



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE ELEMENTOS
FINITOS TRIDIMENSIONAL BASADO EN LA WEB

*Tesis presentada en cumplimiento de los requisitos para la obtención del título
Doctor en Ciencias Aplicadas*

Candidata: Msc. Maylett Y. Uzcátegui Flores
Tutor: Dr. Julio Flórez López

Mérida, Venezuela
Junio, 2012

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Resumen

Desde 1990 en la Universidad de Los Andes (ULA), se ha llevado a cabo un programa de investigación en el área de la simulación numérica del proceso de daño en estructuras. Logrando el desarrollo de la Teoría del Daño Concentrado, mediante la cual ha sido posible escribir una serie de elementos finitos. En busca de un instrumento computacional de apoyo, en esta tesis se presenta un programa de elementos finitos de propósito general denominado “Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF)”, a través del cual fue posible incorporar las subrutinas de elementos finitos existentes. Actualmente a través de PEEF es viable realizar simulaciones numéricas lineales y no lineales de estructuras aporticadas de concreto armado en dos y tres dimensiones, incluyendo la mampostería de relleno, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas. Además, permite la inclusión de nuevas librerías de elementos finitos.

Adicionalmente, en este trabajo se propone que los programas de elementos finitos sean accedidos vía Web a través de portales de cálculo. Como aplicación directa usando PEEF se presenta el “Portal de Pórticos 3D”, el cual es una herramienta computacional que permite el análisis de pórticos tridimensionales de concreto armado, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Agradecimientos

A mi tutor Dr. Julio Flórez López por su ayuda constante, esfuerzo, preocupación, y guía durante la realización de este trabajo.

Al Ing. Jormany Quintero por su valiosa colaboración en el desarrollo de la aplicación “Portal de Pórticos 3D”.

A la profesora Monica Puglisi por su confianza y apoyo incondicional.

A mis compañeros de trabajo, colegas y amigos que de una u otra forma me prestaron su ayuda incondicional.

A la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales por la beca otorgada para realizar los estudios de doctorado.

Al Parque Tecnológico, especialmente al personal adscrito a CeCalCULA quienes de forma desinteresada brindaron su tiempo, conocimientos y apoyo.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Índice general

Introducción	1
1. Antecedentes	5
Abaqus	5
Ansys	7
Nastran	8
Sap2000	9
Etabs	11
Idarc	12
Drain	13
Portal de Pórticos 2D	14
2. Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF)	16
2.1 Formulación del problema	16
2.2 Resolución del problema global	17
2.2.1 Desarrollo del bloque de subrutinas:	22
Declaración de variables e inicialización	22
Lectura del archivo de entrada	22
Condiciones iniciales	24
Lazos que controlan los pasos del análisis	24
Actualizaciones	25
Solución del problema global	27
Escritura de los archivos de salida	32
Actualización de las variables de tiempo	32
2.2.2 Diseño del archivo de entrada (.inp)	33
2.3 Resolución del problema local	35
2.3.1 Implementación numérica del problema local	36
3. Elemento para muros de mampostería de relleno	38
3.1 Modelo para pórticos rellenos con mampostería: El concentrador plástico	39
3.1.1 Cinemática de pórticos rellenos con mampostería	39
3.1.2 Dinámica de pórticos rellenos con mampostería	41

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3.1.3 Modelo perfectamente plástico sin concentrador inelástico	42
3.1.4 Análisis experimental de pórticos rellenos	46
3.1.5 Modelo elastoplástico perfecto con concentrador plástico	49
3.2 Modelo para pórticos rellenos con mampostería: agrietamiento y daño	52
3.2.1 Conceptos fundamentales de la teoría del daño continuo	53
3.2.2 Comportamiento de la mampostería bajo fuerzas de compresión	55
3.2.3 Un modelo de daño para la mampostería de relleno en pórticos planos	56
3.2.4 Comportamiento del puntal equivalente durante cargas monotónicas	58
3.2.5 Comportamiento del puntal equivalente durante cargas cíclicas	60
3.2.6 Simulación numérica de pórticos rellenos con mampostería	62
4. Elementos para vigas y columnas de concreto armado	67
4.1 Conceptos básicos de la Mecánica de fractura frágil	67
4.2 Teoría del daño concentrado para el caso de pórticos planos	69
4.2.1 Cinemática de pórticos planos	69
Desplazamientos generalizados de pórticos planos	69
Deformaciones generalizadas de pórticos planos	70
Ecuaciones cinemáticas de pórticos planos	71
4.2.2 Dinámica de pórticos planos	72
Esfuerzos generalizados de pórticos planos	72
Fuerzas internas generalizadas de pórticos planos	73
Fuerzas externas sobre los nodos de un pórtico plano	73
Fuerzas de inercia de pórticos planos	74
Ecuaciones de equilibrio dinámico de pórticos planos	74
4.2.3 Modelo Histerético Elastoplástico Degradable con Fatiga de Bajo Ciclaje	76
Ley de estado del modelo histerético degradable	77
Ley de evolución del daño	78
Función de fluencia de la plasticidad	79
4.3 Teoría del daño concentrado para el caso de pórticos tridimensionales	79

4.3.1 Cinemática de pórticos tridimensionales	79
Desplazamientos generalizados tridimensionales	79
Deformaciones generalizadas tridimensionales	80
Ecuaciones cinemáticas tridimensionales	81
4.3.2 Dinámica de pórticos tridimensionales	81
Esfuerzos generalizados tridimensionales	82
Fuerzas externas sobre los nodos del pórtico tridimensional	82
Fuerzas de inercia de un pórtico tridimensional	82
Ecuaciones de equilibrio dinámico tridimensional	83
4.3.3 Leyes de comportamiento de pórticos elastoplásticos con daño tridimensional	83
Ley de estado tridimensional	84
Leyes de evolución del daño tridimensional	84
Leyes de evolución de las deformaciones plásticas	86
5. Elemento para estructuras duales de concreto armado	88
5.1 Cinemática de estructuras duales planas	88
Desplazamientos generalizados de estructuras duales planas ...	88
Deformaciones generalizadas de estructuras duales planas	90
Ecuaciones cinemáticas de estructuras duales planas	91
5.2 Dinámica de estructuras duales planas	91
Esfuerzos generalizados de estructuras duales planas	92
Fuerzas externas de estructuras duales planas	92
Fuerzas de inercia de estructuras duales planas	93
Ecuaciones de equilibrio dinámico de estructuras duales planas	93
5.3 Modelo elastoplástico degradable para estructuras duales de concreto armado	94
Ley de estado de estructuras duales planas	94
Funciones de fluencia acopladas al daño por flexión	96
Funciones de fluencia acopladas al daño por corte	96
Ley de evolución del daño por flexión	97
Ley de evolución del daño por corte	98
6. La e-ciencia y el Portal de Pórticos 3D	99
6.1 Uso de las TIC en actividades científico técnicas	101
6.1.1 Tecnología Cluster	102

VIII
Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

6.1.2 Tecnología Grid	103
6.1.3 Diferencia entre la tecnología Cluster y Grid	104
6.2 Portal de Pórticos 2D	105
6.2.1 Portales de cálculo	105
6.2.2 Características del Portal de Pórticos 2D	106
6.2.3 Portal de Pórticos 2D en ambiente cluster	108
6.2.4 Portal de Pórticos 2D en ambiente Grid	108
6.3 Portal de Pórticos 3D	113
6.3.1 Módulos del programa	114
Módulo Geometría	115
Módulo Secciones	116
Módulo Solicitaciones	117
Módulo Análisis	118
Módulo Resultados	119
6.3.2 Estado actual y futuro del programa Portal de Pórticos 3D	120
7. Ejemplos numéricos	123
7.1 Ejemplos numéricos para elementos Viga-Columna 2D de Concreto Armado (VC2DCA)	123
7.1.1 Simulación numérica de ensayos experimentales 2D, caso estático	123
Simulación del ensayo de Abrams	123
Simulación del ensayo de Bertero	125
Simulación del ensayo de Vecchio	127
7.1.2 Simulación numérica de un ensayo experimental 2D, caso pseudo-dinámico	129
Prueba experimental de un pórtico de concreto armado en Elsa	129
7.1.3 Simulación numérica de dos edificios reales 2D, caso dinámico	134
Simulación numérica del edificio Los Chaguaramos	135
Simulación numérica de un Ciclo Básico Tipo, para 960 alumnos	144
7.2 Ejemplos numéricos para elementos Viga-Columna 3D de Concreto Armado (VC3DCA)	152
7.2.1 Simulación numérica de ensayos experimentales 3D, caso estático	152

Simulaciones numéricas de ensayos experimentales realizados por Bousias	152
Simulación numérica de una estructura en “L” y dos niveles	158
7.2.2 Simulaciones numéricas 3D, caso dinámico	162
Simulación numérica de una estructura en “L” y dos niveles	162
Simulación numérica del ensayo experimental realizado por Oliva y Clough	164
7.3 Ejemplos numéricos para elementos Muros 2D de Mampostería de Relleno (M2DMR)	168
Pórtico con mampostería monotónico	168
Pórtico con mampostería cíclico	169
Estructura aporticada con mampostería	170
7.4 Ejemplos numéricos para elementos Viga – Columnas – Muros de Corte 2D de Concreto Armado (VCM2DCA)	173
7.4.1 Simulaciones de muros sin carga axial	173
Muro tipo I	173
Muro tipo II	175
Muro tipo III	176
Muro tipo IV	178
7.4.2 Simulaciones de elementos de pórticos sin carga axial	180
Elemento de pórtico tipo I	180
Elemento de pórtico tipo II	181
Elemento de pórtico tipo III	183
Conclusiones	185
Referencias bibliográficas	188
Anexos	194
Anexo A	194
Anexo B	225
Anexo C	232

Índice de figuras

1. Antecedentes

Figura 1.1 Análisis de un anillo de descarga	6
Figura 1.2 Análisis de pre-tensión de un perno	8
Figura 1.3 Análisis de impacto en una placa por una esfera rígida	9
Figura 1.4 Visualización en 3D de una estructura, usando Sap2000	11
Figura 1.5 Visualización en 3D de una estructura, usando Etabs	12
Figura 1.6 Visualización en 3D de una estructura, usando Idarc	13
Figura 1.7 Mecanismo de colapso de un pórtico de acero	14
Figura 1.8 Mapa de daño de un pórtico de concreto armado	15

2. Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF)

Figura 2.1 Diagrama de flujo de PEEF	20
Figura 2.2 Variables tiempo	25
Figura 2.3 Diagrama de flujo de la subrutina Actualizaciones	26
Figura 2.4 Diagrama de flujo para la solución del problema global	27
Figura 2.5 Diagrama de flujo para la solución del problema local y ensamblaje	30
Figura 2.6 Diagrama de flujo para la inclusión de las condiciones externas	31
Figura 2.7 Diagrama de flujo del bloque de subrutinas para la evaluación del tiempo	33
Figura 2.8 Esquema de un archivo de entrada INP	34
Figura 2.9 Esquema general de la resolución numérica	35
Figura 2.10 Esquema general de subrutina ELIB	36

3. Elemento para muros de mampostería de relleno

Figura 3.1 Modelo del puntal diagonal	38
Figura 3.2 a) Pórtico relleno. b) Desplazamientos generalizados de un nodo. c) Deformaciones generalizadas de una viga-columna. d) Deformaciones generalizadas de la pared de relleno equivalente	40
Figura 3.3 a) Esfuerzos en la viga-columna. b) Esfuerzos en el relleno	41
Figura 3.4 a) Relación esfuerzo-deformación propuesta en [34]. b) Relación esfuerzo-deformación propuesta en [3]. c) Relación esfuerzo-	

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

deformación propuesta en [13]. d) Elastoplástico perfecto	43
Figura 3.5 a) Elemento de relleno sujeto a desplazamiento horizontal. b) Fuerza vs. Desplazamiento	45
Figura 3.6 a) Espécimen 0-barras. b) Espécimen 1-barra. c) Espécimen 2-barras	47
Figura 3.7 Cargas monotónicas y cíclicas	47
Figura 3.8 Graficas fuerza-desplazamiento a) Espécimen 0-barras. b) Espécimen 1-barra. c) Espécimen 2-barras	48
Figura 3.9 a) Lazo histerético en el espécimen de 2-barras b) Lazo histerético en el espécimen de 1-barra	49
Figura 3.10 Mampostería de relleno con concentrador plástico	50
Figura 3.11 Graficas fuerza vs. desplazamiento a) Con concentrador plástico. b) Sin concentrador plástico	51
Figura 3.12 Pórtico plano con elastoplasticidad perfecta. a) Sin relleno b) Con relleno y sin concentrador plástico c) Con relleno y concentrador plástico	52
Figura 3.13 Daño en un elemento de volumen	53
Figura 3.14 Espécimen de mampostería	55
Figura 3.15 Graficas fuerzas vs. desplazamiento	56
Figura 3.16 Envolvente de la ley constitutiva	58
Figura 3.17 Grafica de fuerza vs. desplazamiento bajo cargas cíclicas a) $\alpha = 2$ b) $\alpha = 5$ c) $\alpha = \infty$	61
Figura 3.18 Pórticos de concreto armado con y sin mampostería de relleno	62
Figura 3.19 Momento de fluencia vs. rotación plástica	62
Figura 3.20 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico vacío bajo cargas monotónicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica	63
Figura 3.21 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico relleno bajo cargas monotónicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica	64
Figura 3.22 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico vacío bajo cargas cíclicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica	65
Figura 3.23 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico relleno bajo cargas cíclicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica	66

4. Elementos para vigas y columnas de concreto armado

Figura 4.1 Placa con agujero elíptico sometida a tracción uniforme en

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

el infinito	68
Figura 4.2 Representación de un pórtico y desplazamientos generalizados de un nodo i del mismo	70
Figura 4.3 Deformaciones generalizadas del miembro entre los nodos i y j	70
Figura 4.4 Deformaciones generalizadas en el miembro i-j producida por los movimientos infinitesimales dq_1 , dq_2 , dq_3 en el nodo i	71
Figura 4.5 Esfuerzos generalizados en un miembro de pórtico plano	72
Figura 4.6 Fuerzas generalizadas en un miembro de pórtico plano	73
Figura 4.7 Fuerzas externas aplicadas en un pórtico plano	73
Figura 4.8 Representación del estado de daño de un miembro de concreto armado, bajo las acciones positivas a flexión	76
Figura 4.9 Representación del estado de daño de un miembro de concreto armado, bajo las acciones positivas a flexión	77
Figura 4.10 Representación de un pórtico espacial	80
Figura 4.11 Deformaciones generalizadas de un miembro de pórtico espacial	81
Figura 4.12 Esfuerzos generalizados en un miembro de pórtico espacial	82
Figura 4.13 Representación del agrietamiento en un pórtico de concreto armado	83

5. Elemento para estructuras duales de concreto armado

Figura 5.1 Representación de una estructura dual plana	89
Figura 5.2 Desplazamientos generalizados del elemento "m"	90
Figura 5.3 Deformaciones generalizadas del elemento "m"	91
Figura 5.4 Esfuerzos generalizados en un elemento m	92
Figura 5.5 Fuerzas externas nodales en una estructura dual	93
Figura 5.6 Representación de las variables de daño por flexión y corte	95

6. La eficiencia y el Portal de Pórticos 3D

Figura 6.1 Pantallas que representan cada uno de los módulos del programa: Preprocesador, Procesador, Postprocesador	107
Figura 6.2 Arquitectura del Portal de Pórticos en ambiente cluster	108
Figura 6.3 Arquitectura del Portal de Pórticos en Grid	110
Figura 6.4 A) Pórtico de dos niveles. B) Pórtico de 10 niveles. C) Pórtico de 30 niveles	111
Figura 6.5 Pantalla principal del programa Portal de Pórticos 3D	114

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Figura 6.6 Modulo geometría	116
Figura 6.7 Modulo secciones	117
Figura 6.8 Modulo solicitaciones	118
Figura 6.9 Módulo análisis	119
Figura 6.10 Modulo de resultados	120

7. Ejemplos numéricos

Figura 7.1 Características geométricas de la columna ensayada por Abrams et al	124
Figura 7.2 Historia de desplazamiento lateral	124
Figura 7.3 Grafica de la Rotación total del nodo vs. Momento flector (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con el Portal de Pórticos 2D, (c) Ensayo experimental	125
Figura 7.4 Características Geométricas e historia de desplazamientos	126
Figura 7.5 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo libre (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con el Portal de Pórticos, (c) Ensayo experimental	127
Figura 7.6 Características geométricas del pórtico ensayado por Vecchio et al.	127
Figura 7.7 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento en el tope del pórtico (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con el Portal de Pórticos 2D, (c) Ensayo experimental	128
Figura 7.8 a) Vista lateral de los pórticos, b) Vista en planta de la estructura	130
Figura 7.9 Sección transversal para las columnas a) externas b) Internas	131
Figura 7.10 Sección transversal de las vigas de la estructura	131
Figura 7.11 Historia de desplazamiento aplicada a la estructura, sismo de bajo nivel	132
Figura 7.12 Grafica Cortante basal vs. Tiempo (a) Ensayo experimental, (b) Simulación numérica usando PEEF	132
Figura 7.13 Grafica Cortante basal vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental, (b) Simulación numérica	133
Figura 7.14 Historia de desplazamiento aplicada a la estructura, sismo de alto nivel	133
Figura 7.15 Grafica Cortante basal vs. Tiempo (a) Ensayo	

Figura 7.43 Mapa de daño al final de cada simulación	163
Figura 7.44 Curva capacidad dinámica de dos elementos viga.	164
Figura 7.45 Características geométricas de la estructura ensayada por Oliva y Clough	165
Figura 7.46 Detalle de las secciones transversales del pórtico ensayado por Oliva y Clough	166
Figura 7.47 Mapa de daño luego de aplicar el sismo	166
Figura 7.48 Desplazamientos segundo nivel (a) Longitudinal, (b) Transversal	167
Figura 7.49 Características del espécimen ensayado	168
Figura 7.50 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental, (b) Simulación numérica	169
Figura 7.51 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental, (b) Simulación numérica	170
Figura 7.52 Vista lateral del pórtico 1	171
Figura 7.53 Historia de desplazamiento aplicada a la estructura	172
Figura 7.54 Grafica Cortante basal vs. Tiempo (a) Ensayo experimental, (b) Simulación numérica	172
Figura 7.55 Características geométricas del muro tipo I	173
Figura 7.56 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	174
Figura 7.57 Características geométricas del muro tipo II	175
Figura 7.58 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	176
Figura 7.59 Características geométricas del muro tipo III	177
Figura 7.60 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	178
Figura 7.61 Características geométricas del muro tipo IV	178
Figura 7.62 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	179
Figura 7.63 Características del elemento de pórtico tipo I	180
Figura 7.64 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	181

Figura 7.65 Características del elemento de pórtico tipo II	182
Figura 7.66 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	183
Figura 7.67 Características del elemento de pórtico tipo III	183
Figura 7.68 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado, (c) Ensayo experimental	184

Anexo A

Figura A-1 Sistema coordenada cartesiano	197
Figura A-2 Líneas de datos y palabras claves usadas en el modelo	199
Figura A-3 Palabras claves usadas en una historia de datos en el modelo	201
Figura A-4 Tipos de elementos estructurales de PEEF	215
Figura A-5 Asignación del nombre para los elementos finitos	215
Figura A-6 Número de nodos asignados al elemento VC2DCA	216
Figura A-7 Número de nodos asignados al elemento VC3DCA	217
Figura A-8 Número de nodos asignados al elemento M2DMR	218
Figura A-9 Número de nodos asignados al elemento VCM2DCA	219
Figura A-10 Estructura tridimensional	221

Anexo B

Figura B-1 Distancia a los ejes locales	228
Figura B-2 Diagrama de interacción de momentos	228
Figura B-3 Diagrama de curvatura última	229

Anexo C.

Figura C-1 Características geométricas	232
Figura C-2 Características de los elementos de vigas y columnas	233
Figura C-3 Pantalla Inicial del Portal de Pórticos 3D	235
Figura C-4 Pantalla para la creación de la geometría	235
Figura C-5 Módulo geometría	236
Figura C-6 Pantalla para la selección de los grupos de elementos	237
Figura C-7 Módulo secciones	237
Figura C-8 Pantalla para crear sección	238
Figura C-9 Información del conjunto "columnas"	239
Figura C-10 a) Sección transversal de referencia. b) Definición de los	

XV/I
Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

aceros longitudinales y transversales de la sección “columnas”	240
Figura C-11 Definición de las propiedades de los materiales	241
Figura C-12 Diagrama de interacción de la sección Columnas	241
Figura C-13 Definición de los aceros longitudinales y transversales de la sección: a) Vigas en Y. b) Vigas en X	242
Figura C-14 Pantalla asignar sección	243
Figura C-15 Módulo solicitaciones	243
Figura C-16 Pantalla para la creación de los grupos de nodos	244
Figura C-17 Pantalla condiciones iniciales	244
Figura C-18 Pantalla para la creación de los pasos	245
Figura C-19 Pantalla para la asignación de la fuerza sobre las vigas de carga	245
Figura C-20 Pantalla para la definición del paso 2	246
Figura C-21 Creación del archivo de datos Tutorial.INP	246
Figura C-22 Módulo análisis	247
Figura C-23 Pantalla para la creación de graficas	248
Figura C-24 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo 5	248
Figura C-25 Tabla de valores pertenecientes a la grafica de la figura C-24	249
Figura C-26 Mapa de daño de la estructura	249
Figura C-27 Mapa de daño del pórtico X1	250
Figura C-28 Visualización de la estructura deformada	20

Índice de tablas

6. La e-ciencia y el Portal de Pórticos 3D

Tabla 6.1 Número total de nodos y elementos para cada pórtico	111
Tabla 6.2 Hardware usado en los proyectos Grid	112
Tabla 6.3 Tiempo en CPU del análisis para cada pórtico	112

7. Ejemplos numéricos

Tabla 7.1 Tipos de columnas	135
Tabla 7.2 Áreas de acero para columnas de 4 ramas	136
Tabla 7.3 Áreas de acero en vigas del pórtico 1	137
Tabla 7.4 Áreas de acero en vigas del pórtico 6	138
Tabla 7.5 Áreas de acero en vigas del pórtico B=C	140
Tabla 7.6 Áreas de acero en vigas del pórtico E	142
Tabla 7.7 Tipos de columnas, unidad Ciclo Básico	145
Tabla 7.8 Áreas de acero para columnas, unidad Ciclo Básico	146
Tabla 7.9 Áreas de acero en vigas del pórtico 1, unidad Ciclo Básico	147
Tabla 7.10 Áreas de acero en vigas del pórtico 5, unidad Ciclo Básico	148
Tabla 7.11 Áreas de acero en vigas del pórtico A=F, unidad Ciclo Básico	150
Tabla 7.12 Áreas de acero en vigas del pórtico C=D, unidad Ciclo Básico	151
Tabla 7.13 Fuerzas en los Nodos por Nivel	159
Tabla 7.14 Magnitud de la variable aceleración del registro de aceleraciones.	162
Tabla 7.15 Parámetros del modelo del pórtico con mampostería (ELSA)	171
Tabla 7.16 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo I	174
Tabla 7.17 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo II	175
Tabla 7.18 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo III	177
Tabla 7.19 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo IV	179
Tabla 7.20 Parámetros de las funciones inelásticas del elemento de pórtico tipo I	180
Tabla 7.21 Parámetros de las funciones inelásticas del elemento de pórtico tipo II	182
Tabla 7.22 Parámetros de las funciones inelásticas del elemento de	

pórtico tipo III	184
------------------	-----

Anexo A

Tabla A-1 Grados de libertad considerados por el programa de elementos finitos	197
Tabla A-2 Ejemplo de símbolos y unidades usadas para el Sistema Internacional	198
Tabla A-3 Ejemplo de símbolos y unidades Técnicas	198
Tabla A-4 Nombre asignado para cada tipo de elemento finito	216

Anexo B

Tabla B-1 Ceros numéricos correspondientes a la ley de estado	225
Tabla B-2 Ceros numéricos correspondientes a la ley de evolución	226
Tabla B-3 Ceros numéricos correspondientes a la ley de normalidad	226
Tabla B-4 Propiedades reales desde la 21 hasta la 38	227
Tabla B-5 Propiedades reales desde la 39 hasta la 310	229
Tabla B-6 Propiedades reales desde la 310 hasta la 321	230
Tabla B-7 Propiedades enteras	230

Anexo C

Tabla C-1.- Historia de desplazamientos impuestos	234
---	-----

Introducción

El método de los elementos finitos se ha constituido en una herramienta poderosa para la solución de un amplio rango de problemas de ingeniería. Las aplicaciones van desde análisis de esfuerzos y deformaciones de estructuras como edificios, puentes, piezas mecánicas, vehículos y aeronaves, hasta análisis de fluidos, campos magnéticos, etc.

Las ideas básicas del método se desarrollaron a principios de los años 40. Veinte años después, gracias a las primeras computadoras, los ingenieros comenzaron a emplear el método para la resolución de problemas de análisis de esfuerzos y deformaciones, principalmente en aeronaves de uso militar. Clough fue el primero en emplear el término *Elemento Finito* en 1960, y las bases matemáticas se fijaron en la década de 1970. Desde entonces una serie de programas se han desarrollado para cumplir con tal fin. En el primer capítulo se presenta una revisión bibliográfica donde se describen algunos programas comerciales de análisis y/o diseño, tales como: Abaqus, Ansys, Nastran, Sap2000, etc.

La filosofía clásica de estos programas conlleva al uso de sofisticadas herramientas y complejos modelos matemáticos. Su concepción se basa en programas de aplicaciones generales, que comparten el mismo preproceso, proceso y postproceso, independientemente del tipo de análisis que se desea realizar. Esto trae como consecuencia que su uso demande un personal altamente capacitado para el manejo y evaluación de resultados, es decir está diseñado para especialistas. Adicionalmente los requerimientos computacionales pueden ser en ocasiones bastante elevados al igual que los tiempos de ejecución, aumentando así los costos de la evaluación.

Actualmente está surgiendo la idea de una investigación abierta, que involucre al ciudadano común, no especialista, en la solución de problemas planteados en estudios científicos. A este nuevo modo de producción de conocimiento se le conoce como Ciencia Ciudadana. Por lo tanto, la filosofía que persigue la presente tesis doctoral consiste en promover y proveer de herramientas que permita ampliar el espectro de diseño en el uso de los elementos finitos, de manera que puedan estar al alcance tanto del personal especialista como técnico, todo esto sin poner en riesgo la capacidad tecnológica y científica.

Para lograr este objetivo es necesario modificar la filosofía clásica de los programas de elementos finitos, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

a. Hacer uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), utilizando su elemento más poderoso “Internet”, ya que la capacidad de cálculo no debe depender del usuario, sino del poder de cómputo de un centro de alto rendimiento financiado por un ente público o privado. Desde el punto de vista computacional, esto trae como consecuencia que el usuario podrá acceder a las herramientas exclusivamente vía Web usando una PC, portátil, tabletas o dispositivos móviles.

b. Si se desea la popularización de las herramientas es necesario lograr una mayor simplicidad, para ello es obligatorio que la interfaces no sean generales, sino por el contrario de aplicaciones específicas mediante el uso de portales de cálculo.

c. Una mayor simplicidad trae como consecuencia que las teorías y modelos matemáticos se tengan que reescribir en función de la nueva filosofía, con el fin de no sacrificar el rigor científico.

De acuerdo a los aspectos antes mencionados es necesario realizar las siguientes actividades:

1. Crear un programa de elementos finitos de propósitos generales.
2. Reescribir los modelos matemáticos bajo la nueva visión.
3. Desarrollar portales de cálculo especializados que tengan en común el mismo programa de elementos finitos.
4. Proveer de ambientes computacionales adecuados a la nueva tecnología.

La presente tesis doctoral se enmarca en las actividades 1 y 3, pues en ella se desarrolló un programa de elementos finitos denominado “Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF)”, escrito en lenguaje de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

programación Fortran. Este es un programa de propósito general para el análisis de sólidos, el cual permite realizar el análisis lineal y no lineal de estructuras en tres y dos dimensiones, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas. Además, PEEF está estructurado de tal manera que permite la inclusión de nuevas subrutinas de elementos finitos, independientemente del número de nodos y grados de libertad que posea el elemento.

En el segundo capítulo se describe el esquema y diseño general del programa, así como cada una de las subrutinas que lo conforman.

Con la finalidad de mantener el nivel científico, las teorías que sustentan los elementos finitos incorporados a PEEF están reescritas bajo la nueva visión. Desde el año 1990 en la Universidad de Los Andes profesores y estudiantes, en colaboración con la Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, han desarrollado un marco conceptual original denominado Teoría del Daño Concentrado, el cual se basa en la mecánica de fractura, la teoría del daño continuo y el concepto de rótula plástica. En este momento PEEF tiene una librería de elementos que permite el análisis de estructuras de concreto armado, sistemas duales, incluyendo la mampostería de relleno. La descripción de las teorías y modelos usados en los elementos finitos se muestra en el capítulo 3 para elementos de mampostería de relleno, en el capítulo 4 para elementos viga-columna de concreto armado en dos y tres dimensiones, y en el capítulo 5 para sistemas duales.

Cómo primera aplicación de uso específico empleando el programa de elementos finitos PEEF, en esta tesis se propone el Portal de Pórticos 3D. Este programa permite la digitalización de sistemas aporticados de concreto armado tridimensionales, con el fin de hacer el análisis y evaluación del daño que puedan presentar las estructuras ante diferentes solicitaciones. En el capítulo 6, se describe el funcionamiento del programa, los módulos que lo componen, las características computacionales requeridas, y las expectativas que se desean cumplir con dicho portal, para así lograr una herramienta de libre acceso, simple, y con capacidad tecnológica y científica de alto nivel.

Con el fin de validar la implementación numérica de cada uno de los elementos finitos de la librería en PEEF, así como mostrar sus posibles aplicaciones, en el capítulo 7 se presentan algunas simulaciones

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

numéricas realizadas, y cuyos resultados se comparan con los obtenidos en los ensayos experimentales encontrados en la literatura o mediante los programas: Portal de Pórticos 2D y Abaqus. Así mismo se describen tres simulaciones numéricas que permiten mostrar los tipos de estructuras que pueden ser analizadas con el Portal de Pórticos 3D.

En el anexo A se presenta un manual de usuario del Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF), el cual constituye una guía para los usuarios, ya que ofrece una documentación completa sobre: definición de un modelo, descripción y definición de palabras claves, tipos de elementos finitos, y la estructura del archivo de entrada.

En el anexo B se describen las propiedades asignadas al elemento viga – columna 3D de concreto armado. Y en el anexo C se propone un tutorial, para modelar estructuras aporticadas de concreto armado tridimensionales usando el programa Portal de Pórticos 3D.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 1

Antecedentes

Para facilitar el cálculo estructural, se han desarrollado diversos programas o software que permiten evaluar y diseñar estructuras mediante la teoría de los elementos finitos. A través de estos programas es posible obtener resultados que pueden ser interpretados y utilizados en la práctica de la ingeniería. Actualmente existe una gran variedad de programas, entre los que se tiene de propósitos generales como Abaqus, Ansys, etc, y programas de aplicaciones específicas como Idarc, Drain, etc. A continuación se presenta una breve descripción de los programas de elementos finitos encontrados en la literatura.

Abaqus [31]

Abaqus es una herramienta usada para la simulación numérica de problemas de ingeniería. Está basado en el método de los elementos finitos, y puede resolver problemas desde simples análisis lineales hasta complejas simulaciones no lineales. El programa está diseñado como una herramienta de propósitos generales. Entre las aplicaciones más destacadas se encuentra el análisis de esfuerzos y deformaciones, sin embargo, es posible analizar problemas de diversas áreas como análisis termo-eléctricos, de transferencias de calor, impacto, difusión de masa, acústicos, etc.

Abaqus contiene una extensa librería de elementos finitos que permiten modelar virtualmente cualquier geometría. A su vez, es posible simular el comportamiento de los materiales usados frecuentemente en ingeniería, pues incluye modelos para metales, gomas, polímeros,

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

materiales compuestos, de concreto armado, así como suelos y rocas, entre otros.

Abaqus ofrece dos productos de análisis principales: Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit. El primero es un producto de propósito general. El segundo es un producto especializado que usa formulación basada en una integración explícita en el tiempo para el elemento finito dinámico. Por ejemplo, es muy eficiente en problemas de impacto.

Abaqus/Cae es el ambiente interactivo y gráfico de Abaqus. Permite crear modelos, asignar las propiedades del material, cargas, condiciones de borde y mallado, así como importar la geometría de la estructura a analizar. Una vez completado el modelo, es posible realizar el análisis y su monitoreo. Abaqus/Viewer es un subgrupo de Abaqus/Cae que incluye las herramientas gráficas del postproceso.

Un análisis completo en Abaqus consta de tres etapas: preproceso, proceso y postproceso.

- *Preproceso*: En esta etapa se define el modelo a través de la creación de la geometría, asignación de los materiales, cargas, condiciones de borde, mallado y asignación del elemento finito. Esta etapa se realiza mediante Abaqus/Cae.
- *Proceso*: Solución numérica del problema. Se realiza mediante Abaqus/Standard o Abaqus/Explicit.
- *Postproceso*: Evaluación de los resultados obtenidos de la simulación, mediante Abaqus/Viewer.

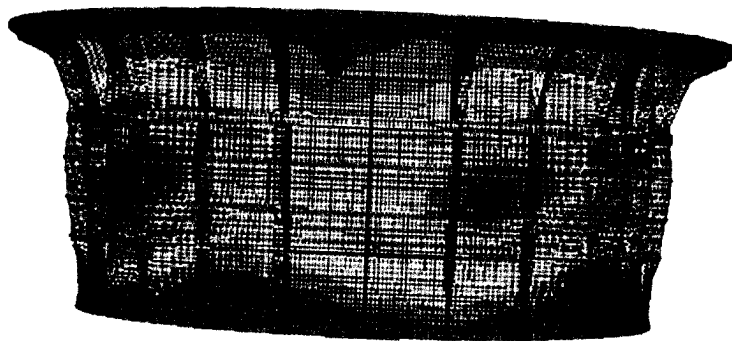


Figura 1.1 Análisis de un anillo de descarga [32].

Ansys [23]

Es un programa de elementos finitos de propósito general, usado para la solución numérica de una gran variedad de problemas de ingeniería, entre los cuales se listan: problemas de mecánica estructural, multifísicos, de mecánica de los fluidos y fluidodinámica, así como electromagnéticos. Todo esto es posible gracias a la extensa librería de elementos finitos, así como los modelos para la representación del material.

Las principales características del software son las siguientes:

Integrado: Permite la asociación de distintas tecnologías para el desarrollo de un producto sin abandonar una única plataforma. Además su integración permite la asociación con los softwares más avanzados de CAD. Por último, su sistema permite incluirse sin dificultad en sistemas de documentación propios de cada empresa.

Modular: Permite que los usuarios instalen una única aplicación para la solución de un problema específico. A medida que el usuario avanza en la solución, este puede necesitar análisis más complejos, hasta llegar al proceso de validación. Los distintos módulos de ANSYS permiten solucionar los problemas por partes.

Extensible: Ansys propone aplicaciones verticales o adaptaciones más específicas según las requiera el usuario. Estas adaptaciones pueden automatizar procesos que realiza normalmente un cliente hasta aplicaciones más complejas que se adaptan a determinados sectores industriales.

El modelado y simulación se realiza en tres etapas: preproceso, proceso y postproceso.

- *Preproceso:* En esta etapa se define la geometría, materiales y mallado del modelo.
- *Proceso y asignación de las cargas:* Aplicación de las cargas y condiciones de borde en los nodos y elementos. Obtención de la solución.
- *Postproceso:* Evaluación de los resultados obtenidos de la simulación.

Dado que el programa es modular, el usuario puede instalar solamente un módulo de aplicación específica o el producto completo. Los productos que ofrece Ansys son:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Mecánica estructural (Ansys Structural Mechanics), incluyen análisis estáticos y dinámicos (lineales y no lineales), análisis modales, térmicos, acústicos y de fatiga.
- Multifísicos (Ansys Multiphysics), permite a los ingenieros y diseñadores crear virtualmente prototipos que simulen fenómenos acoplados de física e ingeniería.
- Fluidodinámica (Ansys CFD, CFX, Fluent), resuelve problemas de mecánica de los fluidos y fluidodinámica.
- Electromagnéticos (High-Performance Electronic Design, Electromechanical Design), con los cuales es posible analizar motores y generadores eléctricos, componentes electrónicos de alta velocidad, entre otros.

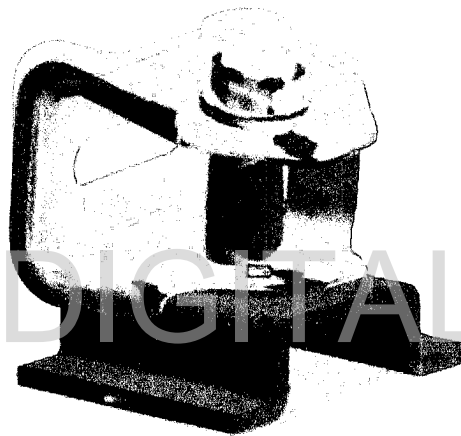


Figura 1.2 Análisis de pre-tensión de un perno [29].

Nastran [28]

Nastran es un programa avanzado de simulación y análisis por elementos finitos adaptable a diferentes entornos de ingeniería. Desde hace más de 30 años, constituye la herramienta de análisis y simulación por excelencia en la industria aeronáutica, aeroespacial, defensa, automotriz, construcción de barcos, maquinaria pesada, bienes de equipo, medicina y productos de consumo.

Está disponible en dos versiones principales:

- Nastran Enterprise: Programa para empresas de mayor envergadura que requieren una solución de análisis flexible, única, potente, e implementada sobre CPUs en red, dando soporte a múltiples usuarios.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Nastran Desktop: Para entornos de ingeniería como Unigraphics NX Advanced Simulation, I-deas MasterFEM o FEMAP.

Para permitir un acceso amplio, incluso a las configuraciones de Nastran más avanzadas, el programa puede adquirirse mediante dos paquetes, Nastran Basic y Nastran Advanced. Estos programas incluyen módulos para el cálculo estático lineal, análisis de frecuencias, pandeo lineal, transferencia de calor, y análisis no lineal.

Los módulos adicionales son:

- Optimization: Módulo de optimización que libera al usuario de la costosa tarea de mejorar manualmente el diseño, automatizando la búsqueda iterativa del diseño óptimo.
- Advanced Aeroelasticity (II): Predice el comportamiento de estructuras trabajando en presencia de una corriente de aire.
- Advanced NonLinear: Módulo no lineal con contactos 3D, grandes deformaciones, cargas en función del tiempo y materiales no lineales.
- Rotor Dynamics: Módulo de análisis dinámico para piezas mecánicas.

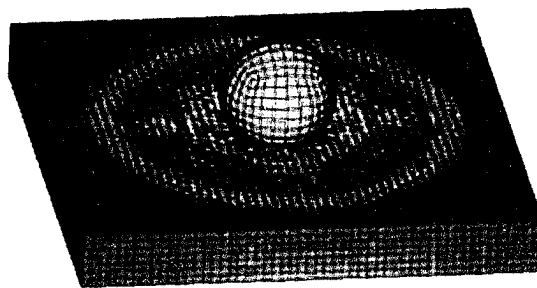


Figura 1.3 Análisis de impacto en una placa por una esfera rígida [27].

Sap2000 [26]

Es un programa para el análisis y diseño estructural basado en el método de los elementos finitos. Específicamente su aplicación está enmarcada en el modelado, análisis, diseño y optimización de estructuras como: puentes, estadios, torres, plantas industriales, edificios, presas, sólidos, piezas mecánicas, entre otros.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Para el análisis de las estructuras se cuenta con diversos tipos de elementos: barras, placas, membranas, cáscaras y sólidos. Acepta distintos tipos de cargas. Para el análisis no lineal existen elementos específicos tales como aislantes antisísmicos, disipadores energéticos, entre otros.

Además de las cargas estáticas pueden introducirse espectros de múltiples frecuencias, con gran variedad en el tipo de cargas y en el tipo de excitación para representar las cargas dinámicas.

Como opciones de diseño toma en cuenta la normativa de Acero Americana AISC, ASD Y LFRD, para el diseño en concreto armado considera el código ACI, el Eurocodigo 2-2004, entre otros.

El análisis y diseño se realiza generalmente mediante un proceso iterativo siguiendo los siguientes pasos:

- Creación o modificación de la geometría, propiedades de los materiales, cargas y parámetros de análisis.
- Análisis del modelo.
- Revisión de los resultados.
- Chequeo y optimización del diseño de la estructura.

Existen tres versiones del programa:

- Sap2000 Basic: Permite realizar análisis estáticos y análisis dinámicos. Diseña elementos de acero y concreto, y está limitado a 1000 nodos.
- Sap2000 Plus: Ofrece las mismas características que la versión Basic, pero no tiene límite en el número de nodos.
- Sap2000 Advanced: Expande las opciones del Plus con análisis dinámico no lineal (amortiguadores o disipadores, aisladores de base) y ofrece además análisis de pushover 3-D estático no lineal.

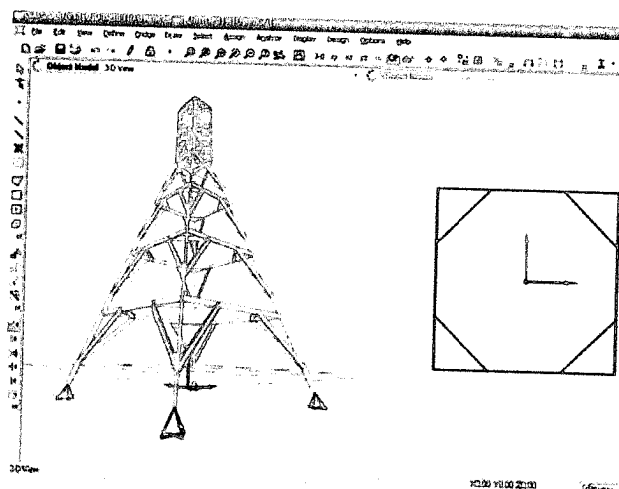


Figura 1.4 Visualización en 3D de una estructura, usando Sap2000 [25].

ETABS [26]

Es un programa para el análisis y diseño de edificios y naves industriales. Su uso permite crear modelos 2D y 3D, modificarlos, optimizarlos y visualizar resultados desde una simple interfaz de usuario.

Al igual que el SAP2000, puede realizar análisis de estructuras complejas, pero cuenta con opciones extras que simplifican el diseño de edificaciones, como por ejemplo:

- División automática de elementos.
- Opciones de análisis lineal y no lineal, para casos estáticos y dinámicos.
- Cálculo automático de coordenadas de centros de masas.
- Cálculo automático de coordenadas de centros de rigideces.
- Cálculo automático de fuerzas sísmicas y aplicación en el centro de masas.
- Cuenta con elementos de barra, cable, placa, membrana, cascara, y elementos de pórtico.

Entre las opciones de análisis se pueden listar:

- Análisis estáticos lineales y no lineales.
- Aplicación de cargas según la secuencia en la construcción.
- Para casos especiales de pushover el análisis incluye el efecto del amortiguamiento.
- Análisis considerando el efecto P-delta.
- Análisis modales, de espectros de respuesta dinámicos.

- Análisis historia tiempo, dinámicos lineales y no lineales.

Finalmente como opciones de diseños considera diferentes normativas para edificios de acero y concreto armado.

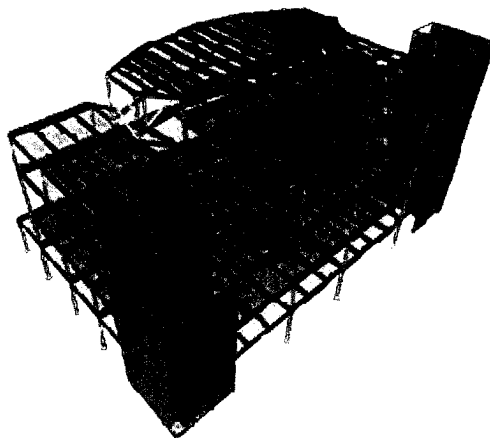


Figura 1.5 Visualización en 3D de una estructura, usando Etabs [24].

IDARC [20]

Idarc es una herramienta de análisis para la simulación numérica de estructuras aporticadas de concreto armado y acero. Es usada principalmente para evaluar la respuesta de edificios bajo cargas sísmicas. Por lo tanto, es un programa orientado a resolver problemas de la ingeniería estructural.

El programa incluye los siguientes tipos de elementos estructurales:

1. Elemento columna
2. Elemento viga
3. Elemento de muro de corte

El elemento columna toma en cuenta la deformación inelástica a flexión, el corte elástico y la deformación axial. El elemento viga usa modelos que consideran la rigidez a flexión no lineal con deformaciones por cortante elásticas lineales. El elemento de muro de corte incluye efectos de corte inelásticos y deformaciones de flexión.

Una de las características más resaltantes y novedosas del programa constituye el modelo de plasticidad distribuida, el cual difiere con el

modelo de la rótula plástica usado para pórticos de acero. El programa calcula el índice de daño propuesto por Park y Ang (1984) para los elementos de la estructura.

Para el caso de cargas dinámica el programa cuenta con modelos histeréticos, los cuales permiten representar el proceso de degradación del material durante cargas reversibles. También están incluidos análisis cuasi-estáticos, pseudo-dinámicos y está considerado el efecto P-Delta.

El programa consta de tres partes:

1. Sistema de identificación: Análisis estático para determinar propiedades y el modo de falla última del edificio.
2. Análisis de respuesta dinámico: Análisis inelástico dinámico paso a paso.
3. Análisis de daño: Evaluación del daño.

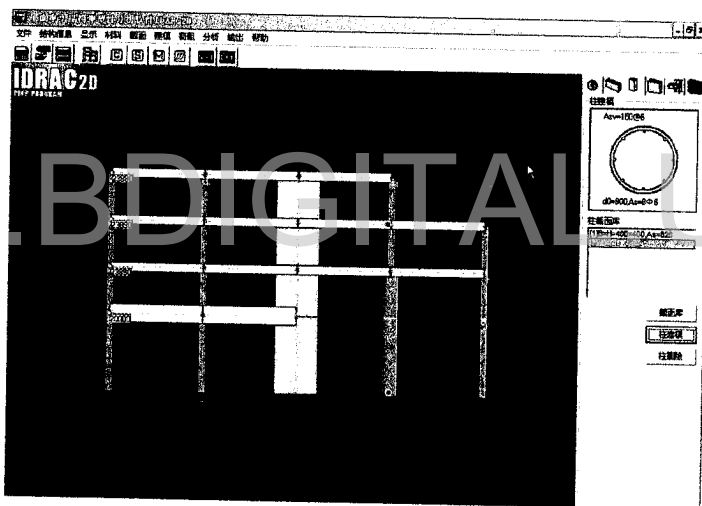


Figura 1.6 Visualización en 3D de una estructura, usando Idarc [22].

Drain [21]

Es un programa para el análisis estático y dinámico de estructuras planas, siendo su principal ventaja la simplicidad en el manejo de las herramientas. Una característica resaltante del programa, es que permite al usuario guardar las salidas al final de cada paso, así como también detener el análisis y luego restaurarlo desde cualquier paso guardado. El proceso de integración paso a paso para el análisis dinámico permite variar el tiempo de duración impuesto por el usuario, ya que cuenta con criterios de tolerancia.

Las cargas tanto estáticas como dinámicas pueden ser aplicadas en cualquier secuencia. Es decir, si una carga estática es aplicada después de una carga dinámica, el programa cuenta con una opción especial que permite estabilizar la estructura antes de que la carga estática sea aplicada.

En cuanto al comportamiento de miembros de concreto armado, el modelo aplica un procedimiento de análisis que permite ver el estado de seguridad de las construcciones existentes antes o después de un movimiento sísmico. Dicho modelo, es capaz de tomar en cuenta la influencia de la fuerza axial en el comportamiento a flexión de los elementos viga-columna. También puede representar la degradación de los esfuerzos durante las cargas cíclicas, simulando la fatiga del material bajo este tipo de cargas.

A lo largo de los años se han desarrollado tres programas a partir de Drain 2D: Drain-2DX, Drain-3DX, y Drain-building. Drain-2DX y Drain-3DX son usados para el análisis de estructuras en dos y tres dimensiones respectivamente. Drain-building es específicamente para edificios 3D.

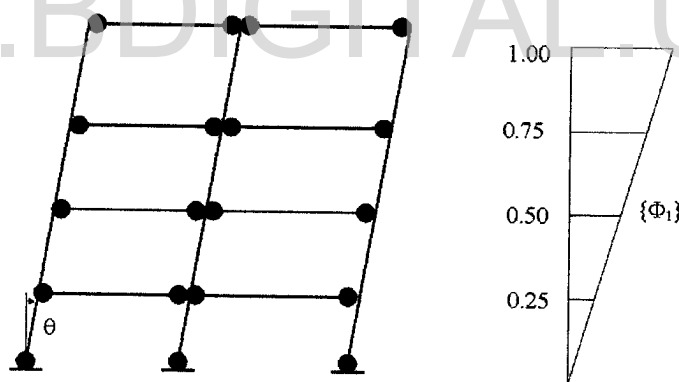


Figura 1.7 Mecanismo de colapso de un pórtico de acero [21].

Portal de Pórticos 2D [30]

El programa Portal de Pórticos 2D es un desarrollo novedoso que combina un programa de elementos finitos no lineal con Internet, es decir un Portal de Cálculo. El modelo físico del portal se basa en la Teoría del Daño Concentrado, la cual es descrita en el capítulo 4 del presente trabajo. El propósito del Portal es la simulación numérica de estructuras aporricadas de concreto armado bajo solicitaciones sísmicas u otro tipo de sobrecargas. Por medio de estas simulaciones se obtienen estimados

cuantitativos de la densidad de agrietamiento de los diferentes componentes de la estructura, una medida de la fluencia del refuerzo y la posibilidad o no de colapso estructural.

El Portal es una interfaz grafica que puede ser accedida a través de un navegador comercial (Explorer, Firefox, etc.) permitiendo establecer una comunicación entre el usuario y un servidor remoto de alto rendimiento. El usuario debe abrir una cuenta, digitalizar el pórtico, generar el archivo de entrada y colocarlo en su cuenta en el servidor ya que las simulaciones numéricas no se realizan en la computadora personal del usuario sino en el servidor de alto rendimiento. Una vez realizado el análisis se accede a un post-procesador gráfico para visualizar los resultados.

La estructura del portal está conformada por 3 módulos principales: Preprocesador, Procesador y Postprocesador.

Módulo Preprocesador: Permite la digitalización del pórtico y sus solicitudes.

Módulo Procesador: Es la interfaz con el programa de elementos finitos que permite realizar el análisis.

Módulo Postprocesador: Permite visualizar los resultados del análisis mediante gráficas de variable contra variable, variables contra tiempo y mapas de distribución de daños en cualquier instante del análisis.

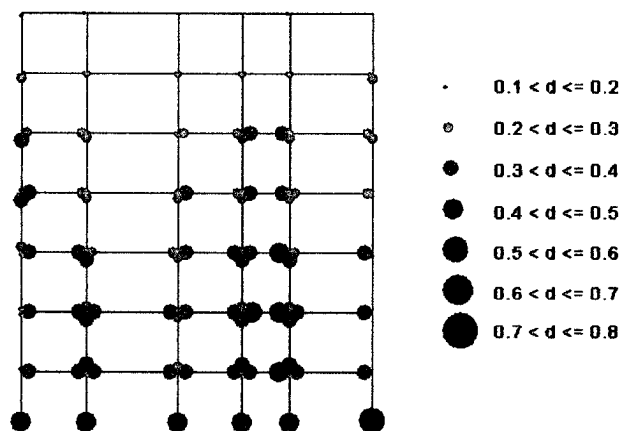


Figura 1.8 Mapa de daño de un pórtico de concreto armado.

Capítulo 2

Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF)

PEEF es un programa de elementos finitos escrito en lenguaje de programación Fortran, el cual fue desarrollado durante la presente tesis doctoral. Este es un programa de propósito general para el análisis de sólidos, que permite realizar el análisis lineal y no lineal de estructuras en tres y dos dimensiones, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas. Además, PEEF está estructurado de tal manera que permite la inclusión de nuevas subrutinas de elementos finitos, independientemente del número de nodos y grados de libertad que posea el elemento. En este momento PEEF tiene una librería de elementos finitos que permite el análisis de estructuras de concreto armado, sistemas duales, incluyendo la mampostería de relleno.

2.1 Formulación del problema [4]

El análisis de una estructura consiste en resolver el conjunto de ecuaciones formado por las ecuaciones de equilibrio, cinemáticas, condiciones externas impuestas y la ley de comportamiento descritas en los capítulos 3, 4 y 5 respectivamente. Básicamente el problema de análisis de la estructura se reduce a la resolución de la ecuación de equilibrio, la cual puede reducirse a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales en el tiempo.

Por ser no lineal, este problema no puede ser resuelto directamente y es necesario emplear un método iterativo apropiado, de manera que en cada iteración "a" del método el problema se convierte en un problema

lineal. A la resolución del sistema de ecuaciones formado por la ecuación de equilibrio más las condiciones externas impuestas en cada iteración “a”, se denomina a partir de esta sección como “problema global”.

En cada iteración “a” del problema global es necesario calcular las matrices de fuerzas internas y rigidez en coordenadas globales para cada uno de los miembros de la estructura. La resolución de este problema para cada elemento se denomina “problema local”.

Por lo tanto, para cada iteración “a” se tiene un problema global y “m” problemas locales, uno por cada elemento de la estructura. En consecuencia, el programa de elementos finitos se encuentra estructurado de la siguiente manera:

- Problema Global (PEEF): Conjunto de subrutinas que se encargan de resolver la ecuación de equilibrio, y constituye la parte desarrollada en la presente tesis doctoral.
- Problema Local: Subrutina que contiene al elemento finito y a través de la cual se obtiene el comportamiento de la estructura.

2.2 Resolución del problema global

Como se indicó en el punto 2.1 el problema global es el encargado de resolver el sistema de ecuaciones formado por la ecuación de equilibrio más las fuerzas y desplazamientos externos impuestos.

Este programa utiliza un procedimiento de resolución paso a paso, donde el intervalo de tiempo $[0, T]$ durante el cual se desea analizar el comportamiento de la estructura, es sustituido por un conjunto discreto de instantes $(0, t_1, t_2, \dots, t_r, \dots, T)$. Esto significa que las incógnitas del problema no son calculadas para el intervalo completo sino únicamente en los instantes escogidos t_r . El cálculo se hace de forma secuencial, es decir, antes de proceder al análisis de la estructura en el instante t_r se debe realizar previamente el cálculo en el instante t_{r-1} . Al concluir este cálculo se dice que se ha realizado un paso de tiempo.

Con el fin de eliminar las derivadas con respecto al tiempo del problema, se emplea el algoritmo de integración numérica del método de Newmark. Este método consiste en utilizar fórmulas aproximadas que expresan las velocidades y las aceleraciones al final de cada paso como funciones de esas mismas cantidades, y de las deformaciones al principio

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

del paso (conocidas) y de las deformaciones al final del paso. El uso de este tipo de algoritmos de integración permite junto con las ecuaciones cinemáticas, de equilibrio dinámico del miembro y la ley de comportamiento expresar las fuerzas internas en un instante t_r como una función de los desplazamientos generalizados. Es importante destacar que todas las cantidades correspondientes a los instantes precedentes son conocidas en el procedimiento paso a paso. La diferencia entre dos instantes consecutivos ($\Delta = t_r - t_{r-1}$) es llamada "paso global".

La ecuación de equilibrio en un instante de tiempo dado t_r puede ser escrita como:

$$\{L(U)\} = \sum_{b=1}^m \{Q(U)\}_b + \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \{\ddot{U}(U)\} - \{P\} = 0 \quad (2.1)$$

Donde $\{L(U)\}$ es llamada matriz residual ya que la solución se obtiene sólo cuando la solución de esta matriz es cero. El primer término del residual representa las fuerzas internas incluyendo las de amortiguamiento, el segundo las fuerzas de inercia, el tercero las fuerzas externas, la matriz $\{U\}$ contiene los desplazamientos nodales y m representa el número de elementos de la estructura. La ecuación (2.1) conjuntamente con los desplazamientos impuestos define el llamado "problema global". Por ser no lineal, este problema no puede ser resuelto directamente y es necesario usar el método de Newton como método iterativo. Cada iteración del método de Newton en un instante t_r consiste en resolver el siguiente problema lineal:

$$\{L(U)\} \cong \{L(U_o)\} + \left[\frac{\partial L}{\partial U} \right]_{\{U\}=\{U_o\}} \{U - U_o\} = 0 \quad (2.2)$$

Donde $\{U_o\}$ representa la matriz de desplazamiento obtenida en la iteración precedente y $\{U\}$ es la matriz de desplazamientos en la iteración actual. Se puede observar que con la finalidad de obtener la matriz residual $\{L(U_o)\}$ y su Jacobiano $\left[\frac{\partial L}{\partial U} \right]_{\{U\}=\{U_o\}}$, es requerido el cálculo de las

matrices $\{Q(U)\}_b$ y sus derivadas. El término $\left[\frac{\partial L}{\partial U} \right]_{\{U\}=\{U_o\}}$ es llamado

jacobiano global y las derivadas de $\{Q(U)\}_b$, jacobiano local. Este cálculo es denominado problema local y se describirá en la sección 2.3 del presente capítulo. Es por ello que el análisis de la estructura requiere de la solución de un problema global y de m problemas locales.

La convergencia del método de Newton depende de que tan cerca esté la matriz de desplazamientos utilizada en la primera iteración, con respecto a la solución del sistema de ecuaciones. En otras palabras, la convergencia del método de Newton depende del tamaño del paso de cálculo. En el procedimiento este paso de cálculo es único y debe satisfacer la convergencia tanto del problema global como de los m problemas locales. De esta manera, si la falta de convergencia se da en alguno de los m problemas locales, se reduce el paso de cálculo de los $m + 1$ problemas considerados.

A continuación se muestra el diagrama de flujo que describe el esquema general del programa de elementos finitos (PEEF) desarrollado:

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

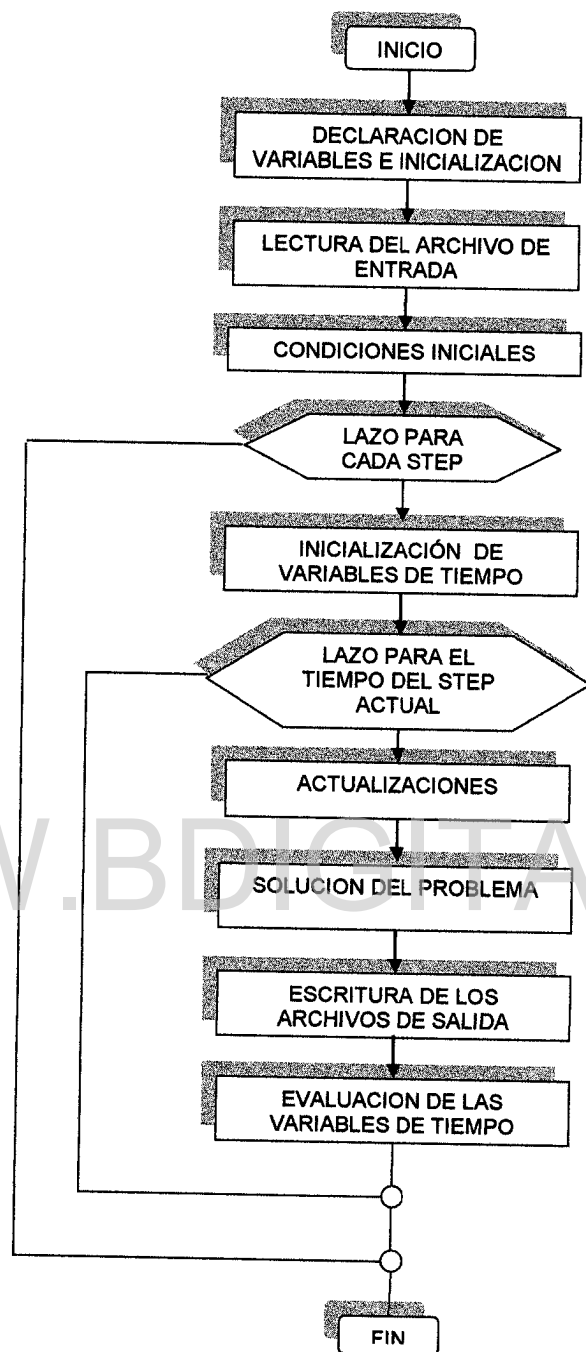


Figura 2.1 Diagrama de flujo de PEEF.

Cada uno de los bloques mostrados en la figura 2.1 tiene como objetivo principal lo siguiente:

Declaración de variables e inicialización: En este bloque se declaran todas las variables que serán usadas por el programa con su respectivo significado.

Lectura del archivo de entrada: Conjunto de subrutinas que se encargan de leer el archivo de entrada, que tendrá la extensión .inp, con los datos del modelo. Posteriormente la subrutina llena la estructura de datos definida para el manejo del problema.

Condiciones iniciales: Bloque de subrutinas que se encargan de establecer las condiciones iniciales antes de comenzar el análisis, estas condiciones son, dimensionar las matrices y vectores en función del tamaño del problema a resolver, así como inicializar las variables necesarias a cero.

Lazo para cada step: Lazo donde se realiza el cálculo del modelo para cada uno de los pasos de análisis (step).

Inicialización de las variables de tiempo: Esta subrutina se encarga de actualizar e inicializar las variables de tiempo para cada paso de análisis.

Lazo para el tiempo del step actual menor al tiempo total del step: Este lazo se ejecuta hasta que el tiempo del step actual es mayor al tiempo total definido para dicho step.

Actualizaciones: Subrutinas encargadas de actualizar las variables de desplazamiento, velocidad y aceleración dependiendo si el problema avanza o reduce el incremento de tiempo en estudio.

Solución del problema: Este bloque de subrutinas se encarga de resolver el problema global es decir, obtener la solución de la ecuación de equilibrio. Para realizar este cálculo se necesita que el programa llame a la subrutina que contiene al elemento finito (solución del problema local), para posteriormente hacer el ensamblaje, introducir las condiciones de contorno y fuerzas externas, resolver el sistema de ecuaciones y finalmente evaluar la convergencia.

Escritura de los archivos de salida: Tienen como objetivo mostrar por medio de archivos de texto, los resultados del modelo analizado, así como los posibles errores originados durante el análisis.

Evaluación de las variables de tiempo: Estas subrutinas evalúan si el paso de tiempo se va a incrementar o reducir, a su vez se actualizan las variables de tiempo para el caso en el que el número de iteraciones es menor al máximo, o en caso contrario se escribe un mensaje indicando el error y se detiene el análisis.

2.2.1 Desarrollo del bloque de subrutinas

Declaración de variables e inicialización

En este bloque se declaran e inicializan todas las variables a ser usadas por el programa. Se tienen datos enteros, reales, lógicos, caracter y datos derivados.

- Las líneas de datos enteros están formadas por datos cuyos caracteres numéricos no llevan el punto decimal.
- Un dato real es una cantidad formada por una parte entera y otra fraccionada, para ello, el punto decimal (.) es usado para definir este tipo de datos. La parte fraccionada en un tipo de dato real no puede llevar más de 8 caracteres numéricos o dígitos. Un número real puede ser escrito de forma exponencial, de ser así, el exponente será precedido por E y la opción (-) o (+) debe ser colocada.
- Los datos lógicos serán usados para definir variables que sólo pueden tomar el valor de cierto o falso.
- Para los datos caracter se especificó que la cadena de datos caracter no puede contener una longitud superior a 30 caracteres.
- Los tipos de datos derivados se usan como una herramienta que permite definir una estructura de datos para una variable en particular, por ejemplo, asociar a cada elemento los números de nodos que lo conforman.

Lectura del archivo de entrada

La subrutina principal se denomina “Traductor”, dicha subrutina se encarga de leer el archivo de entrada (.inp), con la finalidad de almacenar los datos en vectores y matrices que serán usados posteriormente en el

análisis de la estructura. En la sección 2.2.2 se muestra el esquema general de un archivo de entrada.

El conjunto de subrutinas encargadas son:

Subrutina LeerEncabezado: Lee el encabezado del archivo de entrada.

Subrutina CalculoNodos: Se encarga de almacenar las coordenadas de cada uno de los nodos. El programa se diseñó de manera tal que puede leer elementos finitos con distintos números de nodos.

Subrutina CalculoConjuntosNodos: Determina y almacena los nombres y nodos de cada uno de los conjuntos.

Subrutina CaracteristicasElementos: En función del tipo de elemento finito esta subrutina extrae de la librería de elementos finitos la siguiente información: número de nodos, número de propiedades enteras, reales, variables de estado y grados de libertad activos.

Subrutina CalculoElementos: Se encarga de determinar y almacenar para cada elemento, el tipo de elemento finito al que pertenece y los nodos asociados. En esta subrutina los nodos se asignan de manera dinámica ya que el número asociado de nodos depende del elemento finito; para ello se usó la herramienta "Pointer", ya que dentro de los tipos de datos derivados no se permite la asignación dinámica "Allocate".

Subrutina CalculoConjuntosElementos: Determina y almacena los nombres y elementos de cada uno de los conjuntos.

Subrutina PropElem: Se encarga de recopilar las propiedades reales y enteras asignadas a cada conjunto de elementos.

Subrutina DatosBoundary: Se encarga de almacenar la información correspondiente a las condiciones de borde que se encuentran fuera de los steps.

Subrutina LeerFile: Se encarga de obtener las características de los archivos de datos que se utilizan para un análisis dinámicos (registro de aceleraciones) y estáticos (registro de desplazamiento).

Subrutina Step: Obtiene las características y parámetros establecidos en el archivo de entrada para el caso de análisis estáticos y dinámicos, esto es, duración del paso, tipo de análisis, y tipo de sollicitación asignada a los nodos y elementos.

Condiciones iniciales

Bloque de subrutinas que se encargan de establecer las condiciones iniciales antes de comenzar el análisis. Estas condiciones implican dimensionar las matrices y vectores en función del tamaño del problema a resolver (depende del número total de elementos y los grados de libertad activos). Las variables tomadas en cuenta son: desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerzas y variables de estado.

Las subrutinas utilizadas son:

Subrutina TamVector. Se encarga de establecer el tamaño de los vectores en función del número de nodos y el número de grados de libertad activos.

Subrutina AmpliarVector y AmpliarMatriz. Amplia el tamaño de los vectores y matrices en función de la dimensión determinada mediante la subrutina TamVector.

Subrutina Condicion_Inicio: Lee a partir de un archivo de datos externos los valores iniciales de las variables de estado.

Lazos que controlan los pasos del análisis

El bloque comprende dos lazos, el primero controla el tiempo total del análisis incluyendo todos los steps definidos en el archivo de entrada, mientras que el segundo se ejecuta para cada step hasta que el tiempo del step actual es mayor al tiempo total definido para dicho step, para ello se usa la subrutina Inicio_Step, la cual se encarga de actualizar e inicializar las variables de tiempo para cada paso de análisis, así como variables que sólo pueden variar de un step a otro.

Licencia Creative Commons:

24

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Los parámetros de tiempos son: DT_{Step} (delta de tiempo del step), $T_{StepAct}$ (tiempo del step actual), $T_{TotalStep}$ (tiempo total del step), TG_{Actual} (tiempo global actual). En la figura 2.2 se muestra el esquema de las variables de tiempo.

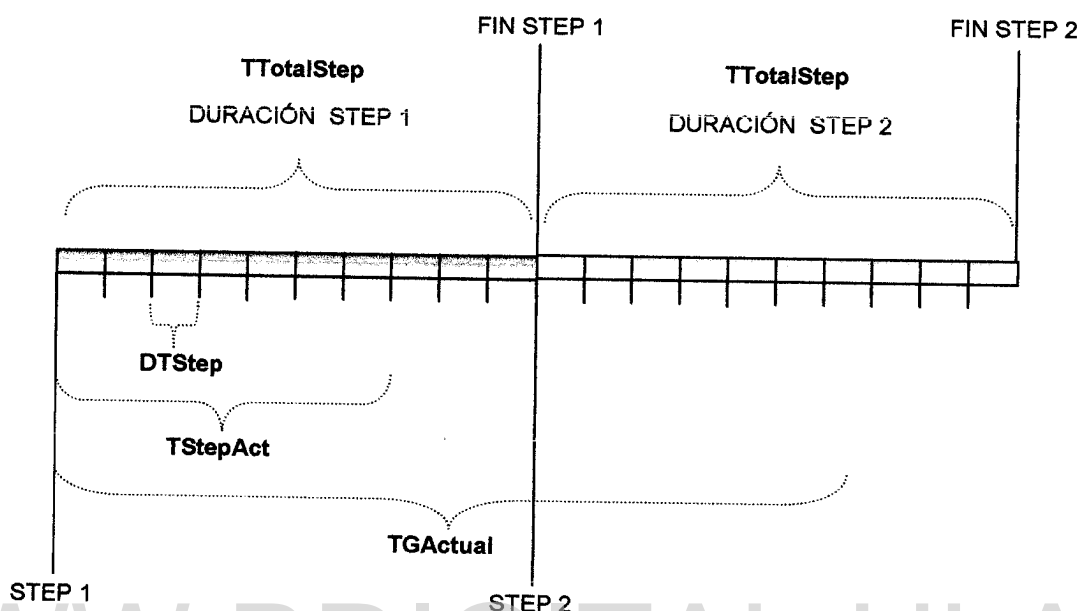


Figura 2.2 Variables tiempo.

Actualizaciones

Subrutina encargada de actualizar las variables de desplazamiento, velocidad, aceleración y variables de estado dependiendo si el problema avanza o retrocede para el instante de tiempo en estudio. Además, asigna el valor de cero (0.0) al vector desplazamiento para los grados de libertad que se encuentran restringidos. Las subrutinas programadas son:

Subrutina ActualizarVariables: Esta subrutina actualiza los valores correspondientes al desplazamiento de los nodos de la estructura y de las variables de estado.

Subrutina RetrocederVariables: En caso de que no se avance, la simulación retrocede. Para ello las variables toman los valores del último intervalo de tiempo donde la simulación fue exitosa.

Subrutina PoliNewton: Esta rutina utiliza el polinomio de extrapolación de Newton para obtener una mejor aproximación para el cálculo de los desplazamientos en cada nodo.

Subrutina Apoyos: Cumple dos funciones, la primera es establecer las condiciones de apoyo del modelo indicando dónde los desplazamientos son nulos. La segunda consiste en aplicar el método de penalización a los nodos restringidos durante el step. Para ambas funciones se utiliza dos subrutinas auxiliares: (BoundaryGrupo - BoundaryNodo) dependiendo si la información está asignada a nodos o grupos de nodos.

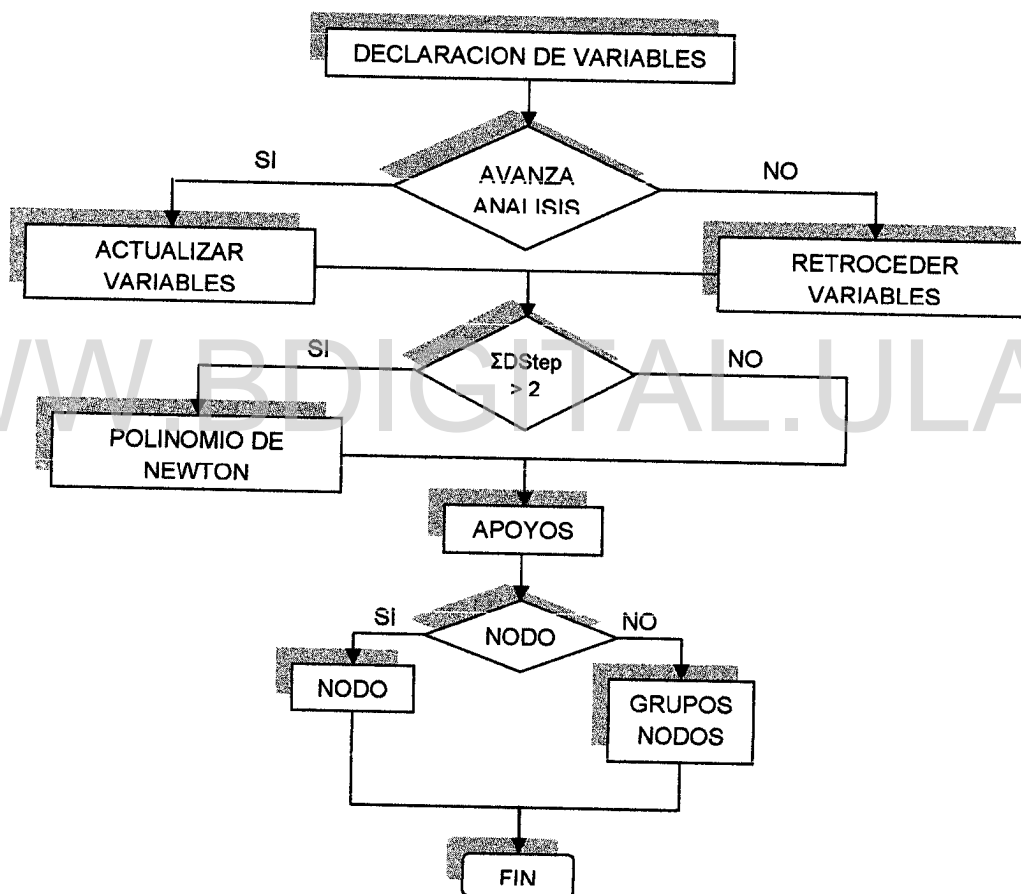


Figura 2.3 Diagrama de flujo de la subrutina Actualizaciones.

Para el caso dinámico el programa establece las nuevas condiciones de borde, es decir, libera los grados de libertad de los nodos donde será aplicado el sismo. A su vez impone los desplazamientos asignados dentro de los steps.

Solución del problema global

Este bloque de subrutinas se encarga de resolver el “problema global” es decir, obtener la solución de la ecuación de equilibrio. Para realizar este cálculo es necesario que el programa llame a la subrutina que contiene al elemento finito (solución del “problema local”), para posteriormente hacer el ensamblaje, introducir las fuerzas externas, resolver el sistema de ecuaciones y finalmente evaluar la convergencia.

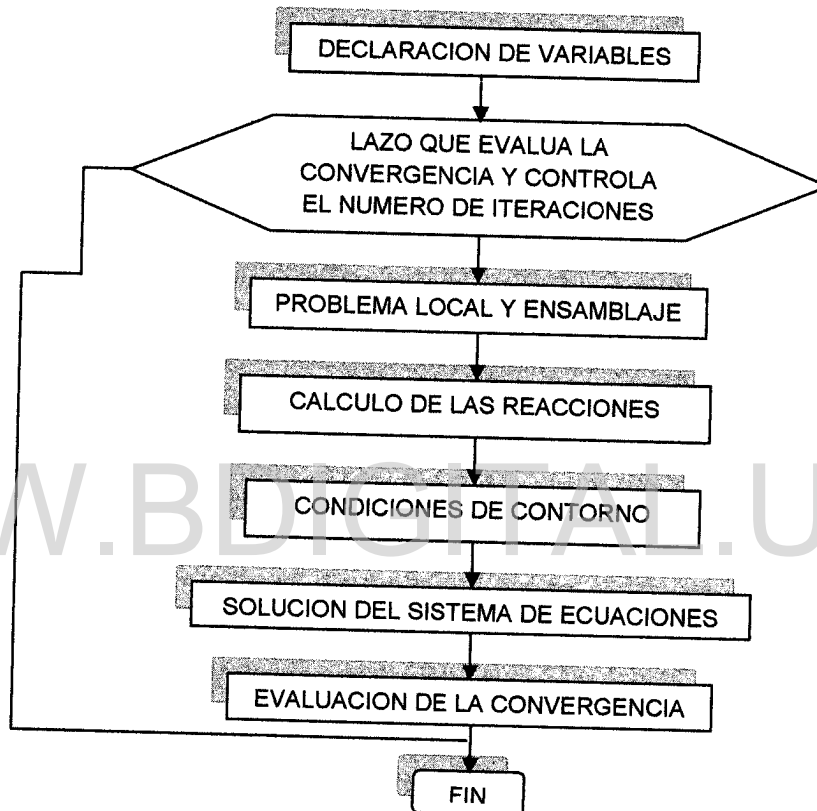


Figura 2.4 Diagrama de flujo para la solución del problema global.

Las subrutinas encargadas de la solución del problema global son:

1. *Subrutina Jacobiano_Global*: Se encarga de resolver el problema local elemento por elemento con la finalidad de determinar el jacobiano local, para posteriormente hacer el ensamblaje del modelo y así obtener el jacobiano global y el vector de fuerzas internas.

Subrutina Inicializar_G: Esta subrutina se encarga de inicializar el vector Jacobiano global y el vector de fuerzas internas.

Subrutina Inicializar_L: Se encarga de inicializar las variables locales que dependen del tipo de elemento finito en estudio.

Subrutina Jacob_Local: Esta subrutina se encarga de resolver el problema local elemento por elemento con la finalidad de obtener para cada uno de ellos el jacobiano local, el vector de fuerzas internas, así como otras variables que definen el estado del elemento finito. Estas últimas son llamadas variables de estado. La subrutina Jacobiano local usa las subrutinas ELIB (contiene a cada uno de los elementos finitos de la librería) y la subrutina Posiciones (calcula la posición de los nodos en el vector global según los grados de libertad). Para el caso dinámico asigna los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento correspondiente a cada nodo del elemento.

Las subrutinas ELIB contemplan los siguientes elementos finitos:

- VC2DCA: Viga - columna 2D de concreto armado.
- VC3DCA: Viga - columna 3D de concreto armado.
- M2DMR: Muro 2D de mampostería de relleno.
- VCM2DCA: Viga - columna - muro de corte 2D de concreto armado.

Subrutina Ensamblaje: La subrutina ensamblaje tiene dos objetivos, el primero consiste en obtener el Jacobiano global a partir del jacobiano local determinado por la subrutina Jacob_Local. El segundo es calcular la sumatoria de las fuerzas locales para cada nodo.

El Jacobiano global es tratado como una matriz dispersa ya que esta posee pocos elementos no nulos y los nulos no necesitan ser almacenados, ahorrando mucho espacio en memoria así como también tiempo computacional. Existen dos tipos de matrices dispersas: estructuradas y no estructuradas; para el caso en estudio, se tiene una matriz no estructurada puesto que las entradas no nulas se localizan irregularmente dentro de la matriz. El almacenamiento de matrices dispersas reserva espacio contiguo en memoria para los elementos no nulos de la matriz. Esto, requiere un esquema que permita saber donde se localizan estos elementos en la matriz completa. El empleo del almacenamiento disperso trae como consecuencia el uso de direcciones para la localización de los elementos, y la complicación en la paralelización de los códigos.

Existen muchos métodos para almacenar estos datos, el implementado en este programa es el CSR [51], dicho método es general y no almacena ningún elemento innecesario; además recorre la matriz por fila. Este tipo de almacenamiento implica que para almacenar una matriz de N filas y columnas no se necesita N^2 posiciones de memoria sino únicamente $2a + N + 1$, siendo a el número de elementos no nulos de la matriz.

La información es almacenada en tres vectores (AN, JA y IA), donde AN es el vector de datos, JA es el vector que almacena el índice de la columna en la que se encuentra cada no nulo, finalmente IA es el vector que indica el índice en A del elemento que comienza cada nueva fila. La subrutina ensamblaje usa las siguientes subrutinas:

Subrutina Posiciones: Esta subrutina calcula las posiciones en los vectores que contienen al jacobiano global con sus componentes i, j .

Subrutina Suma_Fuerzas_L: Esta subrutina se encarga de calcular la sumatoria de las fuerzas locales (Residual).

Subrutina Jacobiano_I: Esta subrutina devuelve el vector Jacob_i y ordena el jacobiano global.

A continuación se muestra el diagrama de flujo que describe los pasos para la obtención del Jacobiano global.

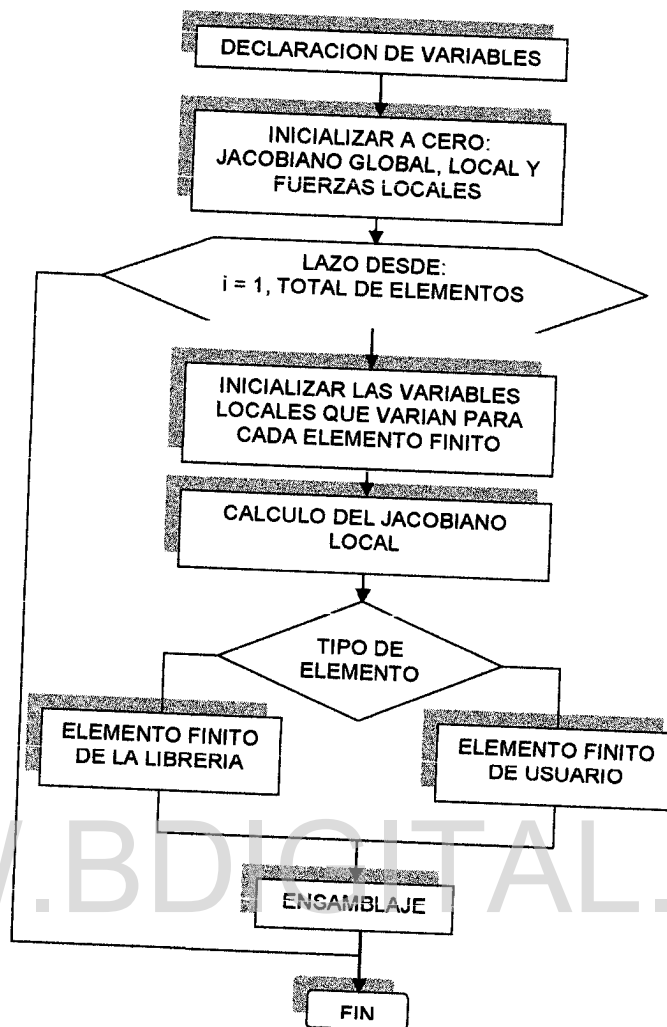


Figura 2.5 Diagrama de flujo para la solución del problema local y ensamblaje.

2. *Subrutina Reacciones*: Esta subrutina se encarga de calcular las reacciones en los nodos de la estructura, a partir de las fuerzas locales obtenidas en la subrutina *Jacobiano_Global*.

3. *Subrutina Cond_Contorno*: Se encarga de aplicar el método de penalización [12] a los nodos restringidos durante el step en estudio, así como en los nodos donde son aplicados los desplazamientos. Además incluye las fuerzas externas nodales. Las subrutinas utilizadas son:

Subrutina Apoyos: Se encarga de aplicar la penalización al vector jacobiano global para los nodos restringidos en el step en estudio. Para realizar tal función se utiliza la subrutina *Penalizacion*.

Subrutina Aplic_Cond: Cumple la función de evaluar el tipo de sollicitación aplicada en el step. Los desplazamientos impuestos se incluyen en el análisis usando el método de penalización. Si son fuerzas externas dichas fuerzas son incluidas en el vector que contiene las fuerzas internas (Residual).

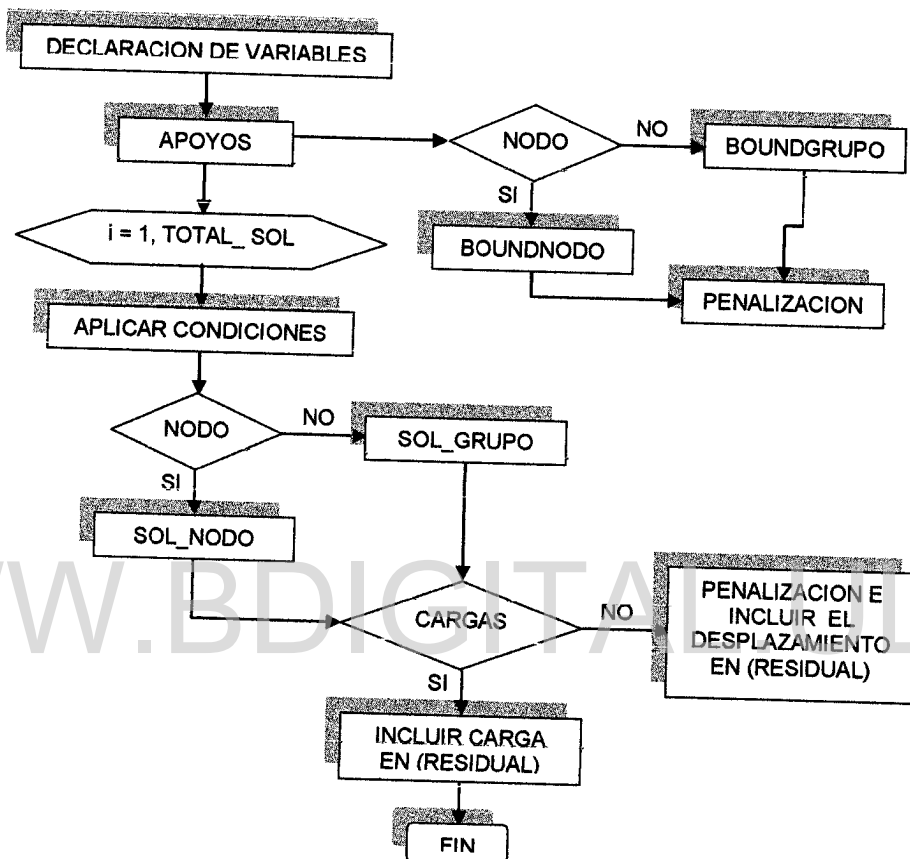


Figura 2.6 Diagrama de flujo para la inclusión de las condiciones externas.

4. *Subrutina Sol_Sist_Eq:* Se encarga de resolver el sistema de ecuaciones formado por la ecuación de equilibrio y las condiciones externas impuestas para el instante de tiempo del step actual. Para la solución del sistema de ecuaciones se utilizará el proceso de eliminación de Gauss y pivote máximo ($AX=B$).

Para el caso dinámico, a partir de los desplazamientos obtenidos de la solución del sistema de ecuaciones se obtienen los valores de aceleración y velocidad haciendo uso de las ecuaciones dadas en el método de Newmark, ver por ejemplo [8].

Aceleración:
$$A_{Act} = \frac{4U_{Act} - 4U_{Ant} - 4V_{Ant}\Delta T^2}{\Delta T^2}$$

Velocidad:
$$V_{Act} = \frac{-V_{Ant}\Delta T + 2U_{Act} - 2U_{Ant}}{\Delta T}$$

Donde:

A_{Act} : Aceleración en el instante de tiempo actual.

U_{Act} : Desplazamiento en el instante de tiempo actual.

U_{Ant} : Desplazamiento en el instante de tiempo anterior.

V_{Act} : Velocidad en el instante de tiempo actual.

V_{Ant} : Velocidad en el instante de tiempo anterior.

ΔT : Delta de tiempo del step.

4. *Subrutina Eva_Conv*: Se encarga de evaluar si existe convergencia después de la resolución del sistema de ecuaciones, para ello se compara el cociente del valor del desplazamiento calculado y el residual del sistema de ecuaciones con una cierta tolerancia.

Escritura de los archivos de salida

Si existe convergencia la subrutina *Salidas* tiene como objetivo escribir para el instante de tiempo analizado los valores correspondientes para cada nodo, de desplazamientos y fuerzas externas. En cuanto a los elementos se escriben los resultados referentes a las variables de estado. Las salidas se muestran en un archivo tipo texto.

Actualización de las variables de tiempo

Este grupo de subrutinas se encargan de evaluar si el paso de tiempo se va a incrementar o reducir:

1. *Subrutina GestionPasoGlobal*: Evalúa si el paso de tiempo se va a incrementar o reducir y actualiza las variables de tiempo para el caso en el que el número de iteraciones es menor al máximo, en caso contrario se escribe un mensaje indicando el error y se detiene el análisis.

2. *Subrutina ActTiempo*: Actualiza las variables de tiempo, tiempo global actual y anterior, tiempo del step actual y anterior.

A continuación se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la evaluación del tiempo en el análisis.

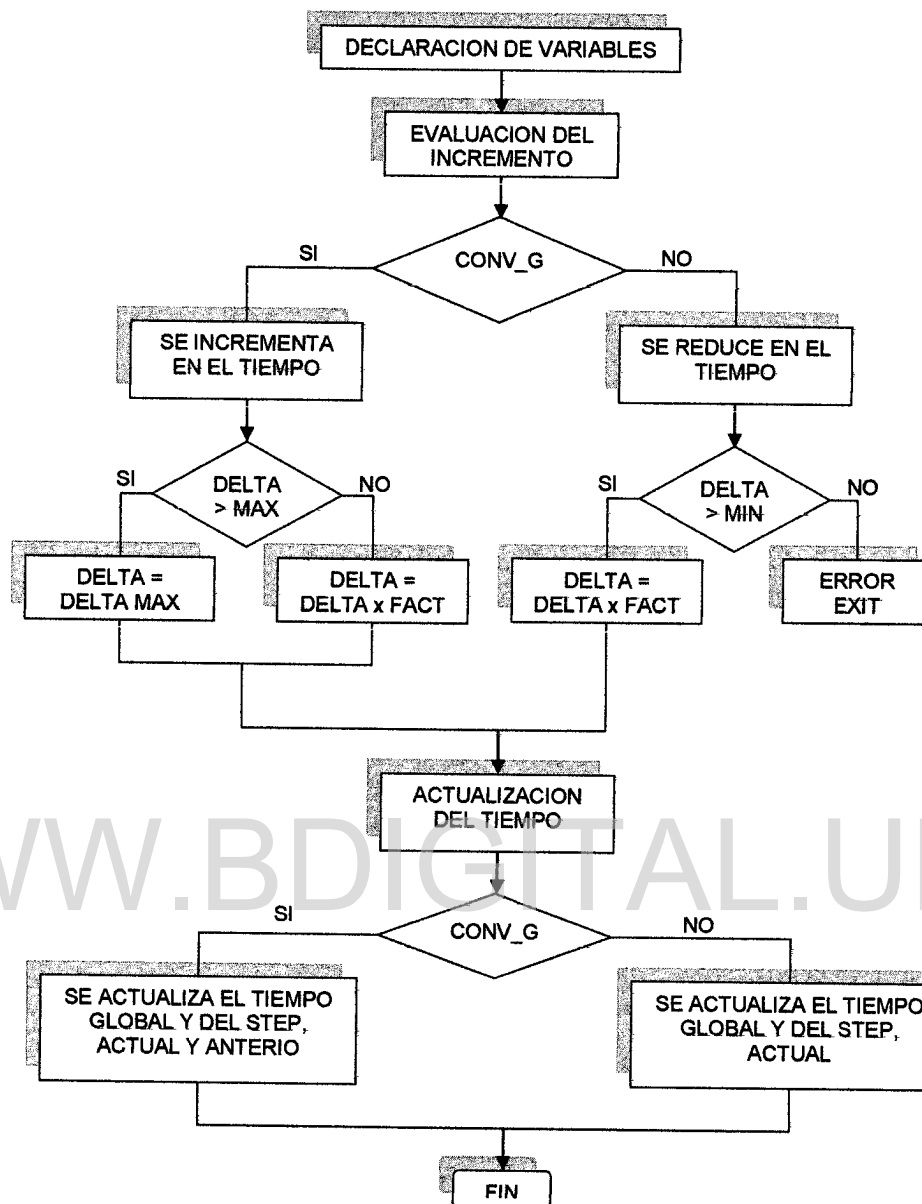


Figura 2.7 Diagrama de flujo del bloque de subrutinas para la evaluación del tiempo.

2.2.2 Diseño del archivo de entrada (.inp)

El archivo de entrada ó archivo de datos (nombre.inp) está basado en el formato usado por el programa Abaqus, esto trae como ventaja que en la depuración y validación del programa se usen los mismos archivos en ambos programas. Este archivo de texto es leído por el programa para el análisis del modelo y contiene información sobre el número de nodos, coordenadas, elementos, tipos de elementos finitos, propiedades del

material, condiciones de borde, condiciones iniciales y solicitaciones. Este archivo posee tres tipos de líneas:

- Líneas de palabras claves: Estas líneas introducen palabras claves y a menudo parámetros conocidos por el programa, las cuales se encuentran en frases separadas por comas. Los parámetros son usados para definir el comportamiento de una opción y llevan un asterisco para identificarlos.
- Líneas de datos: Se usan para la entrada de datos que pueden ser numéricos o alfanuméricos.
- Líneas de comentarios: Son líneas que se utilizan para escribir comentarios. Se identifican por el doble asterisco.

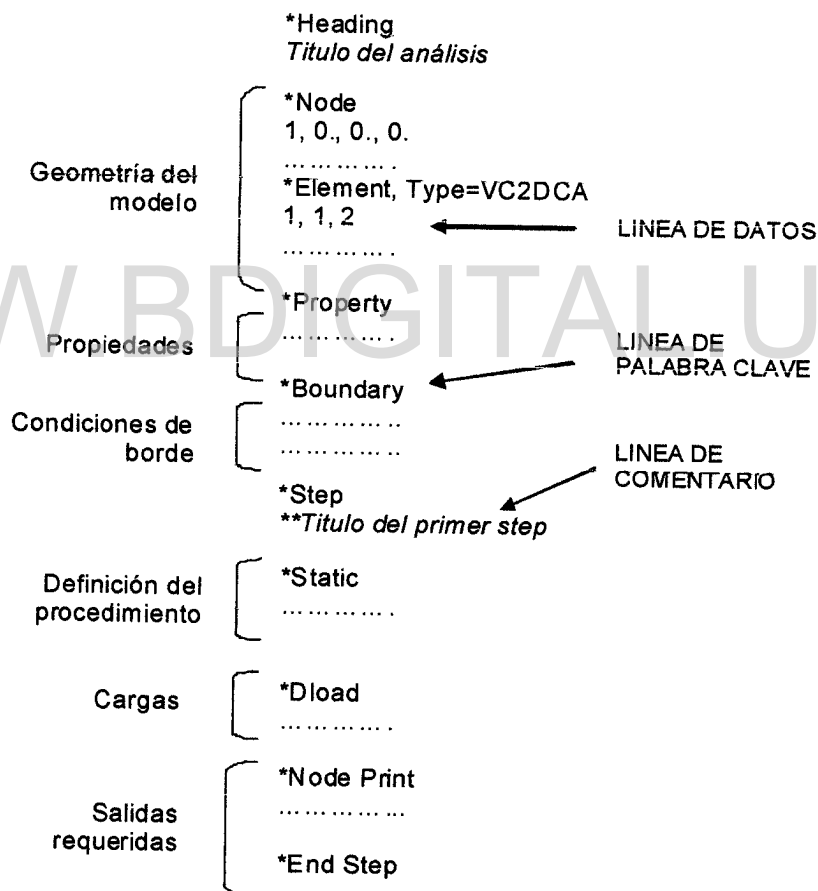


Figura 2.8 Esquema de un archivo de entrada INP.

En el anexo A se muestra con detalle la estructura del archivo de entrada y el manual de usuario del programa de elementos finitos.

2.3 Resolución del problema local

La implementación de los elementos finitos se realizó a través de subrutinas que el programa de cálculo llama cada vez que requiere información de los elementos, de forma general esta subrutina se denomina ELIB. En cada llamada, el programa provee a la subrutina con los valores de las variables (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) de los nodos que corresponden al elemento analizado en el incremento del paso actual. Existe un intercambio de datos controlados entre el programa y la subrutina que depende del tipo de elemento, y de su contribución a la estructura, como los son el vector residual, el Jacobiano y las variables asociadas al elemento.

Este intercambio de información entre el programa y la subrutina ELIB se esquematiza en la figura 2.9. El intercambio frecuente de información entre el programa de elementos finitos y la subrutina se canaliza a través de dos subrutinas, la primera llamada TRAD_PEEF_ELIB, que traduce las variables del programa de elementos finitos para que sean interpretadas por la subrutina ELIB y la segunda, TRAD_ELIB_PEEF, que realiza la traducción inversa como se muestra en la siguiente figura.

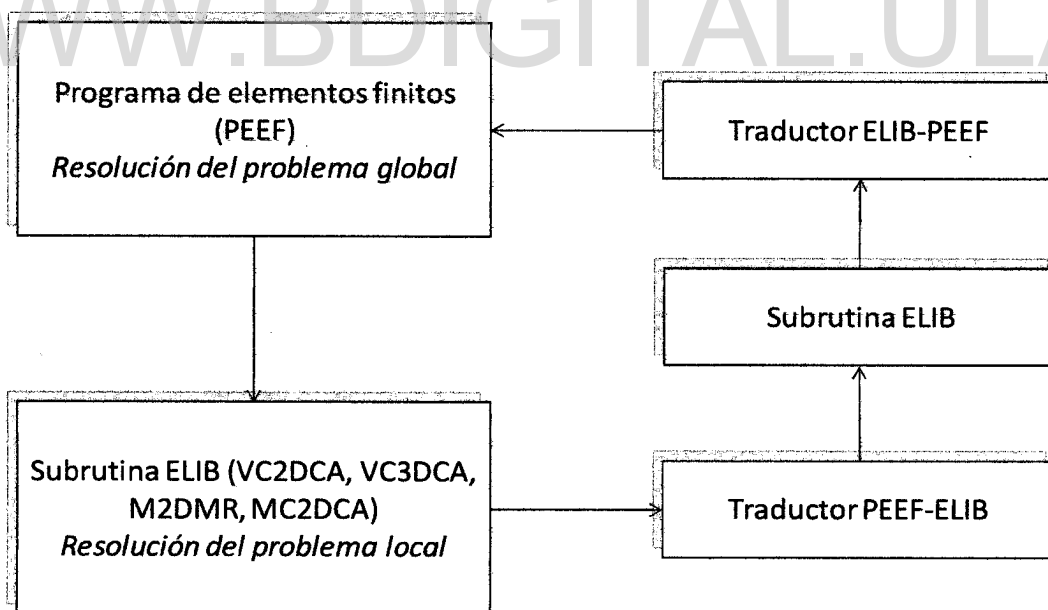


Figura 2.9 Esquema general de la resolución numérica.

2.3.1 Implementación numérica del problema local

La resolución del problema local consiste en el cálculo de las fuerzas internas, los valores de las variables internas (por ejemplo daño y deformaciones plásticas) y el Jacobiano para cada uno de los elementos se realiza a través de la subrutina ELIB. Este cálculo se efectúa utilizando los conceptos de esfuerzos y deformación, cuya definición específica depende del modelo implementado en el elemento finito. Esta subrutina se acopla al programa para poder realizar el análisis de la estructura. ELIB está estructurada como se muestra en la figura 2.10.

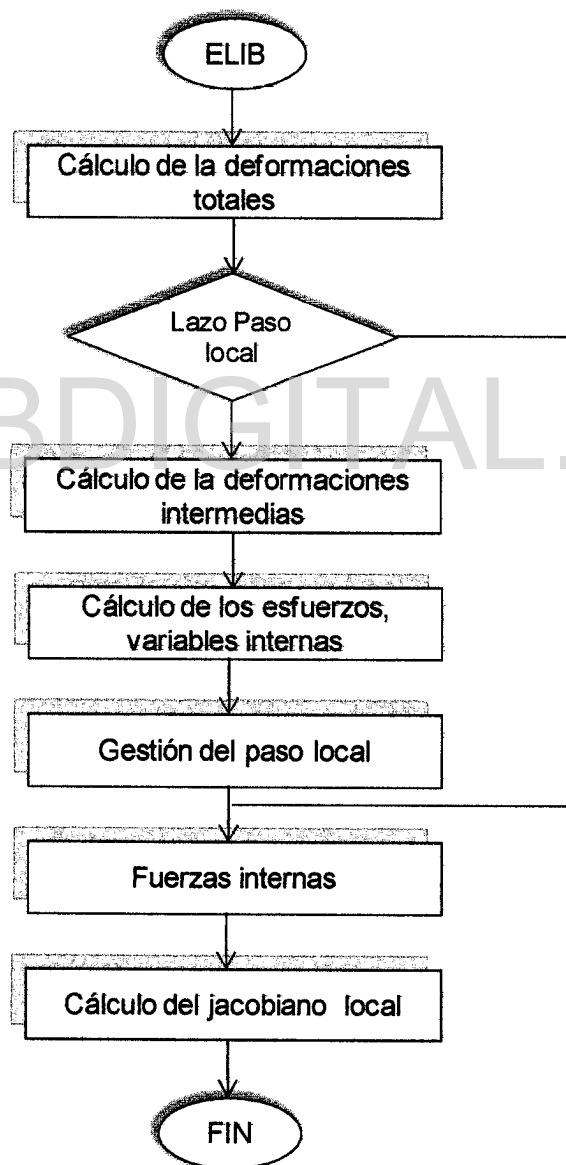


Figura 2.10 Esquema general de subrutina ELIB.

Siguiendo el esquema de la figura 2.10, inicialmente ELIB calcula las deformaciones totales a partir de los desplazamientos utilizando las ecuaciones cinemáticas. Luego, puede observarse que el programa considera la posibilidad de pasos de cálculo diferentes para los problemas global y local. En tal sentido, una vez calculadas las deformaciones totales, se realiza el lazo para la gestión de paso local, para ello primero se calculan las deformaciones intermedias interpolando las deformaciones totales entre el inicio y el final del paso global. Posteriormente se determinan los esfuerzos, y variables internas. Para el cálculo de estos últimos se debe resolver un sistema de ecuaciones formado por las leyes de estado y las leyes de evolución de las variables internas. De no lograrse la convergencia después de una cantidad determinada de veces, se procede a comenzar el ciclo con un paso local más pequeño. Este procedimiento se repite hasta alcanzar el valor del paso global.

Una vez lograda la convergencia local se realiza el cálculo de las fuerzas internas a partir de los esfuerzos generalizados. Finalmente, se determina el Jacobiano local en coordenadas globales.

Si se desea conocer con detalle la resolución numérica del problema local de cada uno de los elementos finitos incorporados en PEEF se puede leer [38] para el elemento viga columna 2D y 3D de concreto armado, [47] para el elemento muro 2D de mampostería de relleno, y [46] para el elemento muro de corte 2D de concreto armado.

Capítulo 3

Elemento para muros de mampostería de relleno

La necesidad de incluir los paneles de relleno en el análisis de pórticos de concreto armado ha sido reconocida durante mucho tiempo. El comportamiento de los pórticos vacíos y los pórticos rellenos es muy diferente. La única vía más cercana para el análisis de pórticos grandes rellenos, es el modelo del puntal diagonal que se encuentra representado en la figura 3.1.

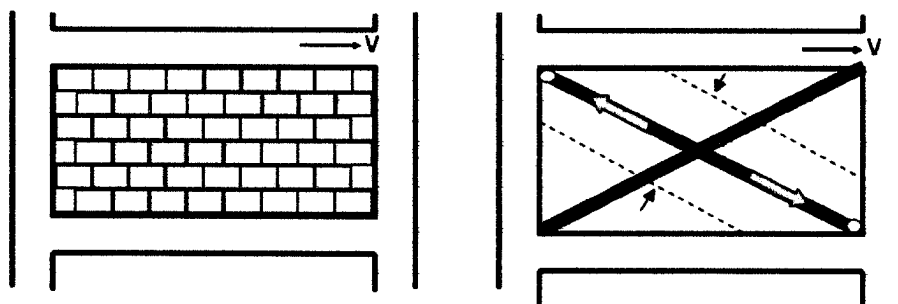


Figura 3.1 Modelo del puntal diagonal [48].

Este modelo, fue propuesto inicialmente por Polyakov (como se reporta en [34,37]), y consiste en suponer que los efectos de los paneles de relleno pueden ser representados por dos barras diagonales a compresión. Las propiedades elásticas del puntal equivalente han sido estudiadas por muchos investigadores (Ver [19-45]). El comportamiento inelástico también ha sido estudiado intensamente (Ver por ejemplo [34,50]).

Sin embargo, para cargas cíclicas o sísmicas, el modelo del puntal diagonal presenta serias desventajas. En estos casos son necesarias dos diagonales para tomar en cuenta la influencia de los paneles de relleno en el comportamiento del pórtico. En el enfoque convencional ambas barras están desacopladas, pero físicamente, hay un solo elemento. Esta característica del modelo, no corresponde a la física del problema, permitiendo una representación incorrecta del comportamiento en tantos casos importantes como el análisis dinámico de pórticos rellenos sujetos a cargas sísmicas.

En este capítulo, se describe una modificación del modelo del puntal diagonal para incluir el acoplamiento entre las dos barras [48,49]. El acoplamiento esta dado por la introducción de un concepto que los autores han llamado “concentrador plástico”. Un concentrador plástico puede ser comparado con una rótula plástica, en el sentido que ambos se pueden considerar como un resorte inelástico de longitud cero. El concentrador plástico une ambas barras diagonales y produce una transferencia de efectos de un puntal al otro. Inicialmente, se describe un modelo que sólo considera el comportamiento plástico de la mampostería de relleno [48]. Posteriormente se detalla un modelo del concentrador plástico para describir el proceso de agrietamiento y daño de la mampostería [49].

3.1 Modelo para pórticos rellenos con mampostería: El concentrador plástico [48]

3.1.1 Cinemática de pórticos rellenos con mampostería

Consideremos un pórtico plano relleno como el que se muestra en la figura 3.2a. Se introduce un par de ejes coordenados globales X, Z para definir la posición de los nodos del pórtico. Esta estructura es modelada usando dos tipos diferentes de elementos, vigas-columnas y paredes de relleno, conectados entre ellos por los nodos del pórtico. La matriz de desplazamientos generalizados del nodo i del pórtico esta dado por:

$$\{\mathbf{u}\}_i' = (u_i, w_i, \theta_i) \quad (3.1)$$

Donde u_i y w_i son, respectivamente, el desplazamiento en la dirección X y Z como se muestra en la figura 3.2b. θ_i es la rotación del nodo. Los

desplazamientos generalizados del pórtico están dados en la matriz $\{U\}$, donde:

$$\{U\}' = (\{u\}'_1, \{u\}'_2, \dots, \{u\}'_n) \quad (3.2)$$

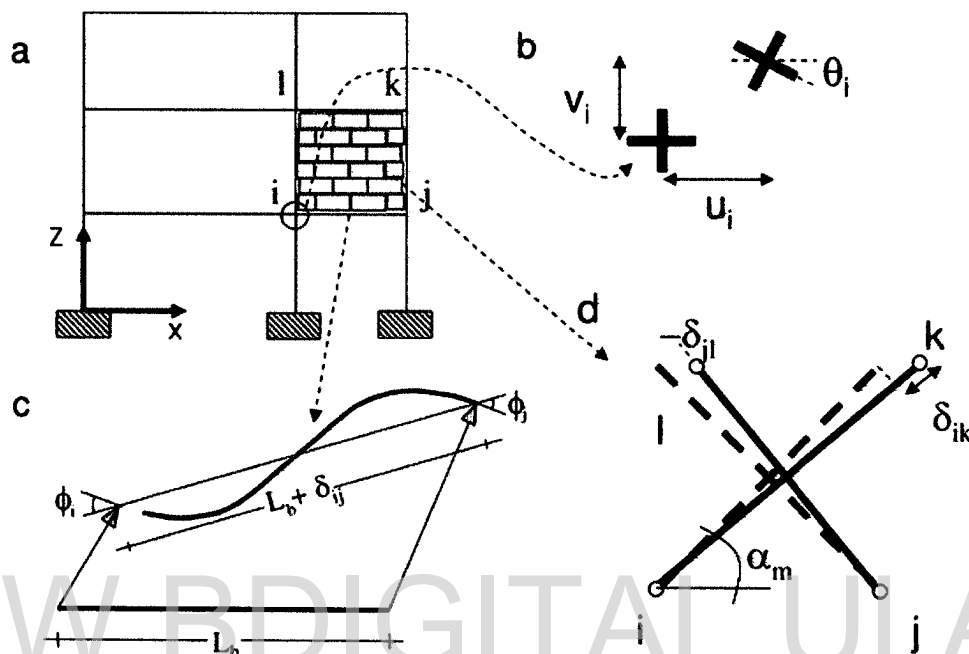


Figura 3.2 a) Pórtico relleno. b) Desplazamientos generalizados de un nodo. c) Deformaciones generalizadas de una viga-columna. d) Deformaciones generalizadas de la pared de relleno equivalente.

Consideremos ahora una viga-columna "b" entre los nodos i y j. Para pórticos planos, la matriz de deformaciones generalizadas de una viga-columna es definida como: $\{\phi\}'_b = (\phi_i, \phi_j, \delta_{ij})$ donde los términos ϕ_i y ϕ_j representan la rotación relativa de la viga-columna y δ_{ij} el alargamiento del miembro (ver figura 3.2c).

En el caso de los paneles de mampostería, estos se modelan como dos barras diagonales que constituyen un único elemento formado por cuatro nodos i, j, k, l como se indica en la figura 3.2d. La matriz de deformaciones del elemento de mampostería "m" está definida como: $\{\Delta\}'_m = (\delta_{ik}, \delta_{jl})$ donde δ_{ik} and δ_{jl} es el cambio de longitud de las diagonales, como se muestra en la figura 3.2d.

Las matrices de deformaciones y de desplazamientos generalizados están relacionadas por las ecuaciones cinemáticas, (los efectos geométricos no lineales se desprecian):

$$\{\phi\}_b = [\mathbf{B}]_b \{\mathbf{U}\} \quad (3.3)$$

$$\phi_i = \frac{\sin \alpha_b}{L_b} u_i - \frac{\cos \alpha_b}{L_b} w_i + \theta_j - \frac{\sin \alpha_b}{L_b} u_j + \frac{\cos \alpha_b}{L_b} w_j$$

$$\phi_j = \frac{\sin \alpha_b}{L_b} u_i - \frac{\cos \alpha_b}{L_b} w_i - \frac{\sin \alpha_b}{L_b} u_j + \frac{\cos \alpha_b}{L_b} w_j + \theta_j$$

$$\delta_{ij} = -u_i \cos \alpha_b - w_i \sin \alpha_b + u_j \cos \alpha_b - w_j \sin \alpha_b$$

$$\{\Delta\}_m = [\mathbf{B}]_m \{\mathbf{U}\} \quad (3.4)$$

$$\delta_{ik} = -u_i \cos \alpha_m - w_i \sin \alpha_m + u_k \cos \alpha_m + w_k \sin \alpha_m$$

$$\delta_{jl} = u_j \cos \alpha_m - w_j \sin \alpha_m - u_l \cos \alpha_m + w_l \sin \alpha_m$$

3.1.2 Dinámica de pórticos rellenos con mampostería

El trabajo interno o de deformación de ambos tipos de elementos se obtienen por la definición de la matriz de esfuerzos conjugada con la matriz de deformaciones $\{\Phi\}_b$ y $\{\Delta\}_m$. Estas variables están dadas por: $\{\mathbf{M}\}_b^t = (m_i, m_j, n_{ij})$ y $\{\mathbf{N}\}_m^t = (n_{ik}, n_{jl})$, donde los parámetros en la viga-columna y en la matriz de esfuerzos del relleno están representados en la figura 3.3. Se puede observar que los términos n_{ik} y n_{jl} son la fuerza axial en los puntales que representan la mampostería de relleno.

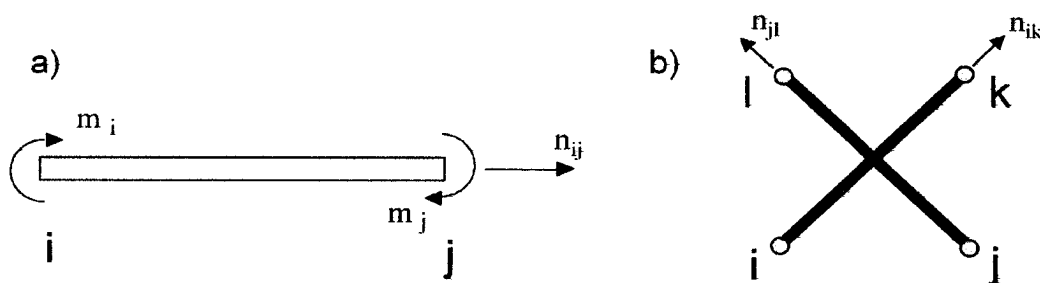


Figura 3.3 a) Esfuerzos en la viga-columna. b) Esfuerzos en el relleno [48].

Así, el trabajo interno del pórtico esta dado por:

$$T_{int} = \sum \{\Phi\}_b^t \{\mathbf{M}\}_b + \sum \{\Delta\}_m^t \{\mathbf{N}\}_m \quad (3.5)$$

El trabajo externo esta dado por la introducción de las fuerzas nodales externas $\{P\}$ que esta conjugada en la matriz de desplazamientos generalizados $\{U\}$:

$$T_{ext} = \{U\}' \{P\} \quad (3.6)$$

Finalmente, el trabajo de las fuerzas de inercia está definido como:

$$T_{iner} = \sum [mass]_b \{\ddot{U}\} + \sum [mass]_m \{\ddot{U}\} \quad (3.7)$$

Donde $[mass]_b$ es la matriz de masas de los elementos de viga-columna y $[mass]_m$ corresponde a la matriz de masas de la mampostería de relleno. Por lo tanto, el principio de los trabajos virtuales esta dado por:

$$T_{int}^* + T_{iner}^* = T_{ext}^* \quad \forall \quad \{U\}^* \quad (3.8)$$

3.1.3 Modelo perfectamente plástico sin concentrador inelástico

El comportamiento de un pórtico relleno esta completamente definido añadiendo las leyes constitutivas de los elementos viga-columna y de la mampostería de relleno. Estos modelos constitutivos relacionan esfuerzos y deformaciones. El comportamiento de la mampostería de relleno se describe usualmente introduciendo el modelo constituido por barras diagonales. Por ejemplo, la relación fuerza-desplazamiento propuesta en [34, 3, 13] se muestra en la figura 3.4. En estos gráficos, las fuerzas de tracción son positivas.

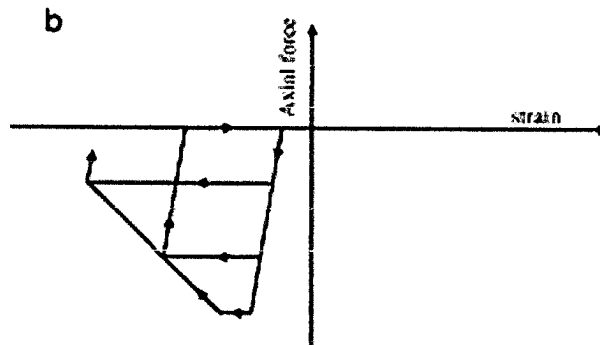
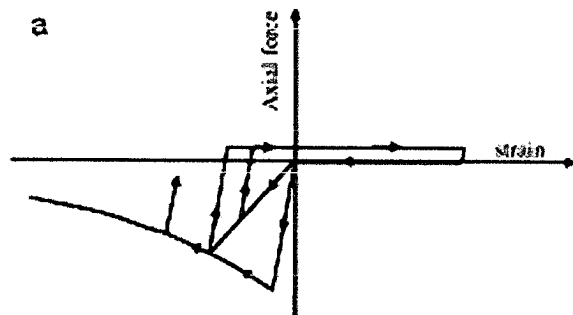


Figura 3.4 a) Relación esfuerzo-deformación propuesta en [34]. b) Relación esfuerzo-deformación propuesta en [3].

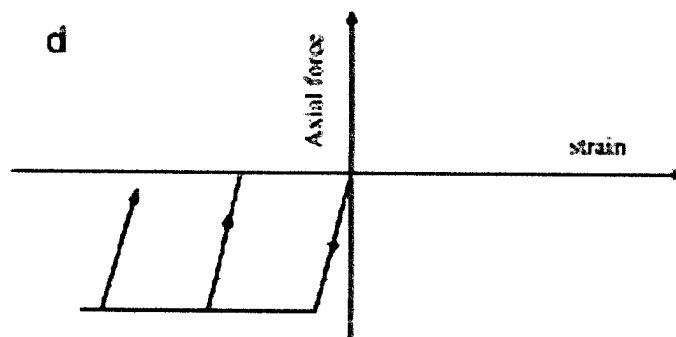
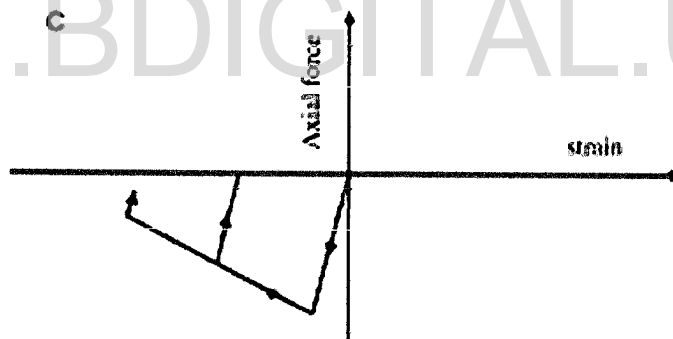


Figura 3.4 c) Relación esfuerzo-deformación propuesta en [13]. d) Elastoplástico perfecto.

Se considera para el comportamiento del puntal un modelo elasto-plástico perfecto (ver figura 3.4d). Se puede observar que este comportamiento corresponde a una simplificación de comportamientos más complejos (y más realistas) descritos en las figuras 3.4a, 3.4b y 3.4c. Matemáticamente, el comportamiento elasto-plástico de la figura 3d puede ser definido por la introducción de la ley de estado, dos funciones de fluencia y una ley de evolución de las deformaciones plásticas. La primera ecuación describe el comportamiento elástico de los puntales y las dos últimas el comportamiento plástico. La ley de estado es:

$$\{N\}_m = [S]_m \{<\Delta - \Delta^p>_-\}_m \quad (3.9)$$

$$\text{Donde } [S]_m = \frac{A_m E_m}{L_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \{\Delta^p\}_m = \begin{bmatrix} \delta_{ik}^p \\ \delta_{jl}^p \end{bmatrix}$$

$[S]_m$ es la matriz de rigidez del elemento de relleno, y A_m es el área de las barras equivalentes. Las expresiones empíricas de las áreas de los puntales se pueden encontrar en [5-6]. E_m es el modulo de elasticidad del material de relleno, y L_m es la longitud de las diagonales. El término $\{\Delta^p\}_m$ es la matriz de deformaciones plásticas que tienen la elongación permanente de los puntales. El símbolo $<x>_-$ significa parte negativa de x , i.e. $<x>_- = x$ si $x < 0$, de lo contrario $<x>_- = 0$. De esta manera, las barras solo pueden desarrollar fuerzas de compresión de acuerdo con el modelo de la figura 3d.

En los modelos clásicos ambos puntales están desacoplados, así su comportamiento plástico es definido por dos funciones de fluencia, una para cada barra:

$$f_{ik} = |n_{ik}| - n_y; \quad f_{jl} = |n_{jl}| - n_y \quad (3.10)$$

Donde $n_y = A_m \sigma_y$ es la fuerza de fluencia de los puntales. Los incrementos de la deformación plástica son solo posibles si la fuerza axial es igual a la fuerza de fluencia:

$$\begin{aligned} d\delta_{ik}^p &= 0 \text{ if } f_{ik} < 0 \text{ or } df_{ik} < 0; & d\delta_{jl}^p &= 0 \text{ if } f_{jl} < 0 \text{ or } df_{jl} < 0 \\ d\delta_{ik}^p &\neq 0 \text{ if } f_{ik} = 0 \text{ and } df_{ik} = 0; & d\delta_{jl}^p &\neq 0 \text{ if } f_{jl} = 0 \text{ and } df_{jl} = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Las expresiones (3.11) constituyen las leyes de evolución de las deformaciones plásticas.

Consideremos un elemento de relleno aislado sujeto a un desplazamiento horizontal como se muestra en la figura 3.5.

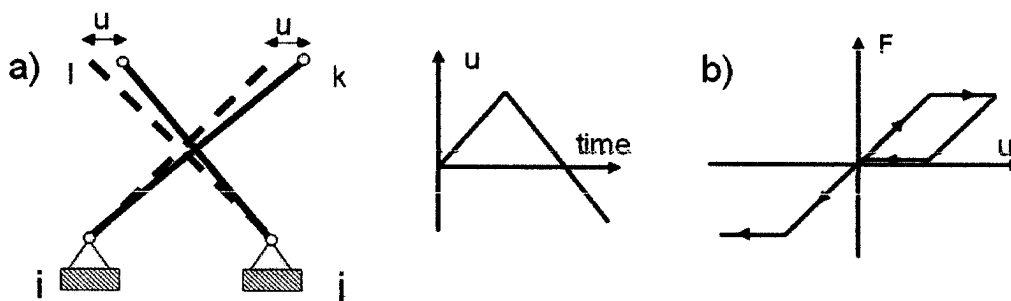


Figura 3.5 a) Elemento de relleno sujeto a desplazamiento horizontal. b) Fuerza vs. Desplazamiento [48].

En el comienzo de la carga, solo la barra jl genera fuerzas de compresión. Cuando la fuerza en la barra alcanza el valor de la fuerza de fluencia, comienzan a aparecer deformaciones plásticas. Las fuerzas y deformaciones en la barra ik permanecen iguales a cero.

Entonces, hay una descarga elástica. Durante este proceso, las fuerzas de compresión decrecen con deformaciones plásticas constantes. La barra opuesta permanece sin carga. La compresión en la barra jl finalmente alcanza el valor de cero, pero la otra diagonal permanece descargada debido a las deformaciones plásticas en la primera barra. El desplazamiento horizontal tiene que alcanzar valores negativos que compensen la deformación plástica en la barra jl , y así generar compresiones en la barra ik . Por lo tanto, este tipo de modelo genera curvas estranguladas en las graficas fuerza-desplazamiento, durante la simulación del comportamiento de los pórticos rellenos. Se puede observar que el mismo tipo de comportamiento es obtenido independientemente de la envolvente que se use para describir el comportamiento de la diagonal si ambas barras están desacopladas.

Sin embargo, este tipo de estrangulamiento no se observa durante los resultados experimentales como se muestra en la siguiente sección. Por supuesto, puede haber estrangulamiento debido a otros fenómenos, por

ejemplo el deslizamiento del refuerzo en los elementos de vigas-columnas de concreto reforzado, o fuerzas de corte, pero no debido al desacoplamiento de las dos barras, ya que físicamente hay un elemento único: las paredes de relleno.

3.1.4 Análisis experimental de pórticos rellenos

Para cuantificar la exactitud de la hipótesis de desacoplamiento, se llevó a cabo un programa experimental [6]. Se consideraron tres tipos diferentes de especímenes, los cuales están representados en la figura 3.6. El primero, llamado “0-barras”, consiste en un pórtico convencional de concreto armado sin mampostería (figura 3.6a). El segundo fue llamado “1-barras” y está representado en la figura 3.6b. Se puede observar que sólo se incluyó la mitad de la mampostería. El propósito de este espécimen es observar el comportamiento de una estructura que corresponde de manera muy cercana al modelo de barras desacopladas descrito en la sección anterior. Finalmente, el tercero, llamado “2-barras” es también un pórtico convencional pero relleno, (figura 3.6c).

Las características externas de los pórticos de concreto armado son las siguientes: especímenes de un vano y un nivel de 1.60 m de altura y de 1.60 m de largo total de la viga. La sección transversal de la viga y columnas son de 0.13 x 0.16 m. Como refuerzo metálico se usaron 4 cabillas de 3/8” para el acero longitudinal, y barras de 6 mm para el acero transversal, separados a 10 cm en la zona no confinada y a 7 cm en las zonas confinadas, para la viga o columna. La resistencia del concreto es de 450 kg/cm². Las columnas están ancladas a una viga base de concreto armado de 25 x 35 cm de sección transversal y 2.50 m de longitud. Los especímenes se construyeron y ensayaron en el Laboratorio de Materiales y Ensayos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, Venezuela.

Los bloques de arcilla usados para el relleno son de dimensiones 0.05 x 0.10 x 0.20 m. El mortero se preparó con una proporción 3:1.

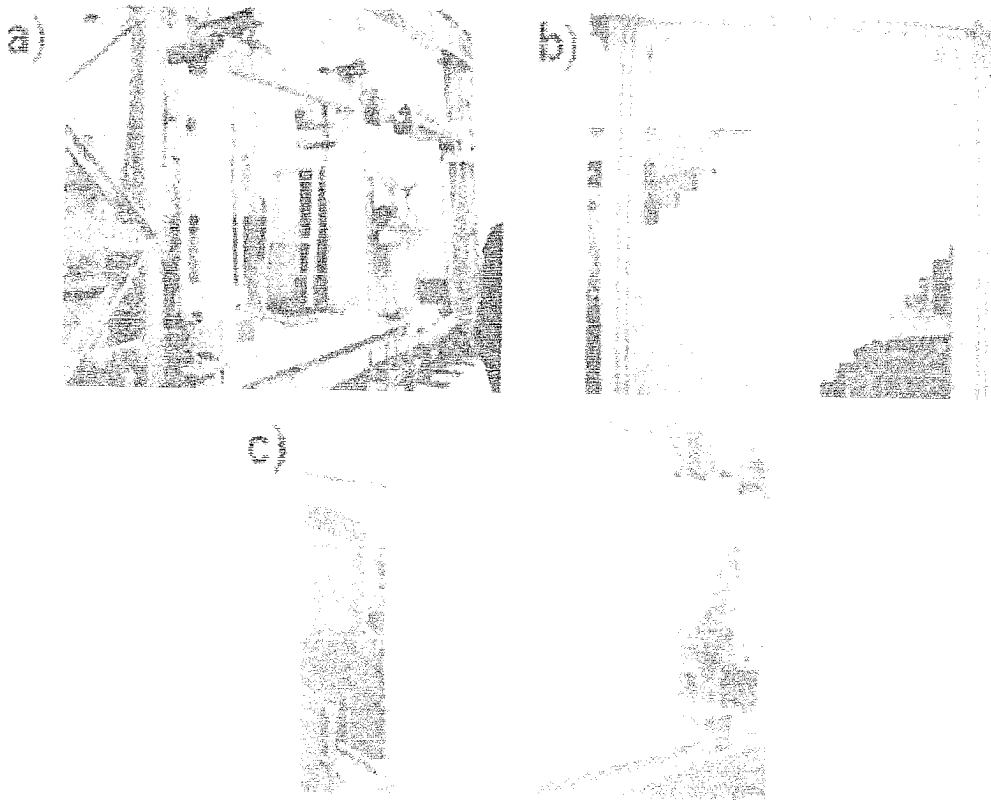


Figura 3.6 a) Especimen 0-barra. b) Especimen 1-barra. c) Especimen 2-barra [48]

Varios especímenes fueron sujetos en el laboratorio a cargas monotónicas y cíclicas (figura 3.7), para mas detalles ver [6]. Estas cargas consisten en desplazamientos horizontales impuestos en el tope del pórtico.

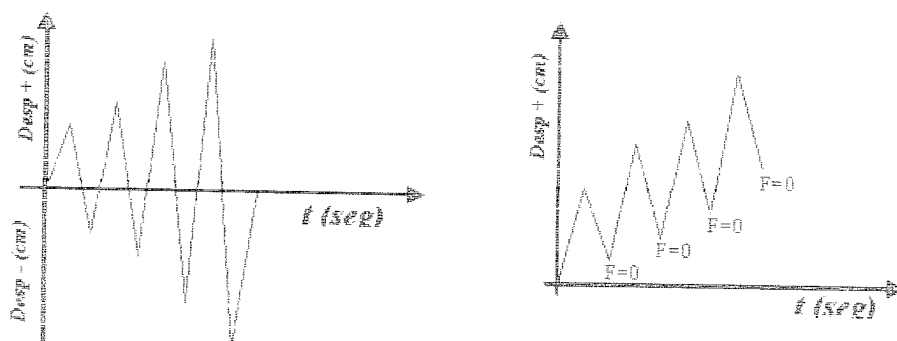


Figura 3.7 Cargas monotónicas y cíclicas [48]

En la figura 3.8, se presentan los resultados de los ensayos cíclicos para tres especímenes, a través de gráficas fuerza-desplazamiento.

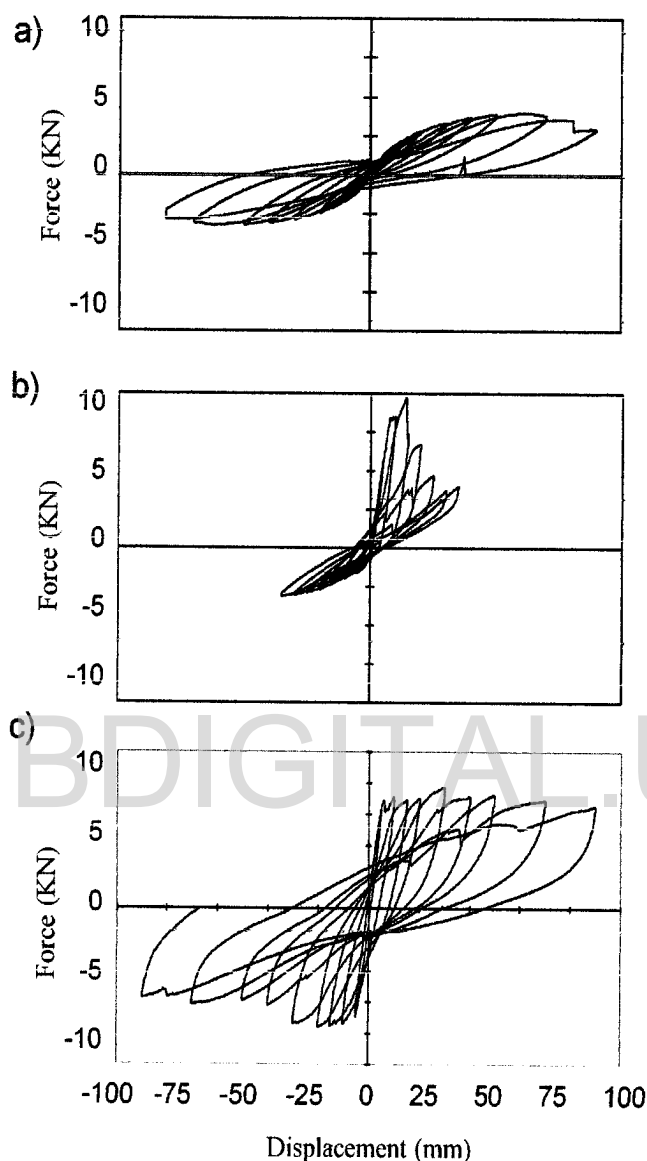


Figura 3.8 Gráficas fuerza-desplazamiento a) Especímen 0-barras. b) Especímen 1-barra. c) Especímen 2-barras [48].

El ensayo del espécimen de “0-barras” permite asegurar que el no estrangulamiento debido al deslizamiento del refuerzo sea observado (figura 3.9a).

La resistencia máxima del espécimen de 1-barra (figura 3.9b) es muy alta, más alta que la del espécimen de 2-barras, pero es menos dúctil que

el espécimen de 2-barras y, su comportamiento durante la fase de descarga elástica es muy diferente. El comienzo del estrangulamiento predicho para el modelo de barras desacopladas puede ser apreciado en los lazos histeréticos de los especímenes de 1-barra como se aprecia en la figura 3.9b.

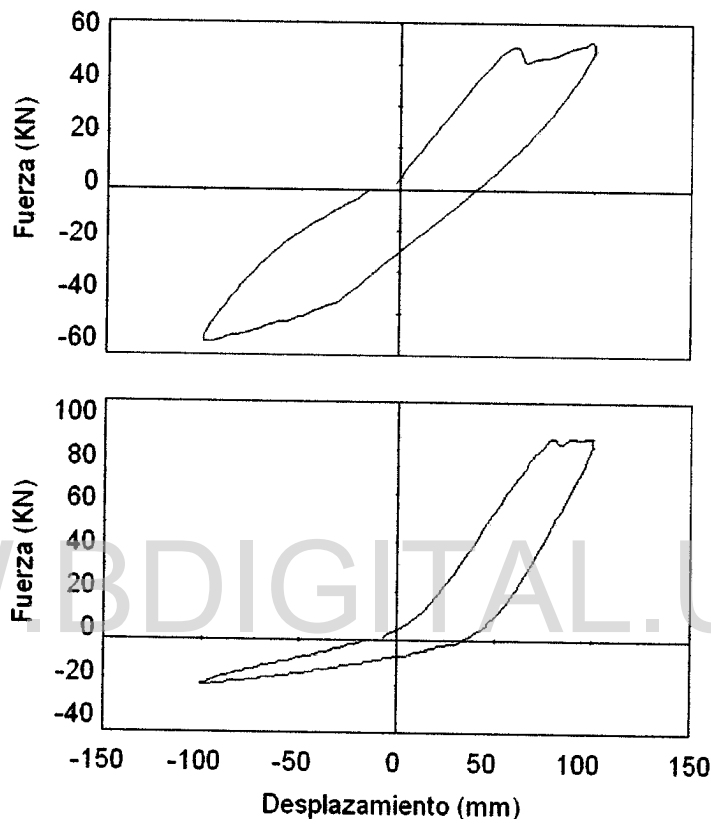


Figura 3.9 a) Lazo histerético en el espécimen de 2-barras b) Lazo histerético en el espécimen de 1-barra [48].

Con el fin de considerar el relleno como un elemento único, en la siguiente sección se describe un modelo elastoplástico perfecto con concentrador plástico.

3.1.5 Modelo elastoplástico perfecto con concentrador plástico

Para medir la transferencia de efectos entre las barras, se realiza una pequeña modificación al modelo del puntal equivalente. Como se muestra en la figura 3.10, el panel de relleno será modelado como un elemento conformado por dos barras diagonal elásticas, de cuatro nodos i ,

j, k, l, donde las dos barras están unidas por un concentrador plástico o inelástico. El concentrador plástico puede ser comparado con el concepto de rotula plástica para elementos de vigas-columnas, en el sentido que las deformaciones plásticas y otros fenómenos inelásticos se supone estarán localizados en el concentrador.

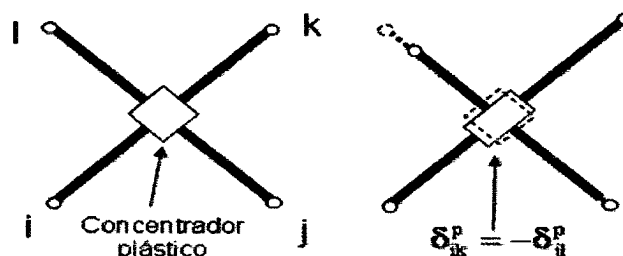


Figura 3.10 Mampostería de relleno con concentrador plástico [48].

Se usan las mismas variables de estado introducidas en la sección anterior ($\{\Delta\}$, $\{N\}$, $\{\Delta^p\}$). La ley constitutiva modificada está dada por la misma ley de estado del modelo desacoplado:

$$\{N\}_m = [S]_m \{<\Delta - \Delta^p>\}_m \quad (3.12)$$

pero ahora las deformaciones plásticas δ_{ik}^p y δ_{jl}^p representan la elongación permanente del concentrador en la dirección de las barras ik y jl. Se puede observar que el concentrador trabaja como un tipo de “resorte bidireccional” que no tiene influencia sobre el comportamiento elástico del relleno de mampostería. Además el concentrador inelástico no introduce variables adicionales o grados de libertad.

En la teoría de plasticidad de un continuo, se acepta regularmente la hipótesis de incompresibilidad plástica. Esta suposición expresa que las deformaciones plásticas introducen cambios de forma pero no cambios de volumen. Matemáticamente, la suposición de incompresibilidad plástica se escribe para expresar que la suma de las deformaciones plásticas principales es siempre cero. Por analogía con la teoría de la plasticidad, se supondrá que la suma de las deformaciones plásticas del concentrador es también igual a cero:

$$\delta_{ik}^p + \delta_{jl}^p = 0 \quad (3.13)$$

El comportamiento plástico del relleno es ahora definido por la función de fluencia del concentrador. Se tiene por lo tanto, la siguiente expresión de la función de fluencia:

$$f = |n_{ik} - n_{jl}| - n_y \quad (3.14)$$

y la ley de evolución de las deformaciones plásticas están definidas por:

$$\begin{aligned} d\delta_{ik}^p &= 0 \text{ if } f < 0 \text{ or } df < 0 \\ d\delta_{ik}^p &\neq 0 \text{ if } f = 0 \text{ and } df = 0 \\ d\delta_{jl}^p &= -d\delta_{ik}^p \end{aligned} \quad (3.15)$$

estas ecuaciones pueden también ser obtenidas de la función de fluencia (3.14) usando el principio de normalidad.

Considerando nuevamente el ejemplo de la figura 3.5. Durante las cargas monotónicas la envolvente de la curva fuerza vs. desplazamiento es idéntica para ambos modelos, con y sin concentrador. Sin embargo, en el modelo con el concentrador, las deformaciones plásticas positivas en la dirección de la barra jl aparecen aún si la fuerza axial en esta barra es cero. Esto es debido a la ecuación (3.13). Cuando el signo de la fuerza cambia, inmediatamente aparecen fuerzas de compresión en la diagonal ik , debidas a las deformaciones plásticas que se generaron durante la primera fase de carga.

La figura 3.11 muestra la curva fuerza vs. desplazamiento en ambos casos, con y sin concentrador plástico.

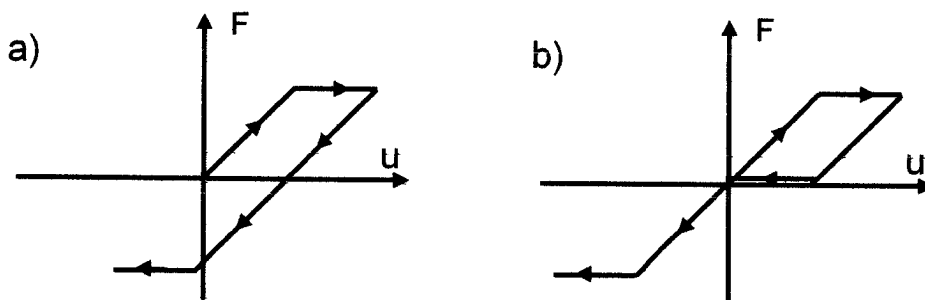


Figura 3.11 Graficas fuerza vs. desplazamiento a) Con concentrador plástico. b) Sin concentrador plástico [48].

Puglisi, M. [47], desarrolló un elemento finito basado en el modelo elastoplástico perfecto con concentrador, y lo incluyó en un programa comercial. Con este nuevo elemento y el elemento convencional de viga-columna con rótulas perfectamente plásticas, las pruebas descritas en las figuras 3.6c y 3.8c fueron reproducidas. Los resultados de este análisis son mostrados en la figura 3.12.

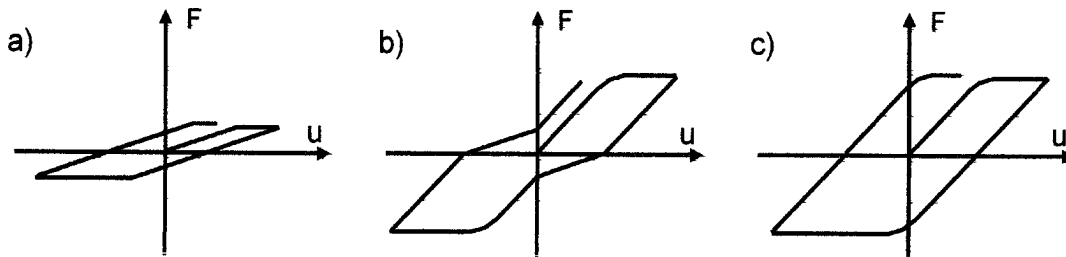


Figura 3.12 Pórtico plano con elastoplasticidad perfecta. a) Sin relleno b) Con relleno y sin concentrador plástico c) Con relleno y concentrador plástico [48].

Se puede observar en la figura 3.9a que el modelo con concentrador conduce a lazos histeréticos gruesos, mientras que el resultado del modelo desacoplado de la figura 3.9b tiene similitud solamente en la parte positiva de las fuerzas del lazo histerético. Es necesario enfatizar que en los resultados experimentales con relleno no se observe estrangulamiento. Por lo tanto, los modelos convencionales no representan correctamente a los ensayos en este importante caso.

3.2 Modelo para pórticos rellenos con mampostería: agrietamiento y daño [49]

Como se indicó al comienzo de este capítulo, la influencia de la mampostería de relleno en el comportamiento de pórticos sujetos a cargas sísmicas es muy importante. Durante sobrecargas severas, el agrietamiento es el fenómeno dominante en la mampostería de relleno. Como resultado, se observa degradación significativa de la rigidez y la resistencia. La interacción entre la mampostería y los pórticos es modificada continuamente. El daño del relleno produce modificaciones muy importantes de las propiedades generales del pórtico. Por lo tanto, es esencial una buena representación de este fenómeno a un costo computacional razonable.

En los modelos propuestos por Klingner y Bertero [34], Andreus [3], Doudoumis y Mitsopoulou [13], no hay endurecimiento pero si hay un comportamiento elástico lineal seguido por un lazo perfectamente plástico o un lazo de ablandamiento. En el modelo descrito en esta sección las ecuaciones constitutivas de la mampostería de relleno están también basadas en el modelo del puntal equivalente, pero se incluye el concepto del concentrador plástico [49]. Adicionalmente el comportamiento de las barras está basado en la teoría del daño.

La teoría del daño concentrado es un modelo cuyo propósito es la descripción de la evolución del agrietamiento debido a cargas mecánicas. La idea principal es la introducción de una nueva variable interna llamada daño. Usualmente, el parámetro daño toma valores entre cero (sin daño) y uno (daño total). La variable daño no es un índice de daño. Los índices de daño son normalmente calculados para tener una medida cuantitativa de la operatividad y posibles reparaciones en una estructura. La variable daño puede ser usada como un índice de daño, pero su función real es medir la pérdida de las propiedades mecánicas, tales como la rigidez y resistencia debido a la evolución del agrietamiento. Por eso, la variable daño es introducida dentro del modelo constitutivo que define el comportamiento del material y debe ser calculado simultáneamente con las variables de estado del problema.

3.2.1 Conceptos fundamentales de la teoría del daño continuo [35]

La teoría del daño continuo está basada en el concepto de la variable de daño. Considérese un elemento de volumen como el de la figura 3.13, donde A es el área de la intersección de un plano con el elemento de volumen y A_d el área efectiva de la intersección de todas las microgrietas o microvacíos en el elemento con A .

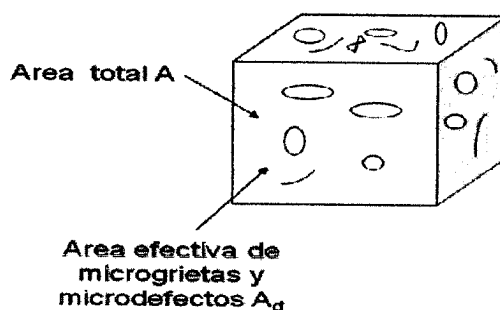


Figura 3.13 Daño en un elemento de volumen [49].

El daño D_n en este elemento de volumen en la dirección definida por la normal $\vec{n}$ al área A , puede ser expresado como:

$$D_{\vec{n}} = \frac{A_d}{A} \quad (3.16)$$

Esta variable puede tomar valores entre cero (elemento intacto) y uno (elemento dañado).

La hipótesis de daño isótropo consiste en asumir que D_n es aproximadamente el mismo en cualquier dirección $\vec{n}$. Entonces, el estado del daño puede ser representado por un escalar:

$$D_n \cong D \quad \forall \quad \vec{n} \quad (3.17)$$

El acoplamiento entre elasticidad y daño es llevado a cabo por la introducción del concepto de esfuerzo efectivo y la hipótesis de equivalencia en deformaciones. Sea F la fuerza normal resistida por el área A en el elemento de volumen. El esfuerzo convencional de Cauchy se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.18)$$

El esfuerzo efectivo $\bar{\sigma}$ es definido en una manera similar, excepto que el área efectiva $A - A_d$ es usada en lugar del área total A , entonces:

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A - A_d} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (3.19)$$

La hipótesis del estado de equivalencia en deformaciones que define el comportamiento de un material dañado, puede ser descrita por las mismas leyes de un material intacto si el esfuerzo de Cauchy es sustituido por los esfuerzos efectivos. Por lo tanto, el comportamiento elástico de una material dañado esta dado por:

$$\bar{\sigma} = E(\varepsilon - \varepsilon^p); \quad \text{i.e.} \quad \sigma = (1 - D)E(\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (3.20)$$

La función de fluencia de un material dañado puede ser obtenida de la misma manera. Por ejemplo, para un material dañado con endurecimiento cinemático, la función de fluencia está dada por:

$$f = |\sigma - c\varepsilon^p| - \sigma_y; \quad \text{i.e.} \quad f = \left| \frac{\sigma}{1-D} - c\varepsilon^p \right| - \sigma_y \quad (3.21)$$

Donde, c y σ_y son los parámetros del material.

Para completar el modelo, una ley de evolución del daño debe ser introducida. Esta ley depende en particular del modo de daño del material (frágil, dúctil, fatiga) y está basado en resultados experimentales.

3.2.2 Comportamiento de la mampostería bajo fuerzas de compresión

El modelo del puntal representa la influencia de los paneles de relleno como un conjunto de dos barras diagonales que pueden solo soportar compresión. Con el fin de describir un modelo realista del comportamiento del puntal equivalente, Puglisi, 2007 ver [47] llevó a cabo un programa experimental. Los resultados de uno de los ensayos llevados a cabo sobre un bloque de mampostería (ver figura 3.14) se muestran en la figura 3.15. Es de esperar que dadas las dimensiones de la mayoría de los pórticos en edificios, el puntal equivalente tiene arreglos de mampostería que están cercanos a los mostrados en la figura 3.14.

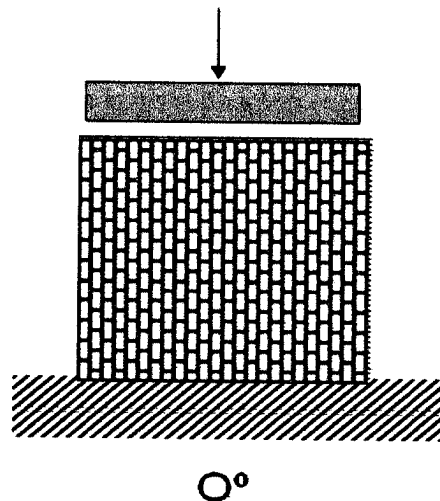


Figura 3.14 Espécimen de mampostería [49].

Las gráficas de fuerzas contra desplazamiento son presentadas en la figura 3.15.

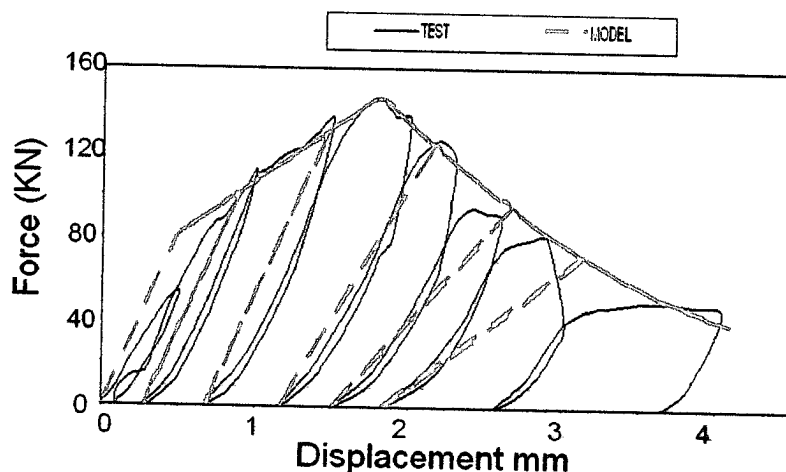


Figura 3.15 Gráficas fuerzas vs. desplazamiento [49].

Se puede observar que el comportamiento del bloque puede ser idealizado como elástico para valores bajos de la fuerza, seguido por una zona plástica con endurecimiento que puede ser representado como lineal con una pendiente muy pronunciada, y finalmente una zona de ablandamiento con degradación de rigidez. El ablandamiento puede ser representado mediante una ley exponencial.

3.2.3 Un modelo de daño para la mampostería de relleno en pórticos planos [49]

El modelo propuesto en esta sección está basado en los conceptos de la teoría del daño, el comportamiento de la mampostería bajo fuerzas de compresión, el modelo del puntal equivalente y el concepto del concentrador plástico propuesto en [48].

Las mismas variables y la misma notación introducidas en la sección anterior serán usadas. Solamente, se introduce una nueva variable: el daño d_m . Esta variable toma valores entre cero y uno, y mide el estado del daño del concentrador (i.e. la variable de daño caracteriza el grado de agrietamiento de la mampostería de relleno). Dado que se introduce una variable de daño, la hipótesis de daño isótropo es aceptada. Esto significa que el daño debido a las fuerzas de compresión en una de las barras también afecta el comportamiento de la barra opuesta.

La ley de estado propuesta en la sección 3.1 es modificada usando el esfuerzo efectivo y la hipótesis de equivalencia en deformaciones, por lo tanto:

$$\{N\}_m = (1 - d_m)[S]_m \{<\Lambda - \Lambda^p>_-\}_m \quad (3.22)$$

Donde la matriz de rigidez $[S]_m$ es igual a la ecuación (3.9), y $<x>_-$ es nuevamente la parte negativa de x . Se puede observar que la rigidez del puntal equivalente decrece con el daño. De este modo la degradación de la rigidez debido al agrietamiento de la mampostería es representada.

Se supone la misma hipótesis de “incompresibilidad plástica”, por lo tanto:

$$\delta_{ik}^p + \delta_{il}^p = 0 \quad (3.23)$$

La función de fluencia de un concentrador plástico dañado puede ser obtenida a partir de la ecuación 3.21, pero usando nuevamente la hipótesis de esfuerzos efectivos y de equivalencia en deformación. Por lo tanto, el comportamiento plástico de la mampostería agrietada con endurecimiento lineal esta dado por:

$$f = \left\langle \frac{n_{ik}}{1 - d_m} - c\delta_{ik}^p \right\rangle_- - \left\langle \frac{n_{lj}}{1 - d_m} - c\delta_{lj}^p \right\rangle_- - n_y \quad (3.24)$$

Finalmente, se obtiene la siguiente ley de evolución del daño:

$$\dot{d}_m = m \left(\frac{|\delta_{ik}^p|}{p_{ik}} \right)^\alpha \left\langle \frac{\dot{\delta}_{ik}^p \delta_{ik}^p}{|\delta_{ik}^p|} \right\rangle_+ \exp(-m\langle p_{ik} - p_{cr} \rangle) \quad \text{if } p_{ik} \geq p_{cr} \quad (3.25)$$

$$\dot{d}_m = 0 \quad \text{if } p_{ik} \leq p_{cr} \quad (3.25)$$

$$p_{ik} = \text{Max} |\delta_{ik}^p| \quad (3.26)$$

Donde $<x>_+$ representa la parte positiva de x (i.e. $<x>_+ = x$ si $x > 0$, de lo contrario $<x>_+ = 0$). Las variables $\dot{d}_m$ y $\dot{\delta}_{ik}^p$ son las derivadas respecto al tiempo del daño y la deformación plástica. Las constantes m y α son

parámetros positivos del material. El símbolo $\text{Max}|\dot{\delta}_{ik}^p|$ representa el máximo valor absoluto que la deformación plástica $\dot{\delta}_{ik}^p$ ha tomado desde el comienzo de la carga. Se puede notar que el daño es siempre positivo, (i.e. una grieta se forma, y no desaparece).

El conjunto de ecuaciones compuestas por la ley de estado (3.22), la hipótesis de incompresibilidad generalizada (3.23), la función de fluencia (3.24), y la ley de evolución del daño (3.25 y 3.26) definen completamente el comportamiento de los elementos de relleno. El grupo de parámetros del modelo es dado por la rigidez del puntal equivalente S_0 , la fuerza de fluencia del puntal n_y , el parámetro de endurecimiento cinemático c y las constantes de la ley de evolución del daño m y α .

3.2.4 Comportamiento del puntal equivalente durante cargas monotónicas

Se puede mostrar que durante una carga monotónica, la ley constitutiva (3.22-3.26) genera la envolvente de la figura 3.16, en la cual se pueden observar tres zonas de comportamiento: elástico, elasto-plástico, y elasto-plástico con daño.

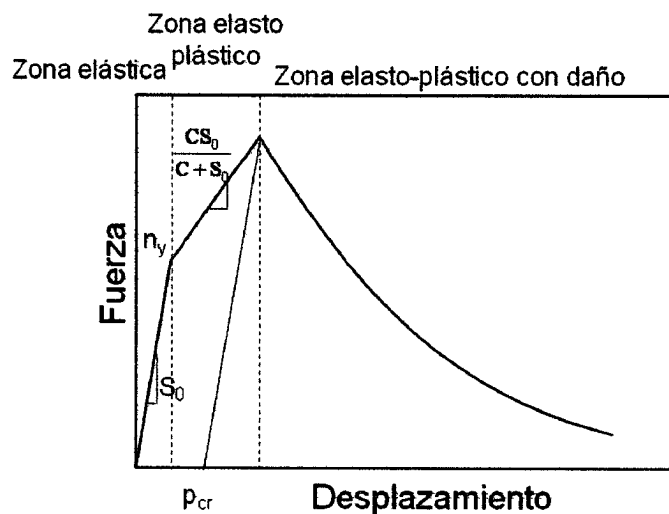


Figura 3.16 Envolvente de la ley constitutiva [49].

Se asume que solo la diagonal ik esta bajo fuerzas de compresión. Al comienzo de la carga monotónica, cuando la fuerza sobre la diagonal es menor que n_y , tenemos:

$$f < 0; \quad \delta_{ik}^p = 0; \quad d_m = 0; \quad y \quad n_{ik} = S_0 \delta_{ik} \quad (3.27)$$

Donde $S_0 = \frac{E_m A_m}{L_m}$. Por lo tanto, la gráfica de fuerza vs. desplazamiento en la zona elástica está representada por una línea recta con inclinación S_0 .

La segunda etapa comienza cuando $n = n_y$, la función de fluencia es igual a cero, y en esta zona el comportamiento es elasto-plástico y se mantiene mientras $p_{ik} = \text{Max}|\delta_{ik}^p| = |\delta_{ik}^p| < p_{cr}$. Por lo tanto, el comportamiento es definido por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} n_{ik} &= S_0 (\delta_{ik} - \delta_{ik}^p) \\ f &= -n_{ik} + c \delta_{ik}^p - n_y = 0 \\ d_m &= 0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

(i.e. el comportamiento es definido como elasto-plástico con endurecimiento lineal). La grafica nuevamente está definida por una línea recta, pero con una inclinación diferente:

$$n_{ik} = \frac{S_0 c}{S_0 + c} \delta_{ik}^p - \frac{S_0}{S_0 + c} n_y \quad (3.29)$$

Cuando la deformación plástica alcanza el valor crítico de p_{cr} , comienza el agrietamiento en la mampostería (i.e. el comportamiento a partir de p_{cr} es elasto-plástico con daño). Teniendo en cuenta que durante una carga monotónica:

$$\left\langle \frac{\dot{\delta}_{ik}^p \cdot \delta_{ik}^p}{|\delta_{ik}^p|} \right\rangle_+ = \left| \dot{\delta}_{ik}^p \right| \quad (3.30)$$

La ley de daño (3.25) se modifica,

$$\begin{aligned} \dot{d}_m &= m \exp\left(-m \langle \delta_{ik}^p - p_{cr} \rangle\right) \left| \dot{\delta}_{ik}^p \right| \quad \text{i.e.} \\ d_m &= 1 - \exp\left(-m \langle \delta_{ik}^p - p_{cr} \rangle\right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Donde $\exp(x)$ representa la exponencial de la variable x . Por lo tanto, durante cargas monotónicas, el daño sigue una ley exponencial y la envolvente de la grafica es definida por:

$$\begin{aligned} n_{ik} &= (1 - d_m) S_0 (\delta_{ik} - \delta_{ik}^p) \\ f &= -n_{ik} + (1 - d_m) (c \delta_{ik}^p - n_y) = 0 ; \\ d_m &= 1 - \exp(-m(|\delta_{ik}^p| - p_{cr})) \end{aligned} \quad (3.32)$$

i.e.

$$n_{ik} = \exp\left(\frac{m(-n_y - S_0|\delta_{ik}| + p_{cr}c + p_{cr}S_0)}{c + S_0}\right) \left(\frac{S_0}{c + S_0}\right) (c\delta_{ik} - n_y) \quad (3.33)$$

Se puede notar que la envolvente definida por la ecuación 3.33 no es muy diferente a la propuesta por [34]. Sin embargo, el modelo descrito en [34] no está basado en la teoría del daño; por lo tanto este modelo no proporciona una medida del daño de la mampostería, y no describe los efectos de fatiga de ultra bajo ciclaje.

Adicionalmente se puede observar que la envolvente del modelo descrito en esta sección describe el resultado experimental mostrado en la figura 3.14.

3.2.5 Comportamiento del puntal equivalente durante cargas cíclicas

Considerando nuevamente la ley de daño (3.25), se puede observar

que hay evolución del daño si $\delta_{ik}^p \cdot \dot{\delta}_{ik}^p > 0$, por ejemplo, si la barra está en una fase de incrementos (en valor absoluto) de la deformación plástica. Si la deformación plástica y la velocidad de la deformación plástica tienen signos opuestos, las grietas se cierran y en tales condiciones los incrementos de daño no son posibles. En la fase de incrementos de deformación plástica ($\delta_{ik}^p \cdot \dot{\delta}_{ik}^p > 0$), la ley de evolución del daño (3.25) se convierte en:

$$\dot{d}_m = m \left(\frac{|\delta_{ik}^p|}{p_{ik}} \right)^\alpha \left| \dot{\delta}_{ik}^p \right| \exp(-m(p_{ik} - p_{cr})) \quad (3.34)$$

Se puede observar que solo la diferencia entre la ecuación (3.34) y la ley de evolución del daño durante cargas monotónicas (3.31) es el término

$\left(\frac{|\delta_{ik}^p|}{P_{ik}} \right)^\alpha$. Esta expresión indica que el valor del daño es pequeño para

fracciones pequeñas de la deformación plástica con respecto al valor máximo de esta variable. Esto es, la evolución del daño es más significativa si el valor de la deformación plástica está cerca del máximo. De este modo, la ley de evolución del daño (3.25) permite representar los efectos de fatiga de ultra bajo ciclaje y la degradación de la rigidez durante cargas cíclicas a desplazamiento máximo constante.

La degradación de resistencia está controlada por el parámetro $\alpha > 0$ (ver figura 3.17). Se ha encontrado que valores de α aproximadamente igual a 1 permiten una correcta representación de los resultados experimentales como se mostraran en la próxima sección. Este parámetro sólo modifica el daño de la mampostería; por lo tanto, no tiene efecto sobre la primera y segunda parte de la envolvente de la figura 3.16.

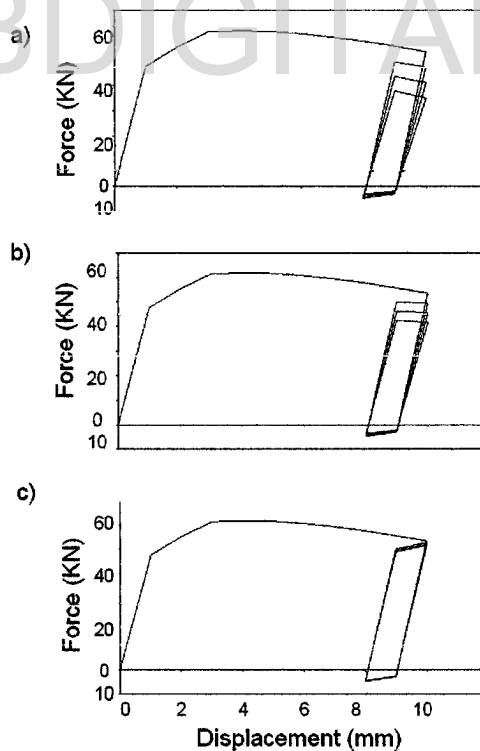


Figura 3.17 Grafica de fuerza vs. desplazamiento bajo cargas cíclicas a) $\alpha = 2$ b) $\alpha = 5$ c) $\alpha = \infty$ [49].

3.2.6 Simulación numérica de pórticos rellenos con mampostería

Algunos pórticos de concreto armado con y sin mampostería de relleno (ver figura 3.18) fueron sujetos a cargas monotónicas y cíclicas (ver apéndice 1 en [48]). Estas pruebas fueron usadas para validar el modelo de daño propuesto en la sección previa. Un nuevo elemento finito (ver [47]), basado en la ley constitutiva (3.22-3.26) y en las ecuaciones de equilibrio y cinemática descritas, se desarrolló y fue incluido en un programa comercial de elementos finitos: Abaqus [1]. La viga y las columnas del pórtico fueron representadas usando los elementos de pórtico (FRAME2D) con rótulas plásticas disponible en Abaqus, mientras que los paneles de relleno fueron caracterizados por el nuevo elemento finito.



Figura 3.18 Pórticos de concreto armado con y sin mampostería de relleno [49].

La respuesta plástica se incluyó mediante un modelo de plasticidad concentrada en los extremos de los elementos (ver figura 3.19).

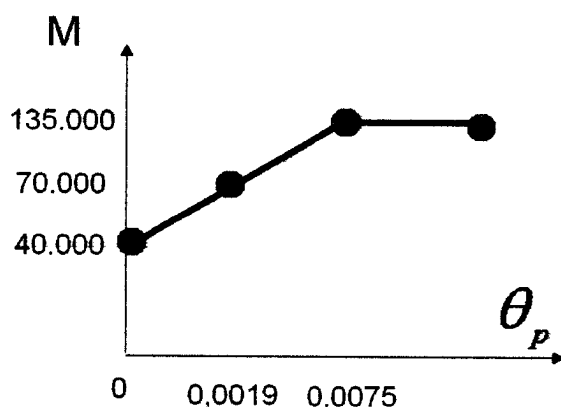


Figura 3.19 Momento de fluencia vs. rotación plástica [49].

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Los parámetros usados por el nuevo elemento finito son:

$S_0(\text{kg/m}^2)$	$C(\text{kg/m}^2)$	$N_y(\text{kg})$	m	α	$P_{cr}(m)$
2.7E+08	17.4E+06	5.5E+03	0.18	5	0.012

En la figura 3.20, se presentan los resultados experimentales y la simulación numérica de un pórtico vacío sujeto a cargas monotónicas (i.e. cargas cíclicas con solo fuerzas positivas). Los parámetros necesarios en Abaqus fueron escogidos para obtener la mejor aproximación entre la prueba y la simulación.

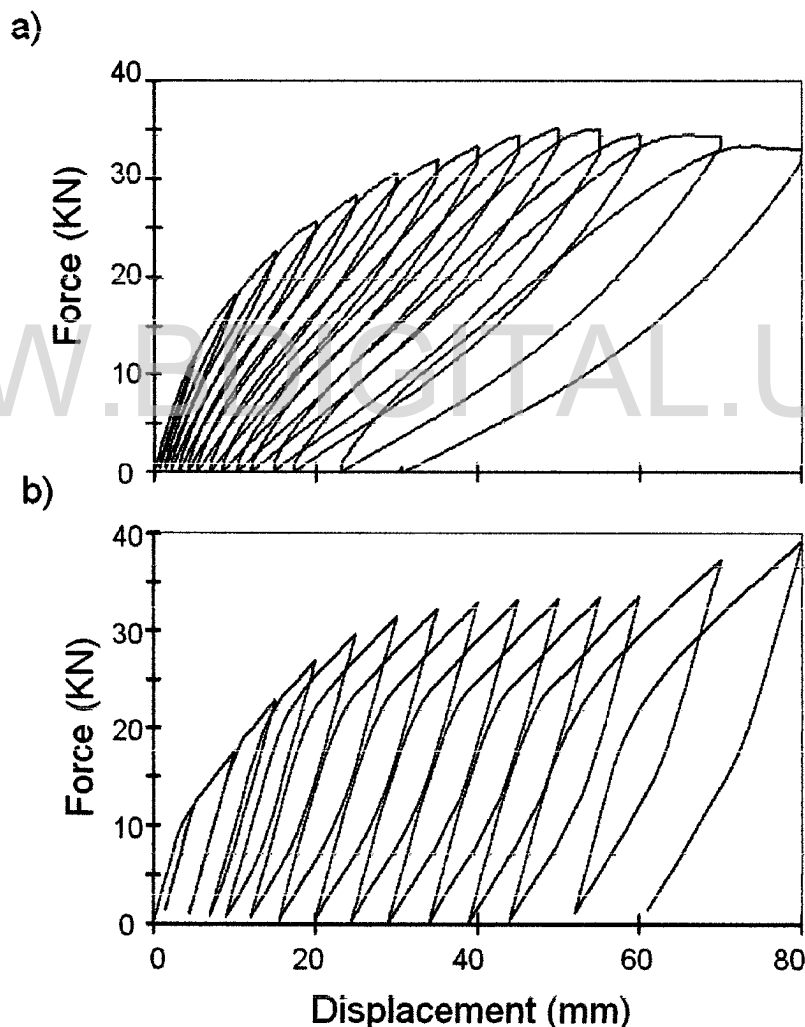


Figura 3.20 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico vacío bajo cargas monotónicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica [49].

Se puede notar que el elemento finito programado en Abaqus no permite describir la degradación de rigidez o el ablandamiento observado en el ensayo experimental.

En la figura 3.21 se presentan el resultado experimental y la simulación numérica del mismo tipo de prueba, pero ahora con mampostería de relleno.

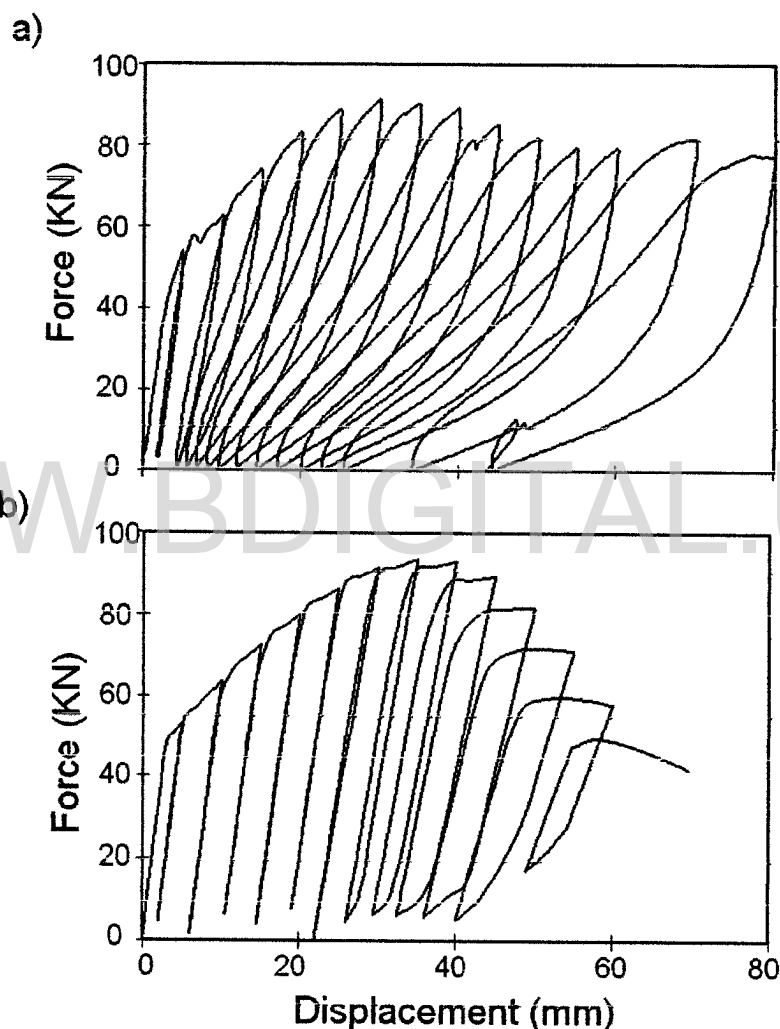


Figura 3.21 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico relleno bajo cargas monotónicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica [49].

En este caso, se puede apreciar en la simulación numérica un leve ablandamiento y degradación de la rigidez. Estos efectos se deben al modelado de la mampostería de relleno exclusivamente. Aún cuando, los

resultados experimentales muestran una degradación de la rigidez más significativa que la simulación numérica. Esta diferencia es debida principalmente a las deficiencias para modelar los elementos de pórtico de las estructuras de concreto armado en Abaqus.

En la figura 3.22, se muestra el resultado experimental y la simulación numérica de un pórtico vacío bajo cargas cíclicas. La simulación numérica fue llevada a cabo usando solo los elementos de pórticos disponibles en Abaqus. El propósito de esta simulación fue nuevamente para calibrar los parámetros que serán usados en la simulación numérica del pórtico relleno con mampostería y minimizar el error debido al modelado de la viga-columnas.

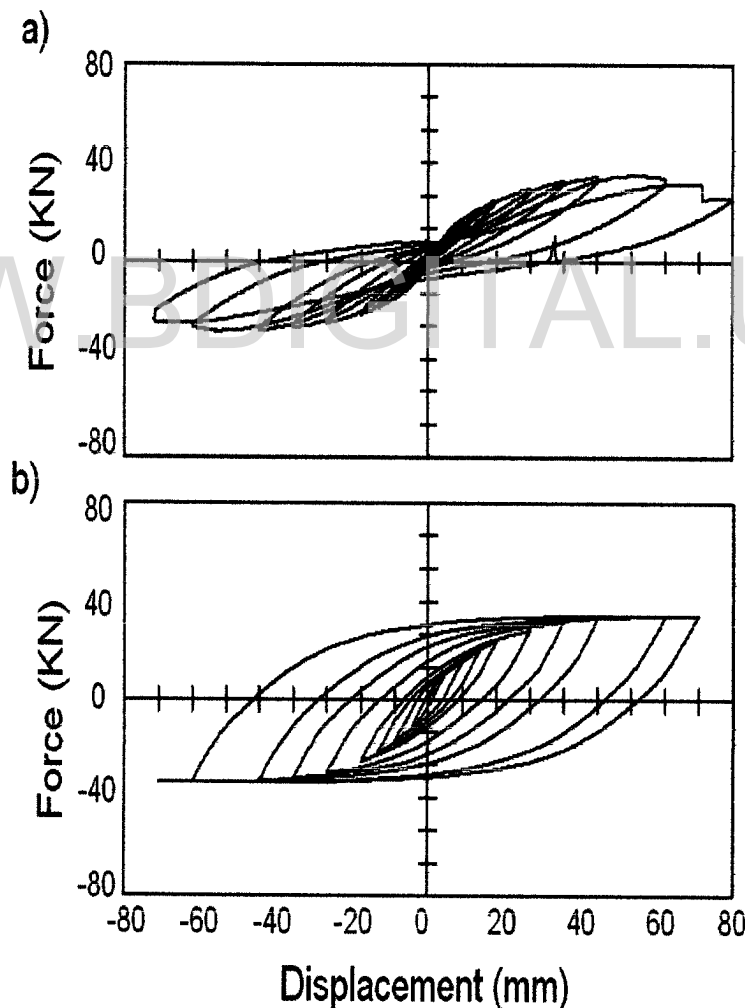
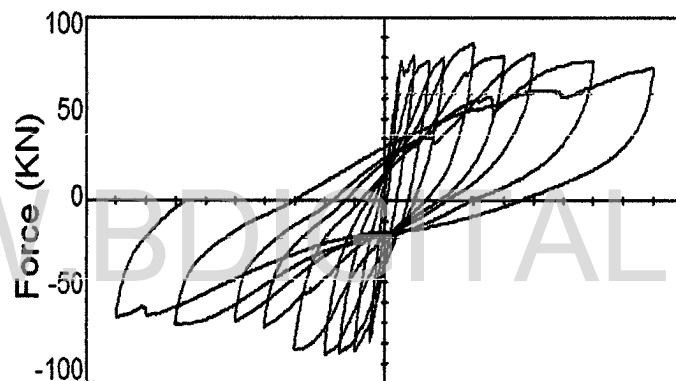


Figura 3.22 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico vacío bajo cargas cíclicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica [49].

Se puede notar que con Abaqus se obtienen lazos más gruesos que los observados experimentalmente. También, se puede resaltar que son necesarios diferentes grupos de parámetros para las simulaciones bajo cargas monotónicas y cíclicas. Nuevamente, esto debido a las deficiencias de los elementos tipo pórtico de Abaqus para describir el comportamiento real de estructuras de concreto armado.

La simulación numérica del comportamiento del mismo pórtico relleno con mampostería pero sujeto a cargas cíclicas se muestra en la figura 3.23. Se usaron los mismos parámetros empleados para la simulación numérica bajo cargas monotónicas. Se puede notar que existe una buena aproximación entre la simulación numérica y el comportamiento observado experimentalmente.

a)



b)

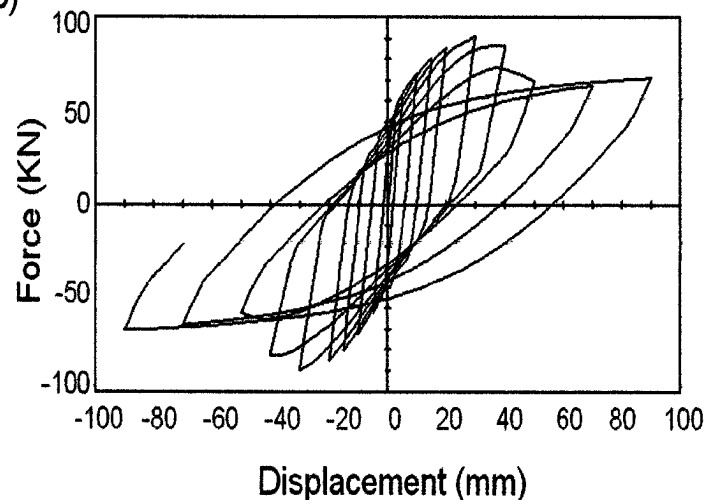


Figura 3.23 Grafica fuerza vs. desplazamiento de un pórtico relleno bajo cargas cíclicas a) Ensayo experimental b) Simulación numérica [49].

Capítulo 4

Elementos para vigas y columnas de concreto armado

La teoría del Daño Concentrado permite describir el comportamiento de elementos de concreto armado sometidos a solicitaciones sísmicas u otros tipos de sobrecargas. Esta teoría se basa en principios completamente diferentes, y mucho más racionales, que los que sustentan otros programas de análisis estructural como IDARC o DRAIN descritos en el capítulo 1. Estos principios son: la mecánica de la fractura, la teoría del daño continuo y el concepto de rótula plástica, siendo este último común a los programas antes mencionados. Es importante destacar que dicha teoría es exclusivamente venezolana, y fue desarrollada en la Universidad de Los Andes en los años 90.

A través de la teoría del daño concentrado es posible obtener estimados cuantitativos de la densidad de agrietamiento del concreto, la fluencia del refuerzo, el cierre de fisuras por cambio de signo de los momentos, la fatiga de bajo ciclaje y el endurecimiento por deformación del refuerzo. A continuación se describe la teoría del daño concentrado para el caso de pórticos planos y tridimensionales.

4.1 Conceptos básicos de la Mecánica de fractura frágil

En materiales frágiles se ha demostrado que el esfuerzo elástico en la punta de una fisura (ver figura 4.1) de una placa infinita con un agujero elíptico, tiende a infinito independientemente de la longitud de la fisura “a” o del esfuerzo aplicado “S”.

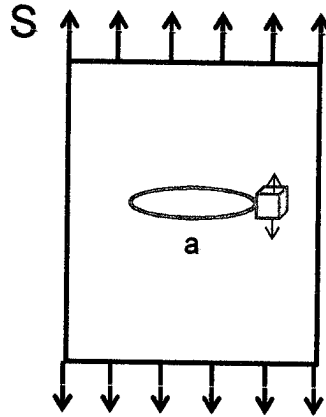


Figura 4.1 Placa con agujero elíptico sometida a tracción uniforme en el infinito.

Por lo tanto, ninguno de los criterios clásicos de falla basados en esfuerzos y deformaciones puede ser usado para predecir la propagación de una fisura. Entonces, es necesario el uso de otras teorías que permitan representar la presencia de grietas y su propagación. Una de las teorías que puede usarse es la mecánica de fractura frágil, la cual considera que el material es elástico, pero admite la existencia de fisuras macroscópicas que pueden propagarse.

Griffith [17] propuso un criterio de propagación estudiando la evolución de la energía en una placa fisurada. En su postulado estableció que la propagación de una fisura solamente puede ocurrir, si la energía potencial puede superar la resistencia a la expansión de la grieta. En términos matemáticos este criterio se conoce como el Criterio de Griffith, el cual se escribe como:

$$G = R \quad (4.1)$$

Donde G es denominada “tasa de restitución de energía” y es obtenida después de un análisis estructural. El término R es llamado “resistencia al agrietamiento”, se admite que es una propiedad del material y puede depender del incremento en la longitud de la fisura.

Se puede mostrar que la tasa de restitución de energía está dada por la siguiente expresión:

$$G = -\frac{\partial U}{\partial A} = \frac{\partial U^*}{\partial A} \quad (4.2)$$

Donde U es la energía potencial acumulada en el sólido, U^* es la energía potencial complementaria, A es el área de la grieta.

El criterio de Griffith establece que la propagación no podrá ocurrir si la tasa de restitución de energía “G” es menor que la resistencia al agrietamiento “R”.

4.2 Teoría del daño concentrado para el caso de pórticos planos

El estado de un pórtico se caracteriza en términos de deformaciones y esfuerzos generalizados, y las ecuaciones del problema se agrupan en ecuaciones cinemáticas, de equilibrio dinámico y leyes de comportamiento.

4.2.1 Cinemática de pórticos planos [15]

Para describir la cinemática de un cuerpo deformable cualquiera, es necesario introducir dos conceptos diferentes: desplazamiento y deformación. El primero permite representar matemáticamente el movimiento de la estructura, el segundo su cambio de forma. La cinemática del sólido se describe por completo al deducir las relaciones existentes entre los dos conceptos.

Desplazamientos generalizados de pórticos planos

Considérese una estructura aporticada compuesta por m miembros estructurales conectados entre sí por n nodos como se muestra en la figura 4.2a. Si se desea estudiar el movimiento de la estructura durante el intervalo de tiempo $[0, T]$, se define la posición de cada uno de los nodos del pórtico mediante un sistema de ejes coordenados X , Y y Z . La configuración del pórtico en el instante cero se supone conocida y se denomina “configuración inicial”. Para cualquier otro instante, la configuración de la estructura no es en general conocida y se denomina “configuración deformada”. Para representar entonces el movimiento de la estructura se definen los desplazamientos generalizados del nodo i mediante la matriz columna, $\{u\}_i = (u_1, u_2, u_3)$ donde u_1 es el desplazamiento horizontal del nodo “i”, u_2 es el desplazamiento vertical y u_3 es la rotación

del nodo con respecto al eje perpendicular del plano que contenga el pórtico, ver figura 4.2b.

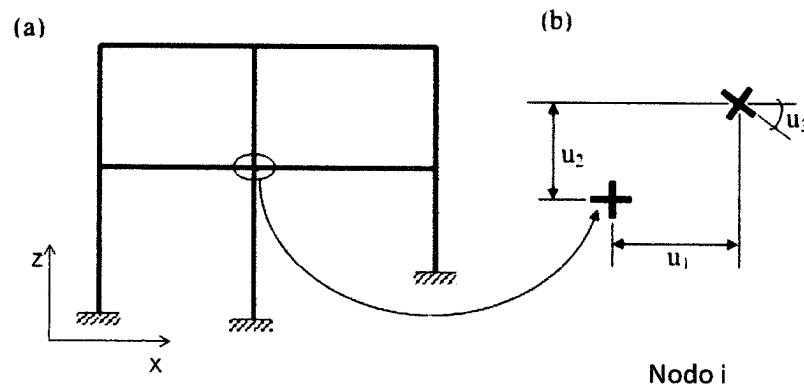


Figura 4.2 Representación de un pórtico y desplazamientos generalizados de un nodo i del mismo.

Los desplazamientos de cualquier miembro se definen por la matriz columna $\{q\}'_b = (\{u\}'_i, \{u\}'_j)$. Los desplazamientos generalizados de todos los nodos de la estructura se agrupan en $\{U\}' = (\{u\}'_1, \{u\}'_2, \dots, \{u\}'_n)$.

Deformaciones generalizadas de pórticos planos

Debido al desplazamiento de la estructura los miembros experimentan cambios de forma, en tal sentido para un elemento entre los nudos "i" y "j", la matriz de deformaciones $\{\phi\}$ proporciona el cambio de forma, y se expresa como $\{\phi\}^t = \{\phi_i, \phi_j, \delta\}$, donde los valores ϕ_i y ϕ_j corresponden a las rotaciones de la tangente en los extremos respecto a la cuerda "i-j" del miembro y δ indica el alargamiento de la cuerda respecto a la configuración inicial. La representación física y convenio de signo de las deformaciones generalizadas se indican en la figura 4.3.

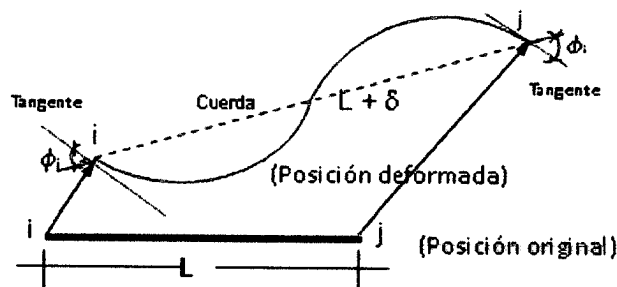


Figura 4.3 Deformaciones generalizadas del miembro entre los nodos i y j [33].

Ecuaciones cinemáticas de pórticos planos

Las ecuaciones cinemáticas relacionan las deformaciones con los desplazamientos generalizados. A fin de obtener estas expresiones, se supone que un miembro de la estructura se somete a un incremento diferencial dq en cada extremo del elemento en las direcciones de los grados de libertad del miembro y actuando de manera independiente, es decir, uno a la vez mientras los demás son nulos.

Por ejemplo en la figura 4.4 se muestran las deformaciones generalizadas en el miembro $i-j$, producida por los movimientos infinitesimales dq_1 , dq_2 , dq_3 en el nodo i .

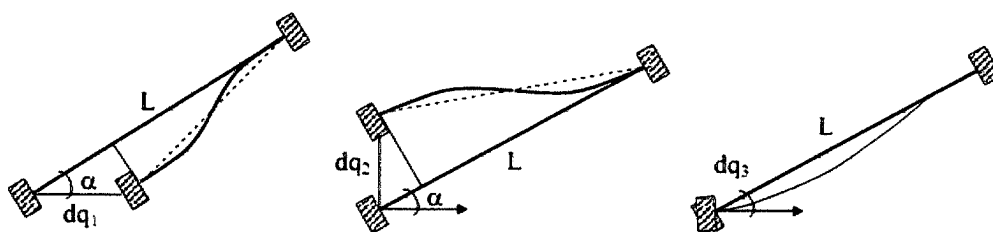


Figura 4.4 Deformaciones generalizadas en el miembro $i-j$ producida por los movimientos infinitesimales dq_1 , dq_2 , dq_3 en el nodo i [15].

Para el caso donde se producen pequeños desplazamientos, simultáneamente en todos los grados de libertad del miembro, se obtiene la siguiente expresión lineal de cinemática:

$$\{d\phi\} = [B_i(q)]\{dq\} \quad (4.3)$$

Donde: $[B_i(q)]$ es la matriz de transformación local.

$$[B_i(q)] = \begin{bmatrix} \frac{\text{sen}\alpha}{L} & -\frac{\text{cos}\alpha}{L} & 1 & -\frac{\text{sen}\alpha}{L} & \frac{\text{cos}\alpha}{L} & 0 \\ \frac{\text{sen}\alpha}{L} & -\frac{\text{cos}\alpha}{L} & 0 & -\frac{\text{sen}\alpha}{L} & \frac{\text{cos}\alpha}{L} & 1 \\ -\text{cos}\alpha & -\text{sen}\alpha & 0 & \text{cos}\alpha & \text{sen}\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Para el caso general en el que α y L dependen de los desplazamientos, se obtiene una expresión no lineal para la ecuación cinemática. Integrando la expresión (4.3) se obtiene:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$\{\phi\} = \int_{(0)}^{(q)} [B_1(q)] \{dq\} \quad (4.5)$$

Si se acepta la hipótesis de “pequeños desplazamientos”, que consiste en admitir que las modificaciones de la matriz de transformación del elemento durante su movimiento son despreciables, la matriz de transformación permanecerá constante, esto es:

$$[B(U)] \cong [B^0] \quad (4.6)$$

Donde $[B^0]$ es la matriz de transformación en la configuración inicial. En este caso la integración de la ecuación cinemática resulta en:

$$\{\phi\} = [B^0] \{q\} \quad (4.7)$$

4.2.2 Dinámica de pórticos planos [15]

Estudia el movimiento considerando las fuerzas y momentos que lo originan. Para ello se introducen los conceptos de esfuerzos generalizados y fuerzas de inercia. La dinámica de la estructura se define por completo al establecer las relaciones entre las fuerzas externas, los esfuerzos generalizados y las fuerzas de inercia. Estas relaciones se obtienen a través del principio de los trabajos virtuales.

Esfuerzos generalizados de pórticos planos

Los esfuerzos generalizados del miembro están definidos por $\{M'\} = \{m_i, m_j, n\}$, donde m_i y m_j son los momentos flectores en los extremos del miembro, y n la fuerza axial, como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5 Esfuerzos generalizados en un miembro de pórtico plano [33].

Fuerzas internas generalizadas de pórticos planos

Las fuerzas internas generalizadas que actúan sobre el miembro en la configuración deformada, se agrupan en la matriz columna $\{Q\}^t = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6\}^t$ según se muestra en la figura 4.6.

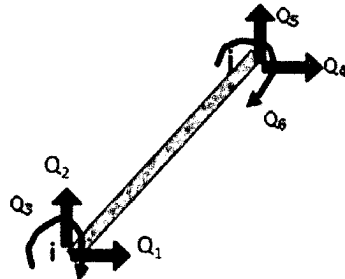


Figura 4.6 Fuerzas generalizadas en un miembro de pórtico plano [33].

Fuerzas externas sobre los nodos de un pórtico plano

Las fuerzas externas se definen por medio de la matriz $\{P\}^t = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, \dots, P_{3n-1}, P_{3n-2}, P_{3n}\}^t$, donde los valores $P_1, P_4, \dots, P_{3n-1}$ definen las fuerzas en la dirección del eje X aplicadas en las juntas 1, 2, 3, ..., n; los términos $P_2, P_5, \dots, P_{3n-2}$ representan las fuerzas en la dirección del eje Z aplicadas en las juntas 1, 2, 3, ..., n; los valores $P_3, P_6, \dots, P_{3n}$ definen los momentos respecto a un eje perpendicular al plano donde está contenida la estructura, aplicados en las juntas 1, 2, 3, ..., n respectivamente, como se muestra en la figura 4.7.

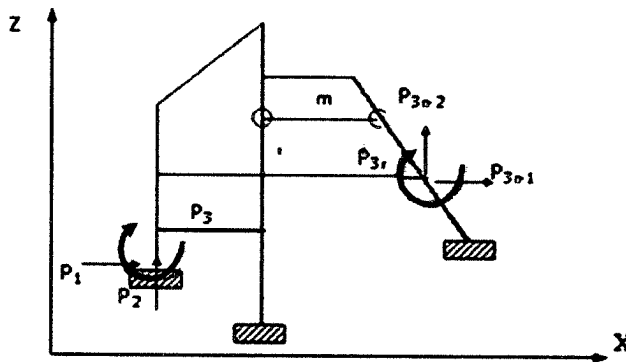


Figura 4.7 Fuerzas externas aplicadas en un pórtico plano.

Las fuerzas externas que corresponden al conjunto N_u de grados de libertad restringidos de la estructura son llamadas “reacciones” de los apoyos. Estas reacciones son a priori desconocidas y forman parte de las

incógnitas del problema. Todos los grados de libertad que no se incluyen en N_u se agrupan en el conjunto N_p llamado conjunto de nodos no restringidos. Las fuerzas externas que corresponden a los grados de libertad contenidos en N_p son datos impuestos por el analista, esto es:

$$P_l = P_l^d(t) \quad (4.8)$$

Donde $P_l^d(t)$ son funciones del tiempo conocidas durante el intervalo en el que se desea calcular la estructura y P_l es el l -ésimo elemento de la matriz de fuerzas externas.

Fuerzas de inercia de pórticos planos

La matriz $\{f\}$ de las fuerzas de inercia del pórtico plano se construye sumando las fuerzas de inercia de todos los miembros:

$$\{f\} = \sum_{b=1}^m \{f_g\}_b = \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \{\ddot{U}\} = [masa] \{\ddot{U}\} \quad (4.9)$$

Donde $[masa] = \sum_{b=1}^m [masa_g]_b$ es denominada matriz de masas del pórtico, y $\{\ddot{U}\}$ es la matriz de aceleraciones del pórtico plano.

Ecuaciones de equilibrio dinámico de pórticos planos

La ecuación de equilibrio para pórticos planos puede ser obtenida a través del principio del trabajo virtual. Si un pórtico como el que se muestra en la figura 4.2, constituido por n nodos y m elementos se somete a un desplazamiento virtual $\{U^*\}$, el trabajo virtual de las fuerzas externas T_e^* , debe ser igual a la suma del trabajo virtual de las fuerzas internas T_i^* , más el trabajo de las fuerzas de inercia T_a^* .

$$T_i^* + T_a^* = T_e^* \quad \text{para todo } \{U^*\} \quad (4.10)$$

El trabajo virtual interno se define en términos generales como el producto de los esfuerzos generalizados $\{M\}$ por las deformaciones virtuales $\{\phi\}$,

$$T_i^* = \sum_{b=1}^m \left\{ \dot{\phi}^* \right\}_b^t \{M\}_b \quad (4.11)$$

El trabajo virtual de las fuerzas externas para toda la estructura, se formula como:

$$T_e^* = \{J^*\}^t \{P\} \quad (4.12)$$

Donde $\{P\}$ es el vector de las fuerzas nodales.

El trabajo virtual realizado por las fuerzas de inercia se calcula como:

$$T_a^* = \{U^*\}^t \{I\} \quad (4.13)$$

Sustituyendo las expresiones (4.11), (4.12) y (4.13) en la ecuación de trabajo (4.9) se obtiene la ecuación de equilibrio para una estructura aporticada:

$$\sum_{b=1}^m \left\{ \dot{\phi}^* \right\}_b^t \{M\}_b + \{J^*\}^t \{I\} = \{J^*\}^t \{P\} \rightarrow \text{para todo } \{J^*\} \quad (4.14)$$

Empleando las ecuaciones cinemáticas puede escribirse:

$$\left\{ \dot{U}^* \right\}^t \sum_{b=1}^m [B]_b^t \{M\}_b + \left\{ \dot{U}^* \right\}^t \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \left\{ \ddot{U} \right\} = \left\{ \dot{U}^* \right\}^t \{P\} \rightarrow \text{para todo } \{U^*\} \quad (4.15)$$

Teniendo en cuenta que la ecuación (4.15) debe cumplirse para cualquier desplazamiento virtual, se obtiene la siguiente ecuación de equilibrio dinámico:

$$\sum_{b=1}^m [B]_b^t \{M\}_b + \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \left\{ \ddot{U} \right\} = \{P\} \quad (4.16)$$

Cuando la ecuación (4.16) se verifica, se dice que la estructura está en equilibrio dinámico.

4.2.3 Modelo Histerético Elastoplástico Degradable con Fatiga de Bajo Ciclaje [15]

En los elementos de concreto armado sometidