL MISMO LADO", _
            vbOKOnly + vbCritical, "**** ERROR EN LA CAPTURA POR INTERPOLACION
****")
        Stop 'IMPOSIBLE LA CAPTURA POR INTERPOLACION, 3 SOLNS. EN EL MISMO LADO
        End If
    End If
End If

'**** SOBRE ESCRIBIR INCREMENTO MUY GRANDE/PEQUEÑO
If (IARC = 0) Then
    '**** Control DE CARGA
    TT = 0.8 * (ALOD(2) - FACT)
    If (Abs(FACI) > Abs(TT)) Then FACI = TT
    TT = 0.2 * (ALOD(2) - FACT)
    If (Abs(FACI) > Abs(TT)) Then FACI = TT
ElseIf (IARC <> 0) Then
    '**** Control de LONGITUD DE ARCO
    If (DLDES > 0.8 * DLDESO) Then DLDES = 0.8 * DLDESO
    If (DLDES < 0.2 * DLDESO) Then DLDES = 0.2 * DLDESO
End If

End Sub

Sub ITER(PT, AN, BETOK, QFI, IBC, IWRIT, IWR, AKTS, D, ITERTY, _
    NV, NN, NE, GM, FI, REAC, PTOL, DT, FACT, FACI, DL, IARC, ID, _
    x, y, z, E, ARO, ALO, AK14S, ANIT, AK15, ID14S, NDSP, NDIM, _
    ARN, POISS, ALN, ITYEL, GO, GOO, DELO, ISPRD, NDOF, NNODE, K, _
    ICORT, IPRED, ICVCK, AKTSO, EPSI, INCC, IRES)
'*****
' 1) REALIZA ITERACIONES DE EQUILIBRIO PARA :
'    A) CONTROL DE CARGA, O DE DESPLAZAMIENTO, O DE LONGITUD DE ARCO
'    B) INCLUYE ACELERACION

' 2) EN LA SALIDA SE TIENE LOS NUEVOS DESPL. PT Y FUERZAS AN

```



```

      'AÑADE EFECTOS DE LOS RESORTES LINEALES (N-R)
      'MODIFICA VECTOR DE FUERZA INTERNA FI POR EFECTO DE RESORTES
      Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, _
              ID14S, AK14S, NDSP, FI, PT, IMOD, IWRT, IWR, ID, _
              AN, x, y, z, ITYEL, NDIM, NDOF, NNODE)
Else
      SH2 = SH2 + NV + 1 + NE + 1
End If
'***SALVA AKTS PARA CORRECTOR DE 2do ORDEN IMPLICITO POSTERIOR
If (ICORT = 2) Then
      For I = 1 To NV
            For J = 1 To NV
                  AKTSO(I, J) = AKTS(I, J)
            Next J
      Next I
End If
'***OBTENER CAMBIO EN DESPL. ITERATIVO PARA CHEQUEO DE CONVERGENCIA
If (ICVCK = 3) Then
      Call VCPD(PT, PT, IBC, 1, DPNM1, NV)
            'DPNM1 = DPNM1 + PT(NV)*PT(NV)
      Call VCPD(GM, GM, IBC, 1, DPNM2, NV)
            'DPNM2 = DPNM2 + GM(NV)+GM(NV)
End If
'***FORMAR GM=VECTOR DE FUERZA DESBALANCEADA (SOLO D.O.F. LIBRES)
'***SALVAR GO=-GM PARA LINEA DE BUSQUEDA Y FORMAR VECTOR DE REACCIONES
Call VCZR(GM, NV)
Call VCSC(GM, QFI, FI, IBC, 2, FACT, -1, NV)
            'GM(NV) = FACT*QFI(NV) - FI(NV)
Call VCCP(GM, GO, -1, NV)
            'GO(NV) = -1*GM(NV)
Call VCCP(FI, REAC, 1, NV)
            'REAC(NV) = FI(NV)
'*** SOBRESERIBIR TERMINOS DE REACCION DE RESORTES
If (NDSP <> 0) Then
      For I = 1 To NDSP
            REAC(ID14S(I)) = -AK14S(I) * PT(ID14S(I))
      Next I
End If
'*** CHEQUEAR CONVERGENCIA
Call VCPD(GM, GM, IBC, 3, GNORM, NV)
            'GNORM = GNORM + GM(NV)*GM(NV)
GNORM = Sqr(GNORM)
If (ICVCK = 1) Then
      Call VCPD(QFI, QFI, IBC, 1, FNORM, NV)

            FNORM1 = FACT * Sqr(FNORM)
            BET = GNORM / MAX3(FNORM, FNORM1, SMALL)

ElseIf (ICVCK = 2) Then
      Call VCPD(REAC, REAC, IBC, 2, RNORM, NV)
            'RNORM = RNORM + REAC(NV)*REAC(NV)
            RNORM = Sqr(RNORM)
            BET = GNORM / MAX(RNORM, SMALL)
ElseIf (ICVCK = 3) Then

```



```

Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "U mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "V mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "NODO"
Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "U mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = "V mov"
For I = 1 To NV / 2 Step 2
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = I
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 2).Value = PT(2 * I - 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 3).Value = PT(2 * I)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 4).Value = I + 1
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 5).Value = PT(2 * I + 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 6).Value = PT(2 * I + 2)
    SH2 = SH2 + 1
Next I
'SH2 = SH2 + NV / 2 - 1
ElseIf (NDIM = 3) Then
    'Worksheets(2).Cells(SH2 + NV / 3 + 1, 1).Activate
    Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "U mov"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "V mov"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "W mov"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "NODO"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = "U mov"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 7).Value = "V mov"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 8).Value = "W mov"
    For I = 1 To NV / 3 Step 2
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = I
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 2).Value = PT(3 * I - 2)
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 3).Value = PT(3 * I - 1)
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 4).Value = PT(3 * I)
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 5).Value = I + 1
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 6).Value = PT(3 * I + 1)
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 7).Value = PT(3 * I + 2)
        Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 8).Value = PT(3 * I + 3)
        SH2 = SH2 + 1
    Next I
    'SH2 = SH2 + NV / 3 - 1
End If
End If
Next ITE
'////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
Worksheets(2).Cells(SH2 - 1, 6).Value = _
    ">>>>>> !!! FALLO LA CONVERGENCIA EN " & (NITMAX - 1) & " ITERACIONES
!!! <<<<<<<"

If (IAUTO = 0) Then
    ITERMSG = MsgBox("** Incremento Numero : " & INCC & Chr(13) & _
        "** No se alcanzo convergencia, No ha reduccion de paso pues IAUTO = 0
!!!", vbOKOnly + vbCritical, _
        " * * * FALLA A LA CONVERGENCIA EN PROCESO IETRATIVO * * *")
    Stop 'STOP, !!!! NO HAY REDUCCION DE PASO PUES IAUTO = 0 !!!!
    Exit Sub

```


Tesis de Maestría Anexo II: Listado de instrucciones AMBAR

```

Worksheets(2).Cells(SH2 - 5 * NV - NE - 8, 7).Value = _
    " + + + LINEA DE BUSQUEDA + + + "

Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = ""
SH2 = SH2 + 1
ILFAIL = 0
Call VCPD(PBAR, GO, IBC, 1, S0, NV)
If (S0 >= SMALL) Then
    ILFAIL = 1
    Worksheets(2).Cells(SH2 - 1, 4).Value = _
        "RETORNO, PROD. INTERNO INICIAL DE SUBIDA, So = " & S0
    'RETORNO
    Exit Sub
End If
'*** PREP. RELACIONES DE PRODUCTOS INICIALES, PRODR, Y LONG. DE PASO, ETA
'*** ICO TOMA LOS VALORES DE:
'
'           = 1 CUANDO LA MAX. O MIN. LONGITUD DE PASO SE HA ALCANZADO
'           = 2 CUANDO SE HA ALCANZADO DOS VECES LO ANTERIOR
ICO = 0
ETA(1) = 0
ETA(2) = 1
PRODR(1) = 1
FACV(1) = FACT - SLOL
FACV(2) = FACT
'*** ABAJO: DESPL. TOTALES FIJOS EN EL FINAL DE LA ULTIMA ITERACION EN PTO
'*** EL CAMBIO EN EL DESPL. ITERATIVO FIJO, ESTA EN PBAR, P/CONTROL DE
CARGA
Call VCSC(PTO, PT, PBAR, IBC, 1, 1, -1, NV)
    'PTO(I)=PT(I)-PBAR(I)
'*** PARA CONTROL DE DESPL. Y LONGITUD DE ARCO, PBAR= DESPL. ITERATIVO
'    DEBIDO A FUERZAS INTERNAS EN EL INICIO DE LA ITERACION, Y PERMANECE
'    FIJO EN LA LINEA DE BUSQUEDA
'////////////////////////////////////
'////////////////////////////////////
'*** INICIO DEL BUCLE DE LINEA DE BUSQUEDA
For ILS = 1 To NLSMX
    '*** CALCULO DE FUERZA AN(NE) EN LA BARRA
    Call FORC(AN, ANIT, E, ARO, ALO, x, y, z, PT, ID, IWRT, IWR, _
        NV, NN, NE, ITYEL, ARN, ALN, POISS, ESTR, NDSP, AK14S, _
        ID14S, NDIM, NNODE)
    Call VCPD(QFI, PT, IBC, 0, ETOT, NV)
        'ETOT=ETOT+QFI(I)*PT(I)
    ETOT = ESTR - FACT * ETOT
    '*** MODIFICAR VECT. DE FUERZA INTERNA FI PARA INCLUIR RESORTES
    Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, _
        AK14S, NDSP, FI, PT, 1, IWRT, IWR, ID, AN, x, y, z, _
        ITYEL, NDIM, NDOF, NNODE)
    '*** FORMAR RELACION DE PROD. INTERNO ACTUAL
    Call VCSC(GO, FI, QFI, IBC, 1, -1, FACT, NV)
        'GO(I)=-FI(I)+FACT*QFI(I)
    Call VCCP(GO, GO, -1, NV)
        'GO(I)=-1*GO(I)
    Call VCPD(PBAR, GO, IBC, 1, SETA, NV)
        'SETA=SETA+PBAR(I)*GO(I)

```

```

SETA = SETA / S0
PRODR(ILS + 1) = SETA
If (IWRIT = 1) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "LINEA DE BUSQ. No.= " & ILS - 1
  Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "ENERGIA POTENCIAL = " & ETOT
  Worksheets(2).Cells(SH2, 7).Value = "ENERGIA DE DEFORMACION = " & ESTR
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = "RAZON EN EL CAMBIO DE ENERGIA,
r = " & PRODR(ILS + 1)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 7).Value = "LONGITUD DE PASO, ETA = " &
ETA(ILS + 1)
  SH2 = SH2 + 2
End If
'*** CHEQUEAR SATISFACCION DE TOLERANCIA DE LINEA DE BUSQUEDA
'   SI ES ASI IR A STEP300
'+++++ CHEQUEAR SATISFACCION DE LINEA DE BUSQUEDA
+++++
If (Abs(SETA) < PERMLS) Then GoTo STEP300
'*** LLAMAR RUTINA DE LINEA DE BUSQUEDA PARA OBTENER
'   UN NUEVO ESTIMADO DE ETA EN ETA(ILS+2)
Call SECH(ILS, PRODR, ETA, AMPMX, ETMXA, ETMNA, IWRIT, IWR, ICO, NV, NE)
If (ICO = 2) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2 - 1, 5).Value = "**** PROBLEMA EN LINEA DE
BUSQUEDA ****"
  GoTo STEP110
End If
'ACTUALIZAR RELACIONES PREVIAS DEBIDO AL CAMBIO DE CARGA.
'LAS FUERZAS DESBALANCEADAS NO SE ACTUALIZAN
'ACTUALIZAR DESPLAZAMIENTOS.
'STEP101:
  Call VCSC(PT, PTO, PBAR, IBC, 1, 1, ETA(ILS + 2), NV)
  'PT(I)=PTO(I)+ETA(ILS+2)*PBAR(I)
Next ILS
'////////////////////////////////////
////////
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "MAX No. DE LINEAS DE BUSQ. EXCEDIDOS"
LSLPMMSG = MsgBox("* Incremento Numero : " & INCC & Chr(13) & _
  "* Maximo Numero de lineas de busqueda Excedido !!!", vbOKOnly +
vbInformation, _
  "**** PROBLEMAS EN BUCLE DE LINEA DE BUSQUEDA ****")
STEP110:
'*** SALVAR EL NUEVO CAMBIO EN DESPL. ITERATIVO PARA CORRECTOR DE 2do ORDEN
Call VCSC(PBAR, PT, PTO, IBC, 1, 1, -1, NV)
  'PBAR(I)=PT(I)-PTO(I)
If (IAUTO = 0) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "!!!! Stop en LSLP ya que IAUTO = 0
!!!!"
  LSLPMMSG = MsgBox("* Incremento Numero : " & INCC & Chr(13) & _
    "* Stop en LSLP, pues IAUTO = 0 !!!", vbOKOnly + vbInformation, _
    "**** PROBLEMAS EN BUCLE DE LINEA DE BUSQUEDA ****")
  Stop
ElseIf (IAUTO = 1) Then
  ILFAIL = 2
  Exit Sub 'RETORNO
End If

```

```

STEP300:
SLOL = ETA(ILS + 1)
'*** ANTES DEL RETORNO A LA RUTINA ITER SE DEBE CALCULAR LA MATRIZ DE
' RIGIDEZ TANGENTE SI SE ESTA USANDO ITERACIONES NEWTON-RAPHSON
COMPLETAS
If (ITERTY = 1) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, NV + 2).Value = " + + + SE ESTA USANDO
  NEWTON-RAPHSON + + +"
  Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, _
    AK14S, NDSP, FI, PT, 2, IWRIT, IWR, ID, AN, x, y, z, _
    ITYEL, NDIM, NDOF, NNODE)
Else
  SH2 = SH2 + NV + 1
End If

End Sub

Sub NEIN(IARC, ITE, ISPRD, FACI, FACMX, FACMN, DL, DLDES, _
  DLDMX, DLDMN, BETOK, BET, PT, PTOL, AN, ANOL, NV, NN, NE, _
  IDES, FACT, FACTOL, ALO, ALN, ARO, ARN, ID, NDIM, x, y, z, _
  ITYEL, NNODE, IWR, POISS)
'*****
*****
'CALCULO DE FACTORES PARA EL SIGUIENTE INCREMENTO USANDO INCREMENTOS
AUTOMATICOS
'*****
*****
Dim FAC As Double, I As Integer
Dim I1 As Integer, I2 As Integer, I3 As Integer, I4 As Integer
Dim X21D As Double, Y21D As Double, Z21D As Double, POW As Double
Dim RAT As Double, NEINMSG As Integer

If (ISPRD = 1) Then
  '*** NO HUBO CONVERG. EN EL ULTIMO INCREM., OBTENER FACTOR DE REDUCCION,
  FAC
  If (IARC = 0 And Abs(FACI) <= FACMN) Then
    NEINMSG = MsgBox("* Stop en NEIN, [Control de Carga]" & Chr(13) & _
      "* !!! FACI < FACMN, el tamaño del paso no puede reducirse mas !!!",
    vbOKOnly + vbCritical, "**** PROXIMO INCREMENTO ****")
    Stop '!!!! FACI<FACMN, EL TAMAÑO DE PASO NO PUEDE REDUCIRSE MAS !!!!
  ElseIf (IARC = 1 And Abs(DL) <= DLDMN) Then
    NEINMSG = MsgBox("* Stop en NEIN, [Ctrl. de Long. de Arco]" & Chr(13) & _
      "* !!! DL < DLDMN, el tamaño del paso no puede reducirse mas !!!",
    vbOKOnly + vbCritical, "**** PROXIMO INCREMENTO ****")
    Stop '!!!! DL<DLDMN, EL TAMAÑO DE PASO NO PUEDE REDUCIRSE MAS !!!!
  End If
  FAC = BETOK / BET
  If (FAC > 0.5) Then FAC = 0.5
  If (FAC < 0.05) Then FAC = 0.05
  '*** RETORNAR DESPL. Y FUERZAS A SUS VALORES ANTES DEL INCREMENTO FALLIDO
  Call VCCP(PTOL, PT, 1, NV)
  Call VCCP(ANOL, AN, 1, NE)

```

```

FACI = FACT - FACTOL
FACT = FACTOL
For I = 1 To NE
  '*** CALCULAR LONGITUD Y AREA EN EL ULTIMO INCREMENTO CONVERGIDO
  I1 = ID(I, 1)
  I2 = ID(I, 2)
  I3 = NDIM * (I1 - 1) + 1
  I4 = NDIM * (I2 - 1) + 1
  X21D = x(I2) - x(I1) + PT(I4) - PT(I3)
  Y21D = y(I2) - y(I1) + PT(I4 + 1) - PT(I3 + 1)
  ALN(I) = Sqr(X21D * X21D + Y21D * Y21D)
  If (NDIM = 3) Then
    Z21D = z(I2) - z(I1) + PT(I4 + 2) - PT(I3 + 2)
    ALN(I) = Sqr(ALN(I) * ALN(I) + Z21D * Z21D)
  End If
  If (ITYEL = 4) Then
    '*** PERMITIR CAMBIO DE VOLUMEN
    POW = 2 * POISS
    RAT = ALO(I) / ALN(I)
    ARN(I) = ARO(I) * RAT ^ POW
  End If
Next I
Else
  '*** SE HA CONVERGIDO EN EL ULTIMO INCREMENTO, OBTENER FACTOR DE
  CAMBIO,FAC
  ' HACERLO GRANDE SI NO SE REALIZARON ITERACIONES REALES EN EL ULTIMO
  INC.
  FAC = 100
  If (ITE > 1) Then FAC = Sqr(IDES / (ITE - 1))
End If
If (IARC = 0) Then
  '*** CONTROL DE CARGA
  FACI = FAC * Abs(FACI)
  If (FACI > FACMX) Then FACI = FACMX
  If (FACI < FACMN) Then FACI = FACMN
ElseIf (IARC <> 0) Then
  '*** CONTROL DE LONGITUD DE ARCO
  DLDES = FAC * DL
  If (DLDES > DLDMX) Then DLDES = DLDMX
  If (DLDES < DLDMN) Then DLDES = DLDMN
End If

End Sub

Sub OUTP(IARC, FACT, IWR, NDIM, AN, NE, NV, NOUT, PT, REAC, IDOUT, _
  INCC, x, y, NN, z, NMATE, NANIT, IRES)
'*****
' SALIDA DE SOLUCIONES EN EL FINAL DE UN INCREMENTO
'*****
Dim I As Integer, COCI As Integer, AUX1 As Integer, FILA As Integer, J As
Integer

SH2 = SH2OP + 1
'Worksheets(2).Cells(SH2 + NE \ 2 + NN + 5, 1).Activate

```

```

Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
  "***** SOLUCIONES EN EL FINAL DE ESTE INCREMENTO *****"

Worksheets(2).Select
Worksheets(2).Range(Cells(SH2 + 1, 1), Cells(SH2 + NV + NN + 15, 2 *
NV)).Value = ""
Worksheets(4).Select

SH2 = SH2 + 1
If (IARC <> 0) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
  "FACTOR DE CARGA TOTAL DESPUES DEL AJUSTE DE LONG.DE ARCO, FACT = " &
  FACT
  SH2 = SH2 + 1
End If
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "ELEM."
Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "F.AXIAL"
Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "ELEM."
Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "F.AXIAL"

COCI = NE \ 2
If (COCI * 2 = NE) Then 'NE es par
  For I = 1 To NE / 2
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = 2 * I - 1
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 2).Value = AN(2 * I - 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 3).Value = 2 * I
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 4).Value = AN(2 * I)
  Next I
  SH2 = SH2 + NE / 2 + 1
Else 'NE es impar
  For I = 1 To NE \ 2 + 1
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = 2 * I - 1
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 2).Value = AN(2 * I - 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 3).Value = 2 * I
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 4).Value = AN(2 * I)
  Next I
  SH2 = SH2 + NE \ 2 + 2
End If
SH2 = SH2 + 1
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
  "DESPL. FINALES TOTALES Y REACCIONES FINALES TOTALES"
SH2 = SH2 + 1
If (NDIM = 2) Then '-----PROBLEMA EN DOS DIMENSIONES
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "U mov"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "V mov"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "Reac X"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "Reac Y"
  For I = 1 To NV / 2
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = I
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 2).Value = PT(2 * I - 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 3).Value = PT(2 * I)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 4).Value = REAC(2 * I - 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 5).Value = REAC(2 * I)
  
```

```

Next I
SH2 = SH2 + NV / 2 + 1

COCI = 12 + NE + 1 + NV + 7
Worksheets(3).Cells(COCI, 1).Value = _
  "COORD. NODALES ACTUALES, INCC = " & INCC
For I = 1 To NV / 2
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 1).Value = I
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 2).Value = x(I) + PT(2 * I - 1)
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 3).Value = y(I) + PT(2 * I)
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 4).Value = ""
Next I

ElseIf (NDIM = 3) Then '-----PROBLEMA EN TRES DIMENSIONES
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "U mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "V mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "W mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "Reac X"
Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = "Reac Y"
Worksheets(2).Cells(SH2, 7).Value = "Reac Z"
For I = 1 To NV / 3
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = I
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 2).Value = PT(3 * I - 2)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 3).Value = PT(3 * I - 1)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 4).Value = PT(3 * I)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 5).Value = REAC(3 * I - 2)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 6).Value = REAC(3 * I - 1)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 7).Value = REAC(3 * I)
Next I
SH2 = SH2 + NV / 3 + 1
COCI = 12 + NE + 1 + NV + 7
Worksheets(3).Cells(COCI, 1).Value = _
  "COORD. NODALES ACTUALES, INCC = " & INCC
For I = 1 To NV / 3
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 1).Value = I
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 2).Value = x(I) + PT(3 * I - 2)
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 3).Value = y(I) + PT(3 * I - 1)
  Worksheets(3).Cells(COCI + I, 4).Value = z(I) + PT(3 * I)
Next I
End If

Worksheets(3).Cells(COCI, 5).Value = "INCR"
Worksheets(3).Cells(COCI, 6).Value = "FACT"
Worksheets(3).Cells(COCI - 1, 7).Value = "IDOUT(I)"

