

Determinación Rápida y Efectiva de la Curva de Capacidad Última de una Estructura -“Push-Over-Curve”- Mediante el Uso de EXCEL

Por:

Natalie Theut Jiménez

Tesis sometida como parte de los requisitos para obtener el grado de

MAESTRIA EN CIENCIAS
en
INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2013

Aprobado por:

Dr. Daniel A. Wendichansky Bard, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Dr. Luis E. Suárez, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Dr. José Guevara, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Profa. Awilda Valle
Representante de Estudios Graduados

Fecha

Ismael Pagán Trinidad, MSCE
Director de Departamento de Ingeniería
Civil y Agrimensura

Fecha

ABSTRACT

At present, most seismic structural designs are based on the elastic behavior of the structure. However, over the years studies have shown that the inelastic behavior of structures plays an important role in the design. Although plastification have been taken into account in design stages, the elastic stiffness is commonly used. Such analysis must take into account that the elastic stiffness commonly used to characterize the response of the structure will be significantly reduced once the structure yields. The plastic design considers the degradation of stiffness and ductility of the structural elements allowing these to be loaded without failure once they reach the maximum bending moment. This way the structure can be designed in a more economical manner. The advent of computers has allowed linear elastic analysis using programs that are commercially available. However, plastic analysis programs are not widely available. Also, some of the few existing applications for these purposes do not consider the softening of the elements. The main purpose of this research is to introduce a simple and general method to perform, nonlinear, plastic analysis that considers rigidities degradation in elements using accessible and modern computational tools.

This study presents the development of a simple application developed in EXCEL, called "SEPA" Static Elastic Plastic Analysis, to facilitate the approximation of inelastic analysis. This research discusses the applicability and validity of the mathematical model proposed by Darvall (1984), in which not typical coefficients are identified for generating stiffness matrix in the plastic area. Also, SEPA has the ability to evaluate both structures rigidities, positive and negative. This is highly advantageous because currently there are no simple programs to consider this aspect. Models like this have already been implanted in

more commercial programs such as SAP2000. It is shown that the application developed in this study does not yield significant differences compared with the results obtained using SAP2000.

Through this work, it is shown that it is possible to implement a highly complex mathematical model proposed in the 80's using simple and modern tools from present time to facilitate preliminary inelastic structural analysis approach.

RESUMEN

Al presente, la mayoría de los diseños sísmicos estructurales se fundamentan en el comportamiento elástico de las estructuras. Sin embargo, a través de los años se ha demostrado que el comportamiento inelástico de las estructuras desempeña un papel importante en el diseño. Aunque la plastificación se ha tomado en cuenta en etapas de diseño, la rigidez elástica es comúnmente usada. Estos análisis deben tomar en cuenta que para caracterizar la respuesta de la estructura la rigidez será significativamente menor una vez la estructura cede. El diseño plástico considera la degradación de rigidez y la ductilidad de los elementos estructurales permitiendo así que estos estén cargados sin que fallen una vez alcanzan la capacidad máxima del momento flector. De esta manera se puede diseñar de una manera más económica. El advenimiento de las computadoras ha permitido realizar análisis lineal elástico usando programas que se encuentran comercialmente disponibles. No obstante, los programas para el análisis plástico no están tan accesibles. Así también, algunas de las pocas aplicaciones existentes para estos propósitos no consideran el ablandamiento de los elementos. El propósito principal de este trabajo es introducir un método general y sencillo para llevar a cabo el análisis plástico, no lineal, que considere la degradación de rigideces en los elementos haciendo uso de herramientas computacionales modernas y accesibles.

Este estudio presenta el desarrollo de una aplicación sencilla desarrollada en EXCEL, denominada como "SEPA", "Static Elastic Plastic Analysis", para facilitar la aproximación de un análisis inelástico. Este trabajo expone la aplicabilidad y validez del modelo matemático propuesto por Darvall (1984), en el cual se han identificado coeficientes no típicos para generar la matriz de rigidez en el área plástica. Así también, el Sistema SEPA

tiene la capacidad de evaluar estructuras, tanto con rigideces positivas así como con rigideces negativas. Esto resulta altamente ventajoso debido a que actualmente no existen programas sencillos que consideren este aspecto. Modelos similares a este ya han sido implantados en programas comerciales como SAP2000. Se demostró que la aplicación objeto de esta investigación no arroja diferencias significativas en comparación con los resultados obtenidos usando SAP2000.

A través de este trabajo, se demuestra que es posible implantar un modelo matemático altamente complejo propuesto en la década del 80 utilizando herramientas sencillas del presente para facilitar la aproximación preliminar de un análisis estructural inelástico.

© Natalie Theut Jiménez - 2013

DEDICATORIA

Quiero dedicar el esfuerzo de este proyecto a mi madre y mi padre ya que sin ellos y sin su entusiasmo no lo hubiese logrado. Ellos son mi fuente de inspiración para conseguir el éxito, para mejorar cada día y dar lo mejor de mí en todos los aspectos de mi vida.

RECONOCIMIENTO

Durante el desarrollo de mis estudios graduados varias personas colaboraron directa e indirectamente en mi investigación. Sin el apoyo de ellos hubiese sido imposible para mí terminar el trabajo. Por esta razón deseo dedicar esta sección para reconocer todo el apoyo que ellos me brindaron.

Deseo expresar mi sincero reconocimiento a mi madre y a mi padre, quienes estuvieron todos estos meses a su entera disposición para aclararme numerosas dudas y para brindarme su apoyo incondicional y su motivación.

Así también, deseo dar gracias especialmente a mi mentor Dr. Daniel Wendichansky por darme la oportunidad de trabajar bajo su orientación y supervisión, por ayudarme a completar este trabajo de tesis, por su entera disponibilidad y por mostrar plena confianza en mí. Siempre recibí motivación y apoyo de su parte durante mis estudios. También deseo agradecer a mi comité graduado: Dr. Luis E. Suárez y Dr. José Guevara, quienes estuvieron siempre en la disposición de aclarar cualquier duda que se me presentara.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	6
CAPÍTULO 2.....	8
2 REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 INVESTIGACIONES PREVIAS	8
CAPÍTULO 3.....	15
3 METODOLOGÍA.....	15
3.1 INTRODUCCIÓN	15
3.1.1 MARCO TEÓRICO	17
3.1.1.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS FUNDAMENTALES	17
3.1.1.2 MODELO DE DARVALL	20
3.1.1.3 APLICACIÓN DEL MODELO DE DARVALL	29
3.1.2 ALGORITMO	36
3.1.2.1 ETAPAS DE DESARROLLO.....	36
3.1.2.1.1 ALGORITMO GENERAL.....	38
3.1.2.1.2 ALGORITMO DETALLADO	44
3.1.3 INFORMACIÓN RELEVANTE AL USUARIO.....	66
3.1.3.1 INTERFAZ CON EL USUARIO	66
3.1.3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA SEPA	70
CAPÍTULO 4.....	78
4 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	78
4.1 CICLOS HISTERÉTICOS.....	78

4.2	LIMITACIONES	80
4.2.1	APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE PÓRTICO	82
4.3	VALIDACIONES	84
4.3.1	APLICACIÓN A UN ELEMENTO EN VOLADIZO	85
4.3.1.1	CÁLCULO MANUAL	85
4.3.1.2	RESULTADOS EN EL SISTEMA SEPA.....	91
4.3.1.3	RESULTADOS EN EL PROGRAMA SAP2000.....	92
4.3.2	APLICACIÓN A UN PÓRTICO	93
4.3.2.1	RESULTADOS EN EL SISTEMA SEPA.....	93
4.3.2.2	RESULTADOS EN EL PROGRAMA SAP2000.....	94
4.3.3	APLICACIÓN A UN PÓRTICO DE UN PISO Y DOS TRAMOS	95
4.3.3.1	RESULTADOS EN EL SISTEMA SEPA.....	95
4.3.3.2	RESULTADOS EN EL PROGRAMA SAP2000.....	97
4.3.4	APLICACIÓN A UN PÓRTICO DE DOS PISOS Y UN TRAMO	98
4.3.4.1	RESULTADO EN SEPA.....	98
4.3.4.2	RESULTADO EN SAP2000	99
4.3.5	VALIDACIONES ADICIONALES	101
4.4	CAPACIDADES ADICIONALES DEL PROGRAMA SEPA.....	105
4.4.1	APLICACIÓN DE CARGAS INICIALES	105
4.4.2	APLICACIÓN DE PENDIENTE NEGATIVA	108
CAPÍTULO 5.....		110
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
5.1	CONCLUSIONES	110
5.2	RECOMENDACIONES	112
REFERENCIAS		113
APÉNDICE A.	CÓDIGO DEL SISTEMA SEPA.....	115

LISTA DE TABLAS

Tablas	Página
Tabla 1: Descripción de Variables que definen la estructura a ser evaluada por el Sistema SEPA.....	69
Tabla 2: Descripción de Variables utilizadas como parámetros para el análisis de "Push-Over"	70
Tabla 3: Propiedades de los Elementos.	84
Tabla 4: Propiedades de las Articulaciones Plásticas.	85

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
Figura 1: Estructura Sujeta a un Análisis de "Push-Over"	2
Figura 2: Ilustración de la Fuerza de Reserva.....	4
Figura 3: Comparación del Diseño Plástico y el Diseño Elástico	5
Figura 4: Diagrama que Ilustra la Metodología Utilizada para el Desarrollo de esta Investigación	16
Figura 5: Curva de Carga-Deflexión.....	18
Figura 6: Típica Curva de Momento-Curvatura de un elemento de Concreto Reforzado (Sanjatan y Darvall, 1995)	21
Figura 7: Modelos de Articulaciones Plásticas en un Elemento.....	22
Figura 8: Modelo del Ciclo de Histéresis (Sanjatan y Darvall, 1995)	23
Figura 9: Elemento con Largos de Articulaciones Plásticas Definidos.....	23
Figura 10: Aproximación de las Curvas Momento-Curvatura: (a) Elástico-Ablandamiento ("Elastic-Softening"); (b) Elástico-Plástico-Ablandamiento ("Elastic-Plastic-Softening")	24
Figura 11: Presunción de Gráficas de Momento-Curvatura: (a) Pendiente de Endurecimiento ("Hardening"); (b) Pendiente de Ablandamiento ("Softening")	25
Figura 12: Base para la Determinación de los Coeficientes de Rigidez en el Caso de Ablandamiento en Ambos Extremos (Darvall, 1984).....	26
Figura 13: (a) Viga en Voladizo, (b) Distribución del Momento Flector, (c) Distribución de Curvatura (Park y Paulay, 1975).....	28
Figura 14: (a) Respuesta Máxima de Curvatura, (b) Deflecciones.....	29
Figura 15: Modelo Matemático Usado para Crear la Matriz de Rigidez Local.....	29

Figura 16: Modelo Matemático correspondiente a la Matriz de Rigidez Local Elástica por Elemento.	30
Figura 17: Modelo Matemático según Darvall para crear las Matrices 2x2.....	32
Figura 18: Modelo Matemático de la $[Matriz(i,j)]^{-1}$ a ser Multiplicada por el Recíproco del Determinante de la Matriz (i,j).....	34
Figura 19: Modelo Matemático según Darvall correspondiente a los Vectores (i) con dimensión igual a 2x1	34
Figura 20: Diagrama de Flujo General que Describe el Algoritmo que se Utilizó para Desarrollar el Sistema SEPA ("Static Elastic Plastic Analysis").....	39
Figura 21: Diagrama de Flujo para la Construcción de la Matriz Direccional y la Matriz de Rigidez Global por Elemento.....	46
Figura 22: Diagrama de Flujo para la Construcción de la Matriz de Rigidez Global de la Estructura	48
Figura 23: Diagrama de Flujo para la Creación del Vector Global de Fuerzas Inicial.....	50
Figura 24: Diagrama de Flujo para la Aplicación del Incremento en Desplazamientos o Fuerzas según la Distribución Porcentual entrada por el usuario	52
Figura 25: Nodos identificados para aplicación de Incremento en Desplazamientos o en Fuerzas.	53
Figura 26: Diagrama de Flujo para la creación del Vector Global de Desplazamientos Inicial de la Estructura	55
Figura 27: Diagrama de Flujo para Cálculo de la Estructura Mediante el Método de Partición al Aplicar Control por Desplazamientos.....	59
Figura 28: Diagrama de Flujo para Cálculo de la Estructura al Aplicar el Control de Fuerzas	60
Figura 29: Diagrama de Flujo para el Cálculo de las Fuerzas por Elemento	63
Figura 30: Diagrama de Flujo que Ilustra el Proceso del Cálculo de Fuerzas y Desplazamientos Acumulados	65
Figura 31: Ejemplo de un Pórtico y su Nomenclatura.....	67

Figura 32: Pantalla para controlar el análisis a realizarse por Desplazamientos o por Fuerzas	67
Figura 33: Pantalla para Entrar los Datos que Describen la Estructura a ser Evaluada por el Sistema SEPA	68
Figura 34: Pantalla para Entrar los Parámetros a ser Utilizados para el Análisis de “Push-Over”	68
Figura 35: Ejemplo de la Hoja de Trabajo "Datos de la Estructura" (“Structure Data”).....	73
Figura 36: Hoja de Trabajo "Datos de Momento Curvatura" ("Moment Curvature Data"). ..	75
Figura 37: Ejemplo de la Hoja de Trabajo “Resutados” ("Results").	75
Figura 38: Fragmento de la Hoja de Trabajo "Detalle del Análisis"	76
Figura 39: Fragmento de la Hoja de Trabajo "Detalle del Análisis por Elemento" (“Member Analysis Detail”).....	77
Figura 40: Ciclo Histerético de una Columna (Mellek y Wallace, 2004)	79
Figura 41: Envolvente del Ciclo Histerético de una Estructura.....	80
Figura 42: Dependencia de la Dirección de la Rigidez (Darvall, 1992).....	81
Figura 43: Ablandamiento en la Base de una Columna de un Pórtico, (a) Tabla de Valores para Ambas Gráficas; (b) Resultados Según Darvall, 1985 (Darvall, 1985); (c) Resultados según SEPA	83
Figura 44: Diagrama de Elemento en Voladizo y su Distribución de Carga.....	85
Figura 45: Diagrama de Incremento en Momento y Curvatura del Elemento en Voladizo ...	86
Figura 46: Resultados Obtenidos a través del Sistema SEPA para un Elemento en Voladizo	91
Figura 47: Resultados Obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Elemento en Voladizo...	92
Figura 48: Diagrama de Pórtico y su Distribución de Carga	93
Figura 49: Resultados del Sistema SEPA para un Pórtico.....	94
Figura 50: Resultados Obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico	95

Figura 51: Diagrama de Pórtico de un Piso y dos Tramos y su Distribución de Carga.....	96
Figura 52: Resultados del Sistema SEPA para un Pórtico de un Piso y dos Tramos	96
Figura 53: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de un Piso y dos Tramos	97
Figura 54: Diagrama de Pórtico de dos Pisos y un Tramo y su Distribución de Carga.....	98
Figura 55: Resultados Obtenidos a través del Sistema SEPA para un Pórtico de dos Pisos y un Tramo	99
Figura 56: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de dos Pisos y un Tramo	100
Figura 57: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de dos Pisos y un Tramo con el 100% de la carga en el Piso 2 y el 66.6% de la carga en el Piso 1	101
Figura 58: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de tres Pisos y un Tramo con el 100% de la Carga en todos los Pisos	102
Figura 59: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de tres Pisos y un Tramo con diferentes Distribuciones de Cargas en cada Piso	103
Figura 60: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de dos Pisos y dos Tramos	104
Figura 61: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de tres Pisos y dos Tramos	105
Figura 62: Diagrama de pórtico de dos Pisos y un Tramo y su Aplicación de Cargas.....	107
Figura 63: Gráfica de “Push-Over”, Según Aumenta el Momento Aplicado en los Nodos. 107	
Figura 64: Diagrama de Pórtico de dos Pisos y un Tramo y su Distribución de Desplazamiento	109
Figura 65: Gráfica de “Push-Over”, Según se Pronuncia la Pendiente “a”	109

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la doctrina del diseño sísmico establece el marco conceptual de comportamiento de una estructura. Al presente, un buen diseño estructural guiado por esta doctrina admite que para sismos de alta intensidad (mayor de siete en la escala Richter), cuya probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la estructura es mínima, se acepten daños severos sin llegar al colapso de la estructura, excepto para estructuras de gran importancia tales como hospitales y plantas nucleares, entre otras. Por lo tanto, uno de los parámetros claves del diseño sísmico es el nivel de daño que pueda sufrir la estructura. Se ha establecido que para sismos de baja intensidad (menos de cinco en la escala Richter) la estructura debe comportarse dentro del rango elástico y para movimientos moderados o más fuertes se admiten comportamientos dentro del rango inelástico o plástico.

Se sabe que los elementos dúctiles tienen la capacidad de disipar energía sin llegar a la rotura o al colapso. Por consiguiente, otro parámetro clave en el diseño sismo-resistente es la predicción y control de disipación de energía mediante un ciclo de histéresis. Esto pretende establecer cuáles son los elementos que disipan energía para luego diseñar conforme a ello. El concreto reforzado está usualmente diseñado para proveer ductilidad bajo cargas de momentos flectores. La capacidad de rotación o ductilidad es necesaria para permitir la redistribución de momentos de flexión en estructuras estáticamente indeterminadas. Estos hechos demuestran que la ductilidad está altamente conectada con la difusión del análisis plástico en el diseño de estructuras de concreto reforzado.

En regiones de alta sismicidad el análisis de “Push-Over” debe formar parte del proceso de diseño estructural. Este análisis se basa en someter la estructura a cargas laterales hasta el colapso de la misma. En la Figura 1(a) se muestra un ejemplo de una estructura sujeta a un análisis de “Push-Over”. La estructura se mantiene esencialmente

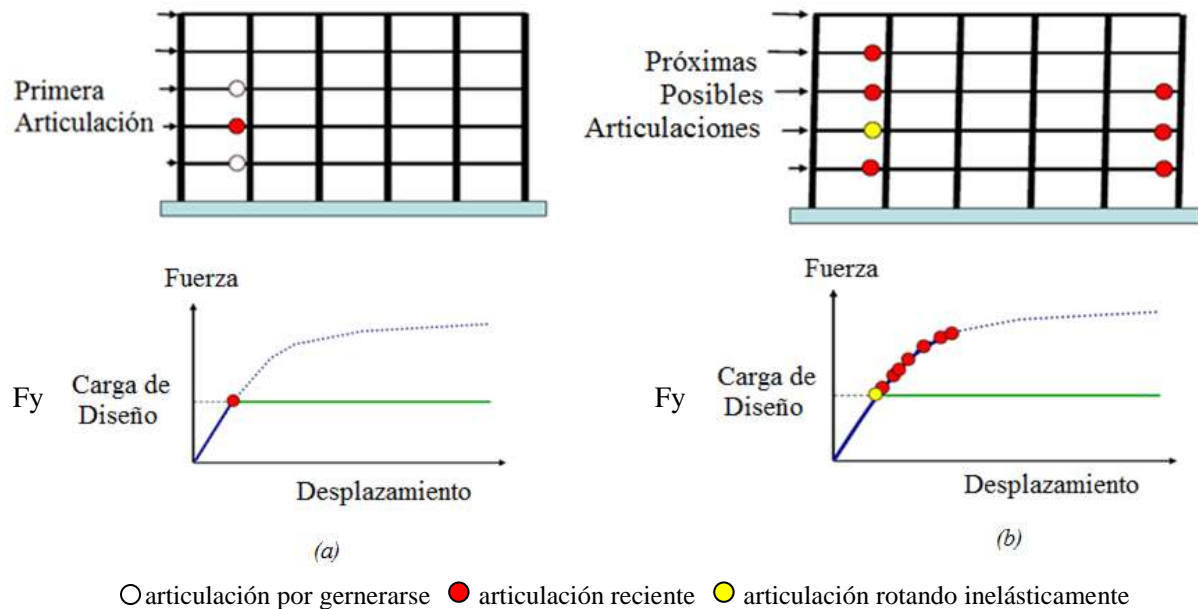


Figura 1: Estructura Sujeta a un Análisis de "Push-Over"

elástica hasta que la primera articulación plástica se da lugar. La formación de ésta ocurre al mismo nivel de la carga de diseño del sistema como se muestra en la gráfica de la Figura 1(a). Si la región de esta articulación tiene una ductilidad adecuada, puede sostener aumentos de rotaciones plásticas sin pérdida de resistencia. Al mismo tiempo, como se muestra en la Figura 1(b), las próximas posibles articulaciones de la misma permitirán cargas adicionales hasta que las mismas comiencen a ceder. De esta manera, según se incrementan las cargas laterales a la estructura, más articulaciones plásticas comenzarán a formarse. Simultáneamente, la primera articulación que se generó, continúa rotando inelásticamente,

pero sin haber alcanzado su capacidad rotacional. Una vez algunas de estas articulaciones alcancen su capacidad máxima de rotación, la estructura se comportará de manera inestable y consecutivamente colapsará. Es por ello que es necesario tomar en cuenta un análisis de “Push-Over” al momento de diseñar.

Al presente, la mayoría de los diseños sísmicos se llevan a cabo usando requerimientos que permiten la reducción de fuerzas sísmicas calculadas basadas en el comportamiento elástico. Esto es debido a que la mayoría de los materiales pasan por el estado elástico antes de alcanzar el estado plástico. Sin embargo, a través de los años se ha demostrado que el comportamiento inelástico de las estructuras desempeña un papel importante en el diseño.

Esto es particularmente relevante para las estructuras de concreto reforzado y de mampostería que se encuentran bajo cargas sísmicas variadas, donde el valor inicial de la matriz de rigidez elástica se torna inválido luego de que el acero de refuerzo cede, o de que el concreto o mampostería pasan por daños y agrietamientos. Las cargas laterales debidas al terremoto, no serán similares luego de que la misma cede, y luego de que la respuesta moderada inelástica se da lugar. La rigidez comúnmente usada en el análisis elástico para caracterizar la respuesta de la estructura será significativamente menor una vez la misma cede. Esto es, a menor rigidez menor carga lateral por terremoto.

El método de diseño plástico hace uso de la fuerza de reserva (Ω) que existe más allá del estado elástico de la estructura. La fuerza de reserva (Ω) de la estructura que se muestra en la Figura 2, permite que los elementos estructurales estén cargados sin que los mismos fallen cuando estos alcanzan la capacidad máxima del momento flector, es utilizada a través del estado elasto-plástico cuando la carga va en aumento.

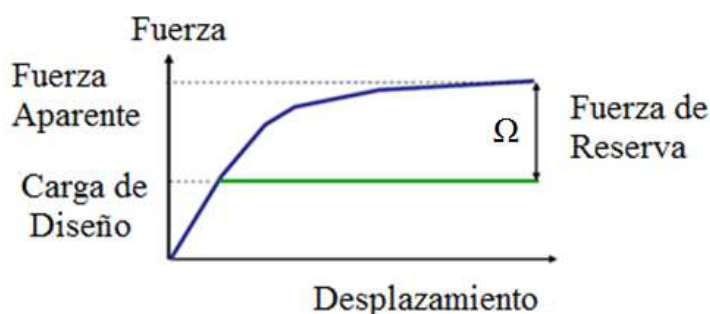


Figura 2: Ilustración de la Fuerza de Reserva

En la Figura 3 se observa que si los diseños, tanto elásticos así como plásticos, satisfacen la misma carga de diseño, el método de diseño plástico requiere una estructura más liviana con elementos más pequeños ya que hace uso de la fuerza de reserva de la estructura. Esta figura también muestra, la fuerza y el desplazamiento que se alcanzaría si la estructura responde elásticamente. Por otra parte, la línea de diseño plástico muestra la respuesta actual de la fuerza y el desplazamiento y la línea restante pauta la fuerza para la cual se diseña. Se observa claramente que se descansa en la ductilidad del sistema para prevenir el colapso.

Se ha expuesto que el análisis plástico cobra una importancia fundamental en la predicción del comportamiento de la estructura al momento en que ésta se someta a un movimiento sísmico. Además, debido a que el método de diseño plástico hace uso de la fuerza de reserva que existe más allá del estado elástico de la estructura, se obtiene un diseño más costo efectivo debido a la economía de materiales que se pudiera lograr. Es por estas razones que se hace necesario desarrollar herramientas eficientes que faciliten el análisis plástico estructural.

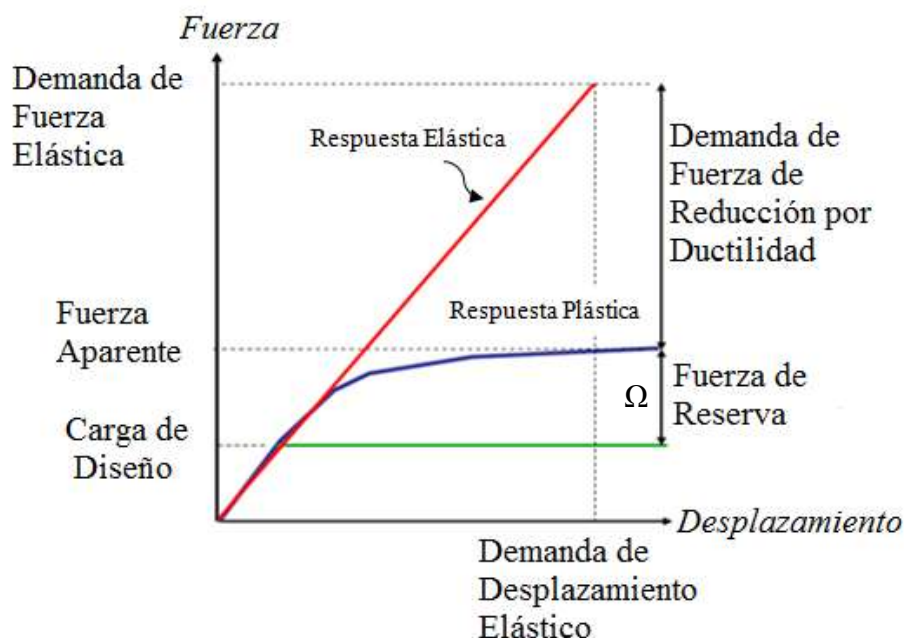


Figura 3: Comparación del Diseño Plástico y el Diseño Elástico

Uno de los elementos principales a considerar en el análisis plástico es la reducción en la capacidad del momento plástico. Entre los factores que contribuyen a esta reducción están las fuerzas axiales, fuerzas cortantes y la torsión. Debido a que el efecto de las fuerzas cortantes es usualmente pequeño (Wong, 2009), la tendencia ha sido a ignorar el mismo.

El advenimiento de las computadoras ha permitido llevar a cabo análisis elásticos usando programas de computadoras que se encuentran comercialmente disponibles. Sin embargo, los programas para el análisis plástico no están tan accesibles como los programas para análisis lineal elástico. Esto quizás se deba a la percepción de algunos ingenieros, que sugieren que el análisis plástico es más complejo y es usado solo para cierto tipo de estructuras complejas. Esta percepción desalienta a los desarrolladores de programas de computadoras a producir programas para el análisis plástico por sus aplicaciones limitadas.

Así también, algunas de las pocas aplicaciones existentes para estos propósitos no consideran el ablandamiento de los elementos.

Los dos métodos principales de análisis estructural, el método de flexibilidad o fuerza y el método de rigidez o desplazamiento están mayormente fundamentados en la creación de matrices. El uso de matrices es conveniente para la implantación de programas de computadoras ya que las mismas son capaces de manejar una enorme cantidad de datos numéricos y cálculos. En los años recientes los métodos matemáticos de programación se han convertido en un área importante de investigación para la ingeniería en el área de plasticidad.

El propósito de este trabajo es introducir un método general y sencillo para el análisis plástico, no lineal, que considere rigideces plásticas tanto positivas como negativas en los elementos haciendo uso de las herramientas computacionales modernas. Actualmente las computadoras poseen una gran capacidad de almacenamiento y de procesamiento de datos numéricos que hacen posible que los diseños y análisis estructurales se lleven a cabo para estructuras de cualquier tamaño.

1.2 OBJETIVOS

- Proveer una herramienta sencilla cuya funcionalidad sea poder realizar el análisis plástico de pórticos haciendo uso de la aplicación EXCEL. Dicha herramienta permitirá a los ingenieros obtener una aproximación cercana al análisis estructural no lineal de una manera económica, rápida y accesible con miras a ejecutarse a través de dispositivos, tales como teléfonos inteligentes ("Smart Phones"), tabletas ("Tablets") y computadoras portables.

- Considerar degradaciones de rigideces dentro del análisis plástico y a su vez considerar el análisis de distintas distribuciones de fuerzas o desplazamientos de la estructura.
- Utilizar herramientas tecnológicamente modernas y de actualidad para implantar las matrices de rigidez propuestas por Darvall (1984,1985) durante la década de los 80.
- Demostrar la validez de las matrices de rigidez, no típicas, propuestas por Darvall (1984,1985).
- Identificar la magnitud de las cargas y desplazamientos que causan que los elementos de la estructura entren en el rango plástico hasta que finalmente colapsen.
- Describir el orden en que las juntas de los elementos plastificarán ante incrementos de fuerza o desplazamientos laterales aplicados a la estructura.
- Generar una gráfica de “Push-Over” que considere la degradación de rigidez de la estructura a fin de poder determinar el punto de falla de la misma con mayor exactitud.

CAPÍTULO 2

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 INVESTIGACIONES PREVIAS

La importancia del análisis plástico para el diseño de estructuras sismo-resistentes se debe a tres factores, entre muchos otros. Primero, para movimientos moderados o fuertes, cinco o más en la escala Richter, se considera que los elementos se comportan dentro del rango inelástico o plástico. Segundo, la ductilidad está altamente conectada con la difusión del análisis plástico en el diseño de estructuras de concreto reforzado. Por último, pero no menos importante, el diseño plástico hace uso de la fuerza de reserva que existe más allá del estado elástico de la estructura, lo cual permite incorporar elementos más livianos a la misma, y consecuentemente se logra un diseño estructural más económico (Wong, 2009).

La relación entre el análisis plástico y la capacidad rotacional o ductilidad se ha venido estudiando desde la década de los sesenta. Según Corrado, Paggi y Carpinteri (2010), la primera contribución al estudio de capacidad rotacional vino de programas experimentales coordinados por el “Indeterminate Structures Commission” del “Comité Européen du Béton” en los principios de la década del 1960. Más de 350 pruebas se hicieron en diferentes laboratorios y países. Una evaluación estadística de los resultados, propuesta por Siviero en 1976, dio base a una relación hiperbólica considerando la rotación plástica. Esta expresión fue asumida por el “Model Code 78” para resolver el problema de la evaluación de rotación plástica para propósitos prácticos.

Una segunda contribución fundamental vino de una investigación llevada a cabo en los principios de la década del 1980 en “University of Stuttgart” (Eligehausen y Langer,

1987). En ese estudio, un modelo analítico fue desarrollado para describir el comportamiento de articulaciones plásticas, considerando que el colapso final pudiera resultar tanto como de la ruptura del acero así como de la rotura del concreto. Los resultados obtenidos dieron pie a la formulación de las prescripciones del “Model Code 90” (Comité Euro-International du Béton, 1993) y el “Eurocode 2” (CEN TC/250, 2004). En esa investigación los efectos de tamaño y escala en la capacidad de rotación de las vigas de concreto reforzado no fueron considerados, a pesar de que la dependencia de las dimensiones de la estructura han sido reconocidas en varias pruebas experimentales, razón por la cual este modelo requiere de evaluaciones subsiguientes.

Los investigadores Shedid, El-Dakhakhni y Drysdale (2010), señalaron que para tener en cuenta los efectos de ductilidad y disipación de energía a través del comportamiento inelástico, la mayoría de los diseños sísmicos se llevan a cabo usando requerimientos prescritos que permiten la reducción en el diseño de fuerzas sísmicas calculadas basadas en el comportamiento elástico. En Estados Unidos, la fuerza elástica calculada es dividida por un factor de reducción de fuerza R (ASCE, 2008), mientras que en el “National Building Code of Canada” (NBCC 2005), la fuerza elástica es dividida por el producto del factor de fuerza de modificación relacionado a la ductilidad R_d , y por el factor de fuerza de modificación relacionado a la sobre resistencia R_o . No obstante, estos autores hacen referencia a Priestley, Calvi y Kowalsky (2007), el cual indica que es una presunción errónea el hecho de que las características elásticas de la estructura son el mejor indicador del rendimiento inelástico. Esta presunción errónea ha hecho que muchos ingenieros no reconozcan la importancia del análisis plástico. La respuesta inelástica ocurre luego de que el acero de refuerzo cede, o de

que el concreto o mampostería se agrietan. Esto hace que el valor inicial de la matriz de rigidez elástica se torne inválido bajo cargas sísmicas variadas.

Los investigadores Attard y Mignolet (2008) señalan que la plastificación se puede desarrollar en una región a lo largo del elemento antes de que la falla local ocurra. Por lo tanto, si la propagación de la plasticidad a lo largo del elemento no es insignificante, el comportamiento total inelástico de la estructura no puede ser exactamente modelado usando modelos de articulaciones plásticas con longitud igual a cero. Con este fin estos investigadores desarrollaron un modelo constitutivo para predecir el comportamiento de esfuerzo-deformación en un material justo en el momento donde empieza a ceder. El modelo es formulado usando funciones de esfuerzos integrados definidas por un parámetro de endurecimiento y un coeficiente de deformación plástica. Estas funciones son usadas para identificar un estado de falla último en el material. Según las deformaciones internas en el elemento estructural que es cargado aumentan, la plastificación aumenta gradualmente a través de la profundidad seccional del elemento a lo largo de su longitud, llevando a una degradación suave en la rigidez del elemento. Luego los desplazamientos laterales inelásticos (Attard y Mignolet, 2008; Bayrack y Sheikh, 2001) son calculados tomando en cuenta la propagación después de la fluencia a lo largo del elemento sobre la curvatura plástica.

El investigador Filippou (1988), realizó un estudio que consideró el análisis no lineal de pórticos de concreto reforzado bajo cargas cíclicas, con el fin de desarrollar mejores métodos analíticos para predecir la respuesta no lineal estática de estos pórticos. Se propone un nuevo enfoque en la descripción del comportamiento histerético no lineal de vigas y columnas. El mismo consiste en controlar dicho comportamiento dividiendo las vigas y

columnas en sub-elementos individuales conectados en serie para formar la viga o la columna en un super-elemento. Se desarrollaron dos modelos matemáticos de sub-elementos particulares, uno que describe el comportamiento inelástico a lo largo de la viga tomando en cuenta la propagación gradual de la deformación inelástica al final de la viga, mientras que el otro toma en cuenta las rotaciones empotradas que surgen en la interface de la viga y de la

Según este investigador la implantación del modelo de sub-elementos requiere del desarrollo de un esquema numérico que tome en cuenta los momentos no balanceados que puedan surgir como resultado de la conexión en serie entre estos. Este esquema presume que la respuesta no lineal de una estructura debido a cargas cíclicas solo puede ser determinada a través de un análisis de incremento paso por paso (“Step-by-Step”). Las predicciones que arrojaron los modelos matemáticos desarrollados en este estudio fueron comparadas con las predicciones que surgen como resultado de un modelo de un solo componente. Así también, se compararon estas predicciones con data experimental de pruebas de fuerza-desplazamientos en vigas y columnas. El estudio concluye que los parámetros del modelo de un solo componente se pueden ajustar para que coincidan razonablemente bien con una respuesta dada, mientras que los parámetros del modelo propuesto están directamente conectados a las propiedades físicas de los elementos estructurales y pueden ser obtenidos a través de métodos razonables y bien establecidos.

En el año 1992, el investigador Filippou (1992), efectuó un estudio en continuación al explicado previamente, (Filippou, 1988), considerando el análisis no lineal estático y dinámico de sub-elementos de concreto reforzado. El propósito del mismo fue desarrollar

modelos avanzados y métodos que pudieran predecir, no tan solo la respuesta no lineal estática, sino también la respuesta dinámica de pórticos de hormigón reforzado.

La capacidad de los modelos propuestos para describir la respuesta dinámica de la estructura fue evaluada comparando los resultados analíticos con evidencia experimental de una estructura de hormigón reforzado de dos pisos y un tramo, a la cual se le aplicó la excitación del suelo. Se estudió el efecto de deslizamiento de la junta en la respuesta dinámica local y global de la estructura. Al igual que en la investigación anterior realizada por este autor, los resultados del modelo propuesto se compararon con los del modelo de un solo componente, ampliamente utilizado, con el fin de evaluar la capacidad de este último modelo para determinar la respuesta local y global de pórticos de hormigón armado.

Por otra parte, el investigador Darvall (1984, 1985), también ha desarrollado un modelo matemático en el cual se han identificado los coeficientes para la matriz de rigidez en el área plástica. Este investigador establece que el ablandamiento (“softening”) de las secciones de concreto reforzado en curvaturas avanzadas en flexión debe ser considerado en el análisis de colapso de pórticos. De esta manera, la matriz de rigidez permite que se puedan realizar estudios para el análisis elástico y plástico que consideren ablandamiento o endurecimiento (“softening” o “hardening”). Según Darvall (1984, 1985), existe un programa de computadoras conocido como PAWS (“Plastic Analysis with Softening”), el cual es una modificación de otro programa llamado ULARC, desarrollado en la Universidad de California en Berkeley. ULARC es un programa eficiente para análisis elasto-plástico, que utiliza el método directo de rigidez. En PAWS se toma en consideración ablandamiento

(“softening”) o endurecimiento (“hardening”), por lo tanto, extiende la aplicabilidad de ULARC a pórticos de concreto reforzado. Los resultados de la ejecución de este programa muestran desplazamientos nodales, fuerzas de los elementos, reacciones en los soportes, rotaciones de articulaciones plásticas, entre otros. No obstante, cuando el programa fue desarrollado no se estaba al nivel de conocimiento y necesidades de hoy día. Además, el mismo resulta obsoleto por no atemperarse a las capacidades tecnológicas del presente.

Al presente existen otros programas de computadoras tales como SAP2000, versión 15, (2011) y ETABS versión 9.6, (2010) los cuales realizan análisis estáticos o dinámicos, lineales o no lineales de amplios sistemas estructurales. Estos programas son muy poderosos en cuanto a distintas consideraciones estructurales. También existe DRAIN-2DX, versión 1.1, (1992) el cual es un programa con propósitos generales de análisis estático y dinámico de estructuras planas. En este programa el análisis no lineal estático se lleva a cabo a través de un método, evento por evento donde cada evento corresponde a un cambio significativo en la rigidez. Además existe PERFORM-3D, versión 4.0, (2006) el cual tiene capacidades para el análisis inelástico. No obstante, el propósito general del mismo, no está orientado hacia el análisis no lineal. Sin embargo, estos programas no consideran ablandamiento de los elementos, a su vez son complicados y conllevan un amplio dominio en el campo de la computación para poder usarlos con estos propósitos. En ocasiones los resultados, si es que se hace la configuración adecuada para poder obtenerlos, pueden no ser interpretados correctamente.

Además de demostrar la importancia del análisis plástico estructural, las investigaciones y publicaciones citadas anteriormente describen algunos modelos útiles para

el desarrollo de dicho análisis. Así también, se establece la necesidad de crear aplicaciones de computadoras sencillas que puedan ser utilizadas para llevar a cabo el análisis plástico de estructuras. Al revisar estas publicaciones se encontró que el modelo de matrices de rigideces de Darvall es adecuado para ser implantado a través de un programa de computadoras ya que el mismo utiliza el método de rigidez en lugar del de flexibilidad, que, según (Sennett, 1994) es mucho más eficiente. Además, este modelo contempla los parámetros deseados para la aplicación a ser desarrollada en esta investigación.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

El contenido de este capítulo se presenta mediante el diagrama ilustrado en la Figura 4. En esta sección se expone ampliamente el marco teórico en el que se fundamenta el desarrollo de la aplicación objeto de esta investigación. En primer lugar se definen brevemente algunos términos fundamentales a los cuales se hace referencia continua durante el desarrollo del resto de la metodología. Luego se detalla la aplicabilidad y pertinencia del Modelo de Darvall para cumplir con los objetivos de esta investigación.

Luego de desglosar brevemente las etapas que se siguieron para completar el desarrollo de la aplicación, esta sección describe, de forma general y detallada, el algoritmo elaborado a fin de completar la programación necesaria para la implantación del Modelo de Darvall en el análisis elasto-plástico de pórticos.

Por último, se ofrecen datos que el usuario debe conocer para poder hacer uso eficiente de la aplicación. Entre la información relevante al usuario se describen los componentes del sistema y se ofrece una breve explicación de cómo usar el mismo.

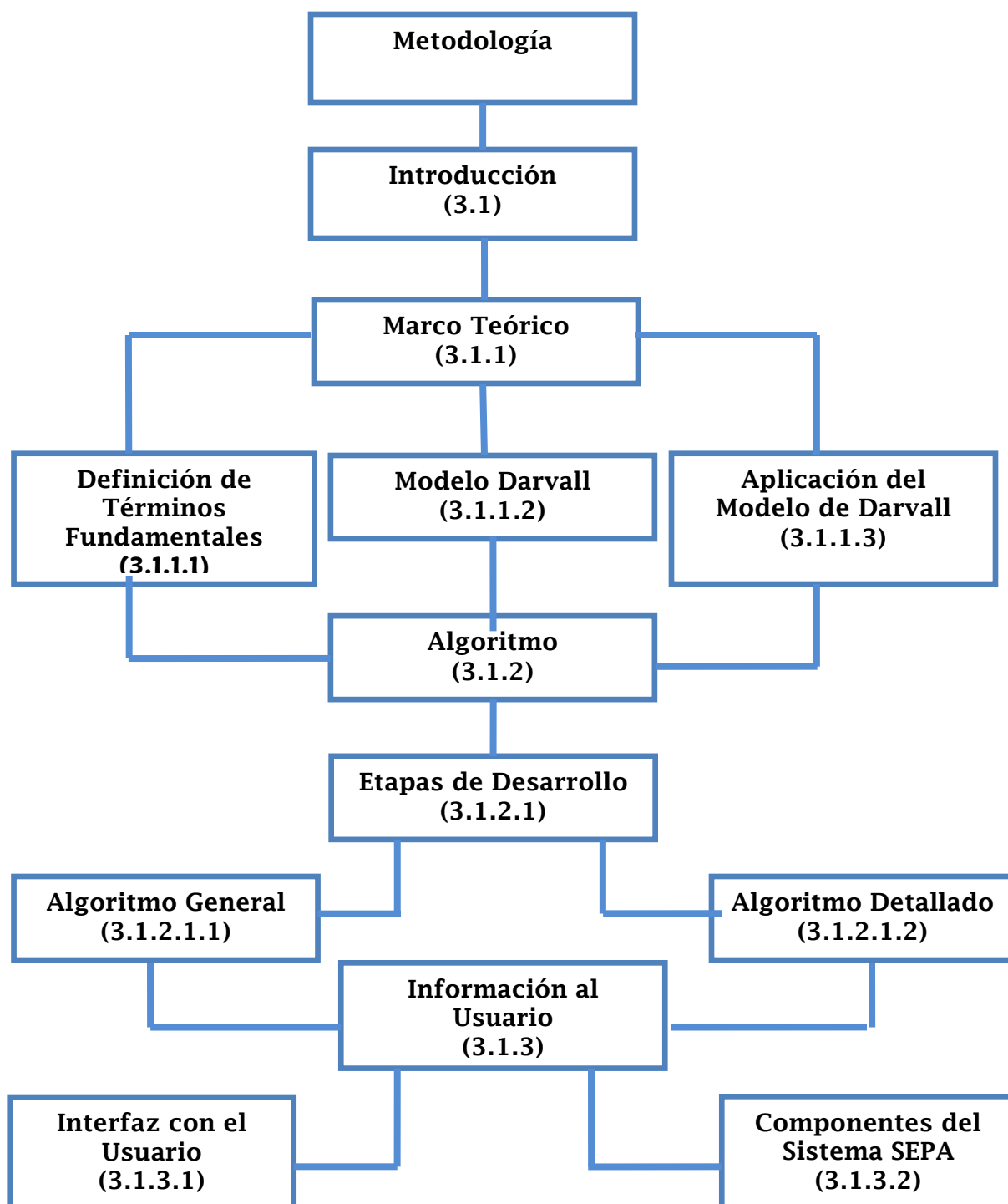


Figura 4: Diagrama que Ilustra la Metodología Utilizada para el Desarrollo de esta Investigación

3.1.1 MARCO TEÓRICO

3.1.1.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS FUNDAMENTALES

A fin de desarrollar la aplicación objeto de esta investigación es necesario poner en perspectiva algunos conocimientos básicos que permitirán crear el algoritmo correspondiente. Entre los conceptos a repasar se mencionan los siguientes: *momento plástico*, *articulación plástica*, *endurecimiento* (“*hardening*”), *ablandamiento* (“*softening*”), *método de flexibilidad* y *método de rigidez*.

El momento plástico es una propiedad física de una sección estructural. El mismo se define como el momento en el cual toda la sección transversal ha alcanzado su límite de fluencia. Esto es teóricamente el momento máximo de flexión que la sección puede resistir. Cuando la sección llega a este punto, una articulación plástica se genera y cualquier carga más allá de este punto resultará teóricamente en una deformación plástica infinita. La capacidad del momento plástico se puede ver reducida debido a fuerzas de interacción. La presencia de fuerzas axiales y cortantes en una sección transversal reduce la capacidad de momento plástico.

El análisis inelástico de las estructuras presume que las mismas alcanzan un límite de fluencia, el cual se manifiesta a través de articulaciones plásticas en las juntas. Según se ha mencionado anteriormente, las articulaciones plásticas permiten la capacidad de rotación o el giro de una parte de un pórtico estático. Cada articulación plástica debe ser capaz de rotar lo suficiente para que ocurra una redistribución de momentos y consecutivamente se vayan generando articulaciones plásticas subsiguientes. La sección estructural se comportará siempre como una articulación plástica mientras esté presente el momento plástico. Este

comportamiento permite que una estructura sea analizada continuamente insertando una articulación plástica en cualquier sección de la misma que pueda alcanzar el momento plástico. El concepto previamente descrito se conoce como “concepto de articulación por articulación” (*“hinge-by-hinge”*), y el mismo constituye el fundamento para que el análisis plástico se lleve a cabo (Figura 5). Durante la localización de las articulaciones plásticas, la estructura se torna cada vez más flexible hasta que su rigidez sea reducida a un valor tan pequeño y el colapso inminente ocurra según se ilustra en la Figura 5.

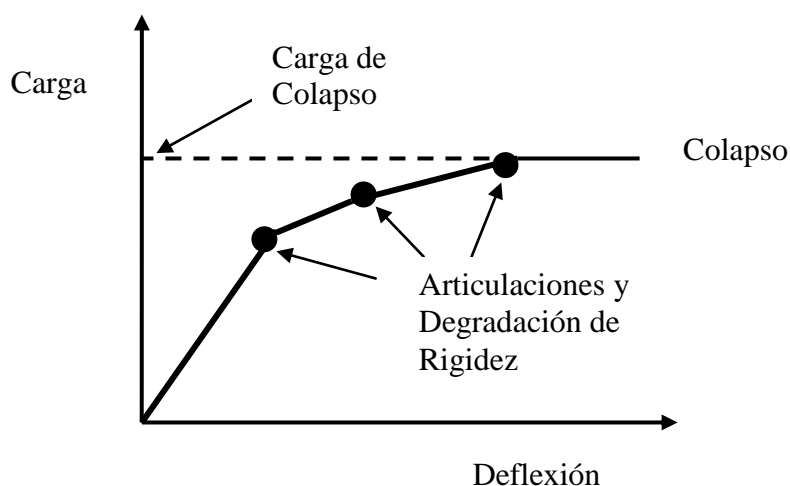


Figura 5: Curva de Carga-Deflexión

Según aumenta la carga, una vez la estructura pasa del rango elástico al plástico y las articulaciones plásticas comienzan a formarse, entre articulación y articulación se requiere una modificación a la rigidez de la estructura ya que la misma va disminuyendo. Esto es en los puntos donde las formaciones de articulaciones plásticas ocurren. Se puede conceptualizar este hecho modelando la articulación plástica como un pin interno. Luego de la modificación a la rigidez de la estructura, un factor incremental de carga puede ser encontrado entre los niveles de carga. Este proceso se puede repetir hasta que el colapso

ocurra. El análisis plástico comienza cuando una de las reacciones sea igual a un momento plástico determinado empíricamente, el cual será entrado inicialmente por el usuario.

El endurecimiento (“*hardening*”), es el aumento en la cantidad de esfuerzo necesario para deformar la estructura. Por el contrario, el ablandamiento (“*softening*”), es la disminución en la cantidad de esfuerzo necesaria para deformar la estructura. Esto puede ocurrir en diferentes posiciones dentro de una estructura estáticamente indeterminada antes de alcanzar la carga máxima. El concepto de rigidez negativa puede dar la apariencia de ser un cambio completo en la relación deseada entre la fuerza y el desplazamiento de las estructuras. No obstante, cuando en la misma estructura, luego de efectuar rigidez negativa se efectúa rigidez positiva, el sistema en conjunto reduce sustancialmente la rigidez sin dejar de ser estable. Esto es, existe un aparente ablandamiento y debilitamiento de la estructura que pudiera resultar en fuerzas reducidas y desplazamientos mayores para algunos elementos, pero en el sistema completo puede resultar en incrementos de fuerzas y desplazamientos mayores sin perder estabilidad.

Los métodos de flexibilidad y de rigidez (desplazamiento) se utilizan para realizar, tanto el análisis elástico así como el plástico. Según Sennett (1994), se prefiere usar el método de rigidez en lugar del de flexibilidad por ser este mucho más sencillo debido a que mientras más estáticamente indeterminada sea la estructura, menos desplazamientos se necesita encontrar. El número de desplazamientos a ser encontrados es equivalente a la cantidad de ecuaciones simultáneas que se deben resolver. Por lo tanto, se utiliza el método de rigidez para el desarrollo de esta aplicación.

Una vez revisados los conceptos principales en los que se fundamenta esta investigación, se mencionan algunos aspectos relevantes a la misma. Según se ha indicado anteriormente los programas comerciales, de dominio público y otros que existen al presente, son herramientas que están dirigidas mayormente a realizar el análisis elástico estructural utilizando el método de rigidez. El análisis plástico aplicando este mismo método asociado a la programación de computadoras es un tema de discusión más reciente y, por lo tanto, no existen muchos modelos analíticos disponibles a ser utilizados. El análisis plástico que se propone usar en este trabajo es el sugerido por Darvall (1984), de conformidad con la literatura previamente revisada.

3.1.1.2 MODELO DE DARVALL

Los elementos de concreto reforzado experimentan deformación por ablandamiento (“*softening*”) antes de llegar a la falla. El ablandamiento es el nombre que se usa cuando el momento flector disminuye en la deformación por flexión avanzada. La Figura 6 muestra un diagrama típico de momento-curvatura para un elemento de concreto reforzado y una posible aproximación con una línea recta representando regiones de elasticidad, endurecimiento (“*hardening*”) y ablandamiento.

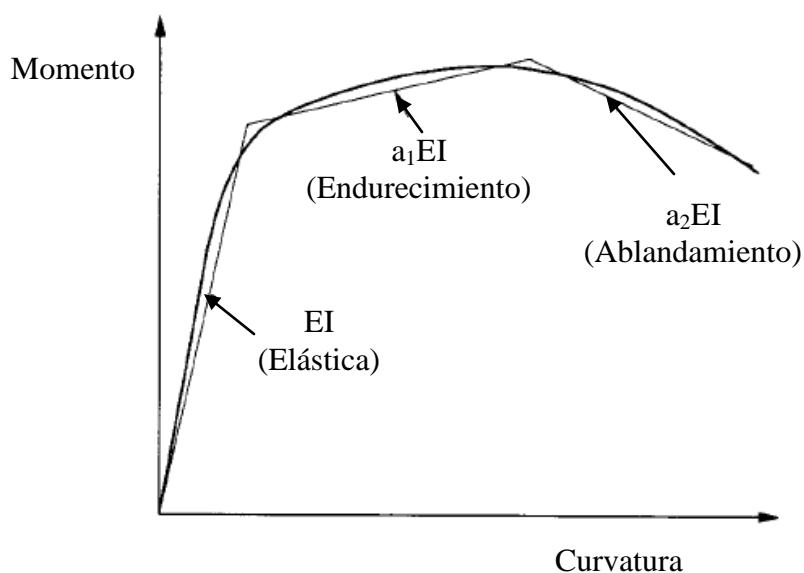


Figura 6: Típica Curva de Momento-Curvatura de un elemento de Concreto Reforzado (Sanjatan y Darvall, 1995)

Según Wood (1968), la aplicación de una simple teoría de flexión en elementos estructurales se encuentra con varias dificultades al momento de considerar ablandamiento (“softening”). Existen varias maneras de considerar las articulaciones plásticas para aproximar el análisis inelástico. En la Figura 7 se muestran varios modelos de articulaciones plásticas en elementos donde se consideran plasticidades concentradas (Figura 7(a,b)) y plasticidades distribuidas (Figura 7(c,d)). Para proveer las deformaciones como consecuencia del ablandamiento en un análisis, Darvall (1984) asumió que la articulación plástica tiene un largo finito, como el que se muestra en la Figura 7(c), lo cual coincide mejor con observaciones experimentales.

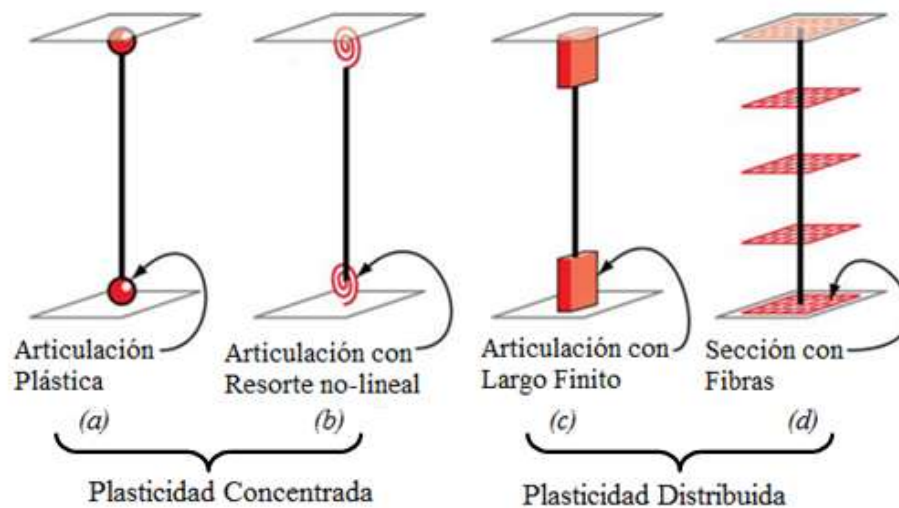


Figura 7: Modelos de Articulaciones Plásticas en un Elemento

Sanjayan (1988), extendió el uso de largos de articulaciones plásticas definidas para un análisis de estructuras de pórticos de concreto reforzado sujetas a deformaciones cíclicas (cargas de terremotos). Un modelo típico del ciclo de histéresis formado por aproximaciones de líneas rectas, como se ve en la Figura 8, se puede adaptar al comportamiento de las articulaciones plásticas sujetas a deformaciones cíclicas. Se asume que un elemento de largo L tiene largos de articulaciones plásticas definidos como se muestra en la Figura 9. La rigidez de flexión de este elemento es EI . Los largos de articulaciones AB y CD tienen rigidez de flexión aEI y bEI , respectivamente, donde a y b son parámetros a-dimensionales describiendo el estado de la articulación. Estas articulaciones (AB y CD) son las únicas porciones que se consideran que sufren deformaciones inelásticas. La parte central del elemento (BC) solo tiene deformaciones elásticas.

Las articulaciones AB y CD pueden adoptar el modelo del ciclo de histéresis similar al que se muestra en la Figura 8, los parámetros a y b siguen dicho ciclo. Una matriz de

rigidez separada por cada estado a y b puede ser generada por cada segmento de línea recta de la relación del diagrama de momento-curvatura usando los valores correspondientes a a_x (véase Figura 8) para a y b (véase Figura 9). Por ejemplo, si la articulación AB entra en estado de ablandamiento siguiendo el tramo 3-4 de la Figura 8, entonces $a = a_1$, al mismo tiempo la articulación CD puede estar siguiendo el tramo 10-7, el cual nos provee $b = a_4$.

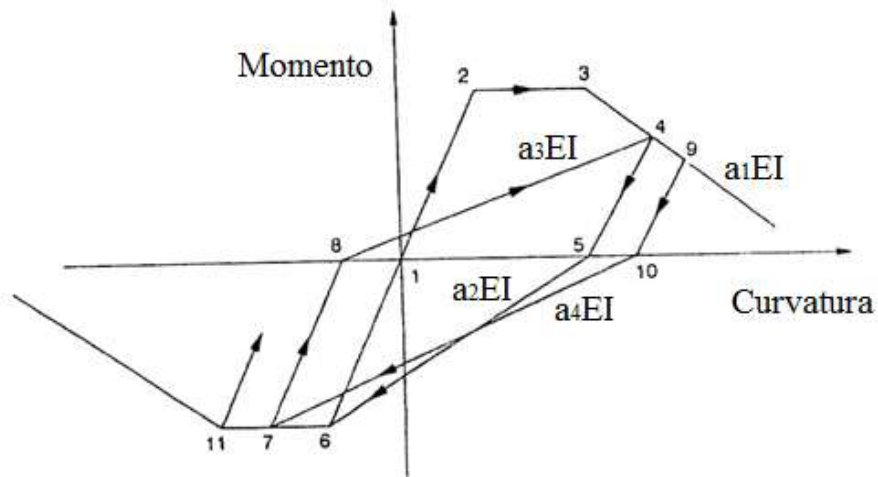


Figura 8: Modelo del Ciclo de Histéresis (Sanjatan y Darvall, 1995)

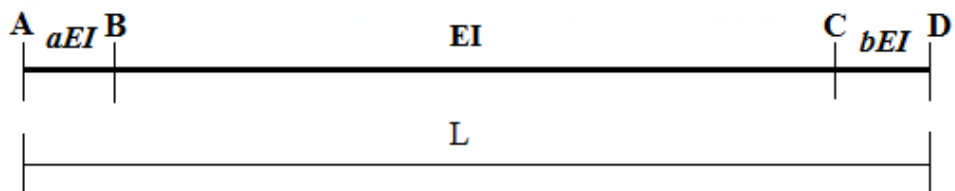


Figura 9: Elemento con Largos de Articulaciones Plásticas Definidos

La Figura 10 muestra dos aproximaciones de diagramas de Momento-Curvatura, bilineal ("*elastic-softening*") y trilineal, ("*elastic-plastic-softening*") respectivamente. Este análisis asume que la aproximación bilineal (Figura 10(a)) es lo suficientemente precisa.

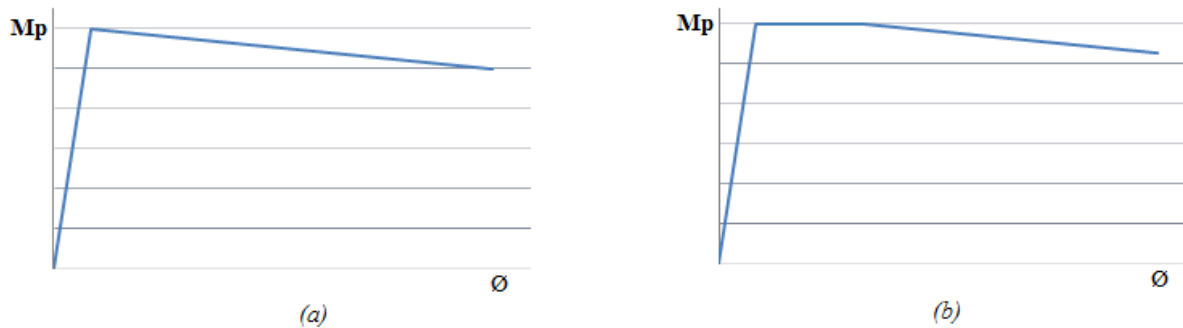


Figura 10: Aproximación de las Curvas Momento-Curvatura: (a) Elástico-Ablandamiento ("Elastic-Softening"); (b) Elástico-Plástico-Ablandamiento ("Elastic-Plastic-Softening")

La Figura 11 muestra claramente las presunciones y notaciones explicadas previamente en esta investigación. El desarrollo del modelo asume que la pendiente en el área elástica del elemento es EI y la pendiente en el área plástica de ablandamiento o endurecimiento es aEI al comienzo del elemento y bEI al final del elemento (véase Figura 11). En el caso de ablandamiento, al comienzo o al final del elemento a y b tendrían un valor negativo respectivamente y en el caso de endurecimiento a y b tendrían un valor positivo al comienzo o al final del elemento respectivamente.

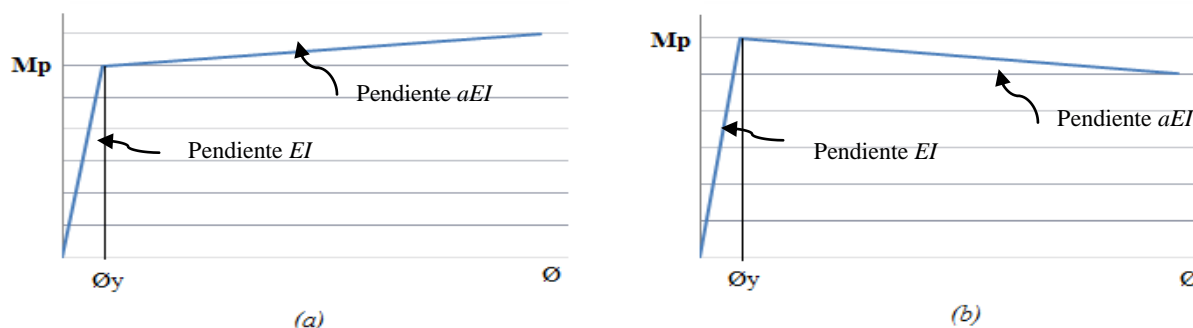
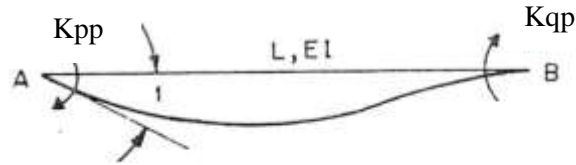


Figura 11: Presunción de Gráficas de Momento-Curvatura: (a) Pendiente de Endurecimiento ("Hardening"); (b) Pendiente de Ablandamiento ("Softening")

Según (Darvall, 1984), una pendiente más pronunciada de ablandamiento reduce el número de articulaciones que se generan antes del colapso de la estructura y reduce además la carga de colapso. Por lo tanto, según se ha mencionado, este aspecto debe ser considerado en un análisis estructural. Este modelo de análisis requiere que los largos de las articulaciones plásticas y las aproximaciones de curvas bilineales de Momento-Curvatura estén disponibles para todas las secciones transversales críticas de la estructura a analizarse. El comportamiento de una estructura a ser determinado por este análisis depende de la precisión de los datos de entrada.

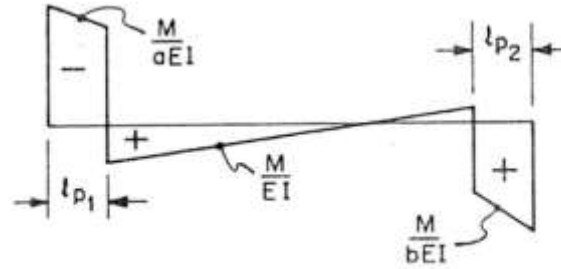
Un análisis programable paso por paso ("*step by step*") puede hacerse de la misma manera que un análisis elasto-plástico, siempre que las matrices de rigideces apropiadas estén disponibles. En algunas situaciones es conveniente tener disponible coeficientes de rigidez para el ablandamiento en ambos extremos del elemento. En este caso los largos de ambos extremos para la porción de ablandamiento son asumidos como l_{p1} y l_{p2} para el comienzo y el final del elemento respectivamente, como también lo son los parámetros de ablandamiento a y b según se muestra en la Figura 12.



(a) Elemento con rotación unitaria en A



(b) Incremento del diagrama del momento flector



(c) Incremento en curvatura

Figura 12: Base para la Determinación de los Coeficientes de Rigidez en el Caso de Ablandamiento en Ambos Extremos (Darvall, 1984)

Ecuaciones para K_{pp} y K_{qp} se forman de la siguiente manera:

$\int_0^L \phi dx = 1$ (Rotación unitaria en **A** con respecto a **B**) nos conduce al siguiente resultado,

$$[2bmn^2 - bn^2 + ab(m^2n^2 - 2mn^2 - m^2 + n^2) + am^2] K_{pp} + [ab(n^2 - m^2 + 2m^2n - m^2n^2) - bn^2 - 2am^2n + am^2] K_{qp} = \frac{2EI}{L} abm^2n^2 \quad (1)$$

$\int_0^L \phi(L-x)dx - L = 0$ (Cero desplazamientos en **B** con respecto a **A**) nos conduce al siguiente resultado,

$$\begin{aligned}
& [3bm^3n^3 - 3bm(m-1)^2n^3 - 3bmn^3 + 2bn^3 - 3abm^3n + 3abm(m-1)^2n^3 \\
& \quad - a(b-1)m^3(n-1)^2(n+2) + ab(3m-2)n^3 + 3am^3n \\
& \quad - am^3n^3] \mathbf{Kqq} \\
& + [2bn^3 - 3bmn^3 - a(b-1)m^3(n-1)^2(n+2) + ab(3m-2)n^3 \\
& \quad - am^3n^3] \mathbf{Kpq} = \frac{6EI}{L} abm^3n^3 \quad (2)
\end{aligned}$$

donde:

L = largo de elemento,

E = módulo de elasticidad del elemento,

I = el momento de inercia del elemento,

a = la pendiente del área plástica al comienzo del elemento,

b = la pendiente del área plástica al final del elemento,

$m = \frac{L}{lp1}$; $lp1$ = largo plástico al comienzo del elemento, y

$n = \frac{L}{lp2}$; $lp2$ = largo plástico al final del elemento.

Estas dos ecuaciones se pueden resolver para Kpp y Kqp para unos datos particulares correspondientes a: a , b , m y n .

Cabe señalar que el modelo de Darvall presume una relación de Momento-Curvatura particular. La misma puede ser explicada a través de una viga en voladizo con una carga concentrada aplicada en el extremo libre como se muestra en la Figura 13(a). Se asume una distribución de curvatura inelástica idealizada y una sección completamente agrietada en la

región elástica (Park y Paulay, 1975). Las Figuras 13(b) y 13(c) representan el diagrama de momento y una posible distribución de curvatura en el momento último.

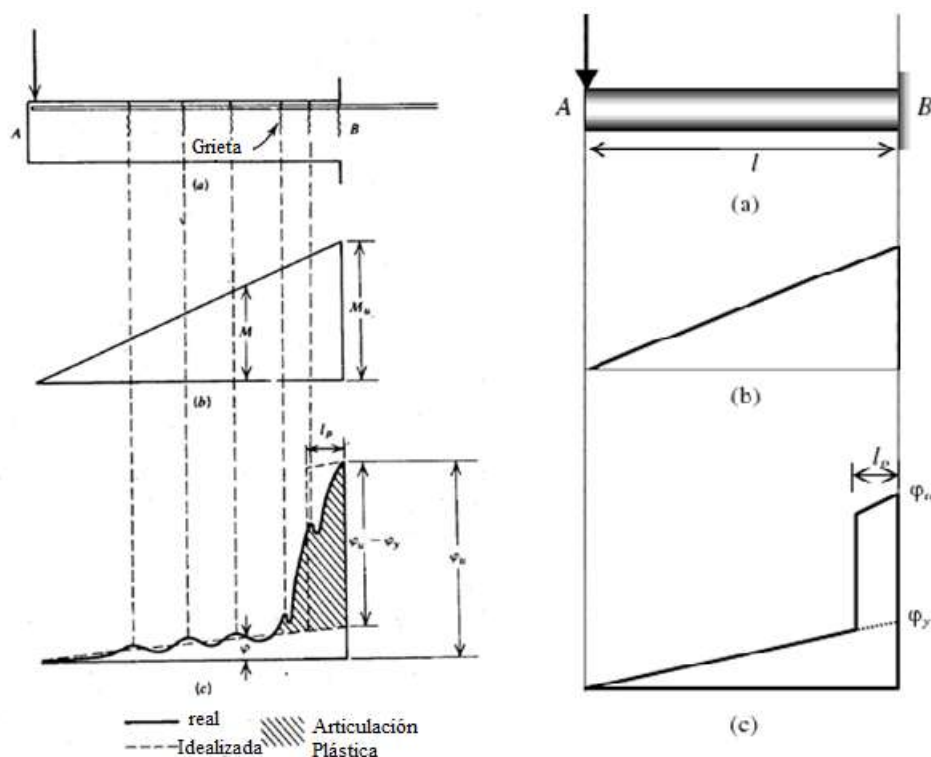


Figura 13: (a) Viga en Voladizo, (b) Distribución del Momento Flector, (c) Distribución de Curvatura (Park y Paulay, 1975)

Este modelo asume que la curvatura plástica será igual a la curvatura última menos la curvatura de cedencia. Así también, el largo de la articulación indica el mínimo largo teórico de concentración de daños a lo largo de la columna. A pesar de que este largo no debe ser considerado como la región de confinamiento que la columna requiere, el mismo indica la dimensión mínima teórica. La región de confinamiento real, la cual es mostrada como la extensión de la plasticidad en la Figura 14(a), debe ser más larga que el largo de la articulación plástica.

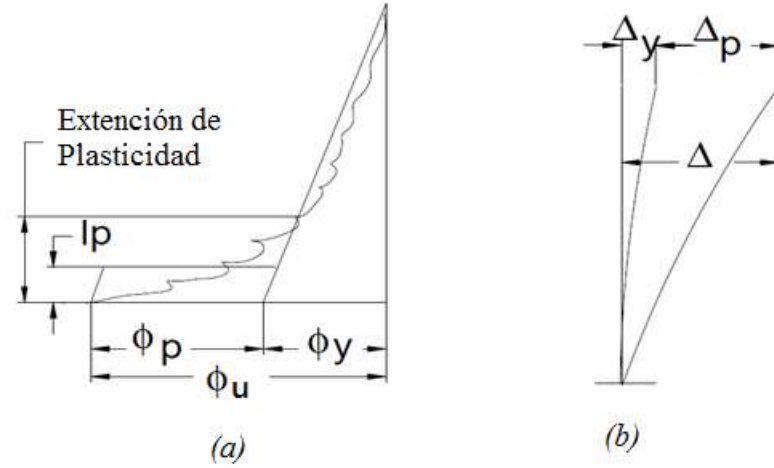


Figura 14: (a) Respuesta Máxima de Curvatura, (b) Deflecciones.

3.1.1.3 APLICACIÓN DEL MODELO DE DARVALL

Según la literatura, el modelo que se sigue para generar la Matriz de Rigidez Local por Elemento, tanto elástica así como plástica es el mismo. En la Figura 15 se ilustra este modelo.

k_{tt}	0	0	$-k_{tt}$	0	0
0	$\frac{k_{pp} + k_{pq} + k_{qp} + k_{qq}}{L^2}$	$\frac{k_{pp} + k_{qp}}{L}$	0	$-\left(\frac{k_{pp} + k_{pq} + k_{qp} + k_{qq}}{L^2}\right)$	$\frac{k_{pq} + k_{qq}}{L}$
0	$\frac{k_{pp} + k_{pq}}{L}$	k_{pp}	0	$-\left(\frac{k_{pp} + k_{pq}}{L}\right)$	k_{pq}
$-k_{tt}$	0	0	k_{tt}	0	0
0	$-\left(\frac{k_{pp} + k_{pq} + k_{qp} + k_{qq}}{L^2}\right)$	$-\left(\frac{k_{pp} + k_{qp}}{L}\right)$	0	$\frac{k_{pp} + k_{pq} + k_{qp} + k_{qq}}{L^2}$	$-\left(\frac{k_{pq} + k_{qq}}{L}\right)$
0	$\frac{k_{qp} + k_{qq}}{L}$	k_{qp}	0	$-\left(\frac{k_{qp} + k_{qq}}{L}\right)$	k_{qq}

Figura 15: Modelo Matemático Usado para Crear la Matriz de Rigidez Local

Lo que distingue si esta matriz es elástica o plástica son los valores que asumirán las variables k_{pp} , k_{pq} , k_{qp} y k_{qq} . En ambos casos la variable k_{tt} asumirá el mismo valor:

$k_{tt} = AE/L$, donde "A" es el área seccional, "E" es módulo de elasticidad y "L" es el largo del elemento.

Si el elemento corriente es elástico, el proceso de construir la Matriz de Rigidez Local no considera las pendientes "a" y "b" ya que se asume que son iguales a uno y, tampoco considera las longitudes de las articulaciones plásticas "L_{pi}" y "L_{pj}" ya se asume que serán iguales a cero. Luego de varias manipulaciones algebraicas con las variables k_{pp} , k_{pq} , k_{qp} y k_{qq} se obtiene la Matriz de Rigidez Local Elástica por Elemento según la Figura 16

$\frac{AE}{L}$	0	0	$-\frac{AE}{L}$	0	0
0	$-12\frac{EI}{L^3}$	$6\frac{EI}{L^2}$	0	$-12\frac{EI}{L^3}$	$6\frac{EI}{L^2}$
0	$6\frac{EI}{L^2}$	$4\frac{EI}{L}$	0	$-6\frac{EI}{L^2}$	$2\frac{EI}{L}$
$-\frac{AE}{L}$	0	0	$\frac{AE}{L}$	0	0
0	$-12\frac{EI}{L^3}$	$-6\frac{EI}{L^2}$	0	$12\frac{EI}{L^3}$	$-6\frac{EI}{L^2}$
0	$6\frac{EI}{L^2}$	$2\frac{EI}{L}$	0	$-6\frac{EI}{L^2}$	$4\frac{EI}{L}$

Figura 16: Modelo Matemático correspondiente a la Matriz de Rigidez Local Elástica por Elemento.

Si el elemento corriente es plástico, entonces se asume que las pendientes "a" y "b" tendrán valores diferentes a uno y que las longitudes de las articulaciones plásticas "L_{pi}" y "L_{pj}" serán diferentes a cero. Como consecuencia, los valores de las variables k_{pp} , k_{pq} , k_{qp} y k_{qq} serán totalmente diferentes a los obtenidos para la Matriz de Rigidez Local Elástica por Elemento.

Según se explica en la sección anterior a esta, Darvall (1984), elabora unos procedimientos matemáticos para obtener unos coeficientes que contemplan pendientes cuyos valores pueden ser diferentes a uno, incluyendo valores negativos. Así también, los coeficientes de Darvall consideran longitudes de articulaciones plásticas con valores

diferentes cero. Estos coeficientes se usan a su vez para hallar los valores de las variables kpp , kpq , kqp y kqq . Una vez obtenidos estos valores se puede construir la Matriz de Rigidez Local Plástica por elemento según el modelo ilustrado en la Figura 15. Los pasos para calcular los coeficientes de Darvall se detallan a continuación.

Darvall Paso 1: *Cálculo de Factores de Longitud (M y n) para la articulación inicial y final del elemento corriente.* Si " L_{pi} " o " L_{pj} " son iguales a cero, entonces el valor de estos factores será igual a uno. De lo contrario, si " L_{pi} " o " L_{pj} " tienen valores diferentes a cero, entonces el valor de estos factores será igual a la división de " L " (Largo del elemento) entre " L_{pi} " o " L_{pj} " respectivamente.

Darvall Paso 2: *Construcción de dos Matrices Cuadradas 2×2 , una para cada nodo con deformaciones plásticas, inicial y final, del elemento corriente.* Los valores de los componentes de estas matrices consideran los factores " M " y " n " computados en el paso anterior y las pendientes plásticas " a " y " b " mencionadas previamente. A continuación se presentan los cálculos, según Darvall, para asignar valor a cada uno de los componentes de estas matrices.

$$\text{Matriz (1,1)} = 2bMn^2 - bn^2 + ab(M^2n^2 - 2Mn^2 - M^2 + n^2) + aM^2 \quad (3)$$

$$\text{Matriz (1,2)} = ab(n^2 - M^2 + 2M^2n - M^2n^2) - bn^2 - 2aM^2n + aM^2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Matriz (2,1)} = & 3bM^3n^3 - 3bM(M-1)^2n^3 - 3bMn^3 + 2bn^3 - 3abM^3n \\ & + 3abM(M-1)^2n^3 - a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + ab(3M-2)n^3 \\ & + 3aM^3n - aM^3n^3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Matriz (2,2)} = & 2bn^3 - 3bMn^3 - a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + ab(3M-2)n^3 \\ & - aM^3n^3 \end{aligned} \quad (6)$$

Las matrices resultantes quedarían según el modelo matemático ilustrado en la Figura 17:

$2bMn^2 - bn^2 + ab(M^2n^2 - 2Mn^2 - M^2 + n^2) + aM^2$	$ab(n^2 - M^2 + 2M^2n - M^2n^2) - bn^2 - 2aM^2n + aM^2$
$3bM^3n^3 - 3bM(M-1)^2n^3 - 3bMn^3 + 2bn^3 - 3abM^3n + 3abM(M-1)^2n^3 - a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + ab(3M-2)n^3 + 3aM^3n - aM^3n^3$	$2bn^3 - 3bMn^3 - a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + ab(3M-2)n^3 - aM^3n^3$

Figura 17: Modelo Matemático según Darvall para crear las Matrices 2x2

Darvall Paso 3: *Hallar las matrices inversas correspondientes a las dos matrices construidas en el paso anterior.* Las dos matrices resultantes en este paso, una para cada nodo con deformaciones plásticas inicial y final, también serán cuadradas con dimensiones igual a 2x2.

El proceso para hallar la matriz inversa de cualquier matriz cuadrada, como la que se está procesando en este momento, es como sigue:

$$\text{Sea } A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}, \text{ entonces la matriz Inversa de } A = A^{-1} = \frac{1}{ad-bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

donde $ad - bc$ es el determinante de la matriz A.

En este caso particular, el Determinante de la Matriz (i, j) =

$$\begin{aligned} & \{[2bMn^2 - bn^2 + ab(M^2n^2 - 2Mn^2 - M^2 + n^2) + aM^2][2bn^3 - 3bMn^3 \\ & - a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + ab(3M-2)n^3 - aM^3n^3]\} \\ & - \{[ab(n^2 - M^2 + 2M^2n - M^2n^2) - bn^2 - 2aM^2n + aM^2][3bM^3n^3 \\ & - 3bM(M-1)^2n^3 - 3bMn^3 + 2bn^3 - 3abM^3n + 3abM(M-1)^2n^3 \\ & - a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + ab(3M-2)n^3 + 3aM^3n - aM^3n^3]\} \quad (7) \end{aligned}$$

Luego de calcular el recíproco del determinante de la matriz (i, j) se procede a multiplicar el mismo por la matriz cuyo modelo matemático aparece ilustrado en la Figura 18.

$2bn^3 - 3bMn^3$ $- a(b-1)M^3(n-1)^2(n$ $+ 2) + ab(3M-2)n^3$ $- aM^3n^3$	$- \left[\begin{array}{c} ab(n^2 - M^2 + 2M^2n - M^2n^2) - bn^2 \\ -2aM^2n + aM^2 \end{array} \right]$
$- \left[\begin{array}{c} 3bM^3n^3 - 3bM(M-1)^2n^3 - 3bMn^3 + \\ 2bn^3 - 3abM^3n + 3abM(M-1)^2n^3 - \\ a(b-1)M^3(n-1)^2(n+2) + \\ ab(3M-2)n^3 + 3aM^3n - aM^3n^3 \end{array} \right]$	$2bMn^2 - bn^2 + ab(M^2n^2 - 2Mn^2 - M^2$ $+ n^2) + aM^2$

Figura 18: Modelo Matemático de la $[Matriz(i,j)]^{-1}$ a ser Multiplicada por el Recíproco del Determinante de la Matriz (i,j)

Darvall Paso 4: Construcción de dos vectores unidimensionales (2x1), uno para cada nodo con deformaciones plásticas, inicial y final, del elemento corriente. A continuación se presentan los cálculos, según Darvall (1984), para asignar valor a cada uno de los componentes de estos vectores. La Figura 19 presenta el modelo matemático correspondiente a estos vectores:

$$\text{Vector (1)} = 2abM^2n^2 \quad (8)$$

$$\text{Vector (2)} = 6abM^3n^3 \quad (9)$$

$2abM^2n^2$
$6abM^3n^3$

Figura 19: Modelo Matemático según Darvall correspondiente a los Vectores (i) con dimensión igual a 2x1

Darvall Paso 5: *Coeficientes de Darvall.* Se toman las dos matrices inversas generadas en el paso número 3 y los dos vectores generados en el paso anterior. Se multiplica la matriz inversa correspondiente al nodo inicial con el vector correspondiente al nodo inicial y se hace lo propio con los que correspondan al nodo final. Como resultado de ambas multiplicaciones obtenemos dos vectores unidimensionales (2x1). Uno de ellos corresponde al nodo inicial ($Coef_i$) y el otro ($Coef_j$) corresponde al nodo final del elemento corriente. El proceso para calcular cualquiera de estos coeficientes es como sigue:

$$Coef = [Matriz(i, j)]^{-1} [Vector(i)] \quad (10)$$

Se asume que para calcular $Coef_i$ se utilicen la Matriz (i, j) y el Vector (i) correspondientes al nodo inicial. Así también, para calcular $Coef_j$ se utilicen la Matriz (i, j) y el Vector (i) correspondientes al nodo final.

Darvall Paso 6: *Cómputo de las variables kpp , kqp , kqq y kpq .* Los Coeficientes de Darvall " $Coef_i$ " y " $Coef_j$ " obtenidos en el paso anterior se usan para calcular los valores de las variables kpp , kqp , kqq y kpq presentadas en el Modelo Matemático ilustrado en la Figura 15. A continuación se presentan los cálculos para calcular estos valores donde "E" es el módulo de elasticidad, "I" es el momento de inercia y "L" es el largo del elemento:

$$\left. \begin{aligned} kpp &= Coef_i(1) * EI/L \\ kqp &= Coef_i(2) * EI/L \end{aligned} \right\} \quad \text{Corresponden al nodo inicial del elemento}$$

$$\left. \begin{aligned} k_{qq} &= \text{Coef}_j(1) * EI/L \\ k_{pq} &= \text{Coef}_j(2) * EI/L \end{aligned} \right\} \quad \text{Corresponden al nodo final del elemento}$$

Los valores obtenidos para las variables k_{pp} , k_{qp} , k_{qq} y k_{pq} se utilizan para crear la Matriz de Rigidez Local Plástica según el modelo ilustrado en la Figura 15.

3.1.2 ALGORITMO

3.1.2.1 ETAPAS DE DESARROLLO

Luego de un proceso de análisis se estableció que el nombre designado a la aplicación objeto de este trabajo sería SEPA, “Static Elastic Plastic Analysis”, ya que la misma contempla estos conceptos. Este sistema está diseñado para realizar el análisis estático elástico y plástico de pórticos.

Para desarrollar la programación propuesta en este trabajo se seleccionó el lenguaje "Visual Basic for Applications" mayormente usado para crear "Macros" que interactúen con Excel. Este lenguaje forma parte de “Microsoft Office”, lo cual permite accesibilidad a un mayor número de personas. Es un lenguaje bastante sencillo con la capacidad de manejar las cantidades numéricas que esta aplicación requiere. Además, el mismo posee funciones específicas para el manejo algebraico de matrices, lo cual fue fundamental para el desarrollo de esta aplicación.

A continuación se presentan, de forma general, los pasos que se siguieron durante esta investigación.

- 1) El proceso inició con la creación de la programación necesaria para realizar el análisis elástico de estructuras utilizando el método de rigidez.
- 2) Una vez programada la parte elástica utilizando el lenguaje VBA, se realizaron corridas de prueba con ejemplos desarrollados manualmente para el análisis elástico de pórticos y con ejemplos desarrollados en SAP2000, versión 15 (2011). De esta manera se corroboró que el programa estuviera funcionando adecuadamente para estos propósitos.
- 3) Una vez confirmado que el programa funcionó bien para el análisis elástico se comenzó la elaboración del algoritmo necesario para que el programa también pudiera realizar el análisis plástico de estructuras siguiendo el modelo analítico de Darvall. Se estableció que el algoritmo debería contemplar la entrada de datos adicionales requeridos para el análisis plástico. El programa final objeto de este trabajo debería ser uno totalmente integrado con la capacidad de realizar cualesquiera de los dos análisis.
- 4) Posteriormente se añadió la codificación necesaria en VBA para el análisis plástico al programa previamente probado para el análisis elástico a fin de lograr una integración total de ambos procesos.
- 5) Una vez completada la codificación se realizaron pruebas ejecutando el programa. Los resultados de estas pruebas se compararon con modelos realizados en el programa SAP2000, versión 15 (2011). Además, se realizaron cálculos manuales

para algunos modelos a fin de compararlos con los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y del programa SAP2000, versión 15 (2011). Estas comparaciones permitieron llegar a las conclusiones finales de la investigación.

3.1.2.1.1 ALGORITMO GENERAL

En esta sección se describen brevemente los procesos incluidos en la lógica principal del Sistema SEPA. En la próxima sección se ofrecen los detalles específicos correspondientes a cada uno de estos procesos.

En la Figura 20 se presenta el diagrama de flujo (“flowchart”) general que describe el algoritmo que se utilizó para desarrollar la lógica principal del Sistema SEPA.

Los pasos ilustrados en el diagrama general se describen a continuación:

1) Entrada de Datos

La ejecución del Sistema SEPA inicia con la entrada de datos a la aplicación. El diseño contempla que el usuario entre los menos datos posibles para garantizar rapidez y eficiencia. El sistema realiza automáticamente muchos de los cálculos. En la sección 3.1.3 se describe ampliamente este proceso.

2) Construcción de Matrices

El análisis elasto-plástico de la estructura requiere inicialmente de la creación de una matriz de rigidez local por cada elemento, ya sea elástica o plástica, dependiendo de los datos existentes en la memoria del computador. Este proceso se realiza iterativamente cada vez que ocurran articulaciones plásticas, cuya ocurrencia a su vez dependerá de la evaluación iterativa de cada incremento en desplazamientos o fuerzas nodales aplicado

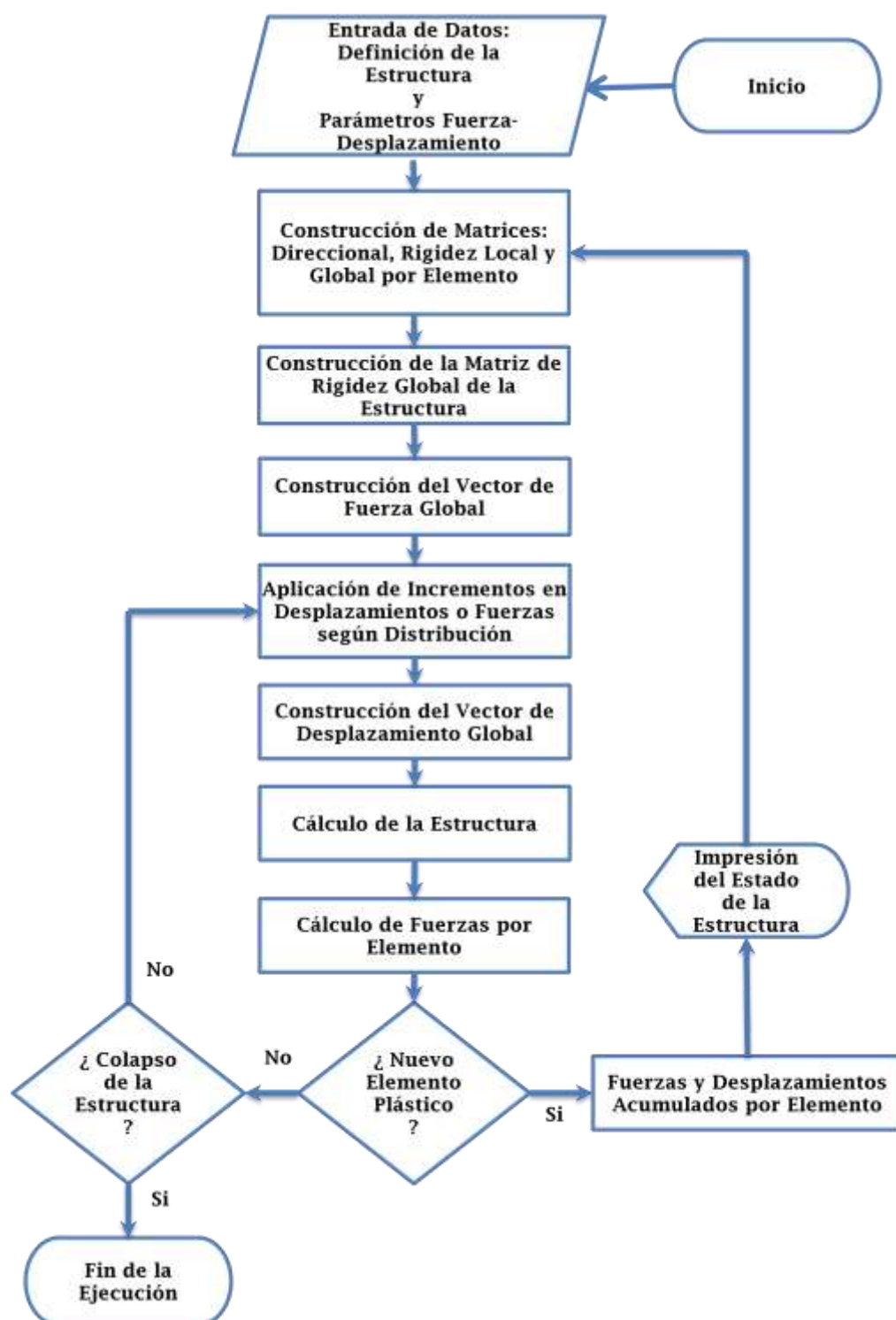


Figura 20: Diagrama de Flujo General que Describe el Algoritmo que se Utilizó para Desarrollar el Sistema SEPA ("Static Elastic Plastic Analysis")

de acuerdo a la distribución porcentual entrada previamente por el usuario. Estas iteraciones se generan por medio de dos ciclos anidados (Véase Figura 20). Así también, se crea una matriz direccional cuyos componentes son los resultados de las funciones trigonométricas seno y coseno correspondientes a los ángulos en cada nodo. Debido a que el sistema está orientado para pórticos, la medida de estos ángulos será generalmente igual a 90° ó 0° grados, en cuyo caso los únicos valores que tendrán los componentes de la matriz direccional serán ceros y unos. No obstante, el sistema permite la evaluación para ángulos de cualquier otra medida. La matriz de rigidez global por elemento surge como resultado de la multiplicación de la matriz direccional por la matriz de rigidez local.

3) Construcción de la Matriz de Rigidez Global de la Estructura

La matriz de rigidez global de la estructura "Kg" se crea para resolver un sistema de ecuaciones que se puede generar de dos modos diferentes: a partir de un vector conocido de fuerzas para hallar el vector de desplazamientos o partiendo de desplazamientos conocidos para hallar el vector de fuerzas. El sistema SEPA ofrece la flexibilidad de que, a opción del usuario, se utilice cualquiera de los dos modos. No obstante, la alternativa que permite hallar el vector de fuerzas "F" a partir de desplazamientos "U" conocidos ofrece ciertas ventajas sobre la otra opción para el manejo de pendientes negativas.

Según se ha indicado anteriormente, uno de los aspectos que distingue esta aplicación de otras es que la misma cuenta con la capacidad de manejar pendientes negativas. Como parte de los resultados de la corrida del Sistema SEPA se genera una gráfica de "Push-Over". La alternativa que permite hallar desplazamientos "U" a partir de fuerzas "F" conocidas no ofrece una gráfica de "Push-Over" confiable cuando las pendientes son negativas. Si la

pendiente es negativa la misma no tendría efecto visual sobre la gráfica ya que, al evaluarse iterativamente cada incremento en fuerza, ésta continuaría en aumento mientras los desplazamientos también continuarían aumentando y como consecuencia la gráfica nunca reflejaría una pendiente negativa. Se utiliza el método de partición, el cual se detalla más adelante, para la implantación de esta opción.

Para la implantación de la opción que permite hallar desplazamientos "U" a partir de fuerzas "F" conocidas se hace uso de la matriz inversa de la matriz de rigidez global de la estructura "Kg" a la cual se le conoce como matriz de flexibilidad. Los desplazamientos "U" se obtienen a través de la multiplicación de la matriz de flexibilidad por el vector global de fuerzas.

4) Contrucción del Vector de Fuerza Global

Este vector "F" se crea añadiendo las fuerzas nodales aplicadas (F_x , F_y , M_z), si alguna, a determinados nodos. El mismo tendrá tantos componentes como grados de libertad tenga la estructura. Si no se observan fuerzas nodales aplicadas, entonces el valor de la mayoría de los componentes en este vector será igual a cero, excepto aquellos componentes que correspondan a los nodos que son soporte, cuyos valores en este momento se desconocen. En aquellos nodos donde se apliquen desplazamientos nodales, los valores de los componentes correspondientes a esos nodos también serán desconocidos.

5) Aplicación de Incrementos en Desplazamientos o Fuerzas según Distribución

Este proceso es cíclico. Se aplicarán los incrementos en los desplazamientos o fuerzas según la distribución deseada por el usuario en los nodos previamente identificados

para ello hasta que la estructura colapse. Los próximos pasos a partir del número 6 hasta el número 8 se ejecutarán tantas veces como se ejecute este proceso.

6) Construcción del Vector de Desplazamientos Global.

Si el usuario optó por aplicar incrementos en desplazamientos en lugar de aplicar incrementos en fuerzas, entonces, luego de aplicar dichos incrementos en el paso anterior, se construye un nuevo vector de desplazamientos de la estructura "U". Cabe señalar que en este momento el vector "U" tendrá algunos componentes cuyos valores serán conocidos y otros no. Aquellos componentes que correspondan a nodos que son soporte y a nodos identificados para aplicar los incrementos tendrán valores conocidos. Si el nodo es soporte, entonces el valor que le corresponde en "U" es igual a cero. Si el nodo ha sido identificado para aplicar el incremento en desplazamiento, entonces el valor que le corresponde es el incremento calculado según la distribución previamente definida. Si el incremento que se está procesando es de fuerzas, entonces los valores de "U" correspondientes a estos nodos tendrán valores desconocidos en este momento de la ejecución del programa al igual que los valores correspondientes al resto de los nodos. Se utilizará el vector "U" para crear un nuevo sistema de ecuaciones a ser resuelto más adelante.

Si el usuario optó por aplicar incrementos en fuerzas, entonces se utiliza el Vector Global de Fuerzas Inicial "F" creado en el paso número 4 y se aplicarán dichos incrementos a aquellos componentes del vector que correspondan a los nodos identificados para ello. Se utilizará el vector "F" para crear un nuevo sistema de ecuaciones a ser resuelto más adelante.

7) Cálculo de la Estructura

El cálculo de la estructura requiere dos procesos esenciales. El primero de ellos consiste en generar un sistema de ecuaciones que utiliza la matriz de rigidez global de la estructura "Kg", creada en el paso número 3, conjuntamente con el vector de desplazamientos de la estructura "U" creado en el paso anterior, si es que el usuario opciónó por entrar incrementos en desplazamientos. Si el usuario optó por entrar incrementos en fuerzas, entonces se usa la Matriz de Rigidez Global "Kg" con el vector de fuerzas "F" creado en el paso número 4 y luego modificado según descrito en el paso número 6 para crear este sistema de ecuaciones.

El segundo proceso resuelve dicho sistema de ecuaciones aplicando el método de partición para hallar el vector de fuerzas "F" de la estructura, si es que el usuario optó por entrar incrementos en desplazamientos. De lo contrario, si se entran incrementos en fuerzas, entonces la solución del sistema de ecuaciones es para hallar el vector de desplazamientos "U" de la estructura. Cabe señalar que en ambos casos, tanto el vector "U", así como el vector "F" venían con valores previos, unos conocidos y otros no, de pasos anteriores a este. A través de este proceso es que todos los componentes de cualesquiera de los dos vectores adquieren valor real. El cálculo de la estructura también es un proceso iterativo al igual que el anterior y se ejecutará tantas veces como se ejecute el paso número 5.

8) Cálculo de Fuerzas por Elemento

Inicialmente este proceso calcula los vectores de desplazamientos por elemento. Esa información es utilizada posteriormente para calcular los Vectores de Fuerzas por cada Elemento de la estructura. Esto permite al sistema decidir si se obtiene o no una nueva

articulación plástica e identificar si el elemento corriente es o no plástico. Si algún elemento plastifica, entonces se transfiere el control de la lógica del programa al proceso a ser descrito en el paso número 9 de esta sección. En el mismo se crearán los vectores de fuerzas y desplazamientos acumulados por elemento. Al finalizar la ejecución del paso número 9 se imprimen los resultados y se repite todo el proceso nuevamente a partir del paso número 2. De lo contrario, si el elemento no plastifica, entonces se decide si la estructura colapsa o no. Si no hay colapso, entonces se regresa al paso número 5 para aplicar nuevamente el incremento en desplazamientos o fuerzas y repetir los pasos número 6, 7 y 8. Si la estructura colapsa, entonces termina la ejecución del Sistema SEPA.

9) Fuerzas y Desplazamientos Acumulados por Elemento

Este proceso se ejecuta iterativamente solo si se detectan articulaciones plásticas. Aquí se crean nuevos vectores de Fuerzas y Desplazamientos por Elemento acumulando iterativamente los valores de estos mismos vectores según van saliendo del proceso anterior a este. Cada vez que se detecta una articulación plástica los valores de ambos vectores van incrementando. Estos incrementos provocarán que eventualmente la estructura colapse y que la ejecución del Sistema SEPA termine. Además, este proceso calcula el acumulado de cortante basal para poder generar la gráfica de "Push-Over".

3.1.2.1.2 ALGORITMO DETALLADO

En esta sección se detallan todos aquellos procesos iterativos que componen la lógica principal del sistema SEPA. Aunque el proceso de Entrada de Datos forma parte esencial del algoritmo, el mismo será descrito ampliamente en la sección 3.1.3.

1) Construcción de Matrices

La Figura 21 presenta un Diagrama de Flujo que ilustra el algoritmo utilizado para la construcción de la Matriz Direccional y de la Matriz de Rigidez Global por Elemento.

Este proceso se ejecutará iterativamente tantas veces como elementos tenga la estructura. Las dimensiones de las matrices resultantes luego de la ejecución de este proceso serán 6x6. La Matriz Direccional es la primera que se construye de las dos matrices aquí mencionadas. En primer lugar se utilizan las coordenadas de cada nodo provistas a través de los datos entrados por el usuario para hallar la distancia entre ellos y eventualmente calcular los senos y cosenos de los ángulos correspondientes a cada nodo. Luego se determinan los grados de libertad del elemento corriente. Estos cálculos son necesarios para crear la Matriz Direccional descrita previamente en el paso número 2 de la sección 3.1.2.1.1, la cual es necesaria para construir la Matriz de Rigidez Global por Elemento.

La construcción de la Matriz de Rigidez Global por Elemento también requiere de una matriz intermedia, la cual se identifica como Matriz de Rigidez Local por Elemento. Esta matriz pudiera ser elástica o plástica dependiendo de si el elemento corriente ha sido

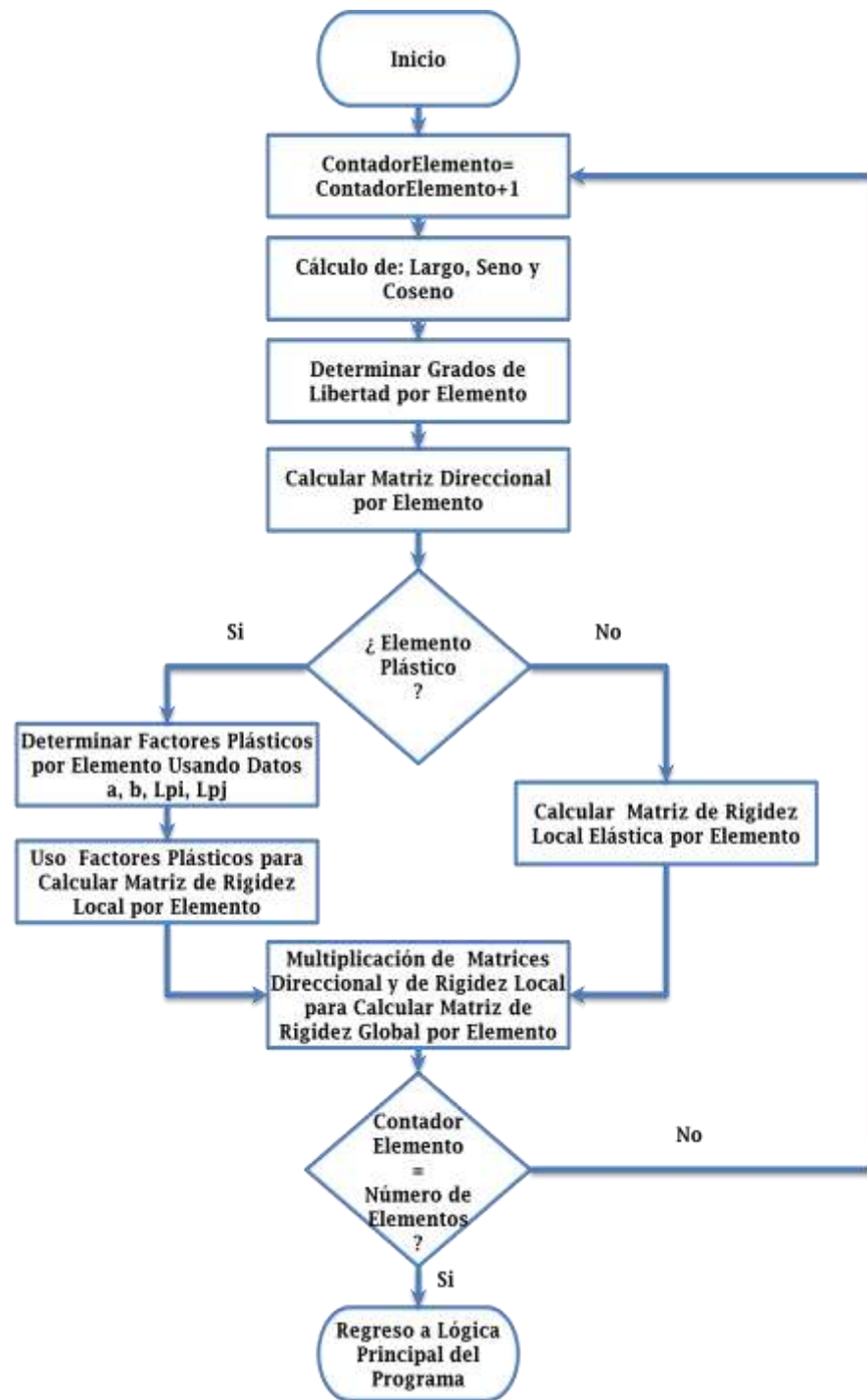


Figura 21: Diagrama de Flujo para la Construcción de la Matriz Direccional y la Matriz de Rigidez Global por Elemento

identificado previamente como plástico o no durante la ejecución del programa.

Esta investigación está centrada en la utilización del **Método de Darvall** para obtener los valores de las variables k_{pp} , k_{pq} , k_{qp} y k_{qq} a fin de poder generar la Matriz de Rigidez Local Plástica por Elemento. La aplicación de este modelo fue descrita en la sección 3.1.1.3 de este capítulo.

Una vez creada la Matriz de Rigidez Local por Elemento, ya sea elástica o plástica, se procede a multiplicar la misma por la Matriz Direccional. Como resultado de esta multiplicación se obtiene la Matriz de Rigidez Global por Elemento. Una vez se completan las iteraciones para cada uno de los elementos se devuelve el control del programa a la lógica principal.

2) Construcción de la Matriz de Rigidez Global de la Estructura

Las dimensiones de la Matriz de Rigidez Global de la Estructura " K_g " serán ($nM \times 3$, $nM \times 3$) donde " nM " es el total de nodos en la estructura y son tres los grados de libertad en cada nodo. Luego de inicializar a cero todos los componentes de la matriz " K_g " a ser generada se inicia un proceso iterativo que ejecutará tantas veces como elementos tenga la estructura. La función de este proceso es concatenar todas las matrices de rigidez globales por elemento que fueron construidas durante el proceso anterior a este. Una vez obtenida la Matriz de Rigidez Global de la Estructura se devuelve el control del programa a la lógica principal. La Figura 22 presenta un Diagrama de Flujo que ilustra el algoritmo utilizado para la construcción de la Matriz de Rigidez Global de la Estructura.

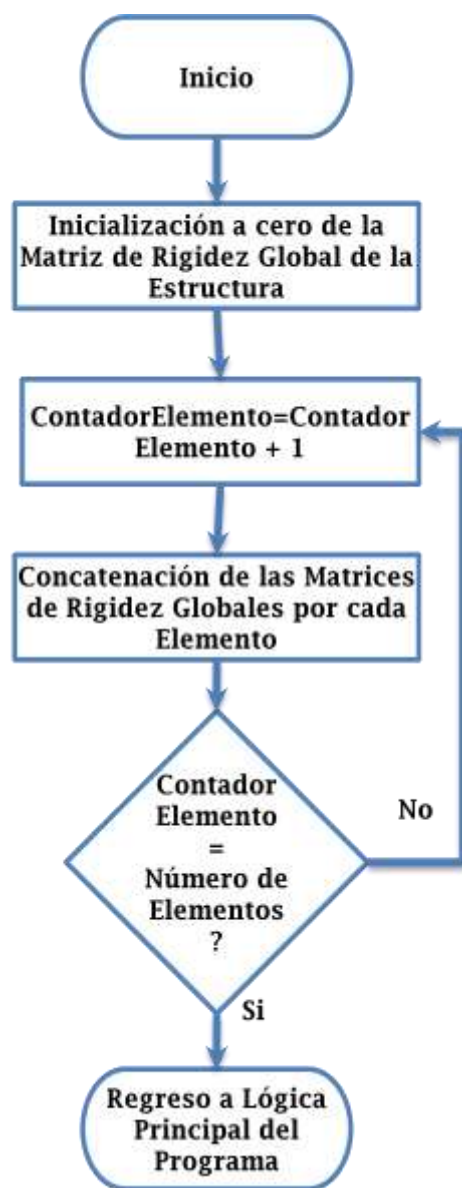


Figura 22: Diagrama de Flujo para la Construcción de la Matriz de Rigidez Global de la Estructura

3) Construcción del Vector de Fuerza Global

En este momento de la ejecución del Sistema SEPA, el Vector Global de Fuerzas "F" que se obtiene como resultado de este proceso tendrá algunos componentes con valores conocidos y otros con valores desconocidos según se explicó en el paso número 4 de la sección 3.1.2.1.1. Es por esta razón que se identifica el mismo como "Inicial". El tamaño de este vector corresponderá a los grados de libertad que tenga la estructura. Luego de inicializar a cero todos los componentes del vector comienza un proceso iterativo que ejecutará tantas veces como nodos tenga la estructura. Durante el proceso se añaden al vector las fuerzas nodales (F_x , F_y , M_z) aplicadas, si alguna. Así también, se dejan en cero aquellos componentes que correspondan a nodos que no sean soporte y a nodos que no se les apliquen incrementos en desplazamientos nodales. Una vez obtenido el Vector Global de Fuerzas Inicial "F" se devuelve el control del programa a la lógica principal.

La Figura 23 presenta un Diagrama de Flujo que ilustra el algoritmo utilizado para la creación del Vector Global de Fuerzas Inicial.

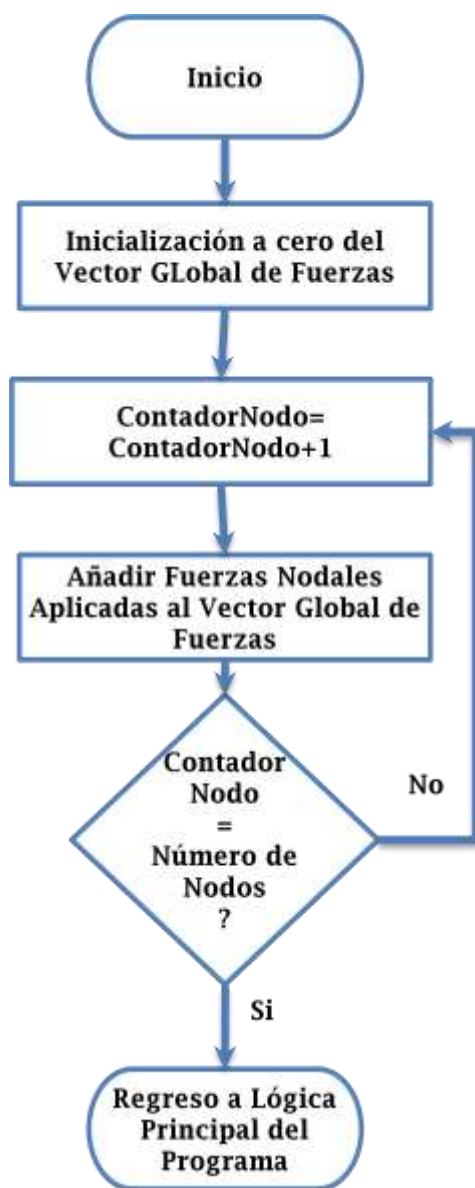


Figura 23: Diagrama de Flujo para la Creación del Vector Global de Fuerzas Inicial

4) Aplicación de Incrementos en Desplazamientos o Fuerzas según Distribución

Cuando el control del programa entra a este proceso por primera vez se comienza con un desplazamiento inicial igual cero o con una fuerza inicial igual a cero. En iteraciones subsiguientes se va acumulando el incremento entrado por el usuario. Este desplazamiento o fuerza inicial fue designado como "VirtualDesp_Force". El sistema identifica automáticamente aquellos nodos a los cuales les aplicará el incremento. Los mismos aparecen identificados con "TRUE" y corresponden a los nodos de la izquierda de la estructura en dirección del eje de "x", excepto los que son soporte. El procesamiento interno de esta rutina ejecutará tantas veces como nodos se hayan identificado para que les aplique el incremento en desplazamiento o en fuerza corriente que este almacenado en la variable "VirtualDesp_Force".

La Figura 24 presenta un Diagrama de Flujo que ilustra el algoritmo utilizado para la Aplicación del Incremento en Desplazamientos o en Fuerzas según la Distribución Porcentual entrada por el usuario. Cabe señalar que esta rutina será invocada mientras la estructura no colapse.

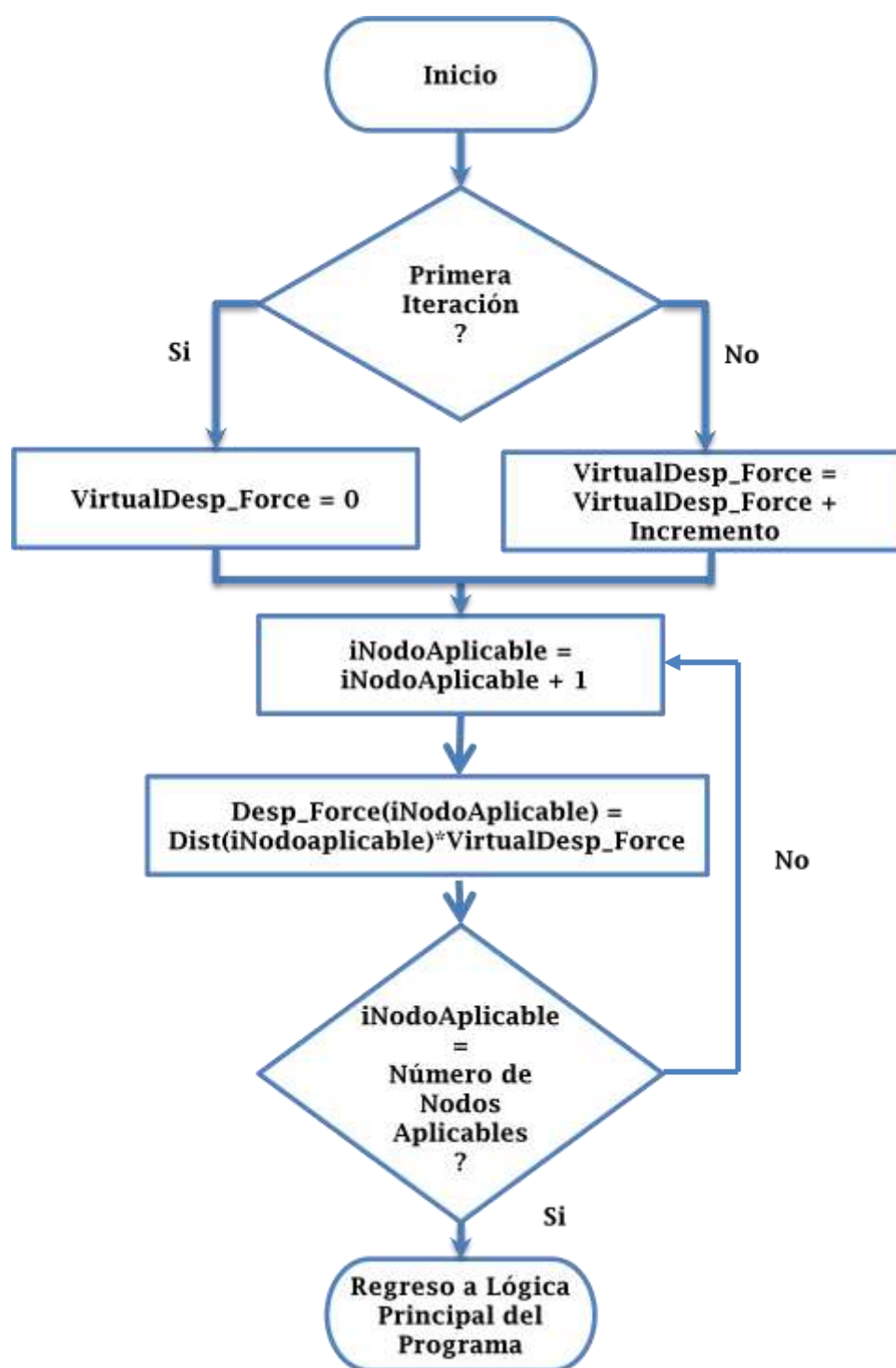


Figura 24: Diagrama de Flujo para la Aplicación del Incremento en Desplazamientos o Fuerzas según la Distribución Porcentual entrada por el usuario

La Figura 25 ilustra un ejemplo de los nodos que el sistema ha identificado para que les aplique el incremento en desplazamiento o en fuerzas.

Nodes										
Number	Coordinates		Restrains			Nodal Forces			Properties	
	X	Y	d_x	d_y	Φ_z	F_x	F_y	M_z	Disp. Application Node	Monitor Node
1	0	0	1	1	1				FALSE	FALSE
2	20	0	1	1	1				FALSE	FALSE
3	0	12	0	0	0				TRUE	FALSE
4	20	12	0	0	0				FALSE	FALSE
5	0	24	0	0	0				TRUE	TRUE
6	20	24	0	0	0				FALSE	FALSE

Figura 25: Nodos identificados para aplicación de Incremento en Desplazamientos o en Fuerzas.

El ejemplo muestra en color amarillo dos nodos a los cuales les aplicará el incremento en desplazamientos o en fuerzas. Esto significa que, de acuerdo al ejemplo, este proceso ejecutaría internamente dos veces. A cada uno de los nodos identificados se le adjudicará un desplazamiento o fuerza equivalente a la multiplicación del contenido corriente de la variable "VirtualDesp_Force" por la distribución porcentual entrada por el usuario en el piso donde ubica el nodo en proceso. Una vez adjudicados los desplazamientos o fuerzas calculados a los nodos correspondientes se devuelve el control del programa a la lógica principal.

5) Construcción del Vector de Desplazamiento Global

Este procedimiento pretende construir un Vector de Desplazamientos Inicial "U" que tendrá tantos componentes como grados de libertad tenga la estructura. Al terminar el

proceso, el vector "U" tendrá unos componentes con valor asignado y otros con valores desconocidos según se indicó en la sección anterior 3.1.2.1.1. La ejecución comienza inicializando el vector "U" a cero, esto es, asignando a todos sus componentes un valor inicial igual a cero. Luego se entra en un proceso iterativo que se ejecutará tantas veces como nodos tenga la estructura. Durante cada iteración se decide si el nodo corriente es uno de los identificados para aplicar incrementos en desplazamiento (véase ejemplo en Figura 25). De ser así, entonces se aplicará el incremento en desplazamiento calculado en el paso número 4. De lo contrario, el componente corriente permanecerá con el valor igual a cero adjudicado previamente.

Aunque el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 26 no lo muestra, si el incremento que se está procesando corresponde a fuerzas, entonces se toma el Vector Global de Fuerzas Inicial "F" creado en el paso número 4 para aplicar dicho incremento a los nodos previamente identificados para ello. En este caso, los componentes correspondientes a esos mismos nodos en el Vector Global de Desplazamientos "U" permanecerían con el valor inicial de cero.

Una vez creado el Vector Global de Desplazamientos Inicial "U" o alterados los componentes del Vector Global de Fuerzas Inicial "F" según se explicó anteriormente, se devuelve el control del programa a la lógica principal. La Figura 26 presenta un Diagrama de Flujo que ilustra el algoritmo utilizado para la creación del Vector Global de Desplazamientos Inicial de la Estructura.

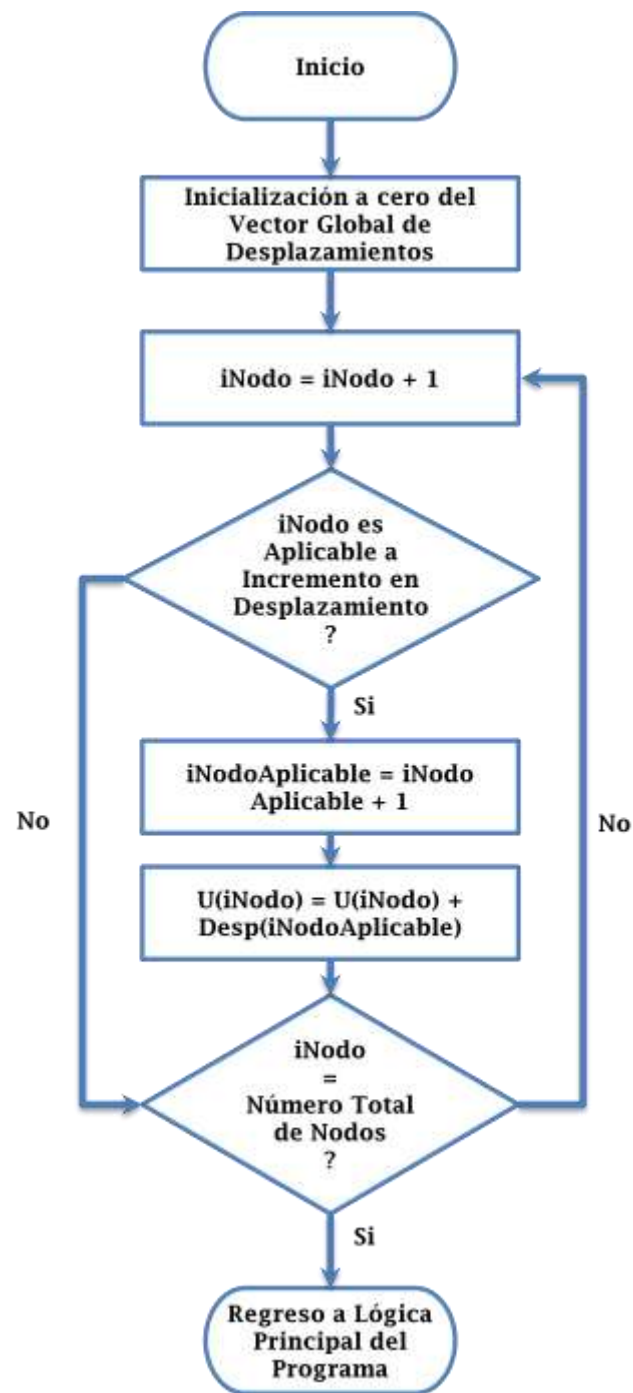


Figura 26: Diagrama de Flujo para la creación del Vector Global de Desplazamientos Inicial de la Estructura

6) Cálculo de la Estructura

Antes de comenzar a detallar el algoritmo utilizado en este proceso, denominado como "Cálculo de la Estructura", se ofrece una breve explicación del funcionamiento del "Método de Partición" mencionado previamente en la sección 3.1.2.1.1. Este método se usa para hallar el valor de fuerzas desconocidas a través de desplazamientos conocidos. Cabe señalar que en los pasos número 3 y número 5 de esta sección se crearon dos vectores: el Vector de Fuerzas Globales Inicial "F" y el vector de Desplazamientos Globales Inicial "U". Ambos vectores incluyen componentes conocidos y desconocidos previos a entrar en este proceso.

El sistema de ecuaciones a resolverse mediante el Método de Partición es como sigue:

$$\begin{bmatrix} F_p \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{ps} \\ K_{sp} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

donde F_p y U_p representan las fuerzas aplicadas conocidas y los correspondientes desplazamientos nodales desconocidos. Las reacciones desconocidas y los correspondientes desplazamientos conocidos están representados por F_s y U_s respectivamente. Para resolver el sistema de ecuaciones es necesario expandirlo reordenando filas y columnas para obtener el siguiente resultado:

$$\{F_p\} = [K_{pp}]\{U_p\} + [K_{ps}]\{U_s\} \quad (12)$$

$$\{F_s\} = [K_{sp}]\{U_p\} + [K_{ss}]\{U_s\} \quad (13)$$

En este caso los valores conocidos del vector de desplazamientos U_s no son todos iguales a cero. Por lo tanto no se puede eliminar este término de la ecuación (1) y la misma se resuelve para los desplazamientos desconocidos U_p :

$$U_p = K_{pp}^{-1}(F_p - K_{ps} U_s) \quad (14)$$

Luego de conocer el valor de los desplazamientos desconocidos U_p , se hace una sustitución de éste en la ecuación (2) para hallar el valor de las fuerzas desconocidas F_s :

$$F_s = K_{sp} U_p + K_{ss} U_s \quad (15)$$

El proceso de cálculo de la estructura, al igual que el anterior, ocurre cíclicamente hasta el colapso de la estructura. El mismo necesita tres parámetros para ejecutar: El Vector de Desplazamientos Global Inicial "U" de la Estructura creado en el paso anterior, el Vector de Fuerzas Global Inicial "F" de la Estructura creado en el paso número tres y la Matriz de Rigidez Global de la Estructura "Kg" creada en el paso número dos, la cual puede ser elástica o plástica.

El proceso comienza determinando los índices correspondientes a los grados de libertad con desplazamientos conocidos ("S_indexes") en el vector de Desplazamientos Global "U". Luego se determinan los índices correspondientes a los grados de libertad con fuerzas conocidas ("P_indexes") en el vector de Fuerzas Global "F". Aunque el diagrama de flujo en la Figura 27 no lo muestra, también se determinan los índices de los grados de libertad correspondientes a los nodos que son soporte ya que se utilizarán para la reconstrucción final de los vectores de Fuerzas "F" y Desplazamientos "U". Se utilizan todos estos índices conjuntamente con la Matriz de Rigidez Global de la estructura "Kg" para montar el sistema de ecuaciones a ser resuelto mediante el Método de Partición.

$$\begin{bmatrix} F_p \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{ps} \\ K_{sp} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

Una vez montado el sistema de ecuaciones se procede a resolver el mismo a fin de hallar las fuerzas desconocidas partiendo de desplazamientos conocidos siguiendo los pasos según el método de partición descrito previamente.

El cálculo de la estructura es el proceso que reconstruye los vectores globales de fuerzas "F" y desplazamientos "U" de la estructura, a fin de que ambos vectores tengan todos sus valores conocidos. Si el usuario decidió entrar incrementos en los desplazamientos, entonces se utiliza el método de partición para reconstruir el vector "F" a partir del vector "U". De lo contrario, si el usuario optó por entrar incrementos en fuerzas, entonces se reconstruye el vector "U" a partir del vector "F" utilizando la matriz de flexibilidad. Una vez completado el proceso se devuelve el control del programa a la lógica principal.

La Figura 27 presenta un Diagrama de Flujo que ilustra el proceso para el cálculo de la estructura mediante el método de partición cuando aplica el control por desplazamientos. La Figura 28 presenta el Diagrama de Flujo que ilustra el proceso cuando aplica el control de fuerzas.

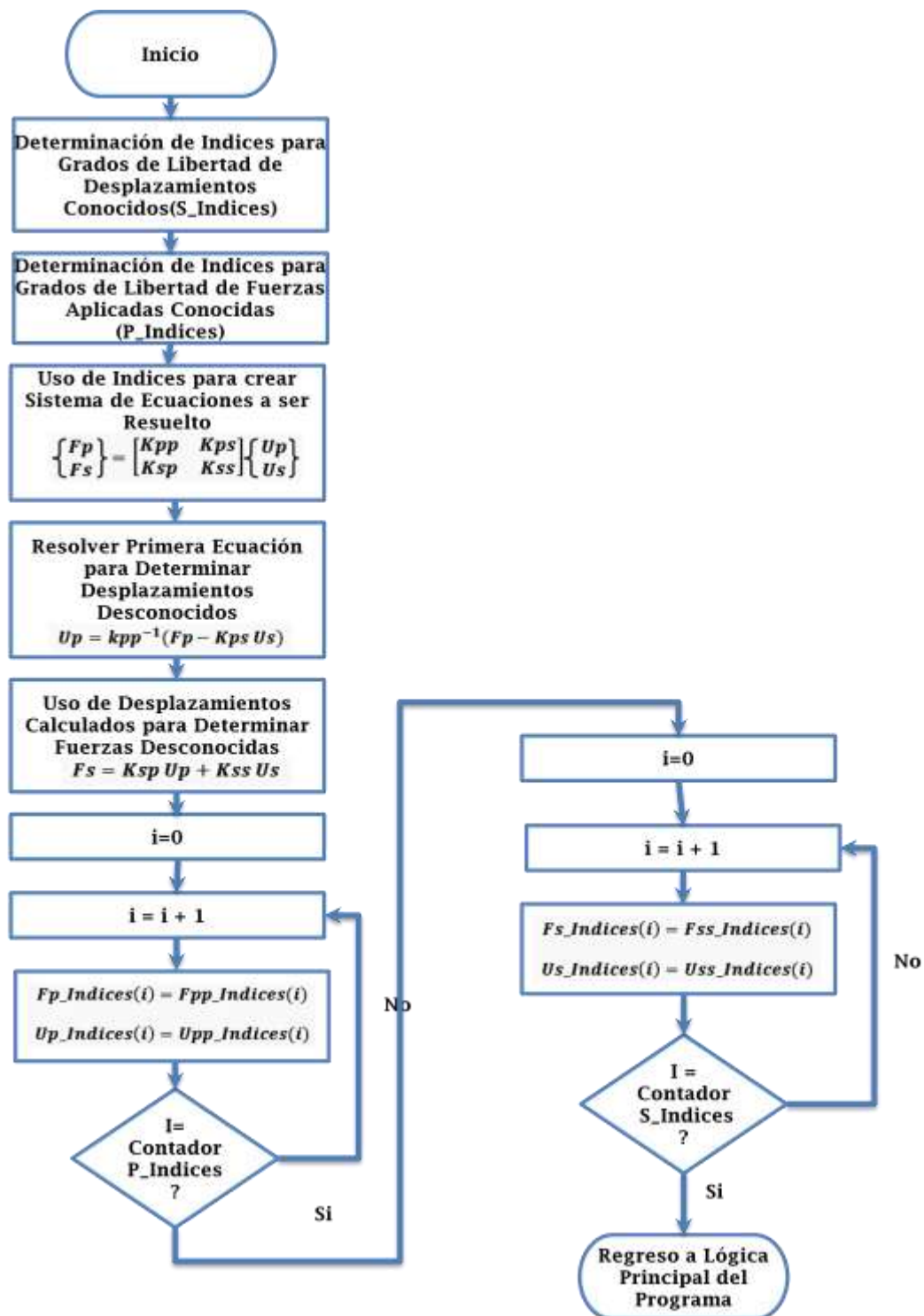


Figura 27: Diagrama de Flujo para Cálculo de la Estructura Mediante el Método de Partición al Aplicar Control por Desplazamientos

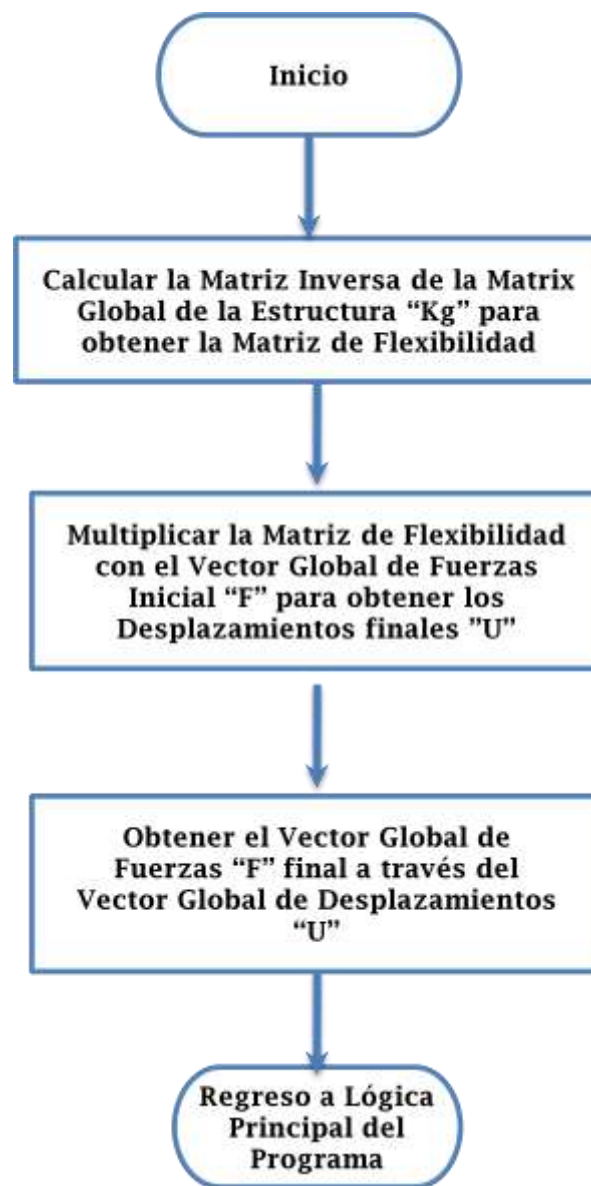


Figura 28: Diagrama de Flujo para Cálculo de la Estructura al Aplicar el Control de Fuerzas

7) Cálculo de Fuerzas por Elemento

Este es un proceso iterativo que pretende crear tantos vectores de fuerzas como elementos tenga la estructura. Por lo tanto, la cantidad de iteraciones corresponderá al total de elementos en la estructura. Cada vector de fuerza "P" aquí creado tendrá seis componentes equivalentes a los grados de libertad que posee todo elemento.

En primer lugar se toman los grados de libertad del elemento corriente y se extraen los desplazamientos nodales globales por elemento " u_{elemento} " del vector de Desplazamientos "U" de la Estructura creado en el paso anterior. Luego, se multiplica este vector por la Matriz de Rigidez Local del Elemento " K_e " y por la Matriz Direccional " β ", ambas creadas en el paso número 1 de esta sección, para obtener el vector de fuerzas "P" por elemento.

$$\{P\} = [k_e][\beta]\{U_{\text{elemento}}\} \quad (17)$$

Con esta información el sistema puede decidir si se obtiene o no una nueva articulación plástica. Para tomar esta decisión se comparan los Momentos Plásticos "Mp+" o "Mp-" entrados inicialmente por el usuario con los momentos que trae el Vector de Fuerzas "P" recién creado. Si la magnitud de los momentos en el vector "P" es mayor o igual a la magnitud de los momentos entrados por usuario, entonces se concluye que existe una articulación plástica y, por lo tanto, se identifica al elemento como uno plástico. Si el elemento corriente plastifica, entonces se transfiere en control de lógica del programa al siguiente paso. De lo contrario, se verifica si hay o no colapso de la estructura. Además,

este proceso tiene la capacidad de retener el número de cada elemento y la posición (inicial o final) según el orden en que se van detectando nuevas articulaciones plásticas.

Para determinar si la estructura colapsa o no, se utiliza el concepto de *Curvatura Ultima* " ϕ_u ", el cual es calculado automáticamente por el sistema según el proceso que se describe en la sección 4.3.1.1. Se utilizan los momentos de cada vector de fuerzas "P" recién creado para calcular las curvaturas " ϕ " correspondientes a cada elemento para ambos extremos, inicial y final, respectivamente.

$$\phi_i = \frac{M_i}{aEI} \quad (18)$$

y

$$\phi_j = \frac{M_j}{bEI} \quad (19)$$

Estas curvaturas se van acumulando por cada iteración. El acumulado corriente se compara con la curvatura última " ϕ_u " previamente calculada. Si el acumulado de curvaturas corriente es mayor o igual a la curvatura última, entonces se concluye que la estructura ha colapsado. Si no hay colapso, entonces se continúan aplicando incrementos en desplazamientos o fuerzas, según sea el caso, hasta lograr el colapso de la estructura y terminar la ejecución del Sistema SEPA.

La Figura 29 presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso para calcular el vector de fuerzas por elemento.

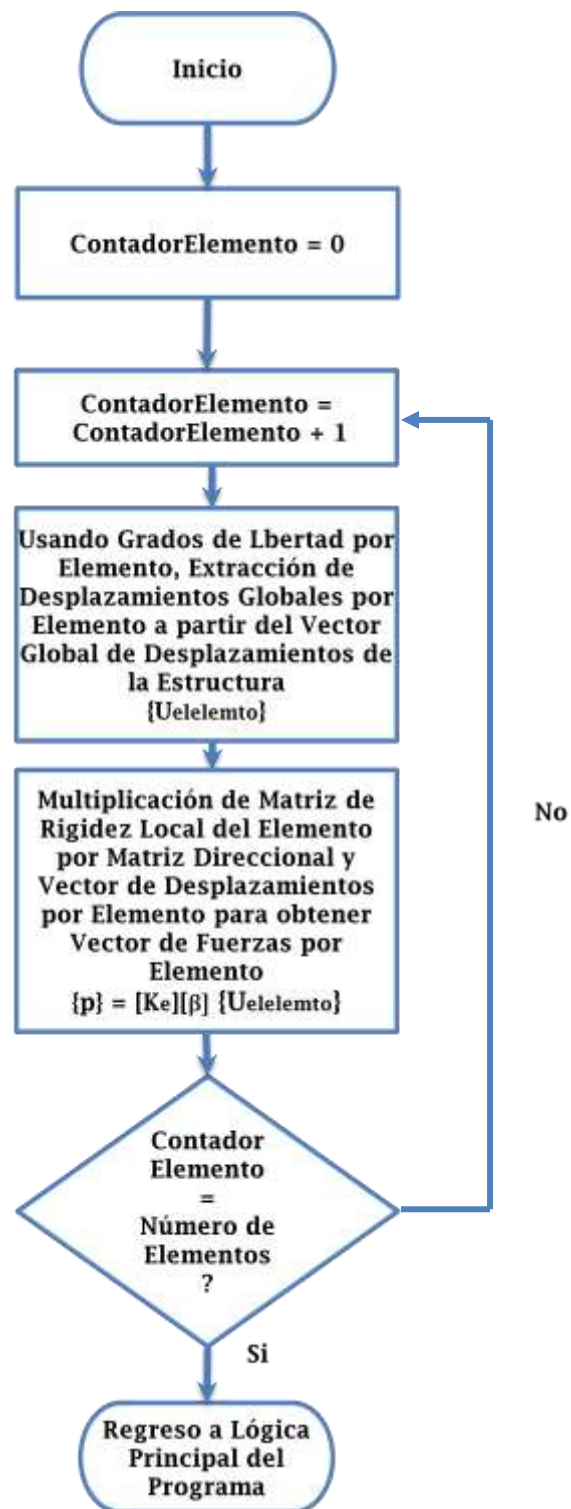


Figura 29: Diagrama de Flujo para el Cálculo de las Fuerzas por Elemento

8) Fuerzas y Desplazamientos Acumulados por Elemento

Este proceso se ejecutará cada vez que se detecte una nueva articulación plástica. El objetivo principal del mismo es generar nuevos vectores de Fuerzas " P_{acum} " y Desplazamientos " U_{acum} " sumando iterativamente los valores correspondientes a estos mismos vectores según salen del proceso anterior a este. Cabe señalar nuevamente que solo se sumarán los vectores que correspondan a los elementos que hayan plastificado.

Según se indicó en la sección 3.1.2.1.1, la otra función de este proceso es calcular el acumulado del cortante basal "ABS". Esto ocurre a través de un proceso iterativo interno que pasa por todos los nodos de la estructura. El proceso determina si el nodo corriente es o no un nodo de soporte. Si el mismo es un soporte, entonces se acude al Vector de Fuerzas Global Final "F" que se generó en el paso número 6. De este vector se extraen las fuerzas correspondientes a ese nodo y se acumulan en una variable "BS" denominada como "Cortante Vasal". Cada vez que se detecte un nodo como soporte se van acumulando estas fuerzas en la variable "BS". Debido a que todo esto ocurre iterativamente cada vez que aparece una nueva articulación plástica, se crea la variable "ABS" con el propósito de ir acumulando todos los cortantes basales "BS" que se generen en cada iteración. Finalmente, se utiliza la variable "ABS", cuyo contenido es el total acumulado del cortante basal, para generar la gráfica de "Push-Over".

La Figura 30 presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso para calcular las fuerzas y desplazamientos acumulados.

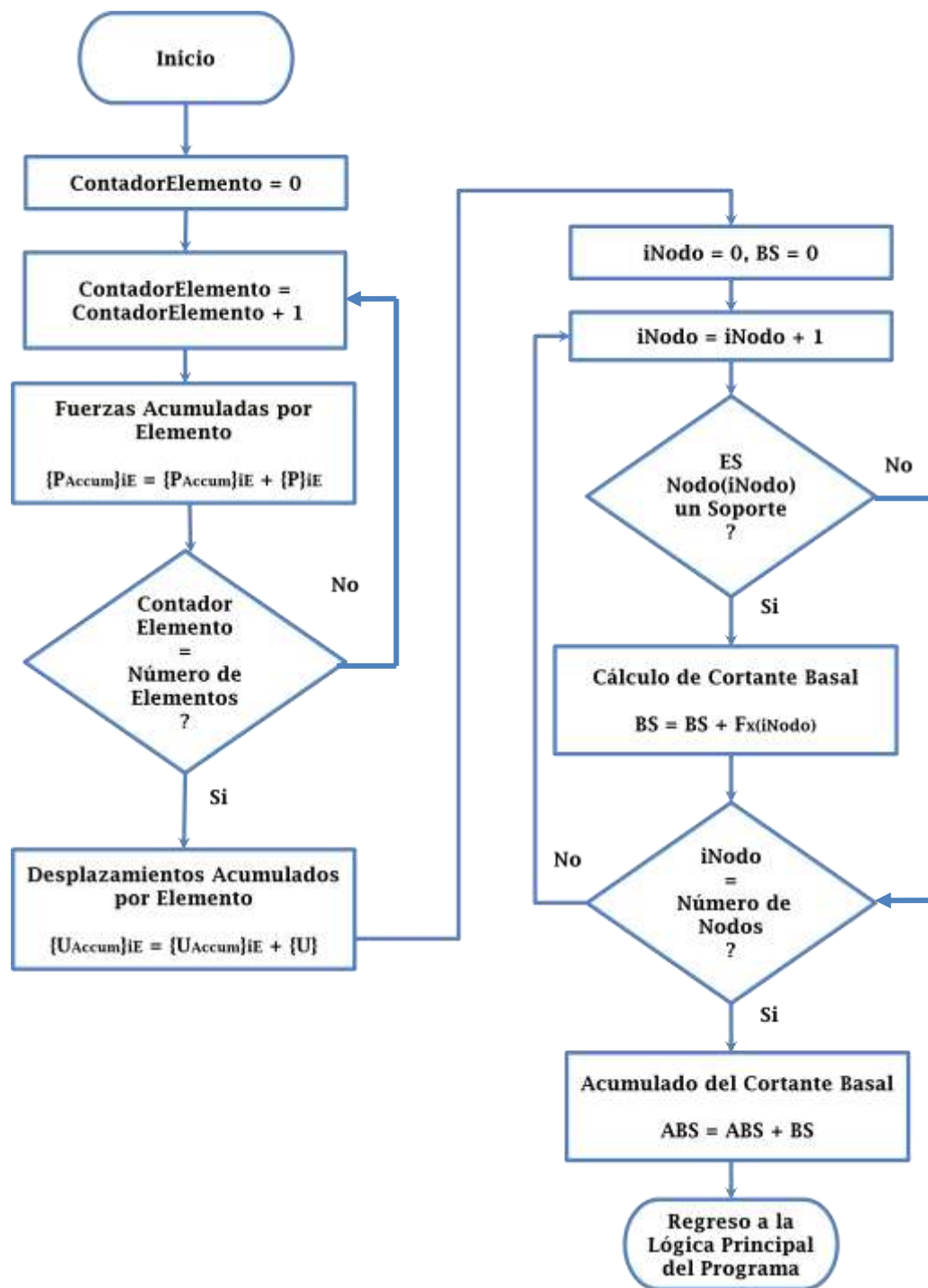


Figura 30: Diagrama de Flujo que Ilustra el Proceso del Cálculo de Fuerzas y Desplazamientos Acumulados

3.1.3 INFORMACIÓN RELEVANTE AL USUARIO

3.1.3.1 INTERFAZ CON EL USUARIO

Aunque se asume que los usuarios de este sistema serán ingenieros estructurales, se hace necesario lograr que la entrada de datos sea lo más amigable posible. Para ello se crearon tres pantallas que facilitan este proceso: "Selección de Control" ("Control Selection"), "Datos de la Estructura" ("Structure Data") y "Parámetros Fuerza-Desplazamiento" ("PushOver Parameters"). La pantalla "Selección de Control" se activa cuando el usuario oprime el botón "Analyze" en la hoja de trabajo "Datos de la Estructura", ilustrada más adelante en la Figura 35. Esta pantalla fue diseñada para que el usuario pueda seleccionar el que el análisis se realice controlando los desplazamientos o controlando las fuerzas. Las otras dos pantallas se activan cuando el usuario oprime los botones "Nueva Estructura" ("New Structure") y "Edición de la Distribución de Desplazamientos" ("Edit Disp.Dist.") en la hoja de trabajo "Datos de la Estructura" ("Structure Data"). Cabe señalar que el usuario debe ser consistente en las unidades de medida al momento de entrar los datos. Además, el programa realiza algunas validaciones internas básicas sobre las variables a ser entradas. Esta aplicación exige que se coteje que todos los datos sean numéricos, entre otras validaciones adicionales que son particulares a cada variable. Esto reduce la posibilidad de errores en los resultados a fin de que los mismos salgan con la mayor precisión y exactitud posible. Las Figuras 32, 33 y 34 ilustran las tres pantallas que se incluyen en el Sistema SEPA para permitir la entrada de datos. Las mismas presentan los datos entrados correspondientes al ejemplo del pórtico ilustrado en la Figura 31.

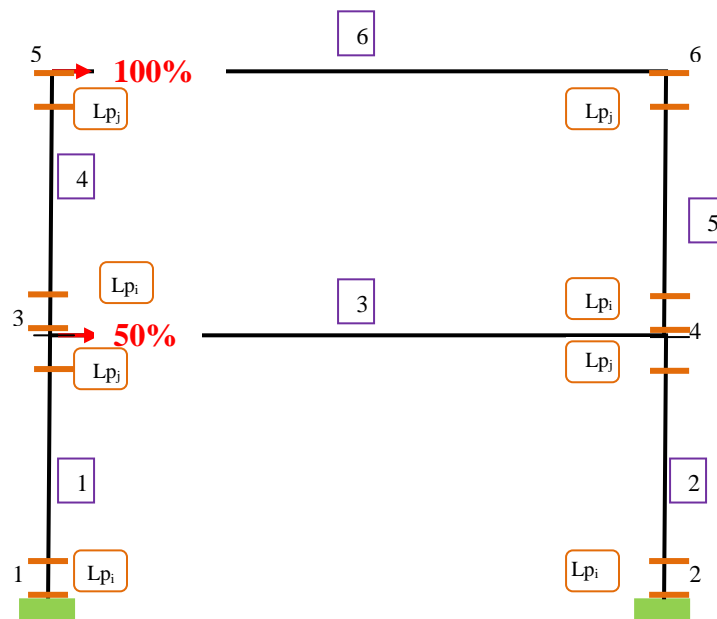


Figura 31: Ejemplo de un Pórtico y su Nomenclatura

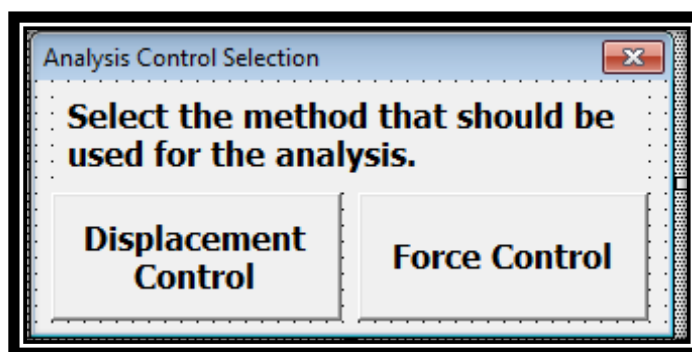
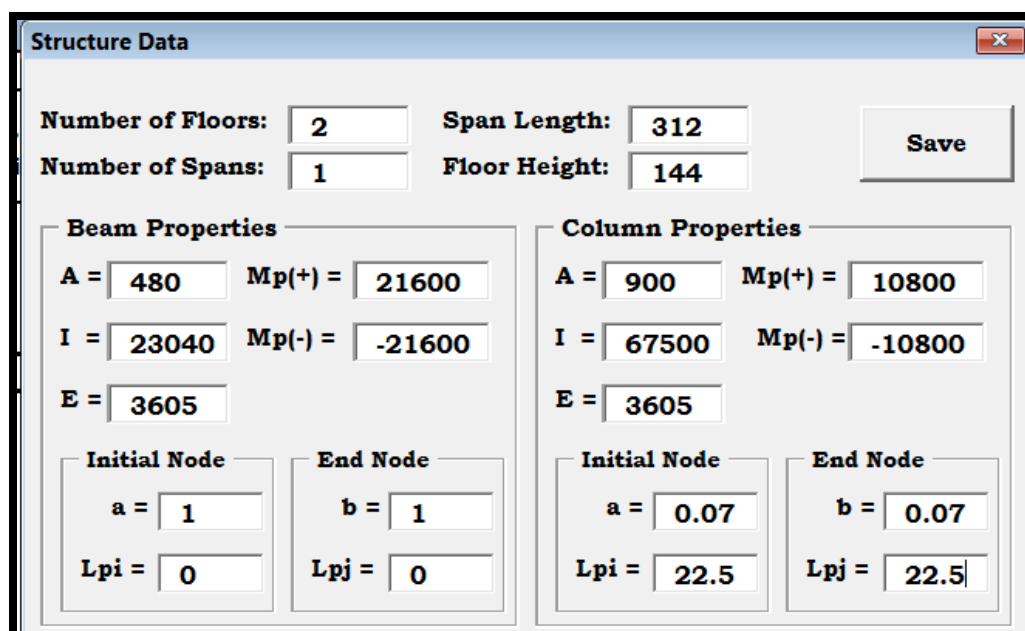


Figura 32: Pantalla para controlar el análisis a realizarse por Desplazamientos o por Fuerzas



Structure Data

Number of Floors: Span Length:

Number of Spans: Floor Height:

Beam Properties

A = Mp(+) =

I = Mp(-) =

E =

Initial Node: a = End Node: b =

Lpi = Lpj =

Column Properties

A = Mp(+) =

I = Mp(-) =

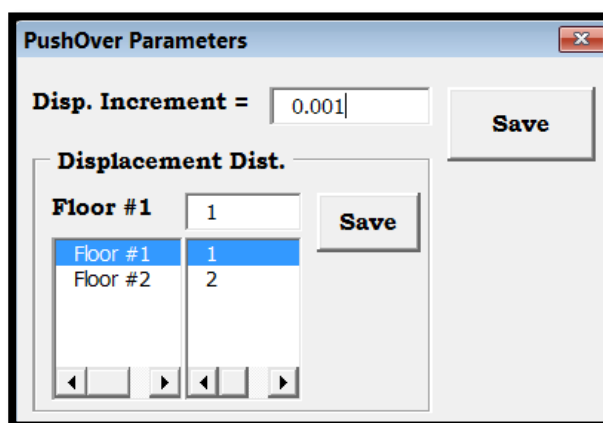
E =

Initial Node: a = End Node: b =

Lpi = Lpj =

Save

Figura 33: Pantalla para Entrar los Datos que Describen la Estructura a ser Evaluada por el Sistema SEPA



PushOver Parameters

Disp. Increment =

Displacement Dist.

Floor #1	
Floor #1	1
Floor #2	2

Save

Figura 34: Pantalla para Entrar los Parámetros a ser Utilizados para el Análisis de “Push-Over”

Las variables que definen la estructura según la Tabla 1 con las correspondientes validaciones internas realizadas por el programa para garantizar la pureza de los datos a ser entrados. Posteriormente, en la Tabla 2 se describen los parámetros utilizados según la Figura 34.

Tabla 1: Descripción de Variables que definen la estructura a ser evaluada por el Sistema SEPA

<i>VARIABLE</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>VALIDACION INTERNA</i>
Number of Floors	Cantidad de Pisos	$n > 0$
Number of Spans	Cantidad de "Spans"	$n > 0$
Span length	Longitud de "Span"	$n > 0$
Floor Height	Altura de Pisos	$n > 0$
A	Area Seccional(aplicable a vigas y columnas)	$n > 0$
I	Momento de Inercia(aplicable a vigas y columnas)	$n > 0$
E	Módulo de Elasticidad(aplicable a vigas y columnas)	$n > 0$
Mp(+)	Momento Plástico Positivo(aplicable a vigas y columnas)	$n > 0$
Mp(-)	Momento Plástico Negativo (aplicable a vigas y columnas)	$n > 0$
a	Pendiente Plástica Nodo Inicial(aplicable a vigas y columnas)	*
b	Pendiente Plástica Nodo Final(aplicable a vigas y columnas)	*
Lpi	Longitud Articulación Plástica-Nodo Inicial(aplicable a vigas y columnas)	$n \geq 0$
Lpj	Longitud Articulación Plástica-Nodo Final(aplicable a vigas y columnas)	$n \geq 0$

* La única validación que se hace de las pendientes "a" y "b" es que ambas sean numéricas ya que lo que distingue a este programa de otros es que permite la entrada de pendientes negativas.

Tabla 2: Descripción de Variables utilizadas como parámetros para el análisis de "Push-Over"

<i>VARIABLE</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>VALIDACION INTERNA</i>
Increment	Incremento Deseado para Evaluar Desplazamientos o Fuerzas	$n > 0$
Floor #	Número de Piso	$n > 0$
Disp/Force Dist.	Distribución de Desplazamientos o Fuerzas por Piso	$n > 0$

3.1.3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA SEPA

A) Programación en VBA

El Sistema SEPA se compone de cuatro módulos independientes que se integran totalmente durante su ejecución. A continuación se describen brevemente los cuatro módulos que componen la aplicación:

1) *Módulo para el manejo de vectores ("arrays")*: Este módulo incluye funciones para definir las dimensiones de un vector, copiar vectores de una posición a otra, convertir vectores de una dimensión a otra, convertir vectores a matrices y viceversa, convertir vectores numéricos a alfanuméricos entre muchas otras funciones relacionadas a vectores, las cuales se invocan continuamente durante la ejecución del programa.

2) *Módulo para el manejo de matrices*: El objetivo principal de este módulo es resolver cualquier sistema de ecuaciones lineales cuya forma matemática es como sigue: $[M] \cdot \{x\} = \{b\} \rightarrow \{x\} = [M]^{-1} \cdot \{b\}$. Además, se incluyen funciones para realizar todo tipo de operaciones con matrices, tales como: transposición, multiplicación y suma de matrices, entre otras.

3) *Módulo para el manejo de funciones plásticas*: En este módulo se utilizan los parámetros entrados por el usuario para el análisis plástico, tales como: Pendientes en la porción plástica para los nodos iniciales y finales "a" y "b" respectivamente, y las longitudes de las articulaciones plásticas para los nodos iniciales y finales "Lpi" y "Lpj" respectivamente, entre muchos otros que se calculan automáticamente durante la ejecución del programa. Aquí se crean los Coeficientes de Darvall necesarios para la construcción de las matrices de rigidez por elemento requeridas para el análisis plástico de la estructura.

4) *Lógica principal del programa*: Este módulo es el que lleva el control total de la ejecución del Sistema SEPA. Desde este módulo se invocan continuamente rutinas que aparecen en los módulos descritos anteriormente. La comunicación entre un módulo y otro se establece a través del paso de parámetros o valores existentes en la memoria del computador. Estos parámetros pueden transferirse de un módulo a otro por valor o por referencia. Se dice que un parámetro pasa por valor a otro módulo o rutina si su valor original no es alterado dentro del módulo. Por el contrario, cuando el parámetro pasa por referencia su valor puede cambiar luego de la ejecución del módulo o rutina. Una vez cada módulo termina su ejecución devuelve los resultados a la lógica principal del programa o al módulo que lo invocó.

La funcionalidad de la aplicación SEPA reside en este módulo ya que aquí se ejecutan las funciones principales, tales como: entrada de datos, creación de vectores de desplazamientos y de fuerzas, creación de matrices de rigidez globales o por elemento, impresión de resultados, identificación del orden en que plastifican los elementos hasta el

colapso de la estructura y la construcción de la gráfica de "push-over", entre muchas otras funciones.

B) Hojas de Trabajo en Excel

La aplicación cuenta con *cinco* hojas de trabajo en Excel, las cuales se generan automáticamente durante la ejecución del programa. Estas hojas son las siguientes: "*Datos de la Estructura*" ("Structure Data"), "*Datos de Momento-Curvatura*" ("Moment Curvature Data"), "*Resultados*" ("Results"), "*Detalle del Análisis*" ("Analysis Detail") y "*Detalle del Análisis por Elemento*" ("Member Analysis Detail"). En la hoja de trabajo "Datos de la Estructura" el usuario ejecuta el programa presionando tres botones provistos para ello. El primero de estos botones aparece identificado como "*Nueva Estructura*" ("New Structure"). Este es el que activa la pantalla para entrar los datos que definen la estructura a ser analizada. El segundo botón, identificado como "*Edición de la Distribución de Desplazamientos*" ("Edit Disp. Dist."), activa la pantalla para entrar el incremento deseado en los desplazamientos o fuerzas y la distribución por piso de dicho incremento. El tercer botón identificado como "*Análisis*" ("Analyze") es el que ejecuta el proceso de análisis elasto-plástico de la estructura. Este botón también le permite al usuario seleccionar si desea que el análisis estructural se realice por control de desplazamientos o por control de fuerzas. La Figura 35 presenta los tres botones en la hoja de trabajo "Datos de la Estructura" que permiten al usuario iniciar la ejecución del Sistema SEPA, los cuales fueron mencionados en la parte "A" de esta sección. Además, esta figura ilustra los datos correspondientes al ejemplo del pórtico presentado en la Figura 31.

Structure General Parameters			
Number of Spans	1	Span Length	312.0
Number of Floors	2	Floor Height	144.0
PushOver Parameters			
Disp./Force Growth	0.001	Distribution	
<div>New Structure</div> <div>Edit Disp. Dist.</div> <div>Analyze</div>		Floor	Disp./Force Distribution
		Floor #1	50%
		Floor #2	100%

Nodes										
Number	Coordinates		Restraints			Nodal Forces			Properties	
	X	Y	d _x	d _y	θ _z	F _x	F _y	M _z	Disp./Force Application Node	Monitor Node
1	0.0	0.0	1	1	1				FALSE	FALSE
2	312.0	0.0	1	1	1				FALSE	FALSE
3	0.0	144.0	0	0	0				TRUE	FALSE
4	312.0	144.0	0	0	0				FALSE	FALSE
5	0.0	288.0	0	0	0				TRUE	TRUE
6	312.0	288.0	0	0	0				FALSE	FALSE

Elements											
Number	Connectivity		Properties					Hinges			
	Node _i	Node _j	Area	Inertia	Elastic Modulus	M _{p(+)}	M _{p(-)}	L _{p_i}	L _{p_j}	a	b
1	1	3	900	67500	3605	10800	-10800	22.5	22.5	0.07	0.07
2	2	4	900	67500	3605	10800	-10800	22.5	22.5	0.07	0.07
3	3	4	480	23040	3605	21600	-21600	0	0	1	1
4	3	5	900	67500	3605	10800	-10800	22.5	22.5	0.07	0.07
5	4	6	900	67500	3605	10800	-10800	22.5	22.5	0.07	0.07
6	5	6	480	23040	3605	21600	-21600	0	0	1	1

Figura 35: Ejemplo de la Hoja de Trabajo "Datos de la Estructura" ("Structure Data")

Las hojas de trabajo antes descritas no deben confundirse con las pantallas de entrada. Aunque la mayoría de los datos que se observan en estas hojas de trabajo se generan automáticamente luego de que el usuario hace uso de las pantallas de entrada ya descritas, el sistema permite que se hagan modificaciones manuales sobre ellos. SEPA provee flexibilidad para que el usuario utilice la Hoja de Trabajo en EXCEL “Datos de la Estructura” (“Structure Data”) (Véase Figura 35) para entrar datos adicionales tales como: Fuerzas Nodales Iniciales (F_x , F_y , M_z). Así también, en esta misma hoja de trabajo, el sistema identifica automáticamente los nodos donde se aplicarán desplazamientos o fuerzas así como los nodos a ser monitoreados por el propio sistema.

En la hoja de trabajo “Datos de Momento-Curvatura” se generan automáticamente datos tales como: Momento Plástico, Momento Último, Curvatura de Cedencia, Curvatura justo Luego de Ceder, Curvatura Plástica y Curvatura Ultima, entre otros. Estos datos se generan para ambos extremos de cada elemento. La Figura 36 ilustra la apariencia de esta hoja de trabajo.

En la hoja de trabajo “Resultados” se genera la gráfica de “Push-Over” y se identifica el orden en que plastifican los elementos hasta el colapso de la estructura. La Figura 37 presenta la apariencia de la hoja de trabajo “Resultados”.

Element Number	Element Start															
	Positive Range								Negative Range							
	M_y	M_x	M_{xt}	ϕ_y	ϕ_{y1}	ϕ_{y2}	ϕ_{xt}	ϕ_y	M_y	M_x	M_{xt}	ϕ_y	ϕ_{y1}	ϕ_{y2}	ϕ_{xt}	ϕ_y
1	10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
2	10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
3	21,600.0	0.0	21,600.0	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	0.0000E+00	-21,600.0	0.0	-21,600.0	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	0.0000E+00
4	10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
5	10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
6	21,600.0	0.0	21,600.0	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	0.0000E+00	-21,600.0	0.0	-21,600.0	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	0.0000E+00

Element End															
Positive Range								Negative Range							
M_y	M_x	M_{xt}	ϕ_y	ϕ_{y1}	ϕ_{y2}	ϕ_{xt}	ϕ_y	M_y	M_x	M_{xt}	ϕ_y	ϕ_{y1}	ϕ_{y2}	ϕ_{xt}	ϕ_y
10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
21,600.0	0.0	21,600.0	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	0.0000E+00	-21,600.0	0.0	-21,600.0	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	0.0000E+00
10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
10,800.0	2,000.0	12,800.0	4.4000E-05	5.3000E-05	1.5200E-04	1.6100E-04	1.0800E-04	-10,800.0	-2,000.0	-12,800.0	-4.4000E-05	-5.3000E-05	-1.5200E-04	-1.6100E-04	-1.0800E-04
21,600.0	0.0	21,600.0	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	2.6000E-04	0.0000E+00	-21,600.0	0.0	-21,600.0	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	-2.6000E-04	0.0000E+00

Figura 36: Hoja de Trabajo "Datos de Momento Curvatura" ("Moment Curvature Data").

ID	Shear	Accumulated Shear	Displacement	Accumulated Displacement	Hinges
1	0	0	0	0	None: Elastic Structure
2	192.9083254	192.9083254	0.506	0.506	New Hinge(s) @ Element #1:5
3	9.163061107	202.0713865	0.041	0.547	New Hinge(s) @ Element #2:5
4	50.87316529	252.9445518	0.573	1.12	Structure Collapse

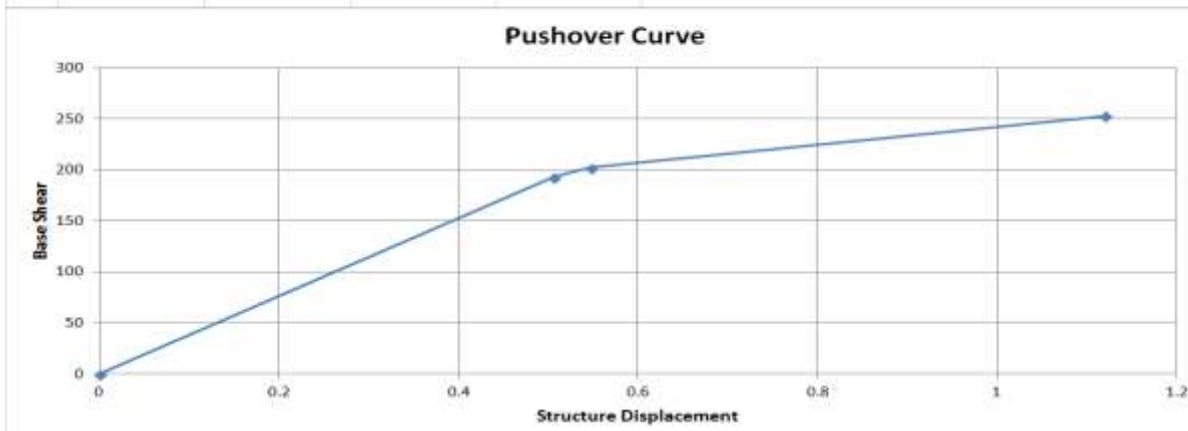


Figura 37: Ejemplo de la Hoja de Trabajo "Resutados" ("Results").

En la hoja de trabajo "Detalle del Análisis" ("Analysis Detail"), a opción del usuario, se imprimen los detalles del análisis, tales como matrices de rigidez, vectores de fuerzas y desplazamientos que se van generando como parte de la ejecución del programa. Si el usuario opta por ver la impresión de estos detalles, entonces el tiempo de ejecución de la aplicación se extenderá unos segundos adicionales. La Figura 38 presenta la apariencia de una porción de la hoja de trabajo "Detalle del Análisis".

For Set of Iterations With No Plastic Elements...																	[U]	{Accum-F}	{Accum-U}
[F]	[K]																		
-102	977.9	0	-70410	0	0	0	-977.9	0	-70410.2	0	0	0	0	0	0	0	0	-102	0
-34.6	0	22531	0	0	0	0	-22531	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-34.6	0
10813	-70410	0	6759375	0	0	0	70410	0	3379688	0	0	0	0	0	0	0	0	10813	0
-91.3	0	0	0	977.9	0	-70410	0	0	0	-977.9	0	-70410.2	0	0	0	0	0	-91.3	0
34.57	0	0	0	0	22531	0	0	0	0	-22531	0	0	0	0	0	0	0	34.57	0
10002	0	0	0	-70410	0	6759375	0	0	0	70410	0	3379688	0	0	0	0	0	10002	0
166.4	-977.9	0	70410.2	0	0	0	7502	0	0	-5546	0	0	-978	0	-70410	0	0	0.253	166.4
0	0	-22531	0	0	0	0	45095	5119.527	0	-32.82	5119.527	0	-22531	0	0	0	0	0.002	0
0	-70410	0	3379688	0	0	0	0	5120	14583612	0	-5120	532430.8	70410	0	3379688	0	0	-0	-0.00207
0	0	0	0	-977.9	0	70410.2	-5546	0	0	7502	0	0	0	0	-978	0	0	0.239	0
0	0	0	0	0	-22531	0	0	-32.82	-5119.53	0	45095	-5119.53	0	0	0	-22531	0	-0	-0.00153
0	0	0	0	-70410	0	3379688	0	5120	532430.8	0	-5120	14583612	0	0	0	70410	0	-0	-0.00203
26.56	0	0	0	0	0	0	-977.9	0	70410.16	0	0	0	6524	0	70410.2	-5546	0	0.506	26.56
0	0	0	0	0	0	0	0	-22531	0	0	0	0	0	22564	5119.53	0	-32.82	0.002	0
0	0	0	0	0	0	0	-70410	0	3379688	0	0	0	70410	5120	7824237	0	-5120	-0	-0.00129
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-977.9	0	70410.16	-5546	0	0	6524	0	0.503	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22531	0	0	-32.82	-5119.5	0	22564	-0	-0.00214
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-70410	0	3379688	0	5120	532431	-0	-0.00141

For Set of Iterations With New Hinge(s) @ Element #1:S...																	[U]	{Accum-F}	{Accum-U}
[F]	[K]																		
-1.84	392.4	0	-12165	0	0	0	-392.4	0	-44342.4	0	0	0	0	0	0	0	0	-103	0
-2.72	0	22531	0	0	0	0	-22531	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-37.3	0
134	-12165	0	926500	0	0	0	12165	0	825246.2	0	0	0	0	0	0	0	0	10947	0
-7.32	0	0	0	977.9	0	-70410	0	0	0	-977.9	0	-70410.2	0	0	0	0	0	-98.7	0
2.72	0	0	0	0	22531	0	0	0	0	-22531	0	0	0	0	0	0	0	37.29	0
806.8	0	0	0	-70410	0	6759375	0	0	0	70410	0	3379688	0	0	0	0	0	10809	0
5.899	-392.4	0	12164.9	0	0	0	6916	0	-26067.8	-5546	0	0	-978	0	-70410	0	0	0.021	172.3
0	0	-22531	0	0	0	0	0	45095	5119.527	0	-32.82	5119.527	0	-22531	0	0	0	1E-04	0
0	-44342	0	825246	0	0	0	-26068	5120	13384291	0	-5120	532430.8	70410	0	3379688	0	0	-0	-0.00221

Figura 38: Fragmento de la Hoja de Trabajo "Detalle del Análisis"

En la hoja de trabajo "Detalle del Análisis por Elemento" ("Member Analysis Detail"), a opción del usuario, se imprimen los detalles del análisis por cada elemento, tales como: matrices de rigidez por elemento, vector de fuerzas y desplazamientos por elemento y vector de fuerzas y desplazamientos acumulados. Estos detalles se van generando iterativamente como parte de la ejecución del programa. La Figura 39 presenta un fragmento de esta hoja de trabajo.

For Set of Iterations With No Plastic Elements...									
For Member#1									
(P)	[K (local)]						(d)	(Accum-P)	(Accum-d)
-34.57	22531	0	0	-22531	0	0	0	-34.57	0
101.6	0	977.9	70410.2	0	-977.9	70410.2	0	101.6	0
10813	0	70410	6759375	0	-70410	3379688	0	10813	0
34.57	-22531	0	0	22531	0	0	0.002	34.57	0.002
-101.6	0	-977.9	-70410.2	0	977.92	-70410.2	-0.25	-101.6	-0.25
3812	0	70410	3379688	0	-70410	6759375	-0	3812	-0
For Member#2									
(P)	[K (local)]						(d)	(Accum-P)	(Accum-d)
34.57	22531	0	0	-22531	0	0	0	34.57	0
91.34	0	977.9	70410.2	0	-977.9	70410.2	0	91.34	0
10002	0	70410	6759375	0	-70410	3379688	0	10002	0
-34.57	-22531	0	0	22531	0	0	-0	-34.57	-0
-91.34	0	-977.9	-70410.2	0	977.92	-70410.2	-0.24	-91.34	-0.24
3151	0	70410	3379688	0	-70410	6759375	-0	3151	-0
For Member#3									
(P)	[K (local)]						(d)	(Accum-P)	(Accum-d)
75.62	5546.2	0	0	-5546	0	0	0.253	75.62	0.253
-20.88	0	32.82	5119.53	0	-32.82	5119.53	0.002	-20.88	0.002
-3269	0	5120	1064862	0	-5120	532431	-0	-3269	-0
-75.62	-5546	0	0	5546.2	0	0	0.239	-75.62	0.239
20.88	0	-32.82	-5119.53	0	32.817	-5119.53	-0	20.88	-0
-3246	0	5120	532431	0	-5120	1064862	-0	-3246	-0

For Set of Iterations With New Hinge(s) @ Element #1-S...									
For Member#1									
(P)	[K (local)]						(d)		
-2.72	22531	0	0	-22531	0	0	0		
1.845	0	392.4	12164.9	0	-392.4	44342.36	0		
134	0	12165	926500	0	-12165	825246.2	0		
2.72	-22531	0	0	22531	0	0	0.00012		
-1.845	0	-392.4	-12164.9	0	392.41	-44342.4	-0.0205		
131.6	0	44342	825246	0	-44342	5560054	-0.0001		
For Member#2									
(P)	[K (local)]						(d)		
2.72	22531	0	0	-22531	0	0	0		
7.318	0	977.9	70410.2	0	-977.9	70410.16	0		
806.8	0	70410	6759375	0	-70410	3379688	0		
-2.72	-22531	0	0	22531	0	0	-0.0001		
-7.318	0	-977.9	-70410.2	0	977.92	-70410.2	-0.0194		
247	0	70410	3379688	0	-70410	6759375	-0.0002		
For Member#3									
(P)	[K (local)]						(d)		
6.046	5546.2	0	0	-5546	0	0	0.0205		
-1.556	0	32.82	5119.53	0	-32.82	5119.527	0.00012		
-235.8	0	5120	1064862	0	-5120	532430.8	-0.0001		
-6.046	-5546	0	0	5546.2	0	0	0.01941		
1.556	0	-32.82	-5119.53	0	32.817	-5119.53	-0.0001		
-249.6	0	5120	532431	0	-5120	1064862	-0.0002		

Figura 39: Fragmento de la Hoja de Trabajo "Detalle del Análisis por Elemento" ("Member Analysis Detail")

CAPÍTULO 4

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 CICLOS HISTERÉTICOS

El término "*histéresis*" es utilizado con diferentes significados en la formulación de teorías con respecto a materiales no lineales. En la ingeniería, el término está representado por deformación o desplazamiento y por el esfuerzo o la fuerza. La mayoría de los sistemas inelásticos se definen por medio de la superficie de cedencia y algunas reglas de endurecimiento. Generalmente se prefiere utilizar el término plástico para describir el comportamiento histerético bajo cargas cíclicas (Capecchi y Felice, 2001). En la ingeniería sísmica frecuentemente se proponen varios modelos analíticos para representar el comportamiento de elementos estructurales. Estos modelos son capaces de describir fenómenos tales como la resistencia y la degradación de la rigidez bajo carga cíclica. El modelo histerético representa una disipación de energía según la estructura se encuentra bajo la carga y la descarga. La Figura 40 muestra un ejemplo del ciclo histerético de una columna sujeta a carga cíclica. En este, según se va disipando la energía a consecuencia de dicha carga, se observa el estado físico de la columna. La Figura 41 ilustra otro ejemplo de un ciclo histerético de una estructura en el cual se muestra una envolvente con pendiente negativa. Esta pendiente representa la degradación de rigidez de la estructura, la cual podría ser como consecuencia de poco confinamiento en las juntas o como consecuencia de efectos de segundo orden. Es decir, si por ejemplo una columna se desplaza de modo tal que queda un poco inclinada ya sea por algún historial de carga o inestabilidad en el suelo, su punto de apoyo en la base ya no estaría en la misma posición que su punto libre al tope de la estructura.

Esto provocaría un momento adicional en la columna y a consecuencia, el ciclo histerético de la misma pudiera estar degradándose de tal forma que provoque igualmente una envolvente negativa. Por el contrario, una envolvente con pendiente positiva, puede representar una estructura dúctil que podría ser a causa de su buen confinamiento en las juntas. SEPA tiene la capacidad para tomar en cuenta ambos casos.

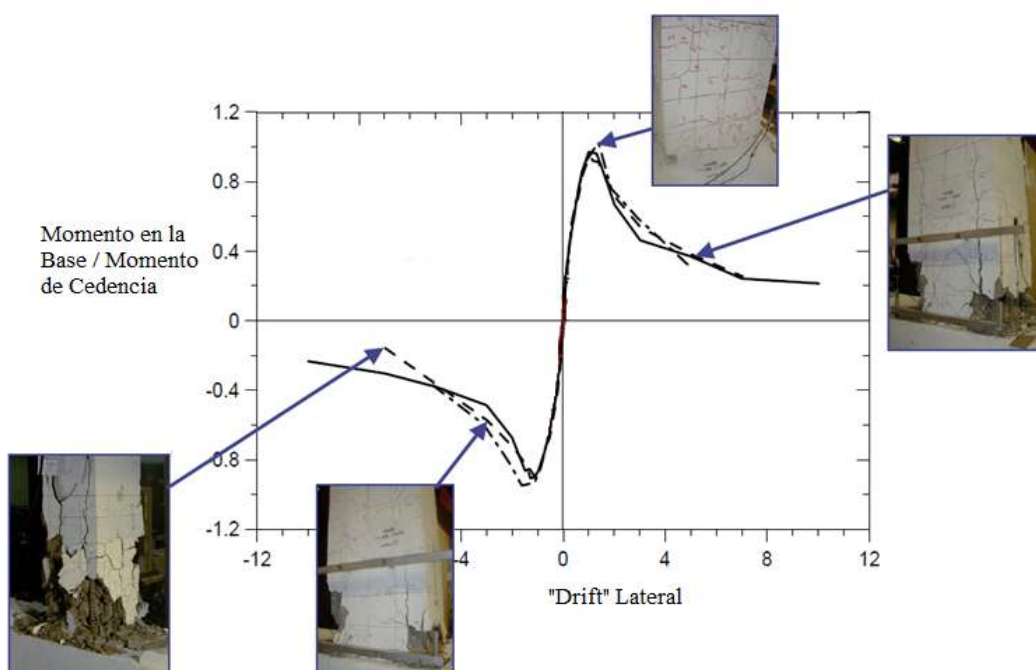


Figura 40: Ciclo Histerético de una Columna (Mellek y Wallace, 2004)

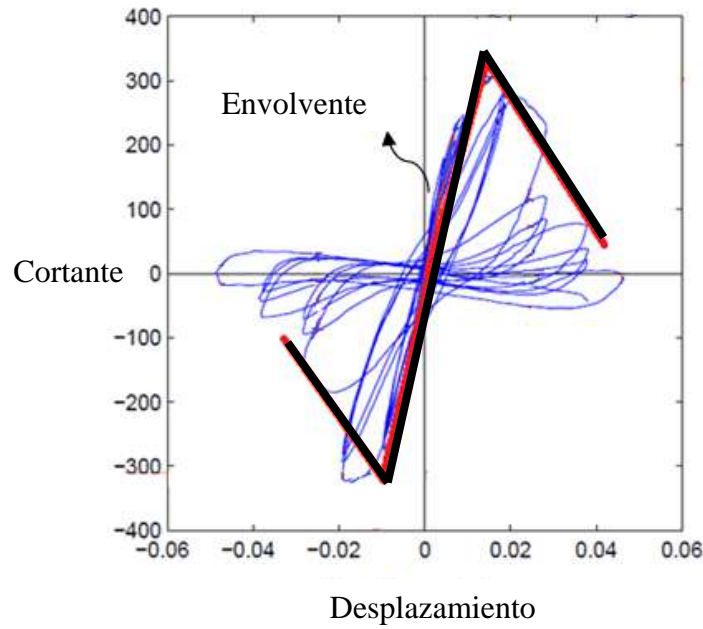


Figura 41: Envolvente del Ciclo Histerético de una Estructura

4.2 LIMITACIONES

Según Darvall (1995), la formulación de los coeficientes para la matriz de rigidez que se ha descrito en este trabajo tiene dos puntos, en donde a (la pendiente de la articulación en el área plástica) se torna inestable y por consiguiente la estructura también se torna inestable. Esto ocurre cuando los valores de a se vuelven críticos, es decir, $a = acr1$ y $a = acr2$. Como consecuencia de estos valores críticos llega el momento en que algunos de los coeficientes de la matriz de rigidez se vuelven infinitos e irreales. Estos valores son representados por:

$$acr1 = -m(2m^2 + 3m + 2) + 2m\sqrt{m^4 + 3m^3 + 4m^2 + 3m + 1} \quad (20)$$

$$acr2 = -m(2m^2 + 3m + 2) - 2m\sqrt{m^4 + 3m^3 + 4m^2 + 3m + 1} \quad (21)$$

donde:

$m = lp/(1 - lp)$, y lp es el largo plástico.

El valor crítico " $acr1$ " ocurre como consecuencia de no considerar la dependencia de la dirección de la rigidez cuando la articulación está experimentando deformación inelástica. La dependencia de la dirección de la rigidez en la región inelástica se describe en la Figura 42. Más allá del punto número 2, que se muestra en la Figura 42, la articulación se mueve a la región inelástica en donde la dirección de deformación sí se torna importante. Por ejemplo, al considerar la articulación en el punto P cuando este está en el área de ablandamiento, se observa que cualquier incremento en la deformación en dirección hacia adelante seguirá el camino de PQ . Además, cualquier rotación en la dirección opuesta seguirá el camino de PR y no el camino de PS . El incremento en curvatura en toda la región de la articulación debe ser en la

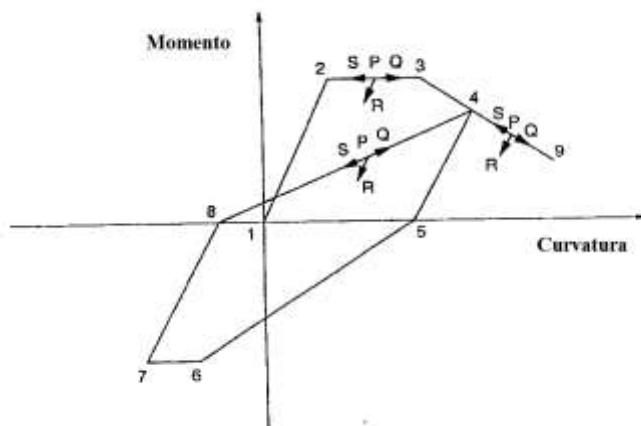


Figura 42: Dependencia de la Dirección de la Rigidez (Darvall, 1992)

misma dirección en donde se originó la curvatura de la articulación. Cuando el incremento en curvatura invierte la dirección se considera que la articulación se cierra y toma la misma rigidez, EI , que el resto del elemento.

El valor crítico " $acr2$ " tiene un significado físico particular. El mismo puede ser definido como el parámetro crítico de ablandamiento ("softening") del elemento. Cualquier elemento con un parámetro particular de a que sea más pronunciado en la articulación ($a < acr2$) no será capaz de mantener el equilibrio.

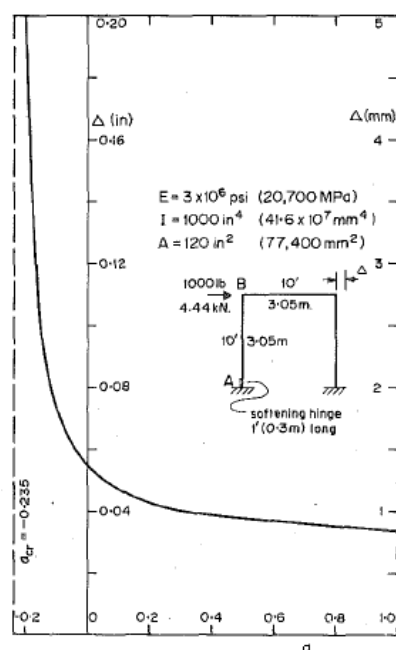
Cabe señalar, que todo esto se da bajo la presunción de que las combinaciones de " lp " y " a " son posibles para las ecuaciones anteriores. Ciertas combinaciones de " lp " y de " a " no son posibles debido a la dependencia de la dirección de la rigidez explicada previamente.

4.2.1 APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE PÓRTICO

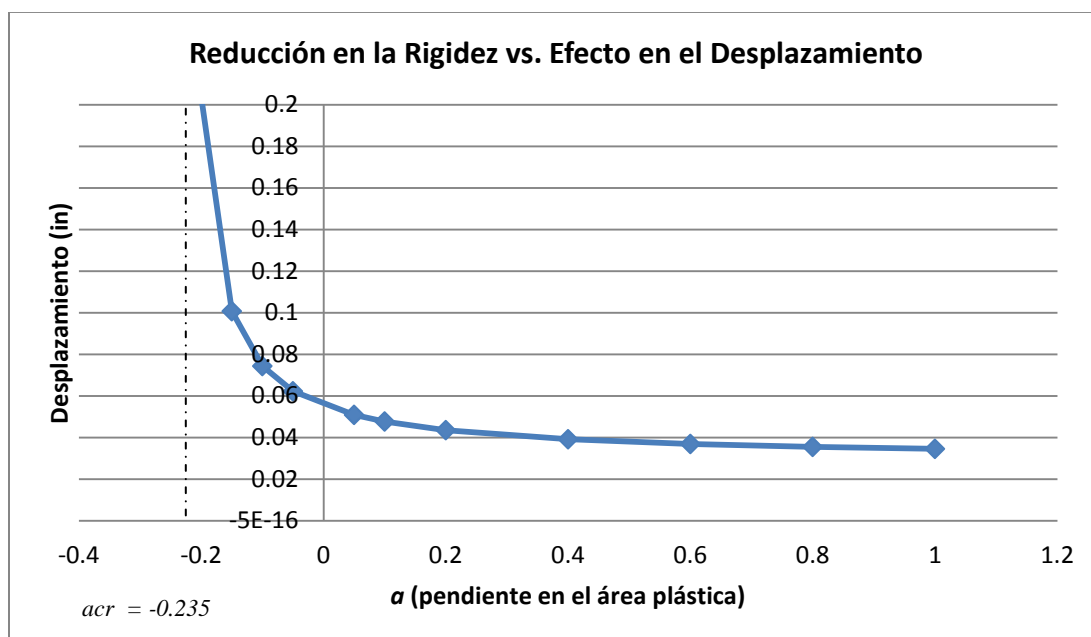
Con el propósito de demostrar la limitación descrita anteriormente, la Figura 43 muestra un ejemplo del análisis de un pórtico. Se asume que como resultado de cierto historial de cargas o deformaciones, una pequeña porción de longitud mínima en la base de una columna del pórtico ha reducido su rigidez. A consecuencia de esto, el pórtico está sujeto a un incremento de carga cuyo máximo es de 1000 libras. A dicho pórtico le fueron asignados distintos valores de a para observar el efecto de la rigidez reducida sobre el desplazamiento. La asíntota vertical demuestra la pérdida total de rigidez, la cual ocurre cuando $a = acr$. La Figura 43(b) muestra los resultados obtenidos según Darvall (1984), la Figura 43(c) muestra los resultados obtenidos según SEPA y la Figura 43(a) muestra los valores para ambas gráficas. Se observa que los resultados de ambos programas son equivalentes, lo cual confirma que el Sistema SEPA sigue las pautas descritas por Darvall (1984).

a	Desp (in)
-0.22	0.238897
-0.2	0.202873
-0.15	0.100678
-0.1	0.074296
-0.05	0.062167
0.05	0.05083
0.1	0.04764
0.2	0.043485
0.4	0.03911
0.6	0.036831
0.8	0.035436
1	0.034492

(a)



(b)



(c)

Figura 43: Ablandamiento en la Base de una Columna de un Pórtico, (a) Tabla de Valores para Ambas Gráficas; (b) Resultados Según Darvall, 1985 (Darvall, 1985); (c) Resultados según SEPA

4.3 VALIDACIONES

Según se expuso previamente en la sección de metodología, el Sistema SEPA provee al usuario la opción de ejecutar a través de cualesquiera de los siguientes dos métodos: control de fuerza (“Force Control”) o control de desplazamiento (“Displacement Control”). Todos los ejemplos que se mencionarán en esta sección serán evaluados con la opción de control de fuerza (“Force Control”) del Sistema SEPA. Estos tendrán las mismas propiedades a fin de mantener consistencia en los análisis a realizarse. En la Tabla 3 se muestran las propiedades de los elementos que forman parte de los pórticos a evaluarse.

Tabla 3: Propiedades de los Elementos

Propiedad	Columna	Viga
Área	900 in ²	480 in ²
Inercia	67500 in ⁴	23040 in ⁴
Módulo E	3605 ksi	3605 ksi
Mp+	10800 k-in	21600 k-in
Mp-	-10800 k-in	-21600 k-in

Las articulaciones plásticas, en caso de que se sitúen, se le estarán asignando a las columnas y las propiedades de las mismas serán las que se muestran en la Tabla 4.

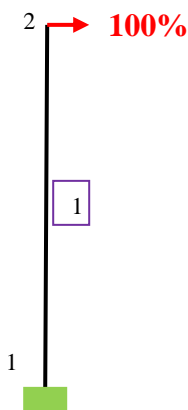
Tabla 4: Propiedades de las Articulaciones Plásticas

Propiedad	Valor
L_{p_i}	22.5 in
L_{p_j}	22.5 in
a	0.07
b	0.07

4.3.1 APLICACIÓN A UN ELEMENTO EN VOLADIZO

4.3.1.1 CÁLCULO MANUAL

Con el propósito de validar el funcionamiento del Sistema SEPA se muestra un ejemplo del desplazamiento de una viga en voladizo calculado manualmente para luego ser comparado con los resultados generados por SEPA. La Figura 44 muestra una representación del voladizo y la distribución de carga. En la Figura 45 se observa un diagrama del incremento del momento y del incremento en curvatura de una viga en voladizo.

**Figura 44: Diagrama de Elemento en Voladizo y su Distribución de Carga**

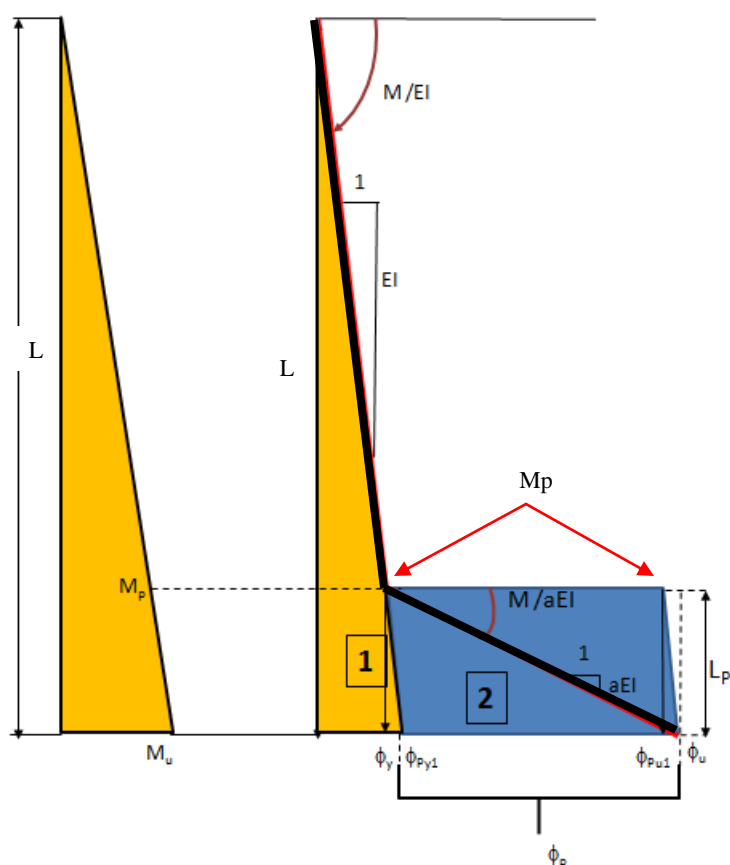


Figura 45: Diagrama de Incremento en Momento y Curvatura del Elemento en Voladizo

Según se ha mencionado anteriormente, entre los datos que el usuario entra al Sistema SEPA se incluyen los siguientes: momento plástico, pendientes en el área inelástica y propiedades del elemento, entre otros. A partir de estos datos el sistema realiza otros cálculos necesarios para completar el análisis plástico de la estructura, tales como el momento último, la curvatura de cedencia, la curvatura plástica y la curvatura última. A continuación se muestra el proceso manual para obtener estos datos.

El *Momento Ultimo*, "*Mu*" se obtiene utilizando la proporción del triángulo de la distribución de momento de la viga en voladizo,

$$\frac{Mu}{L} = \frac{Mp}{L - Lp}$$

$$Mu = \frac{L * Mp}{L - Lp} \quad (22)$$

A través del momento último es posible hallar la *Fuerza Ultima*, "*Fu*" que generó dicho momento,

$$Fu = \frac{Mu}{L} \quad (23)$$

A través del momento plástico es posible hallar la *Fuerza de Cedencia*, "*Fy*" que generó dicho momento,

$$Fy = \frac{Mp}{L} \quad (24)$$

Se asume que la rigidez elástica es dada por EI, de aquí se desprende que la pendiente del diagrama de incremento de momento del voladizo es también igual a EI. De esta forma se puede obtener la *Curvatura de Cedencia*, " ϕy " de la siguiente manera,

$$\phi y = \frac{Mp}{EI} \quad (25)$$

Según se observa en el diagrama, una vez obtenido el momento último, a través de la pendiente elástica se puede obtener la *Curvatura Justo Luego de Ceder*, " $\phi py1$ ", pero antes de plastificar, ("post yielding"), como se muestra en la ecuación,

$$\phi py1 = \frac{Mu}{EI} \quad (26)$$

Una vez obtenida la curvatura de cedencia, a través de la pendiente inelástica del diagrama (aEI), se puede calcular la curvatura que existe entre el punto de cedencia y el punto último. Esta curvatura se le suma a la curvatura de cedencia previamente calculada y se obtiene la *Curvatura Ultima*, " ϕu ".

$$\phi u = \phi y + \left(\frac{Mu - Mp}{aEI} \right) \quad (27)$$

La *Curvatura Plástica*, " ϕp " es la que se produce cuando el elemento ha alcanzado un estado completamente inelástico. La misma se puede obtener restando la curvatura última de la curvatura justo después de ceder, pero antes de plastificar ("post yielding") como se muestra en la ecuación.

$$\phi p = \phi u - \phi py1 \quad (28)$$

Finalmente, para propósitos matemáticos al momento de calcular los desplazamientos, obtenemos una *Curvatura Justo antes de la Ultima*, " $\phi pu1$ " sumando la curvatura de cedencia y la curvatura plástica ya obtenida. Esto asume que el triángulo formado por los extremos Mp - ϕy - $\phi py1$ al lado izquierdo del paralelogramo es el mismo que el del lado derecho formado por los extremos Mp - $\phi pu1$ - ϕu .

$$\phi pu1 = \phi y + \phi p \quad (29)$$

Se necesita obtener la *Rotación Plástica*, " θp " como parte del proceso del cálculo de desplazamientos.

$$\theta p = \phi p * Lp \quad (30)$$

A continuación se presenta un ejemplo para ilustrar los cálculos descritos anteriormente.

Asumiendo que:

$$Mp = 10800 \text{ p-in}, L = 144 \text{ in}, E = 3605 \text{ ksi}, I = 67,500 \text{ in}^4, Lp = 22.5 \text{ in y } a = 0.1$$

se obtienen los siguientes resultados,

$$Mu = \frac{144 * 10800}{144 - 22.5} = 12800 \text{ p-in},$$

$$Fu = \frac{12800}{144} = 88.89 \text{ kip},$$

$$Fy = \frac{10800}{144} = 75 \text{ kip},$$

$$\phi y = \frac{10800}{3605 * 67500} = .0000444,$$

$$\phi py1 = \frac{12800}{3605 * 67500} = .0000526,$$

$$\phi u = .000044 + \left(\frac{12800 - 10800}{0.1 * 3605 * 67500} \right) = .0001266,$$

$$\phi p = .000127 - .000053 = .0000740,$$

$$\phi pu1 = .0000444 + .000074 = .0001184, \text{ y}$$

$$\theta p = .000074 * 22.5 = .0016650.$$

Una vez se completan estos cálculos es posible calcular el desplazamiento elástico y el desplazamiento plástico. Estos últimos pueden compararse con los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y de esta manera validar su funcionamiento.

Para obtener el *Desplazamiento Elástico*, " $\Delta_{elastic}$ " se calcula el área del triángulo, el cual representa el incremento en curvatura cuando la estructura está en estado elástico. Luego esta área se multiplica por 2/3 de la altura del triángulo.

$$\Delta_{elastic} = \frac{1}{2} * \phi y * L * \frac{2}{3} * L \quad (31)$$

$$\Delta_{elastic} = \frac{1}{2} * .0000444 * 144 * \frac{2}{3} * 144 = 0.306 \text{ in}$$

Para obtener el *Desplazamiento Plástico*, " $\Delta_{plastic}$ " se calcula el área del triángulo incluyendo el punto justo después de ceder, pero antes de plastificar ("*post yielding*"). Esta área se multiplica por 2/3 de la altura del triángulo. Luego a este valor se le suma el área del paralelogramo y se obtiene el valor deseado.

$$\Delta 1 = \frac{1}{2} * \phi p y 1 * L * \frac{2}{3} * L \quad (32)$$

$$\Delta 1 = \frac{1}{2} * .0000526 * 144 * \frac{2}{3} * 144 = 0.363 \text{ in}$$

$$\Delta 2 = \theta p * (L - \frac{L p}{2}) \quad (33)$$

$$\Delta 2 = .0016650 * \left(144 - \frac{22.5}{2}\right) = 0.221 \text{ in}$$

$$\Delta_{plastic} = \Delta 1 + \Delta 2 \quad (34)$$

$$\Delta_{plastic} = 0.363 + 0.221 = 0.584 \text{ in}$$

4.3.1.2 RESULTADOS EN EL SISTEMA SEPA

La Figura 46 muestra los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA. Se observa que la primera articulación se genera cuando el cortante en la base es de 75 kip con un desplazamiento elástico de 0.306 in y que el elemento en voladizo colapsa con un cortante en la base de 88.89 kip, con un desplazamiento plástico de 0.568 in.

<i>ID</i>	<i>Shear</i>	<i>Accumulated Shear</i>	<i>Displacement</i>	<i>Accumulated Displacement</i>	<i>Hinges</i>
1	0	0	0	0	None: Elastic Structure
2	75.0063747	75.00637478	0.3068	0.3068	New Hinge(s) @ Element #1:S
3	13.8899776	88.8963524	0.261	0.5678	Structure Collapse

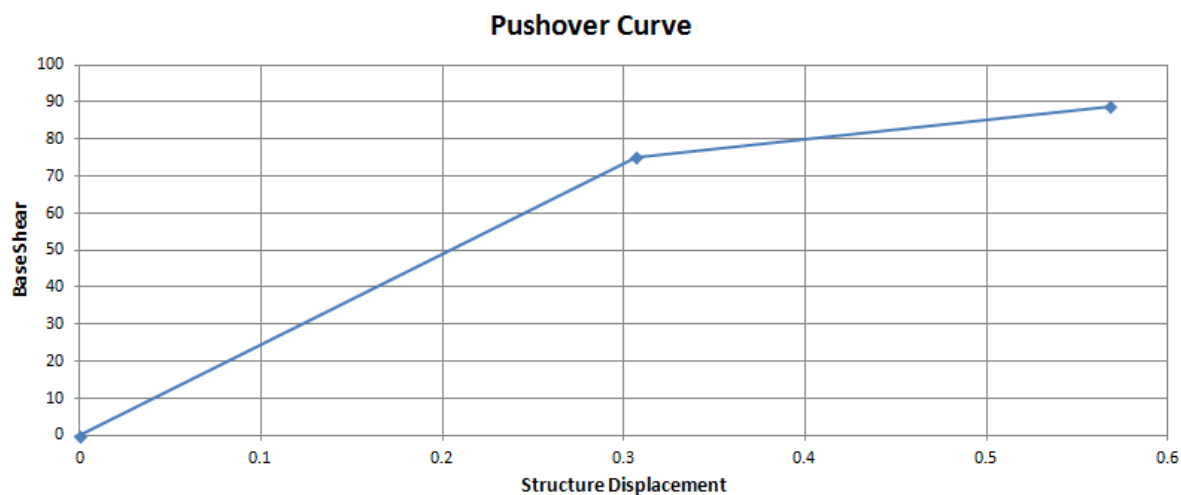


Figura 46: Resultados Obtenidos a través del Sistema SEPA para un Elemento en Voladizo

Se observa que los resultados del Sistema SEPA, en ambos desplazamientos coinciden aproximadamente con los cálculos manuales realizados en la sección anterior.

4.3.1.3 RESULTADOS EN EL PROGRAMA SAP2000

En la Figura 47 se muestran los resultados obtenidos a través del programa SAP2000 y a través del Sistema SEPA. La gráfica de “Push-Over” muestra sus respectivos valores coincidiendo con bastante exactitud.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
0.3068	75.01	0.3068	75.00
0.5678	88.90	0.5618	88.76

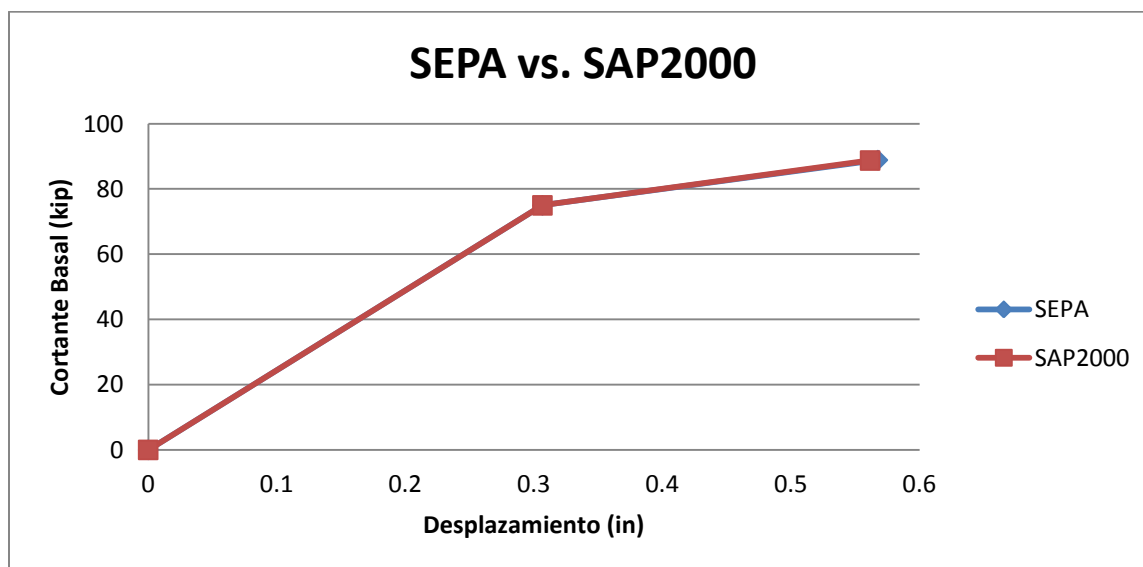


Figura 47: Resultados Obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Elemento en Voladizo

Si se utiliza el cálculo manual como control en este análisis comparativo, se observa que para un elemento en voladizo el valor correspondiente al desplazamiento plástico obtenido a través del sistema SEPA (0.5678) está más cercano al valor de control (0.584) que el valor obtenido a través del programa SAP2000 (0.5618).

4.3.2 APLICACIÓN A UN PÓRTICO

4.3.2.1 RESULTADOS EN EL SISTEMA SEPA

Como parte del proceso de validación del Sistema SEPA, a continuación se muestran los resultados de desplazamientos y cortante basal de un pórtico obtenidos a través de este programa. Posteriormente se mostrarán los resultados del programa SAP2000 a fin de comparar los resultados de ambos programas. La Figura 48 muestra una representación del pórtico y la distribución de carga. El mismo tiene el 100% de la carga en el nodo 3. La Figura 49 muestra los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA.

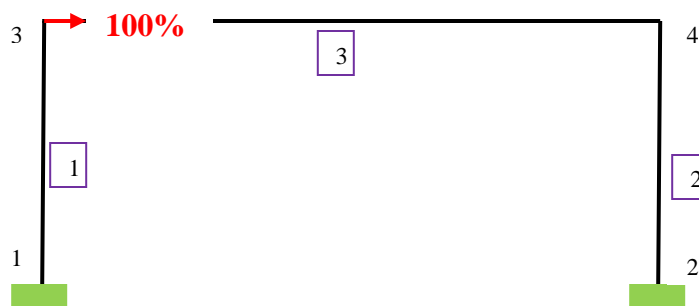


Figura 48: Diagrama de Pórtico y su Distribución de Carga

ID	Shear	Accumulated Shear	Displacement	Accumulated Displacement	Hinges
1	0	0	0	0	None: Elastic Structure
2	192.5894574	192.5894574	0.259	0.259	New Hinge(s) @ Element #1:S
3	7.603049568	200.192507	0.016	0.275	New Hinge(s) @ Element #2:S
4	62.33248553	262.5249925	0.268	0.543	Structure Collapse

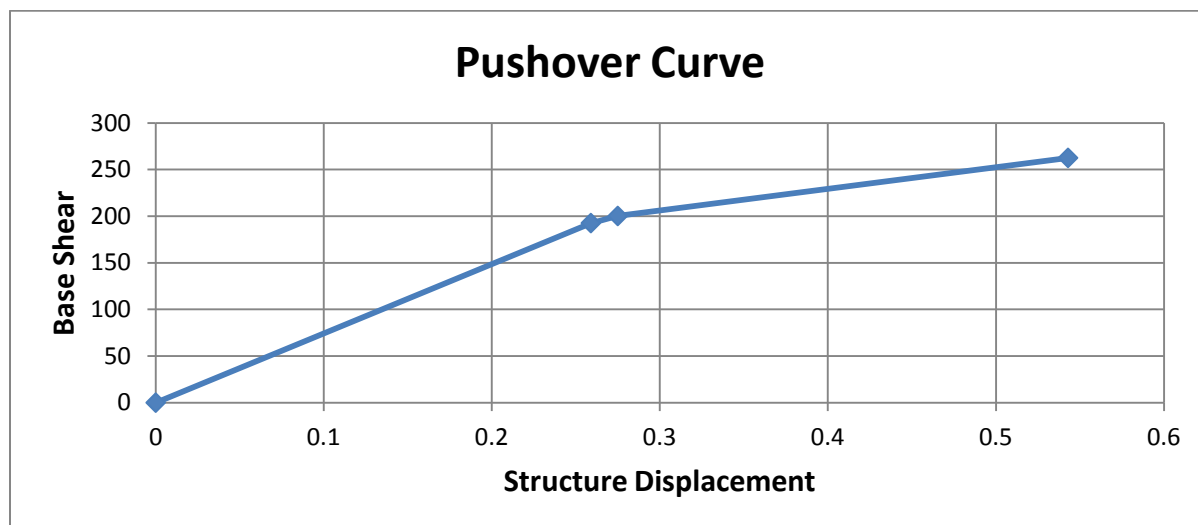


Figura 49: Resultados del Sistema SEPA para un Pórtico

4.3.2.2 RESULTADOS EN EL PROGRAMA SAP2000

En la Figura 50 se muestran los resultados obtenidos a través del programa SAP2000 y a través del Sistema SEPA. La gráfica de “Push-Over” muestra sus respectivos valores coincidiendo con bastante exactitud con una diferencia de aproximadamente 0.02 entre ambos programas. Se puede observar claramente la equivalencia entre ambas aproximaciones.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
0.259	192.5895	0.258	191.6
0.275	200.1925	0.277	200.4
0.543	262.525	0.574	262.4

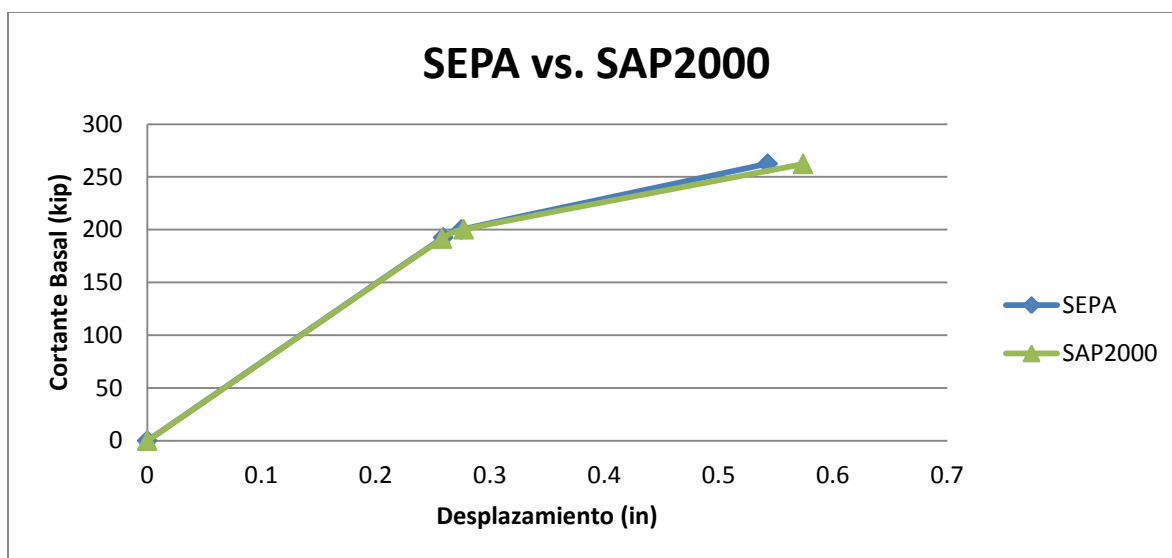


Figura 50: Resultados Obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico

4.3.3 APLICACIÓN A UN PÓRTICO DE UN PISO Y DOS TRAMOS

4.3.3.1 RESULTADOS EN EL SISTEMA SEPA

La Figura 51 muestra una representación de un pórtico de un piso y dos tramos con el 100% de la carga en el nodo 4. La Figura 52 muestra los resultados obtenidos en el programa SEPA. Al igual que en las gráficas anteriores se puede notar el cambio en rigidez de la estructura una vez pasa del área elástica. Se observa una pendiente cada vez más acostada según se generan las articulaciones plásticas en los elementos, lo cual denota una degradación en la rigidez de la estructura.

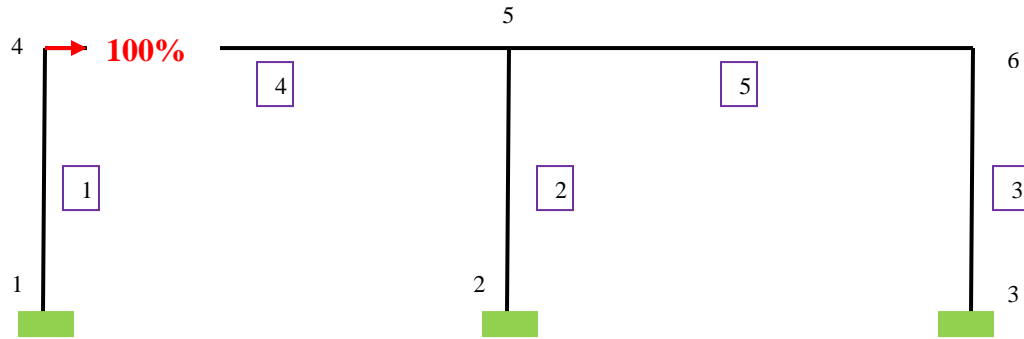


Figura 51: Diagrama de Pórtico de un Piso y dos Tramos y su Distribución de Carga.

<i>ID</i>	<i>Shear</i>	<i>Accumulated Shear</i>	<i>Displacement</i>	<i>Accumulated Displacement</i>	<i>Hinges</i>
1	0	0	0	0	None: Elastic Structure
2	290.779274	290.7792749	0.262	0.262	New Hinge(s) @ Element #1:S
3	1.69243645	292.4717113	0.002	0.264	New Hinge(s) @ Element #2:S
4	32.0316018	324.5033132	0.054	0.318	New Hinge(s) @ Element #3:S
5	79.2879710	403.7912842	0.206	0.524	Structure Collapse

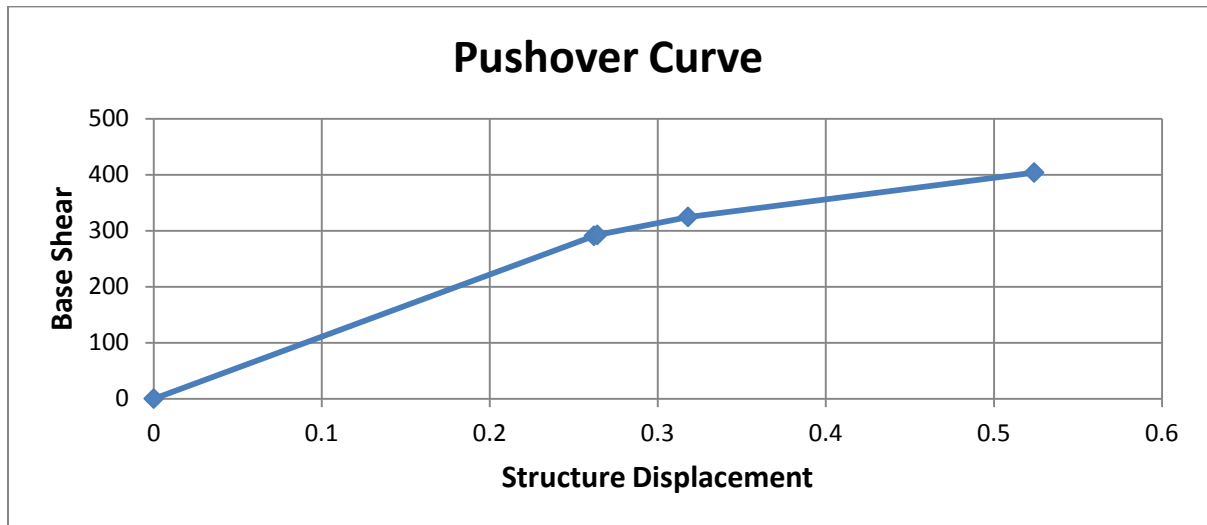


Figura 52: Resultados del Sistema SEPA para un Pórtico de un Piso y dos Tramos

4.3.3.2 RESULTADOS EN EL PROGRAMA SAP2000

En la Figura 53 se muestran los resultados obtenidos a través del programa SAP2000 y a través del Sistema SEPA. La gráfica de “Push-Over” muestra sus respectivos valores coincidiendo con bastante exactitud. Al igual que en el ejemplo anterior, se puede observar claramente la equivalencia entre ambas aproximaciones.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
0.262	290.7793	0.26	288.6
0.264	292.4717	0.264	291.713
0.318	324.5033	0.317	324.5033
0.524	403.7913	0.53	403.7913

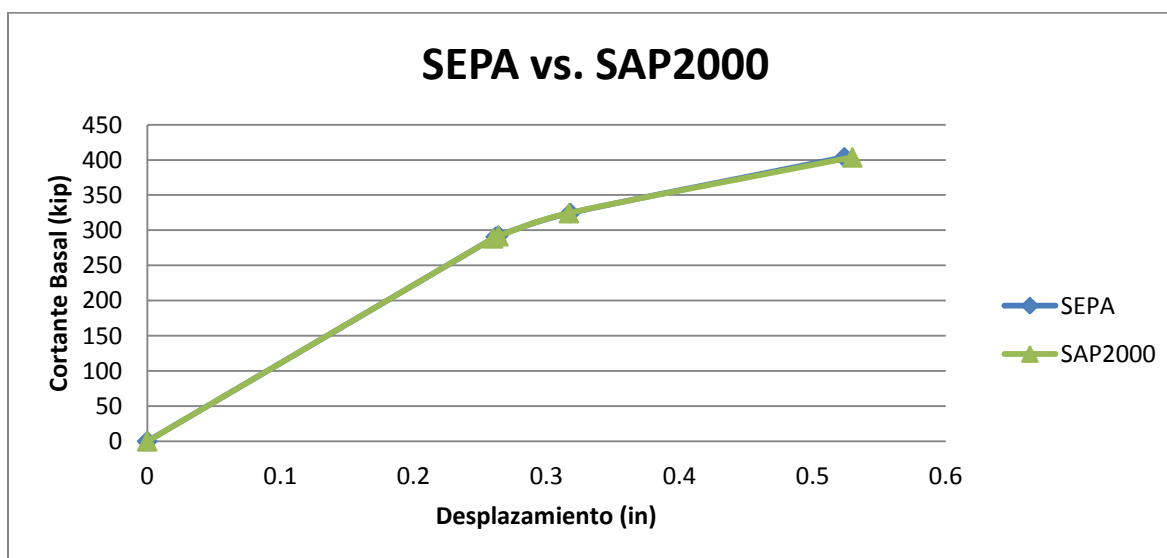


Figura 53: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de un Piso y dos Tramos

4.3.4 APLICACIÓN A UN PÓRTICO DE DOS PISOS Y UN TRAMO

4.3.4.1 RESULTADO EN SEPA

La figura 54 muestra una representación de un pórtico de dos pisos y un tramo con el 100% de la cara en el nodo 5 y el 50% de la carga en el nodo 3. La Figura 55 muestra los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA

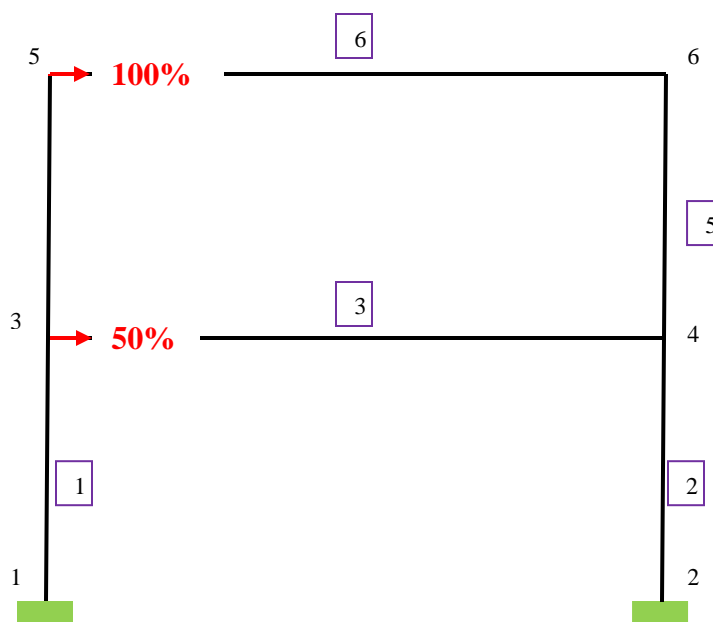


Figura 54: Diagrama de Pórtico de dos Pisos y un Tramo y su Distribución de Carga

<i>ID</i>	<i>Shear</i>	<i>Accumulated Shear</i>	<i>Displacement</i>	<i>Accumulated Displacement</i>	<i>Hinges</i>
1	0	0	0	0	None: Elastic Structure
2	162.6	162.6	0.749997027	0.749997027	New Hinge(s) @ Element #1:S
3	1.95	164.55	0.011231559	0.761228585	New Hinge(s) @ Element #2:S
4	59.85	224.4	0.548020236	1.309248822	Structure Collapse

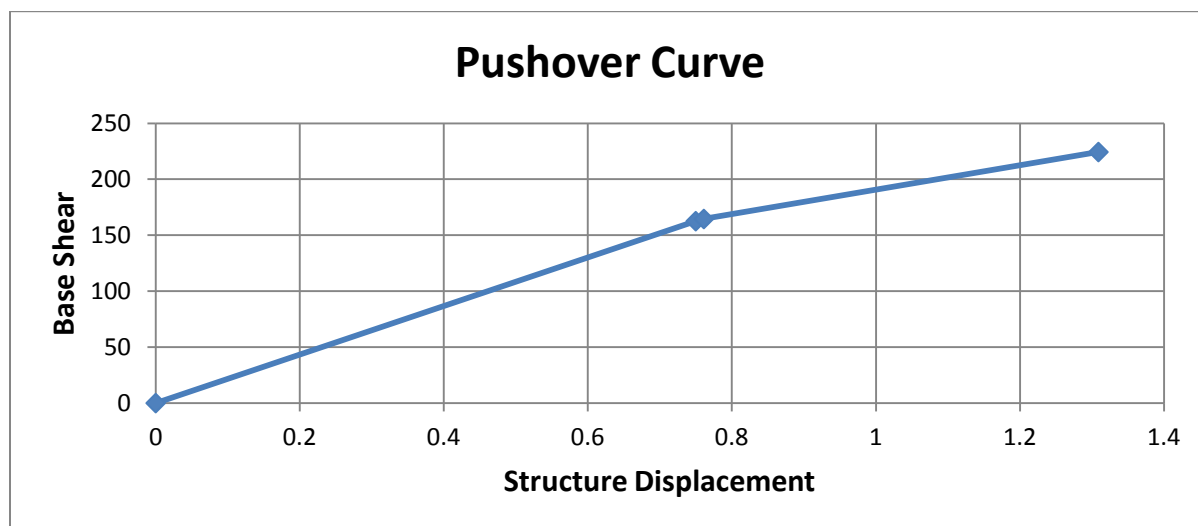


Figura 55: Resultados Obtenidos a través del Sistema SEPA para un Pórtico de dos Pisos y un Tramo

4.3.4.2 RESULTADO EN SAP2000

La Figura 56 muestra una comparación entre los resultados de ambos programas. Se observa que el punto elástico en la gráfica coincide con exactitud en ambos programas y, que según se generan las articulaciones plásticas, la rigidez sufre cambios y se va degradando en ambos programas. Así también, se observa una pequeña diferencia en el área inelástica de la gráfica entre ambos programas. Esta mínima discrepancia puede atribuirse a problemas de precisión. Estos problemas de precisión surgen como consecuencia de añadir más elementos y pisos a la estructura ya que se generan más matrices locales y los cálculos matemáticos se hacen cada vez más exhaustivos. Como consecuencia de ello surgen muchos números

irracionales que provocan que la computadora presente muchos estimados truncados. Estos estimados truncados hacen que el error relativo se propague. Esto demuestra las limitaciones de las computadoras para representar números infinitos. Por otra parte, se sabe que SAP2000 es un programa poderoso y altamente sofisticado en cuanto a diseño y análisis de estructuras y existe la posibilidad de que internamente el mismo esté considerando detalles adicionales que en SEPA no se consideran debido a la sencillez de su diseño.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
0.74	162.5	0.74	162.7
0.76	164	0.75	165.7
1.3	224.4	1.25	224.15

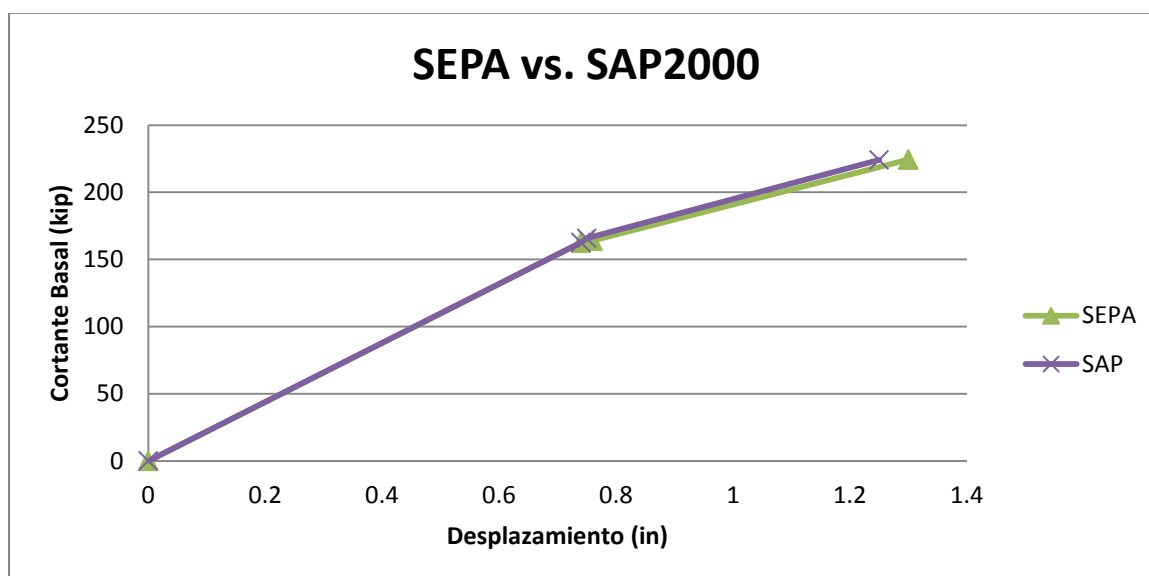


Figura 56: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de dos Pisos y un Tramo

4.3.5 VALIDACIONES ADICIONALES

En esta sección se exponen ejemplos adicionales que muestran solo la comparación entre el programa SAP2000 y el Sistema SEPA con el propósito de validar ampliamente el funcionamiento del Sistema SEPA. Estos ejemplos tienen las mismas propiedades en los elementos y en las articulaciones plásticas que se mencionaron en la sección anterior.

En la Figura 57 se muestran los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y SAP2000 para un pórtico de dos pisos y un tramo con el 100% de la carga en el piso 2 y el 66.6% de la carga en el primer piso.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
0.72	165.83	0.72	165.651
0.74	168.50	0.74	168.837
1.27	229.17	1.24	229.607

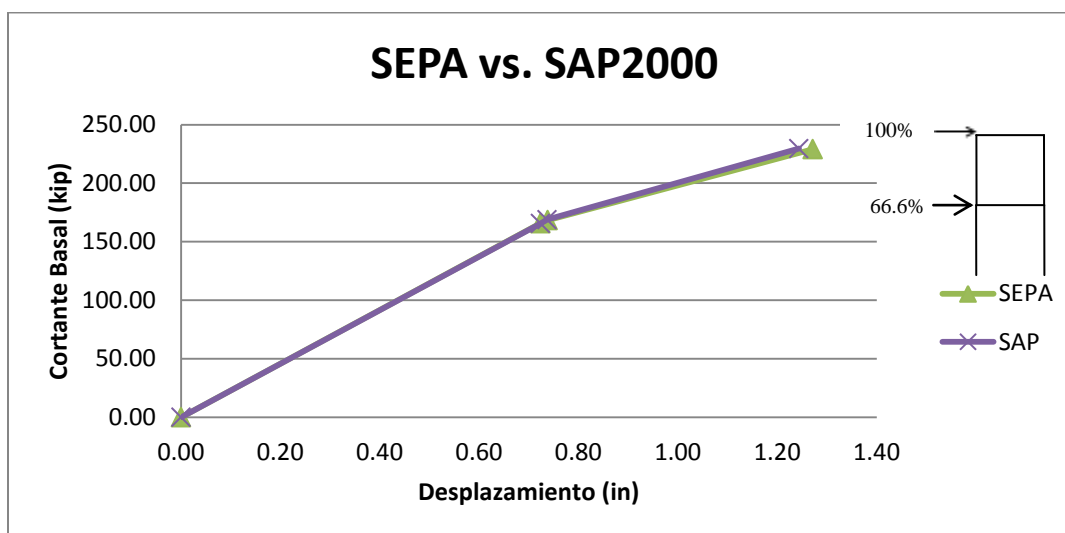


Figura 57: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de dos Pisos y un Tramo con el 100% de la carga en el Piso 2 y el 66.6% de la carga en el Piso 1

En la figura 58 se muestran los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y SAP2000 para un pórtico de tres pisos y un tramo con el 100% de la carga en todos los pisos.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
1.148	160.20	1.148	160.15
1.168	162.60	1.174	163.79
1.890	222.30	1.845	222.25

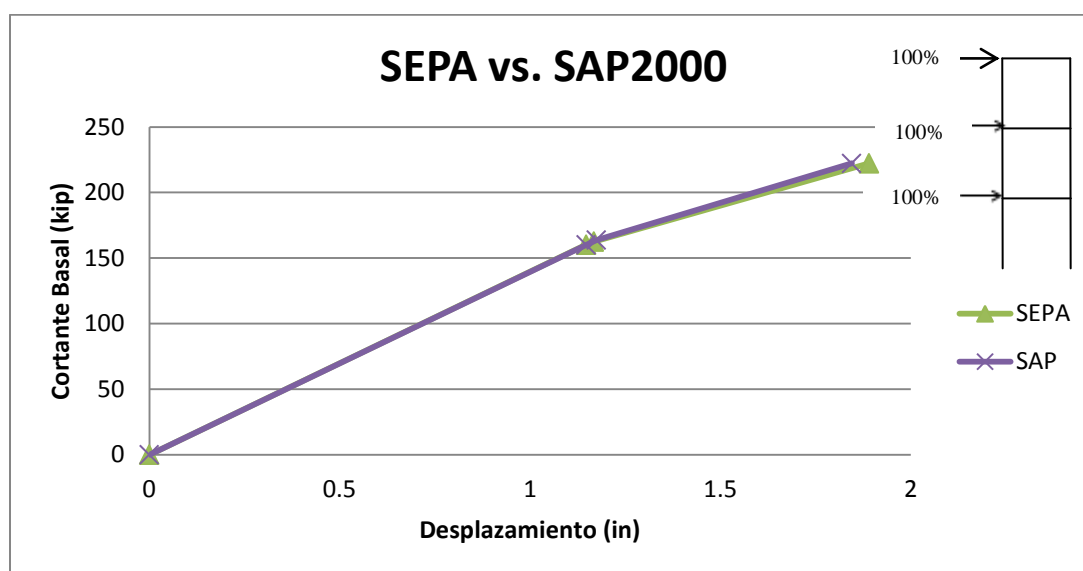


Figura 58: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de tres Pisos y un Tramo con el 100% de la Carga en todos los Pisos

En la Figura 59 se muestran los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y SAP2000 para un pórtico de tres pisos y un tramo con el 100% de la carga en el último piso, 66.6% de la carga en el segundo piso y 33.3% de la carga en el primer piso.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
1.32	150.4	1.32	149.6
1.33	151.2	1.34	151.6
2.13	208.0	2.10	208.6

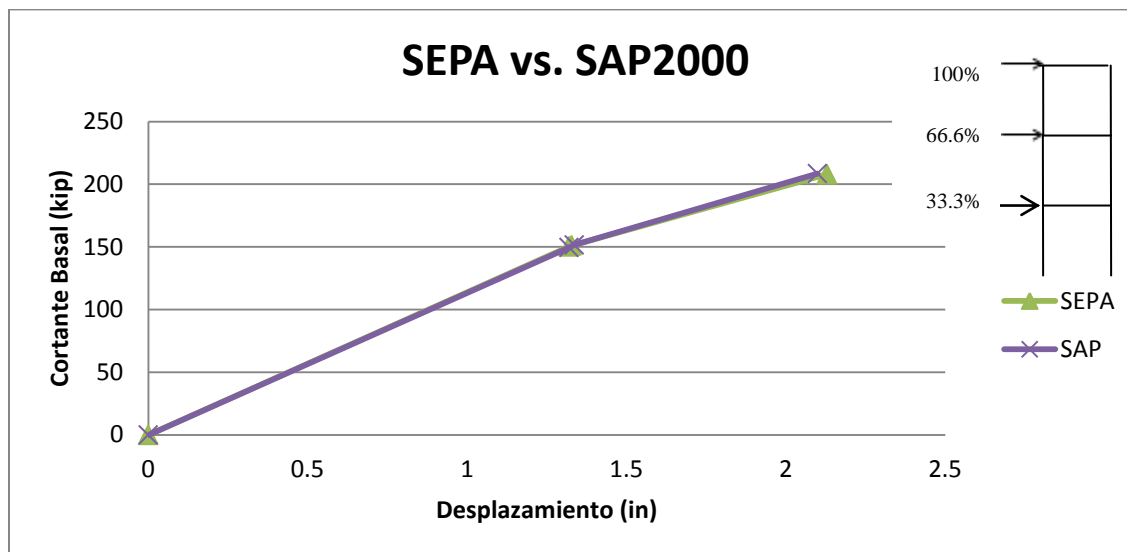


Figura 59: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de tres Pisos y un Tramo con diferentes Distribuciones de Cargas en cada Piso

En la figura 60 se muestran los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y SAP2000 para un pórtico de dos pisos y dos tramos con el 100% de la carga en el segundo piso y el 66.6% de la carga en el primer piso.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
0.666	259.33	0.666	260.21
0.678	263.50	0.674	263.55
0.719	274.83	0.714	276.21
1.165	364.67	1.125	366.00

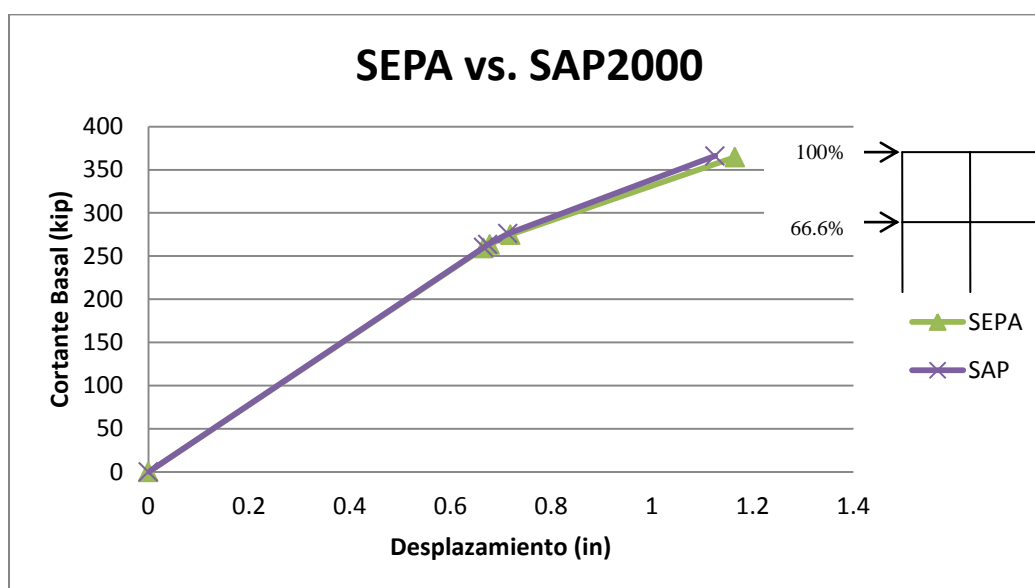


Figura 60: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de dos Pisos y dos Tramos

En la figura 61 se muestran los resultados obtenidos a través del Sistema SEPA y SAP2000 para un pórtico de tres pisos y dos tramos con el 100% de la carga en el tercer piso, el 66.6% de la carga en el segundo piso y el 33.33% de la carga en el primer piso.

SEPA		SAP2000	
Desp (in)	Cortante (kip)	Desp (in)	Cortante (kip)
0	0	0	0
1.148	232.6	1.148	233.0
1.218	245.6	1.214	246.3
1.240	249.2	1.228	249.0
1.883	332.2	1.811	331.7

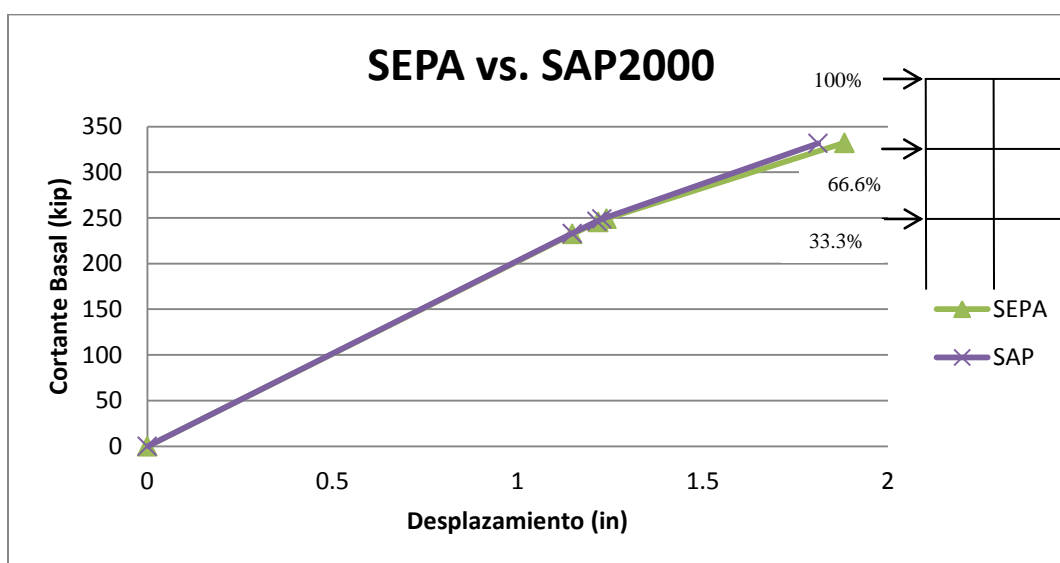


Figura 61: Resultados obtenidos en SEPA y en SAP2000 para un Pórtico de tres Pisos y dos Tramos

4.4 CAPACIDADES ADICIONALES DEL PROGRAMA SEPA

4.4.1 APLICACIÓN DE CARGAS INICIALES

Además de las ventajas que ofrece el Sistema SEPA expuestas anteriormente, esta aplicación posee la capacidad de considerar cargas vivas y muertas a través de los momentos fijos en los nodos de la estructura. Es decir, en la versión actual del sistema SEPA, para analizar cargas distribuidas en la estructura, el usuario debe transformar las mismas a momentos fijos en los nodos para que de esta forma estas

puedan ser consideradas en el análisis. A continuación se muestra un ejemplo de la aplicación de valores de carga muerta (V_x) y momentos (M_x) a los nodos en un pórtico de dos pisos y un tramo. La Figura 62 muestra un diagrama del pórtico y la aplicación de cargas iniciales al mismo. El ejemplo se ejecutará a través de la opción de control de desplazamiento. Para efectos del ejemplo se aplicará una distribución de desplazamiento de 100% en el nodo 5 y de 50% en el nodo 3. Se mantiene constante la carga muerta (V_x) con un valor de 10 kips y el momento (M_x) varía con valores de 500k-in, 700k-in y 900k-in.

La Figura 63 corresponde a la gráfica de “Push-Over” con los diferentes resultados según fue aumentando el momento aplicado a los nodos. Se observa claramente que según incrementa el momento inicial la ductilidad de la estructura disminuye y, por consiguiente, las articulaciones plásticas también disminuyen. Este efecto tiene mucho sentido ya que, a medida que se le designa una mayor cantidad de carga a la estructura ésta alcanzará el desplazamiento deseado, pero cada vez con una reacción en la base mayor, lo cual representa una disminución en la ductilidad.

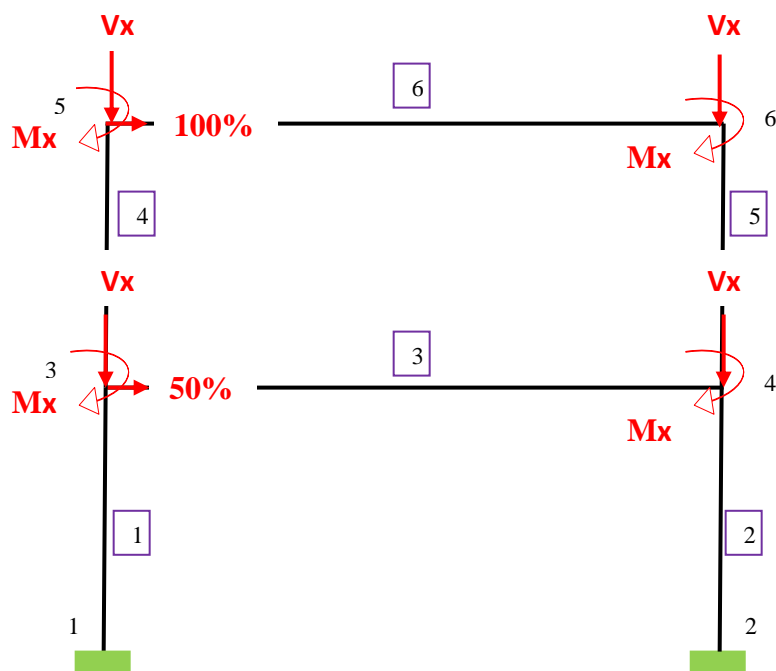


Figura 62: Diagrama de pórtico de dos Pisos y un Tramo y su Aplicación de Cargas

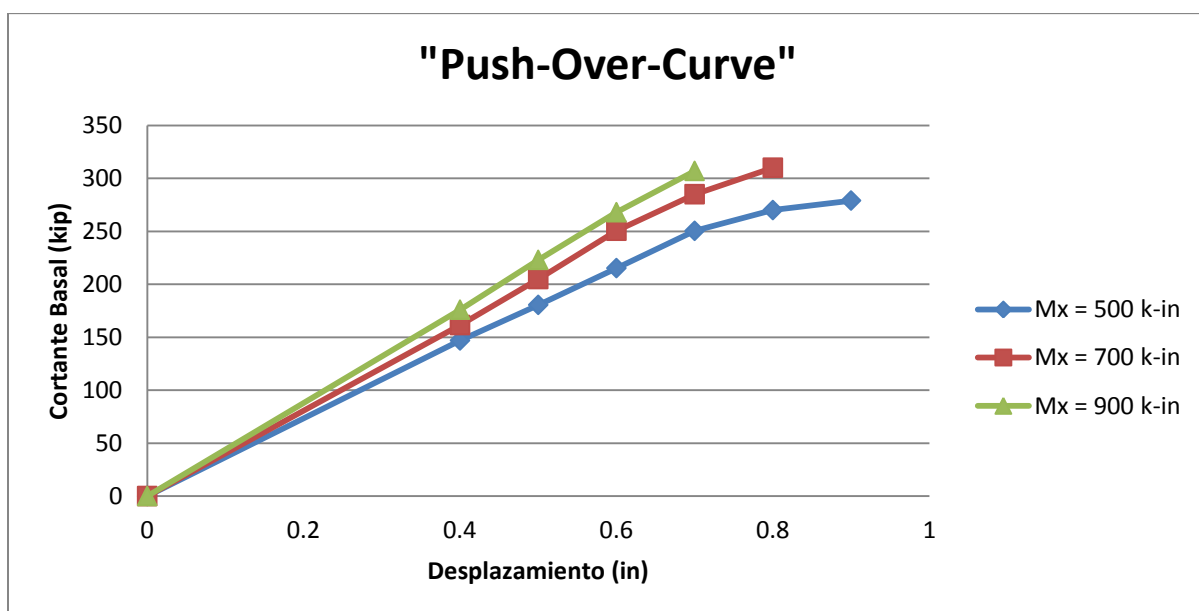


Figura 63: Gráfica de "Push-Over", Según Aumenta el Momento Aplicado en los Nodos

4.4.2 APLICACIÓN DE PENDIENTE NEGATIVA

Según se ha expuesto anteriormente, el Sistema SEPA tiene la ventaja de atender rigideces negativas en los elementos. A continuación, se mostrará un ejemplo de esta aplicación a un pórtico de dos pisos y un tramo. Se le asignarán distintos valores de “ a ” (pendiente en el área plástica) al comienzo de las columnas. A este ejemplo se le aplicará una distribución de desplazamiento de 100% en el nodo 5 y 50% en el nodo 3, esto se ejecutará a través de la opción de control de desplazamiento. La Figura 64 muestra un diagrama de dicho ejemplo.

La Figura 65 muestra la gráfica de “Push-Over” y los diferentes resultados según fue variando la pendiente (“ a ”). En una estructura puede darse el caso de que la rigidez negativa de los elementos logre reducir significativamente la rigidez global de la estructura y que la misma asuma una pendiente negativa en la gráfica de “Push-Over”. Esto se puede ver claramente en la Figura 64, donde según la pendiente “ a ” se va pronunciando cada vez más, la estructura presenta una pérdida cada vez mayor en su rigidez global, así también se reducen cada vez más el número de articulaciones que se van generando antes del colapso y, por consiguiente, la carga de colapso.

Cabe señalar que cuando uno o más elementos contienen pendientes negativas la estructura puede terminar con fuerzas reducidas y desplazamientos mayores para algunos elementos. No obstante, en algunos casos, esto no necesariamente se reflejará en el sistema completo ya que al distribuir los momentos alrededor de toda la estructura se pudiera observar incrementos de fuerzas y desplazamientos mayores sin perder estabilidad.

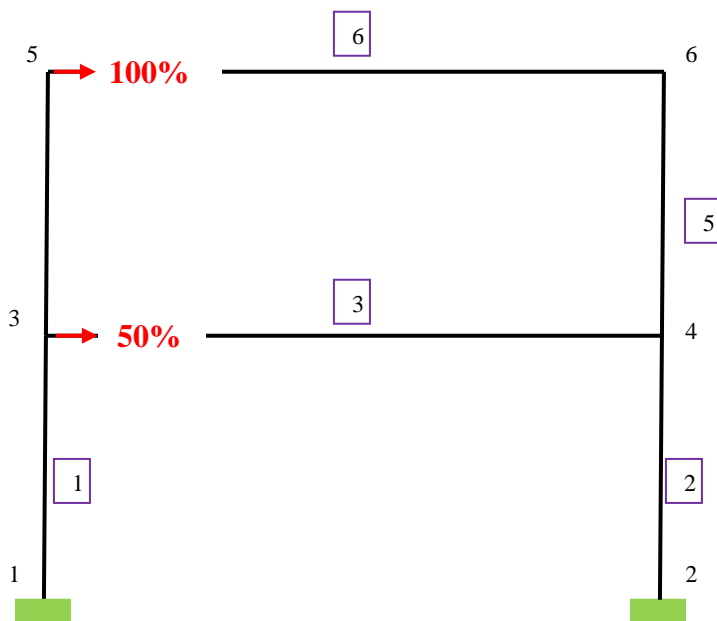


Figura 64: Diagrama de Pórtico de dos Pisos y un Tramo y su Distribución de Desplazamiento

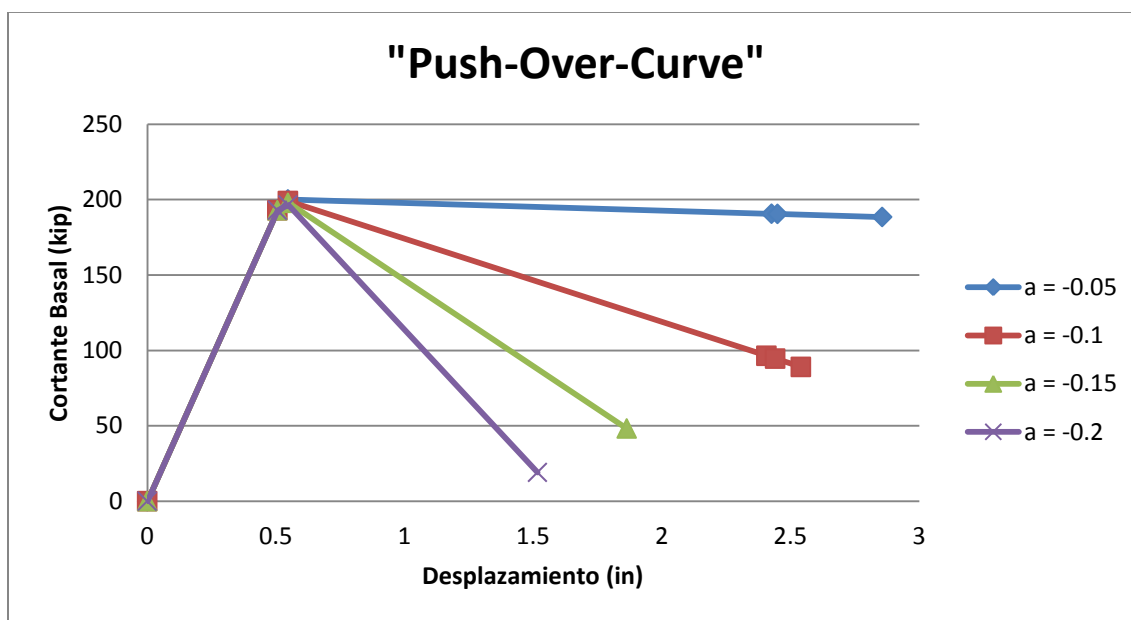


Figura 65: Gráfica de "Push-Over", Según se Pronuncia la Pendiente "a"

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación fue motivado debido a la escasez de programas sencillos que, al presente consideren un análisis plástico no lineal. Esta investigación está fundamentalmente orientada a proveer a los ingenieros la facilidad de resolver un problema estructural complicado, más allá de un análisis elástico, a través de una herramienta comercialmente sencilla y accesible. A continuación se resumen las conclusiones finales de este estudio.

- Se demostró que es posible implantar un modelo matemático altamente complejo utilizando una herramienta simple como EXCEL, al igual que se implantan estos modelos en programas mucho más sofisticados como SAP2000 sin obtener diferencias significativas entre sus resultados.
- La aplicabilidad y validez de las ecuaciones de matrices de rigideces, no típicas, propuestas por Darvall (1984) fue ampliamente demostrada. Estas matrices fueron propuestas en la década de los ochenta y el Sistema SEPA permitió que las mismas fueran implantadas haciendo uso de una herramienta simple y moderna como EXCEL, a fin de facilitar al ingeniero la aproximación de un análisis inelástico. A través del uso de estas matrices se obtienen resultados aceptables para un análisis estructural preliminar.
- Así también, el Sistema SEPA tiene la capacidad de evaluar estructuras, tanto con rigideces positivas así como con rigideces negativas. Esto resulta altamente

ventajoso debido a que actualmente no existen programas sencillos que consideren este aspecto.

- El Sistema SEPA es capaz de generar una gráfica de “Push-Over”, que identifica el orden en el cual van plastificando las juntas y los incrementos de carga que van ocurriendo hasta el colapso de la estructura.
- El Sistema SEPA está apto para realizar un análisis inelástico mediante dos métodos, Control de Fuerza o Control de Desplazamiento. Debido a que el análisis mediante Control de Fuerza se torna inválido cuando la estructura alcanza el punto de rigidez negativa, se hace necesario realizar el análisis por el método alternativo de Control de Desplazamientos, si este fuera el caso.
- Mediante las validaciones realizadas se demostró la flexibilidad que ofrece el Sistema SEPA, no tan solo de considerar cargas laterales, sino también de considerar cargas iniciales en los nodos para el análisis. Así también se consideran las distintas distribuciones de la estructura según la repartición porcentual de fuerzas o desplazamientos indicada por el usuario.
- El Sistema SEPA puede ejecutarse desde teléfonos inteligentes (*"Smart Phones"*) y tabletas (*"Tablets"*) haciendo uso de aplicaciones, tales como *"LogMeIn"*, *"UltraVNC"* y otras que permiten acceso remoto a cualquier PC o servidor. En un futuro cercano se podrá prescindir del uso de las aplicaciones antes mencionadas una vez salga al mercado una versión revisada de Excel para *"Tablets"* o *"Smart Phones"* que permita ejecutar Macros directamente desde estos dispositivos.

Queda demostrado que el uso del Sistema SEPA ofrece una serie de ventajas significativas para los ingenieros.

5.2 RECOMENDACIONES

Es de conocimiento general que el proceso de programación de computadoras es uno muy dinámico. Para prolongar la vida útil de cualquier programa es necesario realizar procesos continuos de retroalimentación. Estos procesos consisten en realizar actualizaciones continuas al programa que respondan a nuevas ideas y requerimientos del usuario. El Sistema SEPA, según implantado en esta investigación, es nada más el inicio de una herramienta que puede ser mejorada. Por consiguiente, se sugieren algunas recomendaciones para mejorar el Sistema SEPA y ampliar su alcance.

Debido a que esta es la primera versión del Sistema SEPA todavía no se ha llegado a un grado de optimización deseable. En relación al aspecto técnico, se propone que se aumente la velocidad de procesamiento del mismo. Existen varias maneras de hacer esto. Entre ellas se sugiere un manejo más eficiente de las ecuaciones matemáticas y la forma en que se manejan los incrementos en desplazamientos o fuerzas. En esta versión del programa se realizan múltiples cálculos internos por cada iteración al aplicar estos incrementos.

En futuras investigaciones se sugiere que este programa sea extendido a otras condiciones. Se pudieran añadir rutinas que contemplen otros factores, tales como efectos de torsión y cortante. Estos factores, dependiendo del caso, pudieran afectar significativamente la capacidad del momento plástico de una o más secciones de la estructura. Así también, se pudiera añadir la degradación de la estructura debido al cortante para poder hallar el punto de falla de la misma con mayor exactitud.

REFERENCIAS

- Albright, S. C. (2001). *VBA for Modelers Developing Decision Support with Microsoft Excel*. California. Duxbury Thomson Learning. 549 pp.
- ASCE (2008). "Minimum Design Loads for Building and Other Structures". *ASCE7-08*, Reston, Va
- Attard, T., y Mignolet, M. (2008). "Random Plastic Analysis Using a Constitutive Model to Predict the Evolutionary Stress-Related Responses and Time Passages to Failure." *Journal of Engineering Mechanics*, v 134, pp 881-891.
- Bayrack, O., y Sheikh, S. A. (2001). "Plastic Hinge Analysis." *Journal of Structural Engineering*, v127, pp. 1092-1100.
- Beaufait, F. W., Rowan, W. H., Hoadley, P. G., y Hackett, R. M. (1970). *Computer Methods of Structural Analysis*. California. Prentice Hall. 543 pp.
- Capecchi, D, y Felice, G, (2001). "Hysteretic Systems with Internal Variables". *Journal of Engineering Mechanics*, v 127, pp 891-898.
- CEN TC/250 (2004). Eurocode 2: *Design of Concrete Structures*, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels, par.5.6.
- Comité Euro-International du Béton. (1993) *CEB-FIP Model Code 1990*. Thomas Telford Ltd: Lausanne, Bulletin No. 213.214.
- Corrado, M., Paggi, M., y Carpinteri, A. (2010). "Limits to Plastic Analysis due to Size-Scale Effects on the Rotational Capacity of Reinforced Concrete Cross Sections." *Structural Engineering International*, v 20, pp 240-245.
- Darvall, P. L. (1984). "Stiffness Matrix for Elastic-Softening Beams." *Journal of Structural Engineering*, v 111, pp 469-473.
- Darvall, P. L., y Mendis, P. A. (1985). "Elastic Plastic-Softening Analysis of Plane Frames." *Journal of Structural Engineering*, v 111, pp 871-888.
- Eligehausen R, Langer P. (1987) "Rotation Capacity of Plastic Hinges and Allowable Moment Redistribution" *CEB Bull d'Information*, 175:17.9-12.27.
- ETABS (versión 9.6) (2010) Software Integrado para Diseño y Analisis Estructural. *Computers & Structures, Inc.*, Berkeley, California.
- Filippou, F. C. (1988) "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames Under Cyclic Load Reversals" Report No. UCB/EERC-88/12, Universidad de California, Berkeley.

- Filippou, F. C. (1992) "Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Subassemblages" Report No. UCB/EERC-92/08, Universidad de California, Berkeley.
- Kimmel, P., Bullen, S., Green, J., Boverly, R., y Rosenberg, R. (2004). *Excel 2003 VBA*. Wiley Publishinf Inc. 1144 pp.
- Melek, M., y Wallace, J.W., (2004) "Cyclic Behavior of Columns with Short Lap Splices" *ACI Structural Journal*, v 101, pp 802-811.
- Microsoft Office EXCEL (2007). Spreadsheet Software. *Microsoft Corp.* United States of America.
- National Building Code of Canada (NBCC). (2005). *National Building Code of Canda*, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Ont.
- Park, R., y Paulay, R. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. Wiley, New York. 769 pp.
- PERFORM-3D (versión 4.0) (2006) Software Integrado para Diseño y Analisis Estructural. *Computers & Structures, Inc.*, Berkeley, California.
- Prakash, V., Powell, G.H. y Filippou, F.C. (1992) "DRAIN2-DX", Report No. UCB/SEMM-92/29, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California.
- Priestley, N., Calvi, G., y Kowalsky, M. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press. 721 pp.
- SAP 2000 (versión 15.0) (2011) Software Integrado para Diseño y Analisis Estructural. *Computers & Structures, Inc.*, Berkeley, California.
- Sanjayan, G. (1988). "Dynamic Response of Reinforced Concrete Structures with Softening Behavior", PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, Monash Univ., Clayton, Victoria, Australia.
- Sanjayan, G., y Darvall, P. L. (1995). "Singularities in RC Beams Elements with Finnite-Length Hinges." *Journal Of Structural Engineering*, v 121, pp 39-47.
- Sennett, R. E. (1994). *Matrix Analysis of Structures*. Illinois. Waveland Press Inc. 228 pp.
- Shedid, M. T., El-Dakhakhni, W. W., y Drysdale, R. G. (2010). "Seismic Performance Parameters for Reinforced Concrete-Block Shear Wall Construction ." *Journal of Performance of Constructed Facilities* , v 24, pp 4-18.
- Wong, M. B. (2009). *Plastic Analysis and Design of Steel Structures*. Australia. Elsevier Ltd. 257 pp.
- Wood, R. H. (1968). "Some Controversial and Curious Developments in the Plastic Theory of Structures". *Engrg. Plasticity*, pp 665-691.

APÉNDICE A. CÓDIGO DEL SISTEMA SEPA

SEPA SYSTEM-MAIN LOGIC CODE

Option Explicit: Option Base 1

'Programmer: Natalie Theut Jimenez'

'Date: 2/2012-4/2013'

'Main Logic-SEPA System'

'Declare Program Variables

'System Worksheets

Dim InputSheet As Worksheet '----->Worksheet Containing
Input Data

Dim ResultSheet As Worksheet '----->Worksheet Containing
Analysis Results

'Nodes Variables

Dim nN '----->Total Number of Nodes

Dim NodeId() '----->Node Names

Dim x(), Y() '----->Node Coordinates

Dim DOF() '----->Node Constraints

Dim NodeForces() '----->Nodal Constant Applied
Forces

Dim Node_Displacements() '----->Nodal Constant Applied
Displacements

'Member Variables

Dim nE '----->Number of Elements

Dim ElementId() '----->Element Names

Dim ElementNodes() '----->Element Connectivities

Dim Element_A(), Element_I(), Element_E() '----->Element Section
Properties

Dim Element_Lpi(), Element_Lpj(), Element_Plastic_Slopes() '----->Element Plastic
Properties

Dim Element_Mp(), Element_MpMinus() '----->Element Plastic &
Ultimate Moments

Dim Ke() '----->Element Local Stiffness
Matrixes

Dim De() '----->Element Directional Matrixes

Dim k() '----->Element Global Stiffness
 Matrixes
 Dim E_DOF() '----->Element Stiffness Matrixes
 Degrees of Freedom
 Dim MemberF() '----->Members Local Forces Vector
 Dim MemberU() '----->Members Local
 Displacements Vector
 Dim Member_AccumF() '----->Members Local
 Accumulated Forces Vector
 Dim Member_AccumU() '----->Members Local
 Accumulated Displacements Vector

'Total Structure System Variables
 Dim Kg() '----->Total System Global Stiffness
 Matrix
 Dim F() '----->Total System Forces Vector
 Dim ReducedU() '----->Reduced System Global
 Displacements Vector
 Dim U() '----->Total System Global
 Displacements Vector
 Dim ReducedKgDOF() '----->Reduced System Global
 Stiffness Matrix Degrees of Freedom
 Dim ReducedKg() '----->Reduced System Global
 Stiffness Matrix
 Dim ReducedF() '----->Reduced System Global
 Forces Vector
 Dim AccumF() '----->Total Accumulated System
 Forces Vector
 Dim AccumU() '----->Total Accumulated System
 Displacements Vector

'Pushover Analysis Variables
 Dim Base_Shear_Delta '----->Increment of Base Shear
 Applied to Structure
 Dim Base_Shear '----->Base Shear Applied to
 Structure
 Dim H_Force_Distribution() '----->Pushover Horizontal Force
 Distribution in Percent(%) by Floor
 Dim H_Forces() '----->Pushover Horizontal Forces
 Applied to Floors based on Base Shear & Force Distribution
 Dim Force_Application_Nodes() '----->Nodes at which Horizontal
 Pushover Forces are Applied
 Dim Monitor_Node '----->Main Node Monitored and
 Plotted During the Analysis

Dim PreviousPlasticity() '----->Elements' Plasticity from
Previous Iterations
Dim IsPlastic() '----->Elements' Present Plasticity
Dim Colapsed As Boolean '----->Boolean Determining the
Colapse of the Structure
Dim Shear_Support_DOFF() '----->Nodes where Base Shear is
Distributed

'2013_03_22

Dim Element_Mult(), Element_MultMinus() '----->Element Positive and
Negative Ultimate Moments
Dim Element_Mx(), Element_MxMinus() '----->Diference between
Hinge Ultimate Moment and Plastic Moment
Dim Element_Phi_y(), Element_Phi_yMinus() '----->Element Positive and
Negative Yield Curvatures
Dim Element_Phi_Py1(), Element_Phi_Py1Minus()
Dim Element_Phi_Pu1(), Element_Phi_Pu1Minus()
Dim Element_Phi_Ult(), Element_Phi_UltMinus() '----->Element Positive and
Negative Ultimate Curvatures
Dim Element_Phi_P(), Element_Phi_PMinus() '----->Diference between
Hinge Phi(ult.) and Phi(y)

Dim Element_Phi(), Element_Accumulated_Phi() '----->Element Curvatures

Dim iHingeFormation As Long

Dim MyRow, MyM
Dim MyJ, myk

Dim myMemberRow
Dim myMemberCol
Dim MySystemRow

Dim Accumulated_Shear

Sub Analyze_Click()

Control_Selection.Show

End Sub

Sub SEPA_DispatchControl_Main()

```

'Ask User if results should be printed...
Dim PrintSystem
PrintSystem = MsgBox("Do you wish to print system matrixes?", vbYesNo, "System Print")

Dim i As Long, j As Long
Dim Iterations As Long
Const MaxIterations = 10000000

'Dimension Accumulated Shear And Monitor Node Displacement...
Dim Accum_Shear
Dim Accum_Displacement

'New Stuff
Dim Virtual_Displacement
Dim H_Displacements()

'Variables to Determine Hinge Formation
Dim NewHinge As Boolean
Dim MyHinges As String
Dim MyPreviousHinges

'Read Structure Data
Call Read_Data
Call Calculate_Hinge_Properties

'Dimension Member Forces & Displacements Variables...
ReDim MemberF(nE, 6, 1)
ReDim MemberU(nE, 6, 1)
ReDim Member_AccumF(nE, 6, 1)
ReDim Member_AccumU(nE, 6, 1)

'Dimension Global Forces And Displacements...
ReDim AccumF(nN * 3, 1)
ReDim AccumU(nN * 3, 1)

'Dimension Member Curvature Variables...
ReDim Element_Phi(nE, 2)
ReDim Element_Accumulated_Phi(nE, 2)

>Delete Analysis Detail Worksheets...
ThisWorkbook.Worksheets("Analysis Detail").Cells.Delete
ThisWorkbook.Worksheets("Member Analysis Detail").Cells.Delete

```

```
Accum_Shear = 0
```

```
Accum_Disp = 0
```

```
'Maybe this is junk...(I don't know anymore...)
```

```
ReDim Accumulated_Moments(nE, 2)
```

```
Call Print_Element_SAP_Data
```

```
'Initialize Applied Displacements to Structure...
```

```
Virtual_Displacement = 0
```

```
H_Displacements = MatrixScalarMult(H_Force_Distribution(), Virtual_Displacement)
```

```
'Initialize Results Worksheet
```

```
Call Delete_WS_Charts(ResultSheet)
```

```
With ResultSheet
```

```
    Range(.Range("R_ID").Offset(1, 0),  
Range("R_Hinges").Offset(.Cells.SpecialCells(xlLastCell).Row, 0)).EntireRow.Delete  
(xlShiftUp)
```

```
    iHingeFormation = iHingeFormation + 1
```

```
    .Range("R_ID").Offset(iHingeFormation, 0).Value = iHingeFormation
```

```
    .Range("R_Applied_Force").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Displacement").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Hinges").Offset(iHingeFormation, 0).Value = "None: Elastic Structure"
```

```
    .Activate
```

```
End With
```

```
Do '--->Loop on the formation of hinges
```

```
    NewHinge = False
```

```
    Call System_Builder
```

```
    Kg = System_Rigidity_Matrix(nN, E_DOF(), k())
```

```
Do '--->Loop on the increment of nodal displacements
```

```
    Iterations = Iterations + 1
```

```
    If Iterations > MaxIterations Then
```

```
        Debug.Print "Maximum number of iterations reached..." & vbCrLf & _  
        "Aborting Analysis... :("
```

```

    End
End If

'Build current iterations global displacement vector
F = System_Applied_Forces_Vector(nN, NodeForces())
U = System_Applied_Displacements_Vector(nN, Node_Displacements())

'Add displacements increment to global displacement vector
For i = LBound(Force_Application_Nodes) To UBound(Force_Application_Nodes)
    U(Force_Application_Nodes(i) * 3 - 2, 1) = U(Force_Application_Nodes(i) * 3 - 2, 1)
+ H_Displacements(1, i)
Next i

'Solve current system using Partitioning Method
Call Solve_System_With_Known_Displacements(F(), Kg(), U(),
Force_Application_Nodes())

For i = 1 To nE
    Call Element_Local_Forces(i, _
        E_DOF(), Ke(), De(), _
        U(), _
        MemberF() _
    )
Next i

'Determine new structure plasticity...
Call Check_Plasticity

'Compare current structure plasticity with the one on the previous iteration...
MyHinges = "New Hinge(s) @"
For i = 1 To nE
    If (IsPlastic(i, 1) <> PreviousPlasticity(i, 1)) Then
        MyHinges = MyHinges & " Element #" & i & ":S"
        NewHinge = True
    End If
    If (IsPlastic(i, 2) <> PreviousPlasticity(i, 2)) Then
        MyHinges = MyHinges & " Element #" & i & ":E"
        NewHinge = True
    End If
Next i

If NewHinge = True Then

    'Accumulate Member Forces And Displacements...
```

```

Call Sum_Forces_And_Displacements

'Accumulate Member Curvatures...
For i = 1 To nE
    If (IsPlastic(i, 1) <> PreviousPlasticity(i, 1)) Then
        If MemberF(i, 3, 1) >= 0 Then
            Element_Accumulated_Phi(i, 1) = Element_Phi_y(i, 1)
        ElseIf MemberF(i, 3, 1) < 0 Then
            Element_Accumulated_Phi(i, 1) = Element_Phi_yMinus(i, 1)
        End If
    Else
        Element_Accumulated_Phi(i, 1) = Element_Accumulated_Phi(i, 1) +
Element_Phi(i, 1)
    End If
    If (IsPlastic(i, 2) <> PreviousPlasticity(i, 2)) Then
        If MemberF(i, 6, 1) >= 0 Then
            Element_Accumulated_Phi(i, 2) = Element_Phi_y(i, 2)
        ElseIf MemberF(i, 6, 1) < 0 Then
            Element_Accumulated_Phi(i, 2) = Element_Phi_yMinus(i, 2)
        End If
    Else
        Element_Accumulated_Phi(i, 2) = Element_Accumulated_Phi(i, 2) +
Element_Phi(i, 2)
    End If
Next i

'Copy Plasticity Matrix
PreviousPlasticity = CopyArray2D(IsPlastic())

'Determine Base Shear & Displacements
Base_Shear = 0
For i = LBound(Shear_Support_DOF) To UBound(Shear_Support_DOF)
    Base_Shear = Base_Shear + F(Shear_Support_DOF(i), 1)
Next i
Accum_Shear = Accum_Shear + (-1) * Base_Shear
Accum_Disp = Accum_Disp + U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)

'Initialize Displacements for Next Series of Iterations
Virtual_Displacement = Base_Shear_Delta
H_Displacements = MatrixScalarMult(H_Force_Distribution(),
Virtual_Displacement)

'Print Current Results
With ResultSheet

```



```

        .Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = iHingeFormation + 1
        .Range("R_Applied_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = (-1) *
Base_Shear
        .Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = Accum_Shear
        .Range("R_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)
        .Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
Accum_Displacement
        .Range("R_Hinges").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = MyHinges
    End With

    'Print System Matrixes if user desires them...
    If PrintSystem = vbYes Then

        'Calculate System Print Position...
        MySystemRow = (iHingeFormation - 1) * nN * 3 + (iHingeFormation - 1) * 3

        'Print Current Iterations Global System Matrixes
        Call Print_Global_System_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic Elements",
MyPreviousHinges))

        'Print Current Iteration Member Local Forces, Local Rigidity Matrixes And Local
Displacements...
        Call Print_Member_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic Elements",
MyPreviousHinges))

        'Copy Formed Hinges String to MyPreviousHinges for Next Print...
        MyPreviousHinges = MyHinges

    End If

    iHingeFormation = iHingeFormation + 1

    Exit Do

Else

    If Colapsed Then

        Debug.Print "Structure Collapsed..." & vbCrLf & _
            "Too Bad... :("

        'Accumulate Member Forces And Displacements...
        Call Sum_Forces_And_Displacements

```

```

Base_Shear = 0
For i = LBound(Shear_Support_DOF) To UBound(Shear_Support_DOF)
    Base_Shear = Base_Shear + F(Shear_Support_DOF(i), 1)
Next i
Accum_Shear = Accum_Shear + -1 * Base_Shear
Accum_Displacement = Accum_Displacement + U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)

With ResultSheet
    .Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = iHingeFormation + 1
    .Range("R_Applied_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = -1 *
Base_Shear
    .Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
Accum_Shear
    .Range("R_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)
    .Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
Accum_Displacement
    .Range("R_Hinges").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = "Structure
Collapse"
End With

'Print System Matrixes if user desires them
If PrintSystem = vbYes Then

    'Calculate System Print Position...
    MySystemRow = (iHingeFormation - 1) * nN * 3 + (iHingeFormation - 1) * 3

    'Print Current Iterations Global System Matrixes
    Call Print_Global_System_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic
Elements During Which Collapse Was Detected", (MyPreviousHinges & " During Which
Collapse Was Detected")))

    'Print Current Iteration Member Local Forces, Local Rigidity Matrixes And
Local Displacements...
    Call Print_Member_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic Elements
During Which Collapse Was Detected", (MyPreviousHinges & " During Which Collapse
Was Detected")))

    'Copy Formed Hinges String to MyPreviousHinges for Next Print...
    MyPreviousHinges = MyHinges

End If

```

```

        Call Line_Chart(Range(Range("R_Accum_Displacement").Offset(1, 0),
Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0)), _
        Range(Range("R_Accum_Force").Offset(1, 0),
Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0)), _
        Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 3, 0).Left,
Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 3, 0).Top, _
        Range(Range("R_ID"), Range("R_Hinges")).Width, 300, _
        "Pushover Curve" _
        )

    End

End If

    Virtual_Displacement = Virtual_Displacement + Base_Shear_Delta '--->Needs
Change
    H_Displacements = MatrixScalarMult(H_Force_Distribution(),
Virtual_Displacement) '----Marron

End If

Loop

Loop

End Sub

Function Nz(A, B)
Dim Buffer
Buffer = B
If VBA.Len(A) > 0 Then Buffer = A
Nz = Buffer
End Function

Sub Sum_Forces_And_Displacements()

Dim i, j

'Sum Member Forces And Displacements...
For i = 1 To nE
    For j = 1 To 6
        Member_AccumF(i, j, 1) = Member_AccumF(i, j, 1) + MemberF(i, j, 1)
        Member_AccumU(i, j, 1) = Member_AccumU(i, j, 1) + MemberU(i, j, 1)
    Next j

```

Next i

'Accumulate Global Reactions And Displacements...

For i = LBound(F, 1) To UBound(F, 1)

AccumF(i, 1) = AccumF(i, 1) + F(i, 1)

AccumU(i, 1) = AccumU(i, 1) + U(i, 1)

Next i

End Sub

Sub Print_Global_System_Detail(Hinges)

Dim ws

Dim i

Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Analysis Detail")

With ws

With .Range("A1").Offset(MySystemRow, 0)

.Value = "For Set of Iterations With " & Hinges & "..."

.Font.Size = 20

.Font.Bold = True

.Font.Underline = xlUnderlineStyleSingle

End With

'Global Reactions Vector {F}...

With .Range("A2").Offset(MySystemRow, 0)

.Value = "{F}"

.Font.Size = 14

.Font.Bold = True

.HorizontalAlignment = xlCenter

End With

Call Print_Matrix(F(), _
ws.Range("A3").Offset(MySystemRow, 0) _
)

'Global System Rigidity Matrix [K]...

With .Range("A2").Offset(MySystemRow, 2)

.Value = "[K]"

.Font.Size = 14

.Font.Bold = True

.HorizontalAlignment = xlCenter

End With

Call Print_Matrix(Kg(), _
ws.Range("A3").Offset(MySystemRow, 2) _
)

```

    )
'Global Displacements Vector {U}...
With .Range("A2").Offset(MySystemRow, 3 + UBound(Kg, 1))
    .Value = "{U}"
    .Font.Size = 14
    .Font.Bold = True
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
Call Print_Matrix(U(), _
    ws.Range("A3").Offset(MySystemRow, 3 + UBound(Kg, 1)) _
)
'Global Accumulated Reactions Vector {Accum-F}...
With .Range("A2").Offset(MySystemRow, 3 + UBound(Kg, 1) + 2)
    .Value = "{Accum-F}"
    .Font.Size = 14
    .Font.Bold = True
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
Call Print_Matrix(AccumF(), _
    ws.Range("A3").Offset(MySystemRow, 3 + UBound(Kg, 1) + 2) _
)

'Global Accumulated Displacements Vector {Accum-U}...
With .Range("A2").Offset(MySystemRow, 3 + UBound(Kg, 1) + 2 + 2)
    .Value = "{Accum-U}"
    .Font.Size = 14
    .Font.Bold = True
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
Call Print_Matrix(AccumU(), _
    ws.Range("A3").Offset(MySystemRow, 3 + UBound(Kg, 1) + 2 + 2) _
)

.Range("A1").Offset(0, 1).EntireColumn.ColumnWidth = 2
.Range("A1").Offset(0, 2 + UBound(Kg, 1)).EntireColumn.ColumnWidth = 2
.Range("A1").Offset(0, 4 + UBound(Kg, 1)).EntireColumn.ColumnWidth = 15
.Range("A1").Offset(0, 6 + UBound(Kg, 1)).EntireColumn.ColumnWidth = 4

End With

End Sub

Sub Print_Member_Detail(Hinges)

```

```

Dim ws '----->Worksheet on Which Results Shall Be Printed
Dim i '----->Member Looping Variable
Dim tmp() '----->Temporary Variable with a Subset of the 3D Arrays in 2D Format

```

```

myMemberRow = 1
Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Member Analysis Detail")

```

```

With ws

```

```

    'Iteration Header Identifying Plastic Elements...
    With .Range("A1").Offset(0, myMemberCol)
        .Value = "For Set of Iterations With " & Hinges & "..."
        .Font.Size = 14
        .Font.Bold = True
        .Font.Underline = xlUnderlineStyleSingle
    End With

```

```

    For i = 1 To nE

```

```

        'Member Header...
        With .Range("A1").Offset(myMemberRow, myMemberCol)
            .Value = "For Member#" & i
            .Font.Size = 14
            .Font.Bold = True
            .Font.Underline = xlUnderlineStyleSingle
        End With

```

```

        'Member {P}...
        With .Range("A1").Offset(myMemberRow + 1, myMemberCol)
            .Value = "{P}"
            .Font.Size = 14
            .Font.Bold = True
            .HorizontalAlignment = xlCenter
        End With
        tmp = CopyArray3DTo2D(MemberF(), i)
        Call Print_Matrix(tmp(), .Range("A1").Offset(myMemberRow + 2, myMemberCol))

```

```

        'Member [K (Local)]...
        With .Range("A1").Offset(myMemberRow + 1, myMemberCol + 2)
            .Value = "[K (local)]"
            .Font.Size = 14
            .Font.Bold = True
            .HorizontalAlignment = xlLeft
        End With

```

```

tmp = CopyArray3DTo2D(Ke(), i)
Call Print_Matrix(tmp(), .Range("A1").Offset(myMemberRow + 2, myMemberCol + 2))

'Member {d}...
With .Range("A1").Offset(myMemberRow + 1, myMemberCol + 6 + 3)
    .Value = "{d}"
    .Font.Size = 14
    .Font.Bold = True
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
tmp = CopyArray3DTo2D(MemberU(), i)
Call Print_Matrix(tmp(), .Range("A1").Offset(myMemberRow + 2, myMemberCol + 9))

'Member {Accum-P}...
With .Range("A1").Offset(myMemberRow + 1, myMemberCol + 6 + 3 + 2)
    .Value = "{Accum-P}"
    .Font.Size = 12
    .Font.Bold = True
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
tmp = CopyArray3DTo2D(Member_AccumF(), i)
Call Print_Matrix(tmp(), .Range("A1").Offset(myMemberRow + 2, myMemberCol +
11))

'Member {Accum-d}
With .Range("A1").Offset(myMemberRow + 1, myMemberCol + 6 + 3 + 2 + 2)
    .Value = "{Accum-d}"
    .Font.Size = 12
    .Font.Bold = True
    .HorizontalAlignment = xlCenter
End With
tmp = CopyArray3DTo2D(Member_AccumU(), i)
Call Print_Matrix(tmp(), .Range("A1").Offset(myMemberRow + 2, myMemberCol +
13))

myMemberRow = myMemberRow + 6 + 3

Next i

'Worksheet Format...
.Range("A1").Offset(0, myMemberCol + 1).EntireColumn.ColumnWidth = 2
.Range("A1").Offset(0, myMemberCol + 8).EntireColumn.ColumnWidth = 2
.Range("A1").Offset(0, myMemberCol + 10).EntireColumn.ColumnWidth = 15
.Range("A1").Offset(0, myMemberCol + 12).EntireColumn.ColumnWidth = 2

```

```

        With Range(.Range("A1").Offset(0, myMemberCol + 14), .Range("A1").Offset(0,
myMemberCol + 15)).EntireColumn
            .ColumnWidth = 6
            With .Borders(xlInsideVertical)
                .Color = vbBlack
                .Weight = xlThick
            End With
        End With

End With

'Accumulate Columns for Next Iterations Results...
myMemberCol = myMemberCol + 16

Set ws = Nothing

End Sub

Sub Solve_System_With_Known_Displacements(F(), Kg(), U(), Disp_Application_Nodes())

'Junt
Dim i As Long, j As Long
Dim v()
v = Array(1)

Dim ppIndexes(), ssIndexes()
Dim Kpp(), Kss(), Kps(), Ksp()
Dim Fp(), Fs(), Up(), Us()

Dim iG As Long
Dim gKnown As Long
Dim gUnknown As Long
Dim iShearSupport As Long

'Determine known displacements degrees of freedom
iG = 0
For i = LBound(DOF, 2) To UBound(DOF, 2)
    For j = LBound(DOF, 1) To UBound(DOF, 1)
        iG = iG + 1
        If DOF(j, i) = 1 Or (IsInArray(i, Disp_Application_Nodes()) And iG = i * 3 - 2) Then
            gKnown = gKnown + 1
            ReDim Preserve ssIndexes(gKnown)
            ssIndexes(gKnown) = iG
        End If
    Next j
Next i

```



```

Next j
Next i

```

```

'Determine applied forces degrees of freedom

```

```

iG = 0
For i = LBound(DOF, 2) To UBound(DOF, 2)
  For j = LBound(DOF, 1) To UBound(DOF, 1)
    iG = iG + 1
    If Not IsInArray(iG, ssIndexes()) Then
      gUnknown = gUnknown + 1
      ReDim Preserve ppIndexes(gUnknown)
      ppIndexes(gUnknown) = iG
    End If
  Next j
Next i

```

```

'Determine Shear Support Nodes

```

```

iG = 0
For i = LBound(DOF, 2) To UBound(DOF, 2)
  For j = LBound(DOF, 1) To UBound(DOF, 1)
    iG = iG + 1
    If DOF(j, i) = 1 And iG = i * 3 - 2 Then
      iShearSupport = iShearSupport + 1
      ReDim Preserve Shear_Support_DOF(iShearSupport)
      Shear_Support_DOF(iShearSupport) = iG
    End If
  Next j
Next i

```

```

'Determine System SubMatrixes

```

```

Kpp = Get_SubMatrix(ppIndexes(), ppIndexes(), Kg())
Kss = Get_SubMatrix(ssIndexes(), ssIndexes(), Kg())
Kps = Get_SubMatrix(ppIndexes(), ssIndexes(), Kg())
Ksp = Get_SubMatrix(ssIndexes(), ppIndexes(), Kg())
Fp = Get_SubMatrix(ppIndexes(), v, F())
Fs = Get_SubMatrix(ssIndexes(), v, F())
Up = Get_SubMatrix(ppIndexes(), v, U())
Us = Get_SubMatrix(ssIndexes(), v, U())

```

```

'Determine Problem Results Using Partitioning Technique

```

```

Dim Temp(), Temp2()
Temp = MatrixMult(Kps(), Us())
Temp = MatrixSubtract(Fp(), Temp)
Up = LU_Decomposition(Kpp(), Temp)

```

```

Temp = MatrixMult(Ksp(), Up())
Temp2 = MatrixMult(Kss(), Us())
Fs = MatrixSum(Temp(), Temp2())

```

```

'Rebuild System Global Force and Displacement Vectors

```

```

F = Zeros(nN * 3, 1)
U = Zeros(nN * 3, 1)
For i = LBound(ppIndexes) To UBound(ppIndexes)
    F(ppIndexes(i), 1) = F(ppIndexes(i), 1) + Fp(i, 1)
    U(ppIndexes(i), 1) = U(ppIndexes(i), 1) + Up(i, 1)
Next i
For i = LBound(ssIndexes) To UBound(ssIndexes)
    F(ssIndexes(i), 1) = F(ssIndexes(i), 1) + Fs(i, 1)
    U(ssIndexes(i), 1) = U(ssIndexes(i), 1) + Us(i, 1)
Next i

```

```

'Debug.Print "Force Vector:" & vbCrLf & Matrix2String(F()) 'MsgBox "Force Vector:" &
vbCrLf & Matrix2String(F())
'Debug.Print "Displacement Vector:" & vbCrLf & Matrix2String(U()) 'MsgBox
"Displacement Vector:" & vbCrLf & Matrix2String(U())

```

```

End Sub

```

```

Function IsInArray(Value, myArray())
IsInArray = False
Dim i As Long
For i = LBound(myArray) To UBound(myArray)
    If Value = myArray(i) Then
        IsInArray = True
        Exit Function
    End If
Next i
End Function

```

```

Sub SEPA_ForceControl_Main()

```

```

Dim PrintSystem
PrintSystem = MsgBox("Do you wish to print system matrixes?", vbYesNo, "System Print")

```

```

Dim i As Long, j As Long
Dim Iterations As Long
Const MaxIterations = 10000000

```

```

'Dimension Accumulated Shear And Monitor Node Displacements...

```

```
Dim Accum_Shear
Dim Accum_Dis
```

```
'Variables to Determine Hinge Formation...
```

```
Dim NewHinge As Boolean
Dim MyHinges
Dim MyPreviousHinges
```

```
Call Read_Data
Call Calculate_Hinge_Properties
```

```
'Dimension Member Forces & Displacement Variables...
```

```
ReDim MemberF(nE, 6, 1)
ReDim MemberU(nE, 6, 1)
ReDim Member_AccumF(nE, 6, 1)
ReDim Member_AccumU(nE, 6, 1)
```

```
'Dimension Global Forces And Displacements...
```

```
AccumF = Zeros(nN * 3, 1)
AccumU = Zeros(nN * 3, 1)
```

```
'Dimension Member Curvature Variables...
```

```
ReDim Element_Phi(nE, 2)
ReDim Element_Accumulated_Phi(nE, 2)
```

```
'Determine Shear Support Nodes
```

```
Dim iG, iShearSupport
iG = 0
For i = LBound(DOF, 2) To UBound(DOF, 2)
    For j = LBound(DOF, 1) To UBound(DOF, 1)
        iG = iG + 1
        If DOF(j, i) = 1 And iG = i * 3 - 2 Then
            iShearSupport = iShearSupport + 1
            ReDim Preserve Shear_Support_DOF(iShearSupport)
            Shear_Support_DOF(iShearSupport) = iG
        End If
    Next j
Next i
```

```
'Delete Analysis Detail Worksheets...
```

```
ThisWorkbook.Worksheets("Analysis Detail").Cells.Delete
ThisWorkbook.Worksheets("Member Analysis Detail").Cells.Delete
```

```
Base_Shear = 0
```

```
Accum_Shear = 0
```

```
Accum_Disp = 0
```

```
'Print Member Hinge Properties...
```

```
Call Print_Element_SAP_Data
```

```
'Initialize Applied Displacements to Structure...
```

```
Dim Force_Increment
```

```
Force_Increment = 0
```

```
H_Forces = MatrixScalarMult(H_Force_Distribution(), Force_Increment)
```

```
Colapsed = False
```

```
'Initialize Results Worksheet...
```

```
Call Delete_WS_Charts(ResultSheet)
```

```
With ResultSheet
```

```
    Range(.Range("R_ID").Offset(1, 0),  
Range("R_Hinges").Offset(.Cells.SpecialCells(xlLastCell).Row, 0)).EntireRow.Delete  
(xlShiftUp)
```

```
    iHingeFormation = iHingeFormation + 1
```

```
    .Range("R_ID").Offset(iHingeFormation, 0).Value = iHingeFormation
```

```
    .Range("R_Applied_Force").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Displacement").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation, 0).Value = 0
```

```
    .Range("R_Hinges").Offset(iHingeFormation, 0).Value = "None: Elastic Structure"
```

```
    .Activate
```

```
End With
```

```
Do '--->Loop on the Formation of Hinges
```

```
    NewHinge = False '--->Initialize New Hinge Check
```

```
    Call System_Builder '--->Build the System Matrixes
```

```
    Kg = System_Rigidity_Matrix(nN, E_DOF(), k())
```

```
Do '--->Loop on the Increment of Pushover Forces
```

```
    Iterations = Iterations + 1 '--->Increment the Number of Iterations Performed
```

```
    If Iterations > MaxIterations Then
```

```
        Debug.Print "Maximum number of iterations reached..." & vbCrLf & _
```

```
        "Aborting Analysis... :("
```

```
    End
```

```

End If

F = System_Applied_Forces_Vector(nN, NodeForces())

'Add Pushover Forces to Global Force Vector
For i = LBound(Force_Application_Nodes, 1) To UBound(Force_Application_Nodes, 1)
    F(Force_Application_Nodes(i) * 3 - 2, 1) = F(Force_Application_Nodes(i) * 3 - 2, 1)
+ H_Forces(1, i)
Next i

'Call Build_Master_Kg(nN, E_DOF(), k(), NodeForces(), Kg(), F())

U = Zeros(nN * 3, 1)

Call Reduce_Master_Kg(nN, Kg, DOF(), F(), ReducedKgDOF(), ReducedKg(),
ReducedF()) '--->Determine Reduced System Global Stiffness Matrix

Call Calculate_Structure '--->Calculate Displacements, Global Forces and Member
Forces

Call Check_Plasticity '--->Check the Plasticity of Elements

'Compare Current Hinges with Previous Hinges
MyHinges = "New Hinge(s) @"
For i = 1 To nE
    If (IsPlastic(i, 1) <> PreviousPlasticity(i, 1)) Then
        MyHinges = MyHinges & " Element #" & i & ":S"
        NewHinge = True
    End If
    If (IsPlastic(i, 2) <> PreviousPlasticity(i, 2)) Then
        MyHinges = MyHinges & " Element #" & i & ":E"
        NewHinge = True
    End If
Next i

If NewHinge = True Then

    'Accumulate Member Forces And Displacements...
    Call Sum_Forces_And_Displacements

    'Accumulate Member Curvatures...
    For i = 1 To nE
        If (IsPlastic(i, 1) <> PreviousPlasticity(i, 1)) Then
            If MemberF(i, 3, 1) >= 0 Then

```

```

        Element_Accumulated_Phi(i, 1) = Element_Phi_y(i, 1)
    ElseIf MemberF(i, 3, 1) < 0 Then
        Element_Accumulated_Phi(i, 1) = Element_Phi_yMinus(i, 1)
    End If
Else
    Element_Accumulated_Phi(i, 1) = Element_Accumulated_Phi(i, 1) +
Element_Phi(i, 1)
End If
If (IsPlastic(i, 2) <> PreviousPlasticity(i, 2)) Then
    If MemberF(i, 6, 1) >= 0 Then
        Element_Accumulated_Phi(i, 2) = Element_Phi_y(i, 2)
    ElseIf MemberF(i, 6, 1) < 0 Then
        Element_Accumulated_Phi(i, 2) = Element_Phi_yMinus(i, 2)
    End If
Else
    Element_Accumulated_Phi(i, 2) = Element_Accumulated_Phi(i, 2) +
Element_Phi(i, 2)
End If
Next i

'Copy Plasticity Matrix...
PreviousPlasticity = CopyArray2D(IsPlastic())

Base_Shear = 0
For i = LBound(Shear_Support_DOF) To UBound(Shear_Support_DOF)
    Base_Shear = Base_Shear + F(Shear_Support_DOF(i), 1)
Next i
Accum_Shear = Accum_Shear + -1 * Base_Shear
Accum_Displacement = Accum_Displacement + U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)

'Print Summarized Results
With ResultSheet
    .Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = iHingeFormation + 1
    .Range("R_Applied_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = (-1) *
Base_Shear
    .Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = Accum_Shear
    .Range("R_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)
    .Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
Accum_Displacement
    .Range("R_Hinges").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = MyHinges
End With

'Print System Matrixes if user desires them...

```

```

If PrintSystem = vbYes Then

    'Calculate System Print Position...
    MySystemRow = (iHingeFormation - 1) * nN * 3 + (iHingeFormation - 1) * 3

    'Print Current Iterations Global System Matrixes
    Call Print_Global_System_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic Elements",
MyPreviousHinges))

    'Print Current Iteration Member Local Forces, Local Rigidity Matrixes And Local
Displacements...
    Call Print_Member_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic Elements",
MyPreviousHinges))

    'Copy Formed Hinges String to MyPreviousHinges for Next Print...
    MyPreviousHinges = MyHinges

End If

iHingeFormation = iHingeFormation + 1

'Reinitiate Base Shear & Pushover Forces
Force_Increment = Base_Shear_Delta
H_Forces = MatrixScalarMult(H_Force_Distribution(), Force_Increment)

Exit Do '--->Exit the Loop to Rebuild the System

Else

If Colapsed Then

    Debug.Print "Structure Collapsed..." & vbCrLf & _
        "Too Bad... :("

    'Accumulate Forces And Displacements...
    Call Sum_Forces_And_Displacements

    Base_Shear = 0
    For i = LBound(Shear_Support_DOF) To UBound(Shear_Support_DOF)
        Base_Shear = Base_Shear + F(Shear_Support_DOF(i), 1)
    Next i
    Accum_Shear = Accum_Shear + -1 * Base_Shear
    Accum_Disp = Accum_Disp + U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)

```

```

'Print Summarized Results
With ResultSheet
    .Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = iHingeFormation + 1
    .Range("R_Applied_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = (-1) *
Base_Shear
    .Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
Accum_Shear
    .Range("R_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
U(Monitor_Node * 3 - 2, 1)
    .Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value =
Accum_Displacement
    .Range("R_Hinges").Offset(iHingeFormation + 1, 0).Value = "Strucure
Collapse"
End With

'Print System Matrixes if user desires them...
If PrintSystem = vbYes Then

    'Calculate System Print Position...
    MySystemRow = (iHingeFormation - 1) * nN * 3 + (iHingeFormation - 1) * 3

    'Print Current Iterations Global System Matrixes
    Call Print_Global_System_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic
Elements", MyPreviousHinges))

    'Print Current Iteration Member Local Forces, Local Rigidity Matrixes And
Local Displacements...
    Call Print_Member_Detail(If(iHingeFormation = 1, "No Plastic Elements",
MyPreviousHinges))

    'Copy Formed Hinges String to MyPreviousHinges for Next Print...
    MyPreviousHinges = MyHinges

End If

'Generate Pushover Curve...
Call Line_Chart(Range(Range("R_Accum_Displacement").Offset(1, 0),
Range("R_Accum_Displacement").Offset(iHingeFormation + 1, 0)), _
    Range(Range("R_Accum_Force").Offset(1, 0),
Range("R_Accum_Force").Offset(iHingeFormation + 1, 0)), _
    Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 3, 0).Left,
Range("R_ID").Offset(iHingeFormation + 3, 0).Top, _
    Range(Range("R_ID"), Range("R_Hinges")).Width, 300, _
    "Pushover Curve" _

```



```

    )

End

End If

'Increment Base Shear and Pushover Forces
Force_Increment = Force_Increment + Base_Shear_Delta
H_Forces = MatrixScalarMult(H_Force_Distribution(), Force_Increment)

End If

Loop

Loop

End Sub

Sub Print_Element_SAP_Data()

Dim myWS As Worksheet
Set myWS = ThisWorkbook.Worksheets("Moment-Curvature Data")
Dim i

With myWS

    Range(.Range("A4").Offset(0,
0), .Range("A4").Offset(.Cells.SpecialCells(xlLastCell).Row, .Cells.SpecialCells(xlLastCell)
.Column)).EntireRow.Delete (xlShiftUp)

    For i = 1 To nE

        .Range("A1").Offset(i, 0).Value = i

        .Range("B1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Mp(i)
        .Range("C1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Mx(i, 1)
        .Range("D1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Mult(i, 1)
        .Range("E1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_y(i, 1)
        .Range("F1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Py1(i, 1)
        .Range("G1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Pu1(i, 1)
        .Range("H1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Ult(i, 1)
        .Range("I1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_P(i, 1)

        .Range("J1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_MpMinus(i)
    
```

```
.Range("K1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_MxMinus(i, 1)
.Range("L1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_MultMinus(i, 1)
.Range("M1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_yMinus(i, 1)
.Range("N1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Py1Minus(i, 1)
.Range("O1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Pu1Minus(i, 1)
.Range("P1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_UltMinus(i, 1)
.Range("Q1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_PMinus(i, 1)
```

```
.Range("R1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Mp(i)
.Range("S1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Mx(i, 2)
.Range("T1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Mult(i, 2)
.Range("U1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_y(i, 2)
.Range("V1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Py1(i, 2)
.Range("W1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Pu1(i, 2)
.Range("X1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Ult(i, 2)
.Range("Y1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_P(i, 2)
```

```
.Range("Z1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_MpMinus(i)
.Range("AA1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_MxMinus(i, 2)
.Range("AB1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_MultMinus(i, 2)
.Range("AC1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_yMinus(i, 2)
.Range("AD1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Py1Minus(i, 2)
.Range("AE1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_Pu1Minus(i, 2)
.Range("AF1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_UltMinus(i, 2)
.Range("AG1").Offset(i + 2, 0).Value = Element_Phi_PMinus(i, 2)
```

Next i

End With

End Sub

Sub Calculate_Hinge_Properties()

```
ReDim Element_Mult(nE, 2)
ReDim Element_MultMinus(nE, 2)
ReDim Element_Mx(nE, 2)
ReDim Element_MxMinus(nE, 2)
```

```
ReDim Element_Phi_y(nE, 2)
ReDim Element_Phi_yMinus(nE, 2)
ReDim Element_Phi_Py1(nE, 2)
ReDim Element_Phi_Py1Minus(nE, 2)
ReDim Element_Phi_Pu1(nE, 2)
```

```

ReDim Element_Phi_Pu1Minus(nE, 2)
ReDim Element_Phi_Ult(nE, 2)
ReDim Element_Phi_UltMinus(nE, 2)
ReDim Element_Phi_P(nE, 2)
ReDim Element_Phi_PMinus(nE, 2)

```

```

Dim i As Long
Dim dx, dy, L

```

```

For i = 1 To nE

```

```

    'Lenght of Element

```

```

    dx = (x(ElementNodes(2, i)) - x(ElementNodes(1, i)))
    dy = (Y(ElementNodes(2, i)) - Y(ElementNodes(1, i)))
    L = VBA.Sqr(dx ^ 2 + dy ^ 2)

```

```

    'Positive Range

```

```

    If Element_Plastic_Slopes(1, i) > 0 Then
        Element_Mult(i, 1) = (L * Element_Mp(i)) / (L - Element_Lpi(i))
    Else
        Element_Mult(i, 1) = 0.2 * Element_Mp(i)
    End If
    If Element_Plastic_Slopes(2, i) > 0 Then
        Element_Mult(i, 2) = (L * Element_Mp(i)) / (L - Element_Lpj(i))
    Else
        Element_Mult(i, 2) = 0.2 * Element_Mp(i)
    End If

```

```

    Element_Mx(i, 1) = Element_Mult(i, 1) - Element_Mp(i)
    Element_Mx(i, 2) = Element_Mult(i, 2) - Element_Mp(i)

```

```

    Element_Phi_y(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Mp(i) / (Element_E(i) *
Element_I(i))), 6)
    Element_Phi_y(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Mp(i) / (Element_E(i) *
Element_I(i))), 6)

```

```

    Element_Phi_Py1(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Mult(i, 1) / (Element_E(i) *
Element_I(i))), 6)
    Element_Phi_Py1(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Mult(i, 2) / (Element_E(i) *
Element_I(i))), 6)

```

```

    Element_Phi_Ult(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_y(i, 1) + Element_Mx(i, 1) /
(Element_Plastic_Slopes(1, i) * Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

```

Element_Phi_Ult(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_y(i, 2) + Element_Mx(i, 2) / (Element_Plastic_Slopes(2, i) * Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

Element_Phi_P(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_Ult(i, 1) - Element_Phi_Py1(i, 1)), 6)
 Element_Phi_P(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_Ult(i, 2) - Element_Phi_Py1(i, 2)), 6)

Element_Phi_Pu1(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_y(i, 1) + Element_Phi_P(i, 1)), 6)
 Element_Phi_Pu1(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_y(i, 2) + Element_Phi_P(i, 2)), 6)

'Negative Range

If Element_Plastic_Slopes(1, i) > 0 Then

Element_MultMinus(i, 1) = (L * Element_MpMinus(i)) / (L - Element_Lpi(i))

Else

Element_MultMinus(i, 1) = 0.2 * Element_MpMinus(i)

End If

If Element_Plastic_Slopes(2, i) > 0 Then

Element_MultMinus(i, 2) = (L * Element_MpMinus(i)) / (L - Element_Lpj(i))

Else

Element_MultMinus(i, 2) = 0.2 * Element_MpMinus(i)

End If

Element_MxMinus(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_MultMinus(i, 1) - Element_MpMinus(i)), 6)

Element_MxMinus(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_MultMinus(i, 2) - Element_MpMinus(i)), 6)

Element_Phi_yMinus(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_MpMinus(i) / (Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

Element_Phi_yMinus(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_MpMinus(i) / (Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

Element_Phi_Py1Minus(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_MultMinus(i, 1) / (Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

Element_Phi_Py1Minus(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_MultMinus(i, 2) / (Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

Element_Phi_UltMinus(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_yMinus(i, 1) + Element_MxMinus(i, 1) / (Element_Plastic_Slopes(1, i) * Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

Element_Phi_UltMinus(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_yMinus(i, 2) + Element_MxMinus(i, 2) / (Element_Plastic_Slopes(2, i) * Element_E(i) * Element_I(i))), 6)

```
Element_Phi_PMinus(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_UltMinus(i, 1) -
Element_Phi_Py1Minus(i, 1)), 6)
```

```
Element_Phi_PMinus(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_UltMinus(i, 2) -
Element_Phi_Py1Minus(i, 2)), 6)
```

```
Element_Phi_Pu1Minus(i, 1) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_yMinus(i, 1) +
Element_Phi_PMinus(i, 1)), 6)
```

```
Element_Phi_Pu1Minus(i, 2) = VBA.Round(CSng(Element_Phi_yMinus(i, 2) +
Element_Phi_PMinus(i, 2)), 6)
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub Read_Data()
```

```
Dim i As Long
```

```
Dim iForceApplication As Long
```

```
Set InputSheet = ThisWorkbook.Worksheets("Structure Data")
```

```
Set ResultSheet = ThisWorkbook.Worksheets("Results")
```

```
With InputSheet
```

```
Do Until IsEmpty(.Range("NodeId").Offset(i + 1, 0))
```

```
    i = i + 1
```

```
    ReDim Preserve NodeId(i)
```

```
    ReDim Preserve x(i)
```

```
    ReDim Preserve Y(i)
```

```
    ReDim Preserve DOF(3, i)
```

```
    ReDim Preserve NodeForces(3, i)
```

```
    ReDim Preserve Node_Displacements(3, i)
```

```
    NodeId(i) = .Range("NodeId").Offset(i, 0).Value
```

```
    x(i) = .Range("XCoordinate").Offset(i, 0).Value
```

```
    Y(i) = .Range("YCoordinate").Offset(i, 0).Value
```

```
    DOF(1, i) = .Range("DOF_X").Offset(i, 0).Value
```

```
    DOF(2, i) = .Range("DOF_Y").Offset(i, 0).Value
```

```
    DOF(3, i) = .Range("DOF_Phi").Offset(i, 0).Value
```

```
    NodeForces(1, i) = .Range("Node_Fx").Offset(i, 0).Value
```

```
    NodeForces(2, i) = .Range("Node_Fy").Offset(i, 0).Value
```

```
    NodeForces(3, i) = .Range("Node_Mz").Offset(i, 0).Value
```

```

Node_Displacements(1, i) = Nz(.Range("Node_Ux").Offset(i, 0).Value, 0)
Node_Displacements(2, i) = Nz(.Range("Node_Uy").Offset(i, 0).Value, 0)
Node_Displacements(3, i) = Nz(.Range("Node_Uz").Offset(i, 0).Value, 0)

If .Range("H_Force_Application").Offset(i, 0).Value = True Then
    iForceApplication = iForceApplication + 1
    ReDim Preserve Force_Application_Nodes(iForceApplication)
    Force_Application_Nodes(iForceApplication) = i
End If

If .Range("Monitor_Node").Offset(i, 0).Value = True Then
    Monitor_Node = i
End If

Loop
nN = i

i = 0
Do Until IsEmpty(.Range("Element_Id").Offset(i + 1, 0))

    i = i + 1

    ReDim Preserve ElementId(i)
    ReDim Preserve ElementNodes(2, i)
    ReDim Preserve Element_A(i)
    ReDim Preserve Element_I(i)
    ReDim Preserve Element_E(i)
    ReDim Preserve Element_Lpi(i)
    ReDim Preserve Element_Lpj(i)
    ReDim Preserve Element_Plastic_Slopes(2, i)
    ReDim Preserve Element_Mp(i)
    ReDim Preserve Element_MpMinus(i)

    ElementId(i) = .Range("Element_Id").Offset(i, 0).Value
    ElementNodes(1, i) = .Range("Node_i").Offset(i, 0).Value
    ElementNodes(2, i) = .Range("Node_j").Offset(i, 0).Value
    Element_A(i) = .Range("Element_A").Offset(i, 0).Value
    Element_I(i) = .Range("Element_I").Offset(i, 0).Value
    Element_E(i) = .Range("Element_E").Offset(i, 0).Value
    Element_Lpi(i) = .Range("Element_Lpi").Offset(i, 0).Value
    Element_Lpj(i) = .Range("Element_Lpj").Offset(i, 0).Value
    Element_Plastic_Slopes(1, i) = .Range("Element_Slopes_a").Offset(i, 0).Value
    Element_Plastic_Slopes(2, i) = .Range("Element_Slopes_b").Offset(i, 0).Value
    Element_Mp(i) = .Range("Element_Mp").Offset(i, 0).Value

```

```

    Element_MpMinus(i) = .Range("Element_MpMinus").Offset(i, 0).Value

Loop
nE = i

'Read Floor Horizontal Forces Distribution
i = 0
Dim DistMax
For i = 1 To .Range("Number_Floors").Value
    ReDim Preserve H_Force_Distribution(1, i)
    H_Force_Distribution(1, i) = .Range("Floor_Dist").Offset(i, 0).Value
    If i = 1 Then
        DistMax = H_Force_Distribution(1, i)
    Else
        If H_Force_Distribution(1, i) > DistMax Then
            DistMax = H_Force_Distribution(1, i)
        End If
    End If
Next i
For i = 1 To .Range("Number_Floors").Value
    H_Force_Distribution(1, i) = H_Force_Distribution(1, i) / DistMax
Next i
Debug.Print DistMax

Base_Shear_Delta = .Range("Shear_Increment").Value

End With

'Initialize Plasticity Check Arrays to False
ReDim IsPlastic(nE, 2)
ReDim PreviousPlasticity(nE, 2)
For i = LBound(IsPlastic, 1) To UBound(IsPlastic, 1)
    IsPlastic(i, 1) = False
    IsPlastic(i, 2) = False
    PreviousPlasticity(i, 1) = False
    PreviousPlasticity(i, 2) = False
Next i

End Sub

Sub System_Builder()

Dim i As Long
ReDim Ke(nE, 6, 6) '----->ReDimension Elements Local Matrixes

```

```

ReDim De(nE, 6, 6) '----->ReDimension Elements Directional Matrixes
ReDim k(nE, 6, 6) '----->Redimension Elements Global Matrixes
ReDim E_DOF(nE, 6) '----->ReDimension Elements Connections

```

```

For i = 1 To nE
  If (Not IsPlastic(i, 1)) And (Not IsPlastic(i, 2)) Then
    'Elastic Element
    Call Elastic_Rigidity_Matrix(i, _
                                E_DOF, Ke, De, k, _
                                x, Y, ElementNodes, _
                                Element_A, Element_I, Element_E _
                                )
  Else
    'Plastic Element
    Call Plastic_Rigidity_Matrix(i, _
                                E_DOF, Ke, De, k, _
                                x, Y, ElementNodes, _
                                Element_A, Element_I, Element_E, _
                                Element_Lpi, Element_Lpj, Element_Plastic_Slopes _
                                )
  End If
Next i

```

```

End Sub

```

```

Sub Calculate_Structure()

```

```

  Dim i As Long

```

```

  'Calculate Structure Displacemebts

```

```

  ReducedU = LU_Decomposition(ReducedKg(), ReducedF())

```

```

  U = Zeros(nN * 3, 1)

```

```

  For i = LBound(ReducedU, 1) To UBound(ReducedU, 1)

```

```

    U(ReducedKgDOF(i), 1) = U(ReducedKgDOF(i), 1) + Cdbl(ReducedU(i, 1))

```

```

  Next i

```

```

  'Calculate Total Global Forces

```

```

  F = MatrixMult(Kg(), U())

```

```

  'Calculate Member Forces

```

```

  ReDim MemberF(nE, 6, 1)

```

```

  For i = 1 To nE

```

```

    Call Element_Local_Forces(i, _

```



```

        E_DOF(), _
        Ke(), De(), U(), _
        MemberF() _
    )
Next i

End Sub

Sub Check_Plasticity()

Dim i As Long

For i = 1 To nE
    'Check Initial Node for Plasticity
    If (Member_AccumF(i, 3, 1) + MemberF(i, 3, 1)) >= Element_Mp(i) Or
    (Member_AccumF(i, 3, 1) + MemberF(i, 3, 1)) <= Element_MpMinus(i) Then
        IsPlastic(i, 1) = True
    End If
    'Check End Node for Plasticity
    If (Member_AccumF(i, 6, 1) + MemberF(i, 6, 1)) >= Element_Mp(i) Or
    (Member_AccumF(i, 6, 1) + MemberF(i, 6, 1)) <= Element_MpMinus(i) Then
        IsPlastic(i, 2) = True
    End If
    If ((Element_Accumulated_Phi(i, 1) + Element_Phi(i, 1)) <= Element_Phi_UltMinus(i, 1))
    Or ((Element_Accumulated_Phi(i, 1) + Element_Phi(i, 1)) >= Element_Phi_Ult(i, 1)) Then
        Colapsed = True
    End If
    If ((Element_Accumulated_Phi(i, 2) + Element_Phi(i, 2)) <= Element_Phi_UltMinus(i, 2))
    Or ((Element_Accumulated_Phi(i, 2) + Element_Phi(i, 2)) >= Element_Phi_Ult(i, 2)) Then
        Colapsed = True
    End If
Next i

End Sub

Sub Print_Results()

With ResultSheet
    For i = 1 To nE
        With .Range("A1").Offset(MyRow, 0)
            .Value = "Element #" & i
            .Font.Bold = True
            .EntireColumn.AutoFit

```

```

End With
For MyJ = LBound(E_DOF, 2) To UBound(E_DOF, 2)
    .Range("B1").Offset(MyRow, MyJ).Value = E_DOF(i, MyJ)
    .Range("I1").Offset(MyRow, MyJ).Value = E_DOF(i, MyJ)
    .Range("P1").Offset(MyRow, MyJ).Value = E_DOF(i, MyJ)
Next MyJ
Range(.Range("A1").Offset(MyRow, 1), .Range("P1").Offset(MyRow,
UBound(E_DOF, 2))).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
Range(.Range("V1").Offset(MyRow, 1), .Range("Z1").Offset(MyRow,
0)).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
Range(.Range("A1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("B1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0)).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
With Range(.Range("B1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("B1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0))
    .Merge
    .Value = "[Ke(" & i & ")]="
End With
With Range(.Range("I1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("I1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0))
    .Merge
    .Value = "[De(" & i & ")]="
End With
With Range(.Range("P1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("P1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0))
    .Merge
    .Value = "[Kg(" & i & ")]="
End With
Range(.Range("I1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("I1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0)).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
Range(.Range("P1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("P1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0)).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
Range(.Range("W1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("W1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0)).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
Range(.Range("Y1").Offset(MyRow + 1, 0), .Range("Y1").Offset(MyRow +
UBound(E_DOF, 2), 0)).Interior.Color = RGB(180, 255, 180)
For MyJ = 1 To 6
    For myk = 1 To 6
        .Range("B1").Offset(MyRow + 1, myk).Value = Ke(i, MyJ, myk)
        .Range("I1").Offset(MyRow + 1, myk).Value = De(i, MyJ, myk)
        .Range("P1").Offset(MyRow + 1, myk).Value = k(i, MyJ, myk)
    Next myk
    With .Range("W1").Offset(MyRow + 1, 0)
        .Value = "d(" & MyJ & ") = u(" & E_DOF(i, MyJ) & ")="
        .EntireColumn.AutoFit
    End With
End With

```

```

End With
.Range("X1").Offset(MyRow + 1, 0).Value = U(E_DOF(i, MyJ), 1)
With .Range("Y1").Offset(MyRow + 1, 0)
    .Value = "P(" & MyJ & ")="
    .EntireColumn.AutoFit
End With
.Range("Z1").Offset(MyRow + 1, 0).Value = MemberF(i, MyJ, 1)
.Range("A1").Offset(MyRow + 1, 0).Value = E_DOF(i, MyJ)
MyRow = MyRow + 1
Next MyJ
MyRow = MyRow + 1
Next i
End With

'For i = LBound(MyDOF, 1) To UBound(MyDOF, 1)
'    MyU(i, 1) = U(MyDOF(i), 1)
'Next i

End Sub

Sub Elastic_Rigidity_Matrix(iE, _
    E_DOF(), Ke(), De(), k(), _
    x(), Y(), C(), _
    Area(), Inertia(), Elastic_Modulus() _
)

Dim i As Long, j As Long

Dim L
Dim dx, dy
Dim lx, ly

'Element Local Degress of Freedom
E_DOF(iE, 1) = (C(1, iE) * 3 - 2): E_DOF(iE, 2) = (C(1, iE) * 3 - 1): E_DOF(iE, 3) = (C(1, iE) * 3)
E_DOF(iE, 4) = (C(2, iE) * 3 - 2): E_DOF(iE, 5) = (C(2, iE) * 3 - 1): E_DOF(iE, 6) = (C(2, iE) * 3)

'Delta X, Y and Length of Element
dx = (x(C(2, iE)) - x(C(1, iE)))
dy = (Y(C(2, iE)) - Y(C(1, iE)))
L = VBA.Sqrt(dx ^ 2 + dy ^ 2)

'Cosine and Sine

```

$$l_x = dx / L$$

$$l_y = dy / L$$

'Element Local Stiffness Matrix

$$Ke(iE, 1, 1) = Area(iE) * Elastic_Modulus(iE) / L$$

$$Ke(iE, 1, 2) = 0$$

$$Ke(iE, 1, 3) = 0$$

$$Ke(iE, 1, 4) = -Area(iE) * Elastic_Modulus(iE) / L$$

$$Ke(iE, 1, 5) = 0$$

$$Ke(iE, 1, 6) = 0$$

$$Ke(iE, 2, 1) = 0$$

$$Ke(iE, 2, 2) = 12 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^3$$

$$Ke(iE, 2, 3) = 6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 2, 4) = 0$$

$$Ke(iE, 2, 5) = -12 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^3$$

$$Ke(iE, 2, 6) = 6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 3, 1) = 0$$

$$Ke(iE, 3, 2) = 6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 3, 3) = 4 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L$$

$$Ke(iE, 3, 4) = 0$$

$$Ke(iE, 3, 5) = -6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 3, 6) = 2 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L$$

$$Ke(iE, 4, 1) = -Area(iE) * Elastic_Modulus(iE) / L$$

$$Ke(iE, 4, 2) = 0$$

$$Ke(iE, 4, 3) = 0$$

$$Ke(iE, 4, 4) = Area(iE) * Elastic_Modulus(iE) / L$$

$$Ke(iE, 4, 5) = 0$$

$$Ke(iE, 4, 6) = 0$$

$$Ke(iE, 5, 1) = 0$$

$$Ke(iE, 5, 2) = -12 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^3$$

$$Ke(iE, 5, 3) = -6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 5, 4) = 0$$

$$Ke(iE, 5, 5) = 12 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^3$$

$$Ke(iE, 5, 6) = -6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 6, 1) = 0$$

$$Ke(iE, 6, 2) = 6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 6, 3) = 2 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L$$

$$Ke(iE, 6, 4) = 0$$

$$Ke(iE, 6, 5) = -6 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L^2$$

$$Ke(iE, 6, 6) = 4 * Elastic_Modulus(iE) * Inertia(iE) / L$$

'Element Directional Matrix

$$De(iE, 1, 1) = l_x$$

$$De(iE, 1, 2) = l_y$$

```

De(iE, 1, 3) = 0
De(iE, 1, 4) = 0
De(iE, 1, 5) = 0
De(iE, 1, 6) = 0
De(iE, 2, 1) = -ly
De(iE, 2, 2) = lx
De(iE, 2, 3) = 0
De(iE, 2, 4) = 0
De(iE, 2, 5) = 0
De(iE, 2, 6) = 0
De(iE, 3, 1) = 0
De(iE, 3, 2) = 0
De(iE, 3, 3) = 1
De(iE, 3, 4) = 0
De(iE, 3, 5) = 0
De(iE, 3, 6) = 0
De(iE, 4, 1) = 0
De(iE, 4, 2) = 0
De(iE, 4, 3) = 0
De(iE, 4, 4) = lx
De(iE, 4, 5) = ly
De(iE, 4, 6) = 0
De(iE, 5, 1) = 0
De(iE, 5, 2) = 0
De(iE, 5, 3) = 0
De(iE, 5, 4) = -ly
De(iE, 5, 5) = lx
De(iE, 5, 6) = 0
De(iE, 6, 1) = 0
De(iE, 6, 2) = 0
De(iE, 6, 3) = 0
De(iE, 6, 4) = 0
De(iE, 6, 5) = 0
De(iE, 6, 6) = 1

```

'Temporary Matrixes fot Element Global Stiffness Matrix Calculation

Dim myMatrix As String

Dim TempK(), TempDe(), TempKe()

ReDim TempKe(UBound(Ke, 2), UBound(Ke, 3))

ReDim TempDe(UBound(De, 2), UBound(De, 3))

ReDim TempK(UBound(Ke, 2), UBound(Ke, 3))

TempKe = CopyArray3DTo2D(Ke, iE)

TempDe = CopyArray3DTo2D(De, iE)

```

'Element Global Stiffness Matrix
TempK = MatrixTranspose(TempDe)
TempK = MatrixMult(TempK, TempKe)
TempK = MatrixMult(TempK, TempDe)
For i = LBound(Ke, 2) To UBound(Ke, 3)
    For j = LBound(Ke, 3) To UBound(Ke, 3)
        k(iE, i, j) = TempK(i, j)
        If j = 1 Then
            myMatrix = myMatrix & VBA.Format(k(iE, i, j), "+000.000;-000.000")
        Else
            myMatrix = myMatrix & " " & VBA.Format(k(iE, i, j), "+000.000;-000.000")
        End If
    Next j
    myMatrix = myMatrix & VBA.Chr(10)
Next i

```

```

'Debug.Print "Element #" & iE & " Is Elastic"
'Debug.Print MyMatrix

```

```

End Sub

```

```

Sub Plastic_Rigidity_Matrix(iE, _
    E_DOF(), Ke(), De(), k(), _
    x(), Y(), C(), _
    Area(), Inertia(), Elastic_Modulus(), _
    Lpi(), Lpj(), Slopes() _
)

```

```

Dim i As Long, j As Long

```

```

Dim L '----->Lenght of Element
Dim dx, dy '----->Changes in Span & Height
Dim lx, ly '----->Cosine & Sine

```

```

'Element Local Degress of Freedom

```

```

E_DOF(iE, 1) = (C(1, iE) * 3 - 2): E_DOF(iE, 2) = (C(1, iE) * 3 - 1): E_DOF(iE, 3) = (C(1, iE) * 3)
E_DOF(iE, 4) = (C(2, iE) * 3 - 2): E_DOF(iE, 5) = (C(2, iE) * 3 - 1): E_DOF(iE, 6) = (C(2, iE) * 3)

```

```

'Delta X, Y and Length of Element

```

```

dx = (x(C(2, iE)) - x(C(1, iE)))
dy = (Y(C(2, iE)) - Y(C(1, iE)))
L = VBA.Sqr(dx ^ 2 + dy ^ 2)

```

'Cosine and Sine

$lx = dx / L$

$ly = dy / L$

Dim ktt As Double, kuu As Double

Dim Kpp As Double, kqq As Double

Dim kpq As Double, kqp As Double

Dim Factors()

$ktt = \text{Area}(iE) * \text{Elastic_Modulus}(iE) / L$

$kuu = ktt$

$\text{Factors} = \text{Plastic_Factors}(\text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 1), \text{Slopes}(1, iE), 1), \text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 2), \text{Slopes}(2, iE), 1), L, \text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 1), \text{Lpi}(iE), 0), \text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 2), \text{Lpj}(iE), 0))$

$Kpp = \text{Factors}(1, 1) * \text{Elastic_Modulus}(iE) * \text{Inertia}(iE) / L$

$kqp = \text{Factors}(2, 1) * \text{Elastic_Modulus}(iE) * \text{Inertia}(iE) / L$

$\text{Factors} = \text{Plastic_Factors}(\text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 2), \text{Slopes}(2, iE), 1), \text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 1), \text{Slopes}(1, iE), 1), L, \text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 2), \text{Lpj}(iE), 0), \text{IIf}(\text{IsPlastic}(iE, 1), \text{Lpi}(iE), 0))$

$kqq = \text{Factors}(1, 1) * \text{Elastic_Modulus}(iE) * \text{Inertia}(iE) / L$

$kpq = \text{Factors}(2, 1) * \text{Elastic_Modulus}(iE) * \text{Inertia}(iE) / L$

'Element Local Matrix

$Ke(iE, 1, 1) = ktt$

$Ke(iE, 1, 2) = 0$

$Ke(iE, 1, 3) = 0$

$Ke(iE, 1, 4) = -ktt$

$Ke(iE, 1, 5) = 0$

$Ke(iE, 1, 6) = 0$

$Ke(iE, 2, 1) = 0$

$Ke(iE, 2, 2) = (Kpp + kpq + kqp + kqq) / L^2$

$Ke(iE, 2, 3) = (Kpp + kqp) / L$

$Ke(iE, 2, 4) = 0$

$Ke(iE, 2, 5) = -(Kpp + kpq + kqp + kqq) / L^2$

$Ke(iE, 2, 6) = (kpq + kqq) / L$

$Ke(iE, 3, 1) = 0$

$Ke(iE, 3, 2) = (Kpp + kpq) / L$

$Ke(iE, 3, 3) = Kpp$

$Ke(iE, 3, 4) = 0$

$Ke(iE, 3, 5) = -(Kpp + kpq) / L$

$Ke(iE, 3, 6) = kpq$

$Ke(iE, 4, 1) = -ktt$

$Ke(iE, 4, 2) = 0$

$$\begin{aligned}
\text{Ke}(\text{iE}, 4, 3) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 4, 4) &= \text{ktt} \\
\text{Ke}(\text{iE}, 4, 5) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 4, 6) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 5, 1) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 5, 2) &= -(\text{Kpp} + \text{kpq} + \text{kqp} + \text{kqq}) / \text{L}^2 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 5, 3) &= -(\text{Kpp} + \text{kqp}) / \text{L} \\
\text{Ke}(\text{iE}, 5, 4) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 5, 5) &= (\text{Kpp} + \text{kpq} + \text{kqp} + \text{kqq}) / \text{L}^2 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 5, 6) &= -(\text{kpq} + \text{kqq}) / \text{L} \\
\text{Ke}(\text{iE}, 6, 1) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 6, 2) &= (\text{kqp} + \text{kqq}) / \text{L} \\
\text{Ke}(\text{iE}, 6, 3) &= \text{kqp} \\
\text{Ke}(\text{iE}, 6, 4) &= 0 \\
\text{Ke}(\text{iE}, 6, 5) &= -(\text{kqp} + \text{kqq}) / \text{L} \\
\text{Ke}(\text{iE}, 6, 6) &= \text{kqq}
\end{aligned}$$

'Element Directional Matrix

$$\begin{aligned}
\text{De}(\text{iE}, 1, 1) &= \text{lx} \\
\text{De}(\text{iE}, 1, 2) &= \text{ly} \\
\text{De}(\text{iE}, 1, 3) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 1, 4) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 1, 5) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 1, 6) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 2, 1) &= -\text{ly} \\
\text{De}(\text{iE}, 2, 2) &= \text{lx} \\
\text{De}(\text{iE}, 2, 3) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 2, 4) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 2, 5) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 2, 6) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 3, 1) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 3, 2) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 3, 3) &= 1 \\
\text{De}(\text{iE}, 3, 4) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 3, 5) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 3, 6) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 4, 1) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 4, 2) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 4, 3) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 4, 4) &= \text{lx} \\
\text{De}(\text{iE}, 4, 5) &= \text{ly} \\
\text{De}(\text{iE}, 4, 6) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 5, 1) &= 0 \\
\text{De}(\text{iE}, 5, 2) &= 0
\end{aligned}$$


```

De(iE, 5, 3) = 0
De(iE, 5, 4) = -ly
De(iE, 5, 5) = lx
De(iE, 5, 6) = 0
De(iE, 6, 1) = 0
De(iE, 6, 2) = 0
De(iE, 6, 3) = 0
De(iE, 6, 4) = 0
De(iE, 6, 5) = 0
De(iE, 6, 6) = 1

```

'Temporary Matrixes fot Element Global Stiffness Matrix Calculation

```

Dim TempK(), TempDe(), TempKe()
ReDim TempKe(UBound(Ke, 2), UBound(Ke, 3))
ReDim TempDe(UBound(De, 2), UBound(De, 3))
ReDim TempK(UBound(Ke, 2), UBound(Ke, 3))
TempKe = CopyArray3DTo2D(Ke, iE)
TempDe = CopyArray3DTo2D(De, iE)

```

'Element Global Stiffness Matrix

```

Dim myMatrix As String
TempK = MatrixTranspose(TempDe)
TempK = MatrixMult(TempK, TempKe)
TempK = MatrixMult(TempK, TempDe)
For i = LBound(Ke, 2) To UBound(Ke, 3)
    For j = LBound(Ke, 3) To UBound(Ke, 3)
        k(iE, i, j) = TempK(i, j)
        If j = 1 Then
            myMatrix = myMatrix & VBA.Format(k(iE, i, j), "+000.000;-000.000")
        Else
            myMatrix = myMatrix & " " & VBA.Format(k(iE, i, j), "+000.000;-000.000")
        End If
    Next j
    myMatrix = myMatrix & VBA.Chr(10)
Next i

```

'Debug.Print "Element #" & iE & " Is Plastic"

'Debug.Print "IsPlastic(Node i)=" & IsPlastic(iE, 1) & " IsPlastic(Node j) = " & IsPlastic(iE, 2)

'Debug.Print MyMatrix

End Sub

Function Zeros(nRows, nCols)

```

Dim i As Long, j As Long
Dim myMatrix()
ReDim myMatrix(nRows, nCols)
For i = LBound(myMatrix, 1) To UBound(myMatrix, 1)
    For j = LBound(myMatrix, 2) To UBound(myMatrix, 2)
        myMatrix(i, j) = 0
    Next j
Next i
Zeros = myMatrix()
End Function

```

```

Function System_Rigidity_Matrix(nN, _
    E_DOF(), k() _
)

```

```

Dim i As Long, j As Long '----->Function Loop Variables
Dim iE As Long '----->Elements Index
Dim myKg() '----->Function Result

```

```

'Build Global Stiffness Matrix

```

```

'Initialize

```

```

myKg = Zeros(nN * 3, nN * 3)

```

```

'Concatenate all global element stiffness matrixes

```

```

For iE = LBound(k, 1) To UBound(k, 1)

```

```

    For i = LBound(E_DOF, 2) To UBound(E_DOF, 2)

```

```

        For j = LBound(E_DOF, 2) To UBound(E_DOF, 2)

```

```

            myKg(E_DOF(iE, i), E_DOF(iE, j)) = myKg(E_DOF(iE, i), E_DOF(iE, j)) + k(iE, i,
j)

```

```

        Next j

```

```

    Next i

```

```

Next iE

```

```

System_Rigidity_Matrix = myKg

```

```

End Function

```

```

Function System_Applied_Forces_Vector(nN, _
    Node_Forces() _
)

```

```

Dim i As Long, j As Long

```

```

Dim iG As Long

```

```

Dim myF()

```

```

'Build Global Forces Vector

```

```

'Initialize

```

```

myF = Zeros(nN * 3, 1)

```

```

'Concatenate all global applied forces

```

```

For i = LBound(Node_Forces, 2) To UBound(Node_Forces, 2)

```

```

    For j = LBound(Node_Forces, 1) To UBound(Node_Forces, 1)
        iG = iG + 1
        myF(iG, 1) = myF(iG, 1) + NodeForces(j, i)
    Next j
Next i
System_Applied_Forces_Vector = myF()
End Function

```

```

Function System_Applied_Displacements_Vector(nN, _
                                           Node_Displacements() _
                                           )
Dim i As Long, j As Long
Dim iG As Long
Dim myU()
'Build Global Displacements Vector
'Initialize
myU = Zeros(nN * 3, 1)
'Concatenate all global displacements
For i = LBound(Node_Displacements, 2) To UBound(Node_Displacements, 2)
    For j = LBound(Node_Displacements, 1) To UBound(Node_Displacements, 1)
        iG = iG + 1
        myU(iG, 1) = myU(iG, 1) + Node_Displacements(j, i)
    Next j
Next i
System_Applied_Displacements_Vector = myU
End Function

```

```

Sub Build_Master_Kg(nN, _
                    E_DOF(), k(), NodeForces(), _
                    Kg(), F() _
                    )

```

'Routine Input Descriptions

'nN----->Total Nodes in System
'E_DOF()----->Element Degree of Freedom stored in 2D array
'K()----->Element Global Axis Stiffness Matrix [K] stored in 3D array
'NodeForces()----->Element Nodal Forces in Global Axis
'Kg()----->System Global Stiffness Matrix
'F()----->System Global Stiffness Matrix

'Local Variables

Dim i As Long, j As Long '----->Local Looping Variables
Dim iE As Long '----->Element Counter

Dim iG As Long '----->Used Degrees of Freedom Counter (Size of Reduced [Kg])

'Build Global Stiffness Matrix

'Initialize

ReDim Kg(nN * 3, nN * 3)

For i = LBound(Kg, 1) To UBound(Kg, 1)

For j = LBound(Kg, 2) To UBound(Kg, 2)

Kg(i, j) = 0

Next j

Next i

'Concatenate All Global Element Stiffness Matrixes

For iE = LBound(k, 1) To UBound(k, 1)

For i = LBound(E_DOF, 2) To UBound(E_DOF, 2)

For j = LBound(E_DOF, 2) To UBound(E_DOF, 2)

Kg(E_DOF(iE, i), E_DOF(iE, j)) = Kg(E_DOF(iE, i), E_DOF(iE, j)) + k(iE, i, j)

Next j

Next i

Next iE

'Build Base Global Forces Vector

iG = 0

F = Zeros(nN * 3, 1)

For i = LBound(NodeForces, 2) To UBound(NodeForces, 2)

For j = LBound(NodeForces, 1) To UBound(NodeForces, 1)

iG = iG + 1

F(iG, 1) = F(iG, 1) + NodeForces(j, i)

Next j

Next i

'Add Pushover Forces to Global Force Vector

For i = LBound(Force_Application_Nodes, 1) To UBound(Force_Application_Nodes, 1)

F(Force_Application_Nodes(i) * 3 - 2, 1) = F(Force_Application_Nodes(i) * 3 - 2, 1) +

H_Forces(1, i)

Next i

End Sub

Sub Reduce_Master_Kg(nN, _

Kg(), DOF(), F(), _

ReducedKgDOF(), ReducedKg(), ReducedF() _

)

'Routine Input Description

'nN----->Number of Nodes

'Kg()----->Global System Stiffness Matrix [Kg]

```

'DOF()----->Array Containing DOF Restrains
'F()----->Global Forces Vector {F}
'ReducedKgDOF()----->Degrass of Freedom Contained in Reduced [Kg]
'ReducedKg()----->Reduced Global System Stiffness Matrix [Kg]
'ReducedF()----->Reduced Global Forces Vector {F}

'Routine Local Variables
Dim i As Long, j As Long '----->Local Looping Variables
Dim gReduced As Long '----->Degrees of Freedom Used in Reduced [Kg] / Size of
Reduced [Kg]
Dim iG As Long '----->Total Degress of Freedom in [Kg] / Size of [Kg]

'Find unrestrained degrees of freedom
iG = 0
For i = LBound(DOF, 2) To UBound(DOF, 2)
    For j = LBound(DOF, 1) To UBound(DOF, 1)
        iG = iG + 1
        If DOF(j, i) = 0 Then
            gReduced = gReduced + 1
            ReDim Preserve ReducedKgDOF(gReduced)
            ReducedKgDOF(gReduced) = iG
        End If
    Next j
Next i

'Reduce the Global Stiffnex Matrix and the Global Forces Vector
ReducedKg = Zeros(gReduced, gReduced)
ReducedF = Zeros(gReduced, 1)
'Fill Reduced Matrix
For i = LBound(ReducedKgDOF, 1) To UBound(ReducedKgDOF, 1)
    For j = LBound(ReducedKgDOF, 1) To UBound(ReducedKgDOF, 1)
        ReducedKg(i, j) = Kg(ReducedKgDOF(i), ReducedKgDOF(j))
    Next j
    ReducedF(i, 1) = F(ReducedKgDOF(i), 1)
Next i

End Sub

Sub Element_Local_Forces(iE, _
    E_DOF(), _
    Ke(), De(), U(), _
    MemberF() _
)

```

'Routine Input Descriptions

'iE----->Element for which forces will be determined
'E_DOF()----->Element Nodal Degree of Freedom (Conectivity)
'Ke()----->Element Local Stiffness Matrix [Ke] stored in 3D array
'De()----->Element Directional Matrix [B] stored in 3D array
'U()----->Global System Displacements {U}
'MemberF()----->Element Local Forces {P} stored in 3D array

'Temporary Local Variables

Dim i As Long, j As Long '----->Local Looping Variables
Dim MyDOF() '----->Copy Element Nodal Degree of Freedom
(Conectivity) stored in 1D array
Dim MyDe() '----->Copy Element Local Directional Matrix [B] stored in
2D array
Dim MyKe() '----->Copy Element Local Stiffness Matrix [Ke] stored in
2D array
Dim myU() '----->Copy of Element Global Displacement {u} stored in
2D array
Dim myF() '----->Element Local Forces to be calculated

'Redimension Temporary Local Variables

ReDim myU(6, 1)
ReDim myF(6, 1)
ReDim MyKe(6, 6)
ReDim MyDe(6, 6)
ReDim MyDOF(6)

'Read Local Degree of Freedom and Local Displacements in Global Axis

For i = LBound(E_DOF, 2) To UBound(E_DOF, 2)
 MyDOF(i) = E_DOF(iE, i)
Next i
For i = LBound(MyDOF, 1) To UBound(MyDOF, 1)
 myU(i, 1) = U(MyDOF(i), 1)
Next i

'Dump Local Rigidity and Directional Matrix to Temporary Variables

MyKe = CopyArray3DTo2D(Ke(), iE)
MyDe = CopyArray3DTo2D(De(), iE)

'Calculate Local Member Forces

myU = MatrixMult(MyDe(), myU())
myF = MatrixMult(MyKe(), myU())

'Store Member Forces in Program Main Array

```

For i = LBound(myF, 1) To UBound(myF, 1)
    MemberF(iE, i, 1) = myF(i, 1)
    MemberU(iE, i, 1) = myU(i, 1)
    'Debug.Print "Local_U" & i & "= Global_U" & MyDOF(i) & " = " & VBA.Format(MyU(i,
1), "0.000000") & ",Local_F" & i & " = " & VBA.Format(MyF(i, 1), "0.000")
Next i

'Calculate Hinge Curvatures
If Not IsPlastic(iE, 1) Then
    Element_Phi(iE, 1) = (myF(3, 1)) / (Element_I(iE) * Element_E(iE))
Else
    If Element_Plastic_Slopes(1, iE) > 0 Then
        Element_Phi(iE, 1) = (myF(3, 1)) / (Element_Plastic_Slopes(1, iE) * Element_I(iE) *
Element_E(iE))
    ElseIf Element_Plastic_Slopes(1, iE) < 0 Then
        Element_Phi(iE, 1) = (-1) * (myF(3, 1)) / (Element_Plastic_Slopes(1, iE) *
Element_I(iE) * Element_E(iE))
    End If
End If

If Not IsPlastic(iE, 2) Then
    Element_Phi(iE, 2) = (myF(6, 1)) / (Element_I(iE) * Element_E(iE))
Else
    If Element_Plastic_Slopes(2, iE) > 0 Then
        Element_Phi(iE, 2) = (myF(6, 1)) / (Element_Plastic_Slopes(2, iE) * Element_I(iE) *
Element_E(iE))
    ElseIf Element_Plastic_Slopes(2, iE) < 0 Then
        Element_Phi(iE, 2) = (-1) * (myF(6, 1)) / (Element_Plastic_Slopes(2, iE) *
Element_I(iE) * Element_E(iE))
    End If
End If

'Debug.Print "Mi: " & VBA.Format(myF(3, 1), "#,##0") & "--Mj: " & VBA.Format(myF(6,
1), "#,##0")
'Debug.Print "For Element#" & iE & "-->Phi(i): " & Element_Accumulated_Phi(iE, 1) +
Element_Phi(iE, 1) & " --->Phi(j): " & Element_Accumulated_Phi(iE, 2) + Element_Phi(iE,
2)

End Sub

```

SEPA SYSTEM - PLASTIC FUNCTIONS MODULE

Option Explicit

Option Base 1

'Programmer: Natalie Theut Jimenez'

'Date: 2/2012-4/2013'

'Plastic Functions-SEPA System'

'Notación de desplazamientos locales

' u----> Desplazamientos Axiales

' v----> Desplazamientos Laterales

' phi--> Giros

' lpi--> Largo de seccion en nodo inicial con deformaciones plasticas

' lpj--> Largo de seccion en nodo final con deformaciones plasticas

' a---->

' b---->

Function fi1(M, n, A, B) As Double

$$\begin{aligned} \text{fi1} = & 2 * B * M * n^2 _ \\ & - B * n^2 _ \\ & + A * B * (M^2 * n^2 - 2 * M * n^2 - M^2 + n^2) _ \\ & + A * M^2 \end{aligned}$$

End Function

Function fi2(M, n, A, B) As Double

$$\begin{aligned} \text{fi2} = & A * B * (n^2 - M^2 + 2 * M^2 * n - M^2 * n^2) _ \\ & - B * n^2 _ \\ & - 2 * A * M^2 * n _ \\ & + A * M^2 \end{aligned}$$

End Function

Function fr12(M, n, A, B) As Double

$$\text{fr12} = 2 * A * B * M^2 * n^2$$

End Function

Function fj1(M, n, A, B) As Double


```

fj1 = 3 * B * M ^ 3 * n ^ 3 _
      - 3 * B * M * (M - 1) ^ 2 * n ^ 3 _
      - 3 * B * M * n ^ 3 _
      + 2 * B * n ^ 3 _
      - 3 * A * B * M ^ 3 * n _
      + 3 * A * B * M * (M - 1) ^ 2 * n ^ 3 _
      - A * (B - 1) * M ^ 3 * (n - 1) ^ 2 * (n + 2) _
      + A * B * (3 * M - 2) * n ^ 3 _
      + 3 * A * M ^ 3 * n _
      - A * M ^ 3 * n ^ 3

```

End Function

Function fj2(M, n, A, B) As Double

```

fj2 = 2 * B * n ^ 3 _
      - 3 * B * M * n ^ 3 _
      - A * (B - 1) * M ^ 3 * (n - 1) ^ 2 * (n + 2) _
      + A * B * (3 * M - 2) * n ^ 3 _
      - A * M ^ 3 * n ^ 3

```

End Function

Function fr21(M, n, A, B) As Double

```

fr21 = 6 * A * B * M ^ 3 * n ^ 3

```

End Function

Function Length_Factor(L, lp) As Double

```

If lp = 0 Then
    Length_Factor = 1
Else
    Length_Factor = L / lp
End If

```

End Function

```

Function Plastic_Factors(A, B, _
                        L, _
                        Lpi, Lpj _
                        )

```

Dim M

```

Dim n
Dim MyEqSys(2, 2)
Dim MyEqR(2, 1)

M = Length_Factor(L, Lpi)
n = Length_Factor(L, Lpj)

MyEqSys(1, 1) = fi1(M, n, A, B)
MyEqSys(1, 2) = fi2(M, n, A, B)
MyEqSys(2, 1) = fj1(M, n, A, B)
MyEqSys(2, 2) = fj2(M, n, A, B)

MyEqR(1, 1) = fr12(M, n, A, B)
MyEqR(2, 1) = fr21(M, n, A, B)

Dim x()
x = LU_Decomposition(MyEqSys(), MyEqR())

Plastic_Factors = x

End Function

```

SEPA SYSTEM - MATRIX MANAGEMENT MODULE

Option Explicit

Option Base 1

'Programmer: Natalie Theut Jimenez'

'Date: 2/2012-4/2013'

'Matrix Functions-SEPA System'

'-----LU Decomposition-----'

'Mathematical Form:

$[M] * \{x\} = \{b\} \rightarrow \{x\} = [M]^{-1} * \{b\}$

'Arguments:

'LU_Decomposition takes a two dimensional array of the coefficients from a system of linear equations [M]

'and their corresponding one dimensional array of results as arguments {b}.

'Results:

'The result is a one dimensional array containing the resulting X values that solve the system of linear

'equations {x}.

'Process:

'(1)-LU Decomposition

'(2)-Forward Substitution

'(3)-Backward Substitution

Function LU_Decomposition(A(), r())

Dim M()

M = CopyArray2D(A())

Dim B()

B = CopyArray2D(r())

Dim nRows

Dim nCols

Dim er

Dim x()

Const tol = 0.00000001

nRows = UBound(M, 1)

nCols = UBound(M, 2)

If nRows <> nCols Then

 LU_Decomposition = "Nonconcurrent number of rows and columns in [M]."

 Exit Function

End If

nRows = UBound(B, 1)

```

If nRows <> nCols Then
    LU_Decomposition = "Nonconcurrent number of rows and columns between [M] and {b}."
    Exit Function
End If
ReDim x(nRows)
Call LUD(M, B, nRows, x, tol, er)
LU_Decomposition = Vector2Matrix(x, "V")
End Function

Sub LUD(M, B, n, x, tol, er)
    Dim i As Long
    Dim j As Long
    Dim o() As Double
    Dim s() As Double
    ReDim o(n)
    ReDim s(n)
    Call Decompose(M, n, tol, o, s, er)
    If er = 0 Then
        Call Substitute(M, o, n, B, x)
    Else
        MsgBox "Ill conditioned system detected."
    End If
End Sub

Sub Decompose(M, n, tol, o, s, er)
    Dim i As Long
    Dim j As Long
    Dim k As Long
    Dim factor As Double
    For i = 1 To n
        o(i) = i
        s(i) = VBA.Abs(M(i, 1))
        For j = 2 To n
            If VBA.Abs(M(i, j)) > s(i) Then s(i) = VBA.Abs(M(i, j))
        Next j
    Next i
    For k = 1 To n - 1
        Call Pivot(M, o, s, n, k)
        If VBA.Abs(M(o(k), k) / s(o(k))) < tol Then
            Debug.Print "My Problem: " & VBA.Abs(M(o(k), k) / s(o(k)))
            er = -1
            Exit For
        End If
    Next k

```

```

For i = k + 1 To n
    factor = M(o(i), k) / M(o(k), k)
    M(o(i), k) = factor
    For j = k + 1 To n
        M(o(i), j) = M(o(i), j) - factor * M(o(k), j)
    Next j
Next i
Next k
If VBA.Abs(M(o(k), k) / s(o(k))) < tol Then er = -1
End Sub

```

```

Sub Pivot(M, o, s, n, k)
    Dim II As Long
    Dim P As Long
    Dim big As Double
    Dim dummy As Double
    P = k
    big = VBA.Abs(M(o(k), k) / s(o(k)))
    For II = k + 1 To n
        If dummy > big Then
            big = dummy
            P = II
        End If
    Next II
    dummy = o(P)
    o(P) = o(k)
    o(k) = dummy
End Sub

```

```

Sub Substitute(M, o, n, B, x)
    Dim k As Long
    Dim i As Long
    Dim j As Long
    Dim Sum As Double
    Dim factor As Double
    For k = 1 To n - 1
        For i = k + 1 To n
            factor = M(o(i), k)
            B(o(i), 1) = B(o(i), 1) - factor * B(o(k), 1)
        Next i
    Next k
    x(n) = B(o(n), 1) / M(o(n), n)
    For i = n - 1 To 1 Step -1
        Sum = 0

```

```

    For j = i + 1 To n
        Sum = Sum + M(o(i), j) * x(j)
    Next j
    x(i) = (B(o(i), 1) - Sum) / M(o(i), i)
Next i
End Sub
'-----'

'-----Transpose Matrix-----'
Function MatrixTranspose(A()) 'As Double()
If Not IsArray(A) Then
    MsgBox "[A] is not an array. Aborting matrix transpose.", _
        vbOKOnly, _
        "Transpose Matrix"
    Exit Function
End If
If ArrayDimensions(A) <> 2 Then
    MsgBox "[A] is not 2D array. Aborting matrix transpose.", _
        vbOKOnly, _
        "Transpose Matrix"
    Exit Function
End If
Dim i As Long
Dim j As Long
Dim Rows As Long
Dim Cols As Long
Dim T()
Rows = UBound(A, 1)
Cols = UBound(A, 2)
ReDim T(Cols, Rows)
For i = 1 To Rows
    For j = 1 To Cols
        T(j, i) = A(i, j)
    Next j
Next i
MatrixTranspose = T
End Function
'-----'

'-----Matrix Multiplication-----'
Function MatrixMult(A(), B()) 'As Double()

If Not IsArray(A) Or Not IsArray(B) Then
    MsgBox "[A] or [B] are not arrays. Aborting multiplication", _

```

```

        vbOKOnly, _
        "Matrix Multiplication"
    Exit Function
End If
Dim RowsA As Long, ColsA As Long
Dim RowsB As Long, ColsB As Long
RowsA = UBound(A, 1)
ColsA = UBound(A, 2)
RowsB = UBound(B, 1)
ColsB = UBound(B, 2)
If ColsA <> RowsB Then
    MsgBox "[A] and [B] dont have required dimensions. Aborting multiplication", _
        vbOKOnly, _
        "Matrix Multiplication"
    Exit Function
End If
Dim AB()
Dim Sum
Dim i As Long
Dim j As Long
Dim r As Long
Dim n As Long
ReDim AB(RowsA, ColsB)
n = ColsA
Sum = 0
For i = 1 To RowsA
    For j = 1 To ColsB
        For r = 1 To n
            Sum = Sum + A(i, r) * B(r, j)
        Next r
        AB(i, j) = Sum
        Sum = 0
    Next j
Next i
MatrixMult = AB
End Function
'-----'

Function MatrixScalarMult(M(), A)
If Not IsArray(M()) Then
    Exit Function
End If
Dim i As Long, j As Long
Dim Ma()

```

```

ReDim Ma(LBound(M, 1) To UBound(M, 1), LBound(M, 2) To UBound(M, 2))
For i = LBound(M, 1) To UBound(M, 1)
    For j = LBound(M, 2) To UBound(M, 2)
        Ma(i, j) = M(i, j) * A
    Next j
Next i
MatrixScalarMult = Ma
End Function

```

```

Function MatrixSum(A(), B())
If (Not IsArray(A) Or Not IsArray(B)) Or (UBound(A, 1) <> UBound(B, 1) Or UBound(A, 2)
<> UBound(B, 2)) Then
    Exit Function
End If
Dim i As Long, j As Long
Dim AB()
ReDim AB(UBound(A, 1), UBound(A, 2))
For i = LBound(A, 1) To UBound(A, 1)
    For j = LBound(A, 2) To UBound(A, 2)
        AB(i, j) = A(i, j) + B(i, j)
    Next j
Next i
MatrixSum = AB()
End Function

```

```

Function MatrixSubstract(A(), B())
If (Not IsArray(A) Or Not IsArray(B)) Or (UBound(A, 1) <> UBound(B, 1) Or UBound(A, 2)
<> UBound(B, 2)) Then
    Exit Function
End If
Dim i As Long, j As Long
Dim AB()
ReDim AB(UBound(A, 1), UBound(A, 2))
For i = LBound(A, 1) To UBound(A, 1)
    For j = LBound(A, 2) To UBound(A, 2)
        AB(i, j) = A(i, j) - B(i, j)
    Next j
Next i
MatrixSubstract = AB()
End Function

```

```

Function Get_SubMatrix(rowindexes(), colindexes(), Matrix())
Dim i As Long, j As Long
Dim M()
ReDim M(UBound(rowindexes), UBound(colindexes))

```



```

For i = LBound(rowindexes) To UBound(rowindexes)
    For j = LBound(colindexes) To UBound(colindexes)
        M(i, j) = Matrix(rowindexes(i), colindexes(j))
    Next j
Next i
Get_SubMatrix = M()
End Function

```

```

Function Matrix2String(M(), Optional DisplayFormat As String)
If Not IsArray(M) Then
    Exit Function
End If
If ArrayDimensions(M()) <> 2 Then
    Exit Function
End If
If VBA.Len(DisplayFormat) = 0 Then
    DisplayFormat = "0000.000"
End If
Dim MyString As String
Dim i As Long, j As Long
For i = LBound(M, 1) To UBound(M, 1)
    MyString = MyString & "| "
    For j = LBound(M, 2) To UBound(M, 2)
        MyString = MyString & VBA.Format(M(i, j), DisplayFormat) & " "
    Next j
    MyString = MyString & "|" & vbCrLf
Next i
Matrix2String = MyString
End Function

```

SEPA SYSTEM - ARRAYS MANAGEMENT MODULE

```

Option Explicit
Option Base 1
'Programmer: Natalie Theut Jimenez'
'Date: 2/2012-4/2013'
'Arrays Functions-SEPA System'
'-----Copy 2D Array-----
Function CopyArray2D(A())
If Not IsArray(A) Then
    MsgBox "CopyArray2D Aborting-->Array is not 2D.", vbOKOnly, "CopyArray2D"
    Exit Function
End If
Dim i As Long, j As Long
Dim MyCopy()
MyCopy = Zeros(UBound(A, 1), UBound(A, 2))
ReDim MyCopy(UBound(A, 1), UBound(A, 2))
For i = LBound(A, 1) To UBound(A, 1)
    For j = LBound(A, 1) To UBound(A, 2)
        MyCopy(i, j) = Nz(A(i, j), 0)
    Next j
Next i
CopyArray2D = MyCopy
End Function

'-----Copy 3D To 2D Array-----
Function CopyArray3DTo2D(A(), s)
If Not IsArray(A()) Then
    MsgBox "CopyArray3DTo2D Aborting-->A is not array.", vbOKOnly,
"CopyArray3DTo2D."
    End
End If
If ArrayDimensions(A()) <> 3 Then
    MsgBox "CopyArray3DTo2D Aborting-->A is not a 3D array.", vbOKOnly,
"CopyArray3DTo2D."
    End
End If
Dim i As Long, j As Long
Dim MyCopy()
ReDim MyCopy(UBound(A, 2), UBound(A, 3))
For i = LBound(A, 2) To UBound(A, 2)
    For j = LBound(A, 3) To UBound(A, 3)
        MyCopy(i, j) = A(s, i, j)
    Next j

```

```

Next i
CopyArray3DTo2D = MyCopy
End Function

```

```

Function GetRow(A(), Row)
Dim i As Long
Dim MyRow()
ReDim MyRow(1, UBound(A, 2))
For i = LBound(A, 2) To UBound(A, 2)
    MyRow(1, i) = A(Row, i)
Next i
GetRow = MyRow
End Function

```

```

Function GetColumn(A(), Col)
Dim i As Long
Dim MyCol()
ReDim MyCol(UBound(A, 1), 1)
For i = LBound(A, 1) To UBound(A, 1)
    MyCol(i, 1) = A(i, Col)
Next i
GetColumn = MyCol
End Function

```

```

Function GetSubMatrix(A(), indexes())
Dim i As Long, j As Long
Dim SubMat()
ReDim SubMat(UBound(indexes, 1), UBound(indexes, 1))
For i = LBound(indexes, 1) To UBound(indexes, 1)
    For j = LBound(indexes, 1) To UBound(indexes, 1)
        SubMat(i, j) = A(indexes(1, j), UBound(indexes, 1))
    Next j
Next i
GetSubMatrix = SubMat
End Function

```

```

'-----Determine Array Dimensions-----
Function ArrayDimensions(A()) As Long
If Not IsArray(A) Then
    ArrayDimensions = 0
    Exit Function
End If
Dim i As Long
Dim MyGarbage As Long

```

```

If Not IsArray(A) Then
    ArrayDimensions = 1
    Exit Function
End If
On Error GoTo Solution
Do
    i = i + 1
    MyGarbage = UBound(A, i)
Loop
Solution:
ArrayDimensions = i - 1
End Function

'-----Vector to Matrix-----
Function Vector2Matrix(A(), H_or_V As String)
'Check if A is array
If Not IsArray(A) Then
    MsgBox "{A} is not an array. Aborting Vector to Matrix conversion.", _
        vbOKOnly, _
        "Vector To Matrix"
    Exit Function
End If
'Check if A is one dimensional array
If ArrayDimensions(A) <> 1 Then
    MsgBox "{A} is not a one dimensional array. Aborting Vector to Matrix.", _
        vbOKOnly, _
        "Vector To Matrix"
    Exit Function
End If
'Check to see if H_or_V is valid
If Not (H_or_V = "H" Or H_or_V = "V") Then
    MsgBox "Invalid parameter entered for Horizontal or Vertical. Aborting Vector to Matrix.", _
        vbOKOnly, _
        "Vector To Array"
    Exit Function
End If
Dim i As Long
Dim Rows As Long
Dim Cols As Long
Dim MyResult()
'Select between horizontal or vertical output
Select Case H_or_V
    Case "H"

```

```

    Rows = 1
    Cols = UBound(A)
    ReDim MyResult(Rows, Cols)
    For i = 1 To Cols
        MyResult(1, i) = A(i)
    Next i
Case "V"
    Rows = UBound(A)
    Cols = 1
    ReDim MyResult(Rows, Cols)
    For i = 1 To Rows
        MyResult(i, 1) = A(i)
    Next i
End Select
'Output resulting array
Vector2Matrix = MyResult
End Function

'-----Matrix to Vector-----
Function Matrix2Vector(A())
'Check if A is array
If Not IsArray(A) Then
    MsgBox "A is not an array. Aborting Matrix to Vector conversion.", _
        vbOKOnly, _
        "Matrix To Vector"
    End Function
End If
'Check to see if A is a 2D array
If ArrayDimensions(A) <> 2 Then
    MsgBox "A is not a 2D array. Aborting Matrix to Vector conversion.", _
        vbOKOnly, _
        "Matrix To Vector"
    End Function
End If
'Check to see if at least one of the dimensions is equal to one
If Not (UBound(A, 1) = 1 Or UBound(A, 2) = 1) Then
    MsgBox "A is doesn't have any dimension equal to one. Aborting Matrix to Vector
conversion.", _
        vbOKOnly, _
        "Matrix To Vector"
    End Function
End If
'Calculate result based on dimensions
Dim MyResult()

```

```

Dim n As Long
If UBound(A, 1) = 1 Then
    'Horizontal Vector
    n = UBound(A, 2)
    ReDim MyResult(n)
    For i = 1 To n
        MyResult(i) = A(1, i)
    Next i
ElseIf UBound(A, 2) = 1 Then
    'Vertical Vector
    n = UBound(A, 1)
    ReDim MyResult(n)
    For i = 1 To n
        MyResult(i) = A(i, 1)
    Next i
End If
'Output resulting array
Matrix2Vector = MyResult
End Function

```

```

Function Array2String(A(), Optional Delimiter As String)
If Not IsArray(A) Then Exit Function
If ArrayDimensions(A) > 1 Then Exit Function
If VBA.Len(Delimiter) = 0 Then Delimiter = ","
Dim i As Long
Dim MyString As String
For i = LBound(A) To UBound(A)
    If i = LBound(A) Then
        MyString = A(i)
    Else
        MyString = MyString & Delimiter & A(i)
    End If
Next i
Array2String = MyString
End Function

```