Worksheets(3).Cells(COCI + INCC, 5).Value = INCC
Worksheets(3).Cells(COCI + INCC, 6).Value = FACT
For I = 1 To NOUT
AUX1 = IDOUT(I)
Worksheets(3).Cells(COCI, 6 + I).Value = "DOF = " & AUX1
Worksheets(3).Cells(COCI + INCC, 6 + I).Value = PT(AUX1)
Next I

```

Tesis de Maestría Anexo II: Listado de instrucciones AMBAR

```

'ESCRIBIR DATOS PARA FIGURA DEFORMADA
Call ZZDEF(NV, NN, NE, NMATE, NANIT, NDIM, IDOUT, FACT, INCC, PT, IRES)

End Sub

Sub PARA(D, DT, CSTIF, FACT, NEG, PIVRAT, PIVS, PIVB, DL, IBC, _
        QFI, INC, IRES, NV, IWR, IBRAC)
'*****
' CALCULO DE PARAMETROS QUE CARACTERIZAN LA RIGIDEZ DE LA ESTRUCTURA

' CSTIF = PARAMETRO DE RIGIDEZ ACTUAL
' PIVS = EL MENOR PIVOTE DE Kt
' PIVB = EL MAYOR PIVOTE DE Kt

' DERT = DETERMINANTE DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ TANGENTE Kt
' PMIN = EL MENOR ABS(PIVOTE) DE Kt
' PIVR = EL PRODUCTO DE PIVS Y PIVB
' NORMALIZADOS POR VALOR INICIAL: DERT0, PMIN0, PIVR0
' 3-ACTUAL;2-ULTIMO;1-PENULTIMO

' QFI = PATRON DE CARGA EXTERNA
'*****

'CALCULO DE: 1) PARAMETRO DE RIGIDEZ ACTUAL
'           2) No. DE PIVOTES NEGATIVOS
Dim STIF As Double, PIVMAX As Double, PIVMIN As Double, ITTTT As Double
Dim I As Integer, II As Integer, PARAMSG As Integer
Dim T1 As Double, T2 As Double

NEG = 0
Call VCPD(DT, QFI, IBC, 1, STIF, NV)
' STIF = STIF + DT(NV)*QFI(NV)
Call VCPD(DT, DT, IBC, 1, DL, NV)
' DL = DL + DT(NV)*DT(NV)
STIF = STIF / DL
DL = Sqr(DL)
If (INC = 1 And IRES = 0) Then STIFI = STIF
CSTIF = STIF / STIFI '....."PARAMETRO DE RIGIDEZ ACTUAL"
Call MAMN(D, NV, PIVMAX, ITTTT, 1, 1, 1, IBC)
'D(NV)-> MAXIMO EN PIVMAX, POSICION EN ITTTT
For I = 1 To NV
  If (IBC(I) > 0 Or D(I) > 0) Then GoTo STEP10
  NEG = NEG + 1
  If (D(I) > -0.00000001 * PIVMAX) Then
    Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value =
      "!PIV.NEG. DEMASIADO PEQUEÑO (<1.0E-8*PIVMAX) ENCONTRADO EN D.O.F. =" &
I
    SH2 = SH2 + 1
  End If
STEP10:
Next I
If (NEG <> NPIV(3) And INBR = 0) Then IPAST = IPAST + 1
'CALCULO DE:
' 1) MINIMO PIVOTE DE Kt : PMIN

```

```

'      2) DETERMINANTE DE Kt : DERT
'      3) PRODUCTO DE MAYOR & MENOR DIAGONAL DE Kt : PIVR
Call MAMN(D, NV, PIVS, IMINM, 0, 0, 1, IBC)
      'D(NV) -> MINIMO EN PIVS, POSICION EN IMINM
Call MAMN(D, NV, PIVB, IMAXM, 0, 1, 1, IBC)
      'D(NV) -> MAXIMO EN PIVB, POSICION EN IMAXM
Call MAMN(D, NV, PIVMIN, ISMAL, 1, 0, 1, IBC)
      'D(NV) -> MINIMO EN PIVMIN, POSICION EN ISMAL
If (INC = 1 And IRES = 0) Then PIVMNI = PIVMIN

'*** NUEVO FACTOR DE ESCALA PARA CAPTURA DEL PUNTO SINGULAR
If (IPAST = ICRIT And INBR = 0 And (IBRAC <> 0 And Not _
  IBRAC = -6) And INC >= 3) Then _
  PIVMNI = Sqr(Abs(PMIN(3) * PMIN(2)) * PMIN0 * PMIN0)
PIVRAT = PIVMIN / PIVMNI
If ((INC = 1) And (IRES = 0)) Then
  '*** INICIALIZAR FUNCIONES DE PRUEBA SI NO ES UN RE-INICIO
  D0 = 1
  For II = 1 To NV
    D0 = D0 * D(II)
    If (Abs(D0) > BIG) Then D0 = BIG 'PARA EVITAR DESBORDAMIENTO
  Next II
  D0 = Abs(D0)
  If (Abs(D0) > BIG) Then D0 = BIG
  PIVR0 = Abs(PIVS * PIVB)
  PMIN0 = Abs(PIVS)
  DERT(3) = 1
  PIVR(3) = 1
  PMIN(3) = 1
Else
  PIVR(1) = PIVR(2)
  PIVR(2) = PIVR(3)
  PMIN(1) = PMIN(2)
  PMIN(2) = PMIN(3)
  DERT(1) = DERT(2)
  DERT(2) = DERT(3)
  DERT(3) = 1
  For II = 1 To NV
    DERT(3) = DERT(3) * D(II) 'DETERMINANTE ACTUAL DE K -> DERT(3)
    If (Abs(DERT(3)) > BIG) Then DERT(3) = BIG 'PARA EVITAR DESBORDAMIENTO
  Next II
  DERT(3) = DERT(3) / D0 'DET. ACTUAL DERT(3) ESCALADO POR EL PRIMER DET.
D0
  If (Abs(DERT(3)) > BIG) Then
    DERT(3) = BIG
    If (IBRAC = 3) Then
      IBRAC = 5
      Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
        "EL DETERM. ES DEMASIADO GRANDE PARA SER USADO EN LA CAPTURA. SE
USARA EL PIVOTE MIN. !"
      SH2 = SH2 + 1
    End If
  End If
  PIVR(3) = PIVS * PIVB / PIVR0

```

```

    PMIN(3) = PIVS / PMIN0
End If
NPIV(1) = NPIV(2)
NPIV(2) = NPIV(3)
NPIV(3) = NEG
ALOD(1) = ALOD(2)
ALOD(2) = ALOD(3)
ALOD(3) = FACT
SH2 = SH2 + 1
'Worksheets(2).Cells(SH2 + NV / 2 + 5, 1).Activate
If (IBRAC <> -6 And Not (IBRAC = 6 And INBR = 1)) Then
    With Worksheets(2)
        .Cells(SH2, 1).Value = "PARAM. DE RIGIDEZ ACTUAL = " & CSTIF
        .Cells(SH2, 5).Value = "No. DE PIVOTES NEGATIVOS = " & NEG
        .Cells(SH2 + 1, 1).Value = "RAZON DE PIVOTES = " & PIVRAT
        .Cells(SH2 + 1, 5).Value = "DETERMINANTE = " & DERT(3)
        .Cells(SH2 + 2, 1).Value = "EL MENOR PIVOTE = " & PIVS
        .Cells(SH2 + 2, 5).Value = "EL MAYOR PIVOTE = " & PIVB
        .Cells(SH2 + 3, 1).Value = "EN EL D.O.F. = " & IMINM
        .Cells(SH2 + 3, 5).Value = "EN EL D.O.F. = " & IMAXM
        .Cells(SH2 + 4, 1).Value = "MINM PIV EN = " & ISMAL
    End With
    SH2 = SH2 + 5
End If
'*** ENCONTRAR LA MULTIPLICIDAD DEL PUNTO SINGULAR
    'IMULTI = No. DE PIVOTES NEGATIVOS ACTUAL-ULTIMO
If (Abs(NPIV(3) - NPIV(2)) <> IMULTI And INBR = 0) Then
    If (IPAST = ICRIT And IBRAC <> -6) Then IMULTI = Abs(NPIV(3) - NPIV(2))
End If
'*** CHEQUEAR CAPTURA IMPROPIA
If (IMULTI > 1 And IBRAC > 2 And Abs(IBRAC) < 6) Then
    Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
        "!! MULTIPLE BIFURCACION ENCONTRADA. NO USAR INTERPOLACION PARA LA
CAPTURA !"
    PARAMSG = MsgBox("* Incremento Numero : " & INC & Chr(13) & _
        "* Stop en PARA, Multiple Bifurcacion Encontrada." & _
        Chr(13) & "!!! NO SE PUEDE USAR INTERPOLACION PARA LA CAPTURA !!!", _
        vbOKOnly + vbCritical, "*** PARAMETROS DEL ESTADO DE RIGIDEZ ACTUAL
***")
    Stop
End If
If (IPAST = ICRIT And INBR > 0 And IBRAC > 2 And Abs(IBRAC) < 6) Then
    If (NPIV(3) = NPIV(2) And NPIV(2) = NPIV(1)) Then
        Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = _
            "TRES SOLNS.CONSECUTIVAS SOBRE EL MISMO LADO DEL PTO.SING. CAPTURA
IMPOSIBLE!"
        PARAMSG = MsgBox("* Incremento Numero : " & INC & Chr(13) & _
            "* Stop en PARA, Tres Solns. Consecutivas en el mismo lado del Pto.
Sing." & _
            Chr(13) & "!!! CAPTURA IMPOSIBLE !!!", _
            vbOKOnly + vbCritical, "*** PARAMETROS DEL ESTADO DE RIGIDEZ ACTUAL
***")
        Stop
    End If
End If

```

```

End If
'*** CHEQUEAR SI HAY OSCILACION NUMERICA
T1 = Abs(ALOD(3) - ALOD(1))
T2 = 0.0001 * Abs(ALOD(2) - ALOD(1))
If (IBRAC = 0 Or (IPAST < ICRIT And IBRAC <> 0)) Then
  If (T1 < T2) Then
    Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "!!!! LA SOLUCION OSCILA !!!!!"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "!!!! LA SOLUCION OSCILA !!!!!"
    Worksheets(2).Cells(SH2, 8).Value = "!!!! LA SOLUCION OSCILA !!!!!"
    PARAMSG = MsgBox("* Incremento Numero : " & INC & Chr(13) &
      "* Stop en PARA ..." & Chr(13) & "!!! SOLUCION OSCILANTE !!!", _
      vbOKOnly + vbCritical, "*** PARAMETROS DEL ESTADO DE RIGIDEZ ACTUAL
***")
    Stop
  End If
End If

End Sub

Sub PRED(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, _
  AK14S, NDSP, FI, PT, ID, AN, x, y, z, ITYEL, NDIM, _
  NDOF, NNODE, D, DT, IBC, QFI, AMP, ANOL, PTOL, IBRSW, _
  IMULTI, INC, INCC, IBRAC, IPAST, ICRIT, IROW, IWR, _
  IWRT, x1, DLDEO, DLDESO, CSTIFO, CSTIF, YY, z1, _
  PIVRAT, NITMAX, BETOK, EPSI)
'*****
'OBTENER PREDICTOR PARA LA SOLUCION ITERATIVA

' AMP = AMPLITUDES PARA EIGENMODOS EN CASO DE BIFURCACION MULTIPLE
' AKTS = MATRIZ DE RIGIDEZ TANGENTE DE ESTRUCTURA
' AK14S = RIGIDEZ DE RESORTES LINEALES EQUIVALENTES
' AK15 = RIGIDEZ DE RESORTE LINEAL ENTRE VARIABLES 1 AND NV
' D = PIVOTES DIAGONALES DE LA FACTORIZACION LDL (TRAN)
' DT = VECT. DE DESPL. TANGENTE, CORRESPOND. A LA CARGA TOTAL (QFI)
' = MENOR EIGENVECTOR FINAL CON IBRAC=1 Y EN UN RE-INICIO CON
IBRSW=1
' FI = FUERZAS INTERNAS
' GM = VECTOR DE FUERZAS DESBALANCEADAS (EN SUB-RUTINA ITER)
' GO = ANTIGUO VEC. DE FUERZAS DESBALANCEADAS (PARA LINEA DE BUSQUEDA)
' IBC = CONTADOR DE CONDICION DE CONTORNO (0=LIBRE, 1=FIJO)
' ID14S = NUMEROS DE VAR. (1-4) EN LOS QUE HAY RESORTES LINEALES ANCLADOS
' ID = NUMEROS NODALES DE ELEMENTOS
' IROW = No. DE FILA DE Kt A SER REEMPLAZADO POR UN VECTOR UNITARIO PARA
' OBTENER EL PREDICTOR DE Seydel PARA CAMBIO DE RAMIFICACION
' NDIM = DIMENSION DEL PROBLEMA (2 OR 3)
' NE = No. DE ELEMENTOS (NO MAYOR QUE NELM )
' NN = No. DE NODOS (NV/NDIM)
' NOUT = No. DE VARIABLES DE SALIDA (NO MAYOR QUE 10)
' NDSP = No. DE RESORTES ANCLADOS
' NV = No. DE VARIABLES (NO MAYOR QUE NDOF)
' PT = VECTOR DE DESPLAZAMIENTO TOTAL
' PTOL = VECTOR DE DESPLAZAMIENTO TOTAL EN EL FINAL DEL ULTIMO INCREMENTO
' QFI = VECTOR DE CARGA FIJA
' X = COORDENADAS X DE NODOS

```

```

' Y      = COORDENADAS Y DE NODOS
' Z      = COORDENADAS Z DE NODOS
' Z1     = MENOR EIGENMODO
'*****
Dim AU2 As Integer

INCC = INCC + 1

If BYINC = 1 Then
    AU2 = MsgBox("INCREMENTO NUMERO : " & INCC,
        vbOKCancel, "CORRIENDO POR INCREMENTOS . . .")
    If AU2 = 2 Then End
End If
'WORKSHEETS(2).Cells(SH2 + 3, 1).Activate
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value =
"*****
*****"
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = "INCREMENTO NUMERO = " & INCC
Worksheets(2).Cells(SH2 + 2, 1).Value =
"*****
*****"
SH2 = SH2 + 3
'*** SALVAR ANTIGUO DESPL., ANTIGUAS FUERZAS; PARA CORTE DE INCREMENTO
' (EL ANTIGUO FACTOR DE CARGA SALVADO EN SCAL)
Call VCCP(PT, PTOL, 1, NV)
    'PTOL(NV)=1*PT(NV)
Call VCCP(AN, ANOL, 1, NE)
    'ANOL(NE)=1*AN(NE)
Call VCCP(QFI, DT, 1, NV)
    'DT(NV)=1*QFI(NV)

If (INC <> 1) Then
    If (IBRAC = 0) Then CSTIFO = CSTIF
    If (IPAST < ICRIT) Then DLDEEO = DLDESO
    If (IBRAC <> 0 And IPAST < ICRIT) Then CSTIFO = CSTIF
End If
If (Abs(IBRSW) = 4) Then Call SWPR(NV, IROW, IBC, z1, DT)
'*** FORMAR MATRIZ DE RIGIDEZ TANG. AKTE; ENSAMBLARLA EN MATRIZ DE ESTRUCT.
AKTS
'    AÑADIR EFECTOS DE RESORTES LINEALES; APLICAR CONDICIONES DE CONTORNO
Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, AK14S, _
    NDSP, FI, PT, 2, IWRT, IWR, ID, AN, x, y, z, ITYEL, NDIM, _
    NDOF, NNODE)
Call BCON(AKTS, IBC, NV, DT, IWRT, IWR, NDOF, 3)
If (IROW <> 0 And Abs(IBRSW) = 4) Then IBC(IROW) = 0
'*** FORMAR FACTORIZACION LDL(TRAN) EN AKTS Y D
Call CROT(AKTS, D, NV, IWRT, IWR, NDOF)
'*** RESOLVER ECUACIONES Y OBTENER DESPL. TANGENTES EN DT (P/CARGA SIN
ESCALAR)
If (IBRSW = 0) Then Call SOLV(AKTS, D, DT, NV, IWRT, IWR, NDOF)
'*** OBTENER PREDICTOR PARA CAMBIO DE RAMIFICACION
If (IBRSW <> 0) Then _
    Call BRSW(IBRSW, NV, x1, IBC, AKTS, D, DT, YY, z1, IMULTI, AMP, NDOF)

```

```

End Sub

Sub QSOL(AA, BB, CC, R1, R2, RLIN, IFAIL)
'*****
' SOLUCION DE ECUACION CUADRATICA AA*X^2 + BB*X + CC

' SI BB ES DIFERENTE DE 0, SOLUCION LINEAL, -CC/BB EN RLIN
' SI IFAIL SALE = CERO, HAY DOS RAICES REALES EN R1,R2
' SI IFAIL SALE = UNO, AA TIENDE A CERO Y R1 SALE COMO RLIN
' SI IFAIL SALE = DOS, NO HAY RAICES REALES
'*****
Dim FAC As Double

SMALL = 0.0000000001
IFAIL = 0
If (BB <> 0) Then RLIN = -CC / BB
FAC = BB * BB - 4 * AA * CC
If (FAC < 0) Then
'NO HAY RAICES REALES
IFAIL = 2
'RETORNO
Exit Sub
Else
'RAICES REALES
FAC = Sqr(FAC)
If (AA = 0) Then
If (BB <> 0) Then
R1 = RLIN
IFAIL = 1
'RETORNO
Exit Sub
Else
'AA=0 AND BB=0
'STOP "QSOL: NO HAY SOLUCION"
Exit Sub
End If
Else
'RAICES REALES Y AA ES DIFERENTE DE 0
R1 = -0.5 * (FAC + BB) / AA
R2 = 0.5 * (FAC - BB) / AA
End If
End If

End Sub

Sub RSRW(FACT, CSTIFO, NEG0, AN, ALN, ARN, PT, DT, z1, NE, NV, _
IRERW, IBRAC, IBRSW, YY, AMP, NDOF, x1)
'*****
' LEER Y ESCRIBIR DATOS DE HOJA DE RE-INICIO
' IREW = 1: LEER REINICIO
' = 2: ESCRIBIR REINICIO
'*****
Dim I As Integer, J As Integer, RSRWMSG As Integer

```

```

If (IRERW = 1) Then
  '*** LEER REINICIO DESDE UNA CORRIDA PREVIA

  '*** LEER D0,PIVR0,PMIN0,STIFI,PIVMNI,CSTIFO,X1
D0 = Worksheets(3).Cells(2, 1).Value
PIVR0 = Worksheets(3).Cells(3, 1).Value
PMIN0 = Worksheets(3).Cells(4, 1).Value
STIFI = Worksheets(3).Cells(5, 1).Value
PIVMNI = Worksheets(3).Cells(6, 1).Value
CSTIFO = Worksheets(3).Cells(7, 1).Value
x1 = Worksheets(3).Cells(8, 1).Value
  '*** LEER FACT,NEGO,IMULTI
FACT = Worksheets(3).Cells(9, 1).Value
NEGO = Worksheets(3).Cells(10, 1).Value
IMULTI = Worksheets(3).Cells(11, 1).Value
  For I = 1 To NE
    '*** LEER: AN(I),ALN(I),ARN(I)
    AN(I) = Worksheets(3).Cells(12 + I, 2).Value
    ALN(I) = Worksheets(3).Cells(12 + I, 3).Value
    ARN(I) = Worksheets(3).Cells(12 + I, 4).Value
  Next I
  If (IBRSW = 0) Then
    For I = 1 To NV
      '*** LEER: PT(I),DT(I)
      PT(I) = Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 2).Value
      DT(I) = Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 4).Value
    Next I
  Else
    For I = 1 To NV
      '*** LEER: PT(I),YY(I),DT(I),(Z1(I,J),J=1,IMULTI)
      PT(I) = Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 2).Value
      YY(I) = Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 3).Value
      DT(I) = Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 4).Value
      For J = 1 To IMULTI
        z1(I, J) = Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 4 + J).Value
      Next J
    Next I
  End If
  For I = 1 To 3
    '*** LEER DERT(I),PIVR(I),PMIN(I),ALOD(I),NPIV(I)
    DERT(I) = Worksheets(3).Cells(14 + NE + NV + I, 1).Value
    PIVR(I) = Worksheets(3).Cells(14 + NE + NV + I, 2).Value
    PMIN(I) = Worksheets(3).Cells(14 + NE + NV + I, 3).Value
    ALOD(I) = Worksheets(3).Cells(14 + NE + NV + I, 4).Value
    NPIV(I) = Worksheets(3).Cells(14 + NE + NV + I, 5).Value
  Next I
  If (IBRSW = 3) Then
    If (IMULTI = 1) Then
      '*** STOP, IBRSW=3 NO APLICABLE A PTO. DE BIFURCACION SIMPLE
      RSRWMSG = MsgBox("* Stop en RSRW !!!" & Chr(13) & _
        "* !!! IBRSW = 3 NO APTO PARA PTO. DE BIFURCACION
SIMPLE !!!" _
        , vbOKOnly + vbCritical, "*** ERROR EN DATOS DE RE-
INICIO ***")

```

```

    End If
  End If
  IRERW = 1
ElseIf (IRERW = 2) Then
  'ESCRIBIR DATOS PARA REINICIO
  With Worksheets(3)
    .Cells(1, 1).Value = "RE-START OUTPUT DATA"
    .Cells(2, 2).Value = " = D0 , det(Ko) en el estado inicial"
    .Cells(3, 2).Value = " = PIVRO , producto de los pivotes menor y mayor
en el estado inicial"
    .Cells(4, 2).Value = " = PMINO , menor pivote de Ko en el inicio de la
solucion"
    .Cells(5, 2).Value = " = STIFI , factor de escala para el param. de
rigidez actual"
    .Cells(6, 2).Value = " = PIVMINI , el menor pivote justo antes de que
inicie la captura"
    .Cells(7, 2).Value = " = CSTIFO , parametro de rigidez actual inicial"
    .Cells(8, 2).Value = " = X1 , coeficiente para la tangente del camino
secundario"
    .Cells(9, 2).Value = " = FACT , factor de carga total en el final de la
ultima corrida"
    .Cells(10, 2).Value = " = NEGO , numero de pivotes negativos en el
final de la ultima corrida"
    .Cells(11, 2).Value = " = IMULTI , multiplicidad del pto. singular
capturado"
    .Cells(12, 1).Value = "NE"
    .Cells(12, 2).Value = "AN"
    .Cells(12, 3).Value = "ALN"
    .Cells(12, 4).Value = "ARN"
    '-----
    .Cells(2, 1).Value = D0
    .Cells(3, 1).Value = PIVRO
    .Cells(4, 1).Value = PMINO
    .Cells(5, 1).Value = STIFI
    .Cells(6, 1).Value = PIVMINI
    .Cells(7, 1).Value = CSTIFO
    .Cells(8, 1).Value = x1
    .Cells(9, 1).Value = FACT
    .Cells(10, 1).Value = NEGO
    .Cells(11, 1).Value = IMULTI
  End With
  For I = 1 To NE
    With Worksheets(3)
      .Cells(12 + I, 1).Value = I
      .Cells(12 + I, 2).Value = AN(I)
      .Cells(12 + I, 3).Value = ALN(I)
      .Cells(12 + I, 4).Value = ARN(I)
    End With
  Next I
  If (IBRAC = 0) Then 'SIN CAPTURA
    With Worksheets(3)
      .Cells(13 + NE, 1).Value = "D.O.F."
      .Cells(13 + NE, 2).Value = "PT"
      .Cells(13 + NE, 4).Value = "DT"
    End With
  End If
End If

```

```

End With
For I = 1 To NV
  With Worksheets(3)
    .Cells(13 + NE + I, 1).Value = I
    .Cells(13 + NE + I, 2).Value = PT(I)
    .Cells(13 + NE + I, 4).Value = DT(I)
  End With
Next I
Else 'CAPTURA
  With Worksheets(3)
    .Cells(13 + NE, 1).Value = "D.O.F."
    .Cells(13 + NE, 2).Value = "PT"
    .Cells(13 + NE, 3).Value = "YY"
    .Cells(13 + NE, 4).Value = "DT"
    .Cells(13 + NE, 5).Value = "z1(s)"
  End With
  For I = 1 To NV
    With Worksheets(3)
      .Cells(13 + NE + I, 1).Value = I
      .Cells(13 + NE + I, 2).Value = PT(I)
      .Cells(13 + NE + I, 3).Value = YY(I)
      .Cells(13 + NE + I, 4).Value = DT(I)
    End With
    For J = 1 To IMULTI
      Worksheets(3).Cells(13 + NE + I, 4 + J).Value = z1(I, J)
    Next J
  Next I
End If
With Worksheets(3)
  .Cells(14 + NE + NV, 1).Value = "DERT"
  .Cells(14 + NE + NV, 2).Value = "PIVR"
  .Cells(14 + NE + NV, 3).Value = "PMIN"
  .Cells(14 + NE + NV, 4).Value = "ALOD"
  .Cells(14 + NE + NV, 5).Value = "NPIV"
End With
For I = 1 To 3
  With Worksheets(3)
    .Cells(14 + NE + NV + I, 1).Value = DERT(I)
    .Cells(14 + NE + NV + I, 2).Value = PIVR(I)
    .Cells(14 + NE + NV + I, 3).Value = PMIN(I)
    .Cells(14 + NE + NV + I, 4).Value = ALOD(I)
    .Cells(14 + NE + NV + I, 5).Value = NPIV(I)
  End With
Next I
End If
End Sub

Sub SCAL(IAUTO, IARC, NEG, FACI, FACT, FACTOL, DL, DLDES, PT, PTOL, _
  DT, ISWCH, CSTIF, CSTIFS, NV, IWR, DLDMX, DLDMN, _
  IBRAC, IPAST, ICRT, NPIV, ALOD, IBRSW, INBR, DERT, PIVR, _
  PMIN, QFI, DLDESO, NDIM, CSTIFO, NEG, ICRTY, ILOAD, _
  IBC, NDOF, K, IROW, INCC)
!*****

```

```

' 1) ACTUALIZA FACTOR DE CARGA TOTAL FACT, MEDIANTE FACTOR INCR. FACI
' 2) OBTIENE LONGITUD INCREMENTAL (PUEDE SER USANDO UN VALOR DESEADO)
' 3) ACTUALIZA DESPLAZAMIENTOS TOTALES EN PT
' 4) RETORNO AL PUNTO SINGULAR SI
'     IBRAC=1 Y IPAST=ICRIT = SE HA PASADO DEL PTO. SING. DESEADO
' 5) IBRSW=1 SI SE REQUIERE UN PREDICTOR ESPECIAL PARA RAMIFICACION
'     CUANDO DT INGRESA CON EL MENOR EIGENMOD0

' ALOD = FACTORES DE CARGA TOTAL; 3:ACTUAL; 2-ULTIMO; 1-PENULTIMO
' NPIV = No DE PIVOTES NEGATIVOS; 3:ACTUAL; 2-ULTIMO; 1-PENULTIMO
' ITEST= 1:CARGANDO; -1:DESCARGANDO; FLAG PARA CAPTURA + LONG.DE ARCO
' INBR = CONTADOR PARA EL No. DE CAPTURAS
' IPAST= No. DE PTOS. CRITICOS ENCONTRADOS
' ICRIT= EL No. DEL PTO. CRITICO DONDE SE DESEA LA CAPTURA
'     SI ICRIT>1, IBRAC DEBERIA SER 1 O 2.
' ICRTY= 0 : PUNTO LIMITE; 1 : PUNTO DE BIFURCACION
' ILOAD= 1 : INCR. DE CARGA DECIDIDO POR EL PARAM. DE RIGIDEZ ACTUAL;
'     2 : INCR. DE CARGA DECIDIDO POR EL NUMERO DE PIVOTES NEGATIVOS
' NEGO = EL NUMERO DE PIVOTES NEGATIVOS JUSTO DESPUES DE PASAR EL
'     PUNTO CRITICO DESEADO
' CSTIFO= PARAMETRO DE RIGIDEZ ACTUAL
'     A) EN EL ULTIMO INCR., ANTES DE PASAR EL PTO.CRIT. DESEADO
'     B) JUSTO ANTES DE PASAR EL PTO. CRIT. DESEADO, SI YA SE PASO
'*****
Dim ASIGN As Integer, ITEST As Integer, SCALMSG As Integer
Dim I As Integer

'*** RAMIFICACION, 1ra LONGITUD DE PASO
If (IBRSW <> 0) Then
    FACI = 0
    '*** RAMIFICACION ASIMETRICA
    If (Abs(IBRSW) = 2) Then
        ASIGN = 1
        If (IBRSW < 0) Then ASIGN = -1
        'ARRIBA: CAMBIO DE SIGNO DEL INCREMENTO DE CARGA
        FACI = ASIGN * (DLDES / DL)
    End If
    DL = DLDES
    GoTo STEP100
End If

'*** ENCONTRAR EL TIPO DE PTO. SINGULAR RECIEN ATRAVESADO
If ((NEG <> NPIV(2)) And INBR = 0) Then 'EL PIVOTE MIN. CAMBIO DE SIGNO
    If (CSTIFO * CSTIF < 0) Then 'EL PARAM. DE RIGIDEZ ACTUAL CAMBIO DE SIGNO
        Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "!!! SE HA PASADO UN POSIBLE PUNTO
LIMITE !!!"
        SCALMSG = MsgBox("Incremento Numero : " & INCC & Chr(13) & _
            "Factor de Carga Total FACT : " & FACT & Chr(13) & _
            "!SE HA PASADO UN POSIBLE PUNTO LIMITE!", vbOKOnly _
            + vbExclamation, "*** ENCUESTRO DE PUNTOS SINGULARES
(SCAL) ***")
    End If
    If (CSTIFO * CSTIF > 0) Then 'EL PARAM. DE RIG. ACTUAL NO CAMBIO DE SIGNO
        Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "!!! SE HA PASADO UN POSIBLE PUNTO
DE BIFURCACION !!!"

```

```

    SCALMSG = MsgBox("Incremento Numero : " & INCC & Chr(13) & _
                    "Factor de Carga Total FACT : " & FACT & Chr(13) & _
                    "!SE HA PASADO UN POSIBLE PUNTO DE BIFURCACION!", _
vbOKOnly _
                    + vbExclamation, "**** ENCUESTRO DE PUNTOS SINGULARES
(SCAL) ****")
    End If
    ICRTY = 0
    If (CSTIFO * CSTIF > 0) Then ICRTY = 1
    NEGO = NEG
End If
'*** CHEQUEAR SI SE ALCANZO EL PTO. SING. DESEADO; SI ES ASI INICIAR
CAPTURA
If (IBRAC <> 0 And IPAST = ICRIT) Then
    '*** ENCONTRAR FLAG DE CARGA/DESCARGA PARA CONTROL DE LONG. DE ARCO
    If (IARC <> 0) Then
        ITEST = 1
        If (ICRTY = 0 And CSTIFO < 0) Then ITEST = -1
        If (ICRTY = 1 And CSTIFO > 0 And NEG = NEGO) Then ITEST = -1
        If (ICRTY = 1 And CSTIFO < 0 And NEG <> NEGO) Then ITEST = -1
        If (INBR = 0) Then DLDES = DLDES0
    End If
    '*** ENCONTAR SGUTE. FACTOR DE INCREMENTO PARA RETORNAR A PTO. SINGULAR
    Call BRAC(FACI, FACT, DL, NPIV, ALOD, NEG, IBRAC, DERT, PIVR, _
            PMIN, IARC, DLDES, DLDES0, ITEST)
    INBR = INBR + 1
    SCALMSG = MsgBox("!!! CAPTURA EN PROCESO !!!" & Chr(13) & _
                    "No. de captura INBR : " & INBR, vbOKOnly + vbInformation, _
                    "**** CAPTURA DE PUNTO SINGULAR (SCAL) ****")
    GoTo STEP100
End If
If (IAUTO = 0) Then GoTo STEP100
'*** ABAJO: INCREMENTOS AUTOMATICOS
'*** CHEQUEO PARA CAMBIO HACIA LONG. DE ARCO
If ((ISWCH <> 0) And (IARC = 0) And (CSTIF < CSTIFS)) Then
    IARC = ISWCH
    ISWCH = 0
    If (IARC <> 6) Then
        DLDES = DL
        DLDMX = 5 * DL
        DLDMN = 0.1 * DL
    End If
    'CAMBIO A LONG. DE ARCO, YA QUE CSTIF < CSTIFS
    Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = "* CAMBIO A LONG. DE ARCO, PUES CSTIF
= " & CSTIF & " < CSTIFS = " & CSTIFS
    SCALMSG = MsgBox("Incremento Numero : " & INCC & Chr(13) & _
                    "Cambiando a Control de Long. de Arco," & Chr(13) & _
                    "pues CSTIF = " & CSTIF & " < CSTIFS = " & CSTIFS, vbOKOnly _
                    + vbExclamation, "**** CAMBIO A CONTROL DE LONG. DE ARCO (SCAL)
****")
End If
If (IARC = 0) Then
    '*** ABAJO: CONTROL DE CARGA
    DL = FACI * DL

```

```

ElseIf (IARC <> 0) Then
  '*** CONTROL DE LONG. DE ARCO; PRIMERO SE ESTABLECE UNA LONGITUD
  '   SI NO SE DIO NINGUNA EN LA ENTRADA DE DATOS
  If (DLDES = 0) Then
    DLDES = FACI * DL
    DLDMX = 5 * DLDES
    DLDMN = 0.1 * DLDES
  End If
  '*** CALCULAR FACTOR DE CARGA INCREMENTAL, FACI
  ASIGN = 1
  '*** ANTES DE PASAR EL PTO. CRITICO DESEADO
  If (CSTIF < 0 And ILOAD = 1 Or ILOAD = 2 And NEG <> 0) Then
    ASIGN = -1
  End If
  'CAMBIAR EL SIGNO DEL INCREMENTO DE CARGA !!!
  FACI = ASIGN * (DLDES / DL)
  DL = DLDES
End If
'*** SALVAR ANTIGUA LONG. DE ARCO PARA EL CAMBIO A LONG. DE ARCO
DLDESO = DL

STEP100:

FACTOL = FACT
FACT = FACT + FACI
'Worksheets(2).Cells(SH2 + 10, 1).Activate
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = "FACTOR DE CARGA TOTAL = " & FACT
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 4).Value = "FACTOR DE CARGA INCR. = " & FACI
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 7).Value = "LONGITUD INCR. = " & DL
'*** RAMIF. SIMETRICA CON PREDICTOR DE CARGA CERO
If (IBRSW <> 0 And Abs(IBRSW) <> 2) Then _
  Call VCSC(PT, PTOL, DT, IBC, 1, 1, DL, NV)
  'PT(NV) = 1*PTOL(NV) + DL*DT(NV)
'*** SIN RAMIFICACION O RAMIFICACION ASIMETRICA, PREDICT. CARGA DIF. DE
CERO
If (IBRSW = 0 Or Abs(IBRSW) = 2) Then _
  Call VCSC(PT, PTOL, DT, IBC, 1, 1, FACI, NV)
  'PT(NV) = 1*PTOL(NV) + FACI*DT(NV)
SH2 = SH2 + 2
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "DESPL. TOTALES DESPUES DE LA SOLUCION
TANGENTE:"
SH2 = SH2 + 1
If (NDIM = 2) Then
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + NV / 2 + 2, 1).Activate
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "U mov"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "V mov"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "NODO"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "U mov"
  Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = "V mov"
  For I = 1 To NV / 2 Step 2
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = I
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 2).Value = PT(2 * I - 1)
    Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 3).Value = PT(2 * I)
  
```

```

Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 4).Value = I + 1
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 5).Value = PT(2 * I + 1)
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 6).Value = PT(2 * I + 2)
SH2 = SH2 + 1
Next I
SH2 = SH2 + 2
ElseIf (NDIM = 3) Then
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NODO"
Worksheets(2).Cells(SH2, 2).Value = "U mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "V mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 4).Value = "W mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "NODO"
Worksheets(2).Cells(SH2, 6).Value = "U mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 7).Value = "V mov"
Worksheets(2).Cells(SH2, 8).Value = "W mov"
For I = 1 To NV / 3 Step 2
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = I
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 2).Value = PT(3 * I - 2)
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 3).Value = PT(3 * I - 1)
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 4).Value = PT(3 * I)
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 5).Value = I + 1
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 6).Value = PT(3 * I + 1)
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 7).Value = PT(3 * I + 2)
Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 8).Value = PT(3 * I + 3)
SH2 = SH2 + 1
Next I
SH2 = SH2 + 2
End If
End Sub

Sub SCDR(CBAR, C, ABAR, A, B, VEC, CDBAR, NDIM)
'*****
' 1) CALCULA VECTOR DE 2do ORDEN, VEC, RELATIVO A VECTORES A Y B
' 2) SE REQUIERE EL ESCALAR CBAR, EL VECTOR C, LA MATRIZ ABAR
'*****
Dim ABARA(6) As Double, ABARB(6) As Double
Dim I As Integer, J As Integer
Dim AC As Double, BC As Double, AABB As Double

For I = 1 To (NDIM * 2)
ABARA(I) = 0
ABARB(I) = 0
For J = 1 To (NDIM * 2)
ABARA(I) = ABARA(I) + ABAR(I, J) * A(J)
ABARB(I) = ABARB(I) + ABAR(I, J) * B(J)
Next J
Next I

AC = 0
BC = 0
AABB = 0
For I = 1 To (NDIM * 2)
AC = AC + A(I) * C(I)
BC = BC + B(I) * C(I)

```

```

      AABB = AABB + A(I) * ABARB(I)
Next I

For I = 1 To (NDIM * 2)
  VEC(I) = CBAR * (AABB * C(I) + AC * ABARB(I) + BC * ABARA(I)) _
          + CDBAR * AC * BC * C(I)
Next I

End Sub

Sub SCPD(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRT, IWR, ID, x, y, z, _
        PP, ITYEL, AN, NDIM, NNODE, FACT, FACI, FACTOL, AKTS, D, DT, _
        NDOF, IARC, DLDES, PTOL, QFI, IBC, K, DL)
'*****
'      CALCULO DE PREDICTOR DE SEGUNDO ORDEN
'      PP= dP*[d(Kt)/dP]*dP
'*****
'      GM->PP en la llamada desde AMBAR
Dim B4S(4) As Double, FACI2 As Double, C As Double, C2 As Double, C3 As
Double

FACI2 = -0.5 * FACI * FACI
'*** OBTENER dP*[d(Kt)/dP]*dP INTO PP
Call B13S(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRT, IWR, ID, x, y, z, _
        DT, DT, B4S, ITYEL, AN, NDIM, PP, 1, NNODE, AKTS, NDOF, IBC)
'*** RESOLVER PARA PREDICTOR DE SEGUNDO ORDEN
Call SOLV(AKTS, D, PP, NV, IWRT, IWR, NDOF)
'*** CONTROL DE CARGA
If (IARC = 0) Then
  Call VCSC(PT, PT, PP, IBC, 1, 1, FACI2, NV)
Else
  '*** CONTROL DE LONGITUD DE ARCO
  '*** ACTUALIZAR FACTOR DE CARGA/INCREMENTO Y OBTENER INCR. DE DESPLAZAM.
  If (IARC = 5) Then
    C = PP(K) / DT(K)
  Else
    Call VCPD(PP, DT, IBC, 1, C, NV)
    Call VCPD(DT, DT, IBC, 1, C3, NV)
    C = C / C3
  End If
  C2 = -C * FACI2
  FACI = FACI + C2
  Call VCSC(PT, PT, PP, IBC, 1, 1, FACI2, NV)
  Call VCSC(PT, PT, DT, IBC, 1, 1, C2, NV)
  'FACI = FACI + 0.5 * DFACI
  FACT = FACTOL + FACI
  Call VCSC(PP, PT, PTOL, IBC, 1, 1, -1, NV)
  Call VCPD(PP, PP, IBC, 1, DL, NV)
  DLDES = Sqr(DL)
  If (IARC = 5) Then
    Call MAMN(PP, NV, DLDES, K, 1, 1, 1, IBC)
  End If
End If
DL = DLDES

```

End Sub

```

      Sub SECH(ILS, PRODR, ETA, AMP, ETMXA, ETMNA, IWRT, IWR, ICO, NV, NE)
'*****
' REALIZA LINEA DE BUSQUEDA LOCAL PARA OBTENER LONG.DE PASO EN ETA(ILS+2)

'   AMP   = FACTOR DE AMP. MAX. PARA LONG.DE PASO
'   ETA   = LONGS.DE PASO PREVIAS (ETA(1)=0.,ETA(2)=1)
'   PRODR = RAZON DE PRODUCTO EQUIVALENTE, (PRODR(1)=1)
'   ETMXA/ETMNA = LONGS.DE PASO MAX/MIN PERMITIDAS
'   ICO ENTRA = 1 SI LA LONG.DE PASO MAX/MIN SE USO EN UNA BUSQUEDA
PREVIA
'   SALE   = 1 SI SE USO EN LA PRESENTE BUSQUEDA
'   SALE   = 2 SI TAMBIEN SE USO EN LA PRESENTE BUSQUEDA
'*****

'OBTENER INEG = No DE PREVIAS LONGS. DE PASO CON RAZON NEG. CERCA DEL
ORIGEN
'   ETMAXP = MAX LONG.DE PASO PREVIA
'SI NO HAY PRODUCTOS NEGATIVOS, INEG TERMINA IGUAL A 999
Dim INEG As Integer, ETANEG As Double, ETMAXP As Double, I As Integer
Dim IPOS As Integer, ETAINT As Double, ETAALT As Double, ETMXT As Double
Dim ETAEXT As Double

INEG = 999
ETANEG = 100000
ETMAXP = 0
For I = 1 To (ILS + 1)
  If (ETA(I) > ETMAXP) Then ETMAXP = ETA(I)
  If (PRODR(I) >= 0) Then GoTo STEP10
  If (ETA(I) > ETANEG) Then GoTo STEP10
  ETANEG = ETA(I)
  INEG = I
STEP10:
Next I

'*** PARA INTERPOLACION
If (INEG <> 999) Then
  '*** ENCONTRAR IPOS=No DE PREVIAS LONGS. DE PASO CON RAZON POS. CERCA
  'A INEG (PERO CON LA MENOR LONG.DE PASO)
  IPOS = 1
  For I = 1 To (ILS + 1)
    If (PRODR(I) < 0) Then GoTo STEP20
    If (ETA(I) > ETA(INEG)) Then GoTo STEP20
    If (ETA(I) < ETA(IPOS)) Then GoTo STEP20
    IPOS = I
STEP20:
  Next I

  '***INTERPOLAR PARA OBTENER LONG. DE PASO ETAINT
  ETAINT = PRODR(INEG) * ETA(IPOS) - PRODR(IPOS) * ETA(INEG)
  ETAINT = ETAINT / (PRODR(INEG) - PRODR(IPOS))

```

```

'***OBTENER ETAALT QUE ASEGURE UN CAMBIO RAZONABLE
ETAALT = ETA(IPOS) + 0.2 * (ETA(INEG) - ETA(IPOS))

'***TOMAR MAXIMA LONGITUD DE PASO
If (ETAINT < ETAALT) Then ETAINT = ETAALT

'***TOMAR MINIMA LONGITUD DE PASO
If (ETAINT < ETMNA) Then
  ETAINT = ETMNA
  If (ICO = 1) Then
    ICO = 2
  ElseIf (ICO = 0) Then
    ICO = 1
  End If
End If

ETA(ILS + 2) = ETAINT
'RETORNO
Exit Sub
'***APLICAR EXTRAPOLACION
ElseIf (INEG = 999) Then
'***ESTABLECER LONG. DE PASO TEMPORAL MAXIMA
ETMXT = AMP * ETMAXP
If (ETMXT > ETMXA) Then ETMXT = ETMXA

'***EXTRAP. ENTRE ACTUAL Y PREVIO
ETAEXT = PRODR(ILS + 1) * ETA(ILS) - PRODR(ILS) * ETA(ILS + 1)
ETAEXT = ETAEXT / (PRODR(ILS + 1) - PRODR(ILS))
ETA(ILS + 2) = ETAEXT

'***ACEPTAR SI ES QUE ETAEXT ESTA DENTRO DE LOS LIMITES
If (ETAEXT <= 0 Or ETAEXT > ETMXT) Then ETA(ILS + 2) = ETMXT
If (ETA(ILS + 2) = ETMXA And ICO = 1) Then
  '***DETENER LINEA DE BUSQUEDA
  ICO = 2
  'RETORNO
  Exit Sub
End If
If (ETA(ILS + 2) = ETMXA) Then ICO = 1
End If

End Sub

Sub SOLV(AK, D, Q, N, IWRT, IWR, NDOF)
'*****
'  APLICA SUSTITUCION DE CROUT HACIA ADELANTE Y ATRAS EN Q
'*****
Dim J As Integer, L As Integer, I As Integer, JJ As Integer

'*** SUSTITUCION HACIA ADELANTE
For J = 2 To N
  For L = 1 To (J - 1)
    Q(J) = Q(J) - AK(L, J) * Q(L)
  Next L

```

```

Next J
'*** SUSTITUCION HACIA ATRAS
For I = 1 To N
  Q(I) = Q(I) / D(I)
Next I
For JJ = 2 To N
  J = N + 2 - JJ
  For L = 1 To (J - 1)
    Q(L) = Q(L) - AK(L, J) * Q(J)
  Next L
Next JJ
If (IWRIT <> 0) Then
  'Worksheets(2).Cells(SH2 + N + 1, 1).Activate
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "INCS.EN DESPL. DESPUES DE
SUSTITUCION HACIA ADELANTE Y ATRAS:"
  For I = 1 To N
    Worksheets(2).Cells(SH2 + I, 1).Value = "DT(" & I & ")= " & Q(I)
  Next I
  SH2 = SH2 + N + 1
End If

End Sub

Sub STAB(AKTS, D, IWR, IRE, z1, FI, NV, NN, IWRIT, NITMAX, EPSI, _
  IBC, E, ARO, ALO, ARN, ALN, NE, PT, ID, x, y, z, YY, B4S, _
  ITYEL, AN, DT, QFI, x1, NDIM, IMULTI, SHIF, NDSP, AK15, _
  ID14S, AK14S, NDOF, NNODE)
'*****
' 1) CALCULAR LAS CUATRO CONSTANTES DE ESTABILIDAD B4S(4)
' 2) DEFINIR EL TIPO DE PUNTO SINGULAR
' 3) CALCULAR PREDICTOR PARA BIFURCACION ASIMETRICA
'*****
Dim I As Integer, IFAIL As Integer
Dim TQFI As Double, TZ1 As Double, TQFIZ1 As Double
Dim x2 As Double, X2T As Double, B22 As Double, RLIN As Double
Dim TT(600) As Double, z1v(600) As Double

SMALL = 0.01
x1 = 0
'*** EIGEN SOLUCION CON CAMBIO
If (SHIF <> 0) Then
  Call ASMB(E, ARO, ALO, ARN, ALN, AKTS, NV, NN, NE, AK15, ID14S, _
    AK14S, NDSP, FI, PT, 2, IWRIT, IWR, ID, AN, x, y, z, _
    ITYEL, NDIM, NDOF, NNODE)
  For I = 1 To NV
    AKTS(I, I) = AKTS(I, I) + SHIF
  Next I
  Call BCON(AKTS, IBC, NV, DT, IWRIT, IWR, NDOF, 3)
  Call CROT(AKTS, D, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
End If
'*** OBTENER LOS IMULTI MENORES EIGENMODOS
Call EIGN(AKTS, D, IWR, z1, FI, NV, IWRIT, NITMAX, EPSI, 0, IBC, _
  IMULTI, SHIF, NDOF)

```

```

'*** MULTIPLE BIFURCACION
If (IMULTI > 1) Then
  Call VCCP(DT, YY, 1, NV)
  'RETORNO
  Exit Sub
End If

'*** SIMPLE BIFURCACION, DECIDIR EL TIPO DE PUNTO CRITICO
'>>>> cambio de variable
  For I = 1 To NV
    z1v(I) = z1(I, 1)
  Next I
Call VCPD(QFI, z1v, IBC, 1, B4S(4), NV) 'OBTENER -B4
Call VCPD(QFI, QFI, IBC, 1, TQFI, NV) 'TQFI=QFI(NV)*QFI(NV)
Call VCPD(z1v, z1v, IBC, 1, TZ1, NV) 'TZ1 =z1v(NV)*z1v(NV)
TQFIZ1 = Sqr(TQFI * TZ1)
'*** OBTENER VECTOR YY QUE COMPLEMENTA A Z1
Call VCPD(DT, z1v, IBC, 1, x2, NV) 'x2= x2 + DT(NV)*z1v(NV)
X2T = -x2
Call VCSC(YY, DT, z1v, IBC, 0, 1, X2T, NV) 'YY(NV)= DT(NV) + X2T*z1v(NV)

Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1).Value = "X2 = " & x2
Worksheets(2).Cells(SH2 + 2, 1).Value = "D.O.F."
Worksheets(2).Cells(SH2 + 2, 2).Value = "YY VECTOR"
Worksheets(2).Cells(SH2 + 2, 3).Value = "EIGEN VECTOR(S)"
'Worksheets(2).Cells(SH2 + NV + 3, 1).Activate
For I = 1 To NV
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 2 + I, 1).Value = I
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 2 + I, 2).Value = YY(I)
  Worksheets(2).Cells(SH2 + 2 + I, 3).Value = z1(I, 1)
Next I
SH2 = SH2 + NV + 3
'*** CALCULAR COEFICIENTES B1-B3 IN B4S(1), B4S(2), B4S(3)
Call B13S(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRIT, IWR, ID, x, y, z, _
  z1, YY, B4S, ITYEL, AN, NDIM, TT, 0, NNODE, AKTS, NDOF, IBC)
'Worksheets(2).Cells(SH2 + 8, 1).Activate
Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "B1 = " & B4S(1)
Worksheets(2).Cells(SH2, 3).Value = "B2 = " & B4S(2)
Worksheets(2).Cells(SH2, 5).Value = "B3 = " & B4S(3)
Worksheets(2).Cells(SH2, 7).Value = "B4 = " & B4S(4)
SH2 = SH2 + 1
If (Abs(B4S(4) / TQFIZ1) > SMALL) Then
  'PUNTO LIMITE CON DSBAR = + 0 - -B4S(4)/B4S(1) VECES D2LAMBDA
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = " * * * PUNTO LIMITE * * *"
  SH2 = SH2 + 1
Else
  If (Abs(B4S(1)) < SMALL) Then
    Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = " * * * BIFURCACION SIMETRICA * *
  *"
    SH2 = SH2 + 1
  ElseIf (Abs(B4S(1)) >= SMALL) Then
    '*** BIFURCACION ASIMETRICA
    Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = " * * * BIFURCACION ASIMETRICA * *
  *"

```

```

SH2 = SH2 + 1
B22 = 2 * B4S(2)
Call QSOL(B4S(1), B22, B4S(3), x2, x1, RLIN, IFAIL)
If (IFAIL = 0) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "SOLN. X1 = " & x1 & " , SOLN. X2
= " & x2
End If
If (IFAIL = 1) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "SOLUCION LINEAL PARA X = " &
RLIN
End If
If (IFAIL = 2) Then
  Worksheets(2).Cells(SH2, 1).Value = "NO SE ENCONTRARON RAICES PARA X
!!!"
End If
SH2 = SH2 + 1
End If
End If

End Sub

Sub SWPR(NV, IROW, IBC, z1, DT)
'*****
' 1) ENCONTAR EL No. DE FILA DEL MAYOR COMPONENTE EN Z1
' 2) HACER EL CORRESPONDIENTE D.O.F. = 1 PARA APROXIMAR
' EL PRIMER EIGENVECTOR PARA:
' (a) PREDICTOR DE SEYDEL EN RAMIFICACION
' (b) CALCULO DIRECTO DE PUNTO SINGULAR
'*****
Dim TX As Double, I As Integer

If (IROW = 0) Then Call MAMN(z1, NV, TX, IROW, 1, 1, 1, IBC)
'z1v(NV) ->Minimo TX, posicion IROW

For I = 1 To NV
  DT(I) = 0
Next I
DT(IROW) = 1
IBC(IROW) = -1

End Sub

Sub TRCR(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRT, IWR, ID, x, y, z, _
GM, ITYEL, AN, NDIM, DT, ICORT, NNODE, AKTS, D, NDOF, _
GOO, IARC, K, PTOL, IBC, DL, FACT, QFI, EPSI, GO, _
DELO, NITMAX, AKTSO, REAC, DFACI)
'*****
' ICORT=1:
' CORRECCION DE 3er ORDEN EXPLICITA BASADA EN dP*[d(Kt)/dP]*dP
' =2:
' CORRECCION DE 3er ORDEN IMPLICITA BASADA EN [d(Kt)/dP]*dP

' EN LA ENTRADA AKTS ES LA MATRIZ FACTORIZADA AKTSO
' DELO = ANTIGUO CAMBIO EN DESPLAZAMIENTO ITERATIVO
' GM = CAMBIO EN DESPLAZAMIENTO ITERATIVO

```

```

'          = DPBAR+DFACI*DT CON CONTROL DE LONG. DE ARCO
'      GO   = FUERZA DESBALANCEADA FIJA DURANTE LA ITERACION ACTUAL
'          = FI-FACT*QFI
'      GOO  = SOLO USADA EN LONGITUD DE ARCO ESFERICA
'      REAC = dP*[d(Kt)/dP]*dP SI ICORT=1
'*****
'1) SALVAR DESPL. ITERATIVO DE NEWTON PARA CHEQUEO DE CONVERGENCIA
'2) SUSTRAR CAMBIO EN DESPL. ITERAT. DE NEWTON DEL DESPL. TOTAL
'   PARA USARSE COMO ESTIMACION DE PARTIDA PARA ITERACION DE 2do ORDEN

If (IARC <> 0) Then FACT = FACT - DFACI
'CALL VCPD(GM,GM,IBC,3,TO,NV)
Call VCSC(PT, PT, GM, IBC, 1, 1, -1, NV)

'ITERAR PARA SATISFACER 0=G(X,L)+(DG/DX)DX+(DG/DL)DL+(DDG/DXDX)DX*DX
For II = 1 To NITMAX
'ESQUEMA IMPLICITO GUARDA ANTIGUA MATRIZ DE RIGIDEZ
If (ICORT = 2) Then
  For I = 1 To NV
    Call VCCP(AKTSO(1, I), AKTS(1, I), 1, NV)
  Next I
End If
Call VCCP(GM, DELO, 1, NV)

'OBTENER dP*[d(Kt)/dP]*dP o [d(Kt)/dP]*dP
Call B13S(E, ARO, ALO, ALN, NV, NN, NE, PT, IWRIT, IWR, ID, x, _
          y, z, GM, GM, B4S, ITYEL, AN, NDIM, REAC, ICORT, NNODE, _
          AKTS, NDOF, IBC)

'MODIFICAR VECT. DE F. DESB. O MAT. DE RIGIDEZ DEBIDO A CORRECCION DE 2do
ORDEN
If (ICORT = 1) Then
  Call VCSC(GM, GO, REAC, IBC, 1, -1, -0.5, NV)
ElseIf (ICORT = 2) Then
  Call VCCP(GO, GM, -1, NV)
  Call BCON(AKTS, IBC, NV, GM, IWRIT, IWR, NDOF, 3)
  Call CROT(AKTS, D, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
  If (IARC <> 0) Then Call VCCP(QFI, DT, 1, NV)
End If

'RESOLVER PARA CORRECCIONES
Call SOLV(AKTS, D, GM, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
If (IARC <> 0) Then
  If (ICORT = 2) Then Call SOLV(AKTS, D, DT, NV, IWRIT, IWR, NDOF)
  Call ARCL(IARC, K, IWR, DT, GM, PT, PTOL, IBC, NV, DL, FACT, _
            IFAIL, QFI, GOO, 1, IWRIT, 0, DFACI)

'NO ACTUALIZAR FACT Y PT COMO EN ITERACIONES N-R ESTANDAR C/LONG. DE
ARCO
FACT = FACT - DFACI
Call VCSC(PT, PT, GM, IBC, 1, 1, -1, NV)
End If

'CHEQUEAR CONVERGENCIA, BASADA EN EL CAMBIO EN DESPL. ITERATIVO

```

```

Call VCSC(GM, GM, DELO, IBC, 2, 1, -1, NV)
Call VCPD(GM, GM, IBC, 3, TT, NV)
Call VCSC(GM, GM, DELO, IBC, 2, 1, 1, NV)
If (TT < EPSI) Then
  'ACTUALIZAR DESPLAZAMIENTO SI LA ITERACION HA CONVERGIDO
  If (IARC <> 0) Then FACT = FACT + DFACI
  For I = 1 To NV
    If (IBC(I) = 0) Then
      PT(I) = PT(I) + GM(I)
    Else
      PT(I) = FACT * QFI(I)
    End If
  Next I
  'RETORNO
  Exit Sub
End If

Next II

End Sub

Sub VCCP(A, B, C, N)
'*****
'      COPIAR VECTOR C*A(N) EN B(N)
'*****
Dim I As Integer

For I = 1 To N
  B(I) = C * A(I)
Next I

End Sub

Sub VCNM(A, IIBC, IBC, N, T)
'*****
'      NORMALIZAR VECTOR A(N) A LONGITUD UNITARIA
'      IIBC = 0 : TODO A(N)
'      = 1 : SOLAMENTE A(N) LIBRES
'*****
Dim I As Integer

T = 0
For I = 1 To N
  If (IIBC = 0 Or IBC(I) <> 1) Then T = T + A(I) * A(I)
Next I

T = Sqr(T)
For I = 1 To N
  A(I) = A(I) / T
Next I

End Sub

Sub VCPD(A, B, IBC, IIBC, D, N)

```

```

'*****
' VECTOR A(N) MULTIPLICA AL VECTOR B(N)
'   IIBC = 0 : TODOS LOS N COMPONENTES
'       1 : SOLAMENTE LOS N LIBRES
'       2 ; SOLAMENTE LOS N RESTRINGIDOS A 0
'       3 ; LOS N LIBRES,EXCL. LOS RESTRINGIDOS DIF. DE 0
'*****
Dim I As Integer
D = 0
For I = 1 To N
  If (IIBC = 0) Then
    D = D + A(I) * B(I)
  ElseIf (IIBC = 1) Then
    If (IBC(I) <> 1) Then D = D + A(I) * B(I)
  ElseIf (IIBC = 2) Then
    If (IBC(I) = 1) Then D = D + A(I) * B(I)
  ElseIf (IIBC = 3) Then
    If (IBC(I) = 0) Then D = D + A(I) * B(I)
  Else
    'STOP; IIBC < 0 O IIBC > 3 DE VCPD
    Exit Sub
  End If
Next I

End Sub

Sub VCSC(A, B, C, IBC, IIBC, D, E, N)
'*****
' VECTOR A(N) =D * B(N) + E * C(N)
'   IIBC = 0; TODOS LOS D.O.F.
'       1; SOLAMENTE D.O.F. LIBRES
'       2; D.O.F. LIBRES, EXCL. LOS RESTRINGIDOS DIF. DE 0
'*****
Dim I As Integer

For I = 1 To N
  If ((IIBC = 0) Or (IIBC = 1 And IBC(I) <= 0)
    Or (IIBC = 2 And IBC(I) = 0)) Then A(I) = D * B(I) + E * C(I)
Next I

End Sub

Sub VCZR(A, N)
'*****
' VECTOR NULO EN A(N)
'*****
Dim I As Integer

For I = 1 To N
  A(I) = 0
Next I

End Sub
Function MAX(A, B)

```

```

If A > B Then
    MAX = A
Else
    MAX = B
End If
End Function
Function MAX3(AA, BB, CC)
If AA > BB Then
    If AA > CC Then
        MAX3 = AA
    Else
        MAX3 = CC
    End If
Else
    If BB > CC Then
        MAX3 = BB
    Else
        MAX3 = CC
    End If
End If
End Function
Sub ZNextEmpty(SH2)
'BUSCAR LA SIGUIENTE CELDA VACIA EN LA COLUMNA A
'Y OBTENER EL NUMERO DE SU FILA EN SH2
SH2 = 1
Do 'While Not IsEmpty(Worksheets(2).Cells(SH2, 1))
    If (IsEmpty(Worksheets(2).Cells(SH2 + 1, 1)) And
IsEmpty(Worksheets(2).Cells(SH2 + 2, 1)) And
IsEmpty(Worksheets(2).Cells(SH2 + 3, 1))) Then
        SH2 = SH2 + 2
        Exit Sub
    Else
        SH2 = SH2 + 1
    End If
Loop
End Sub

Sub ZZDEF(NV, NN, NE, NMATE, NANIT, NDIM, IDOUT, FACT, INCC, PT, IRES)
'*****
'    ACTUALIZAR ESTRUCTURA DEFORMADA
'*****
Dim ELND(1000, 2) As Integer, NOD1 As Integer, NOD2 As Integer
Dim I As Integer, IT As Integer, AUX1 As Integer
Dim XCUR(600) As Double, YCUR(600) As Double, ZCUR(600) As Double

SH1 = 11
If (NMATE <> 0) Then
    SH1 = SH1 + NMATE + 1
Else
    SH1 = SH1 + 2
End If
If (NANIT <> 0) Then
    SH1 = SH1 + NANIT + 1

```

```

Else
  SH1 = SH1 + 2
End If
'*** LEER COORD. NODALES ACTUALES DE SHEET(3)
For I = 1 To NN
  'IT ES EL ID DEL NODO
  IT = Worksheets(3).Cells(20 + NV + NE + I, 1).Value
  XCUR(IT) = Worksheets(3).Cells(20 + NV + NE + I, 2).Value
  YCUR(IT) = Worksheets(3).Cells(20 + NV + NE + I, 3).Value
  ZCUR(IT) = Worksheets(3).Cells(20 + NV + NE + I, 4).Value
Next I
'*** OBTENER CONECTIVIDAD DE ELEMENTOS DESDE SHEET(1)
SH1 = SH1 + 1 + NN
For I = 1 To NE
  'IT ES EL ID DEL ELEMENTO
  IT = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 1).Value
  ELND(IT, 1) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 2).Value
  ELND(IT, 2) = Worksheets(1).Cells(SH1 + I, 3).Value
Next I
'*** ESCRIBIR DATOS EN worksheets(4) PARA ESTRUCTURA DEFORMADA
For I = 1 To NE
  With Worksheets(4)
    .Cells(54 + 3 * I - 2, 13).Value = I
    NOD1 = ELND(I, 1)
    NOD2 = ELND(I, 2)
    .Cells(54 + 3 * I - 2, 14).Value = XCUR(NOD1)
    .Cells(54 + 3 * I - 2, 15).Value = YCUR(NOD1)
    .Cells(54 + 3 * I - 2, 16).Value = ZCUR(NOD1)
    .Cells(55 + 3 * I - 2, 14).Value = XCUR(NOD2)
    .Cells(55 + 3 * I - 2, 15).Value = YCUR(NOD2)
    .Cells(55 + 3 * I - 2, 16).Value = ZCUR(NOD2)
  End With
Next I
Worksheets(4).Select
Range("M55:P599").Select
Selection.Copy
Range("G55").Select
Worksheets(4).Paste
Application.CutCopyMode = False
Range("V39").Select

'*** ESCRIBIR DATOS PARA IDOUT(1)

If IRES = 0 Then
  Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 17).Value = FACT
  Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 26).Value = FACT
  AUX1 = IDOUT(1)
  Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 18).Value = PT(AUX1)
  AUX1 = IDOUT(2)
  Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 27).Value = PT(AUX1)

ElseIf IRES = 1 Then
  I = 0
  Do While Not (IsEmpty(Worksheets(4).Cells(55 + I, 17).Value))

```

```

    If (IsEmpty(Worksheets(4).Cells(55 + I + 1, 17).Value)) Then
        Worksheets(4).Cells(55, 19).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
17).Value
        Worksheets(4).Cells(55, 20).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
18).Value
        '-----
----
        Worksheets(4).Cells(55, 28).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
26).Value
        Worksheets(4).Cells(55, 29).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
27).Value
    End If
    I = I + 1
Loop
Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 19).Value = FACT
Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 28).Value = FACT
AUX1 = IDOUT(1)
Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 20).Value = PT(AUX1)
AUX1 = IDOUT(2)
Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 29).Value = PT(AUX1)

ElseIf IRES = 2 Then
    I = 0
    Do While Not (IsEmpty(Worksheets(4).Cells(55 + I, 19).Value))
        If (IsEmpty(Worksheets(4).Cells(55 + I + 1, 19).Value)) Then
            Worksheets(4).Cells(55, 21).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
19).Value
            Worksheets(4).Cells(55, 22).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
20).Value
            '-----
----
            Worksheets(4).Cells(55, 30).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
28).Value
            Worksheets(4).Cells(55, 31).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
29).Value
        End If
        I = I + 1
    Loop
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 21).Value = FACT
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 30).Value = FACT
    AUX1 = IDOUT(1)
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 22).Value = PT(AUX1)
    AUX1 = IDOUT(2)
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 31).Value = PT(AUX1)

ElseIf IRES = 3 Then
    I = 0
    Do While Not (IsEmpty(Worksheets(4).Cells(55 + I, 21).Value))
        If (IsEmpty(Worksheets(4).Cells(55 + I + 1, 21).Value)) Then
            Worksheets(4).Cells(55, 23).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
21).Value
            Worksheets(4).Cells(55, 24).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,
22).Value

```

```
'-----  
-----  
    Worksheets(4).Cells(55, 32).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,  
30).Value  
    Worksheets(4).Cells(55, 33).Value = Worksheets(4).Cells(55 + I,  
31).Value  
    End If  
    I = I + 1  
    Loop  
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 23).Value = FACT  
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 32).Value = FACT  
    AUX1 = IDOUT(1)  
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 24).Value = PT(AUX1)  
    AUX1 = IDOUT(2)  
    Worksheets(4).Cells(55 + INCC, 33).Value = PT(AUX1)  
  
End If  
  
End Sub  
  
Sub BYINCR()  
BYINC = 1  
Call A_M_B_A_R_  
End Sub
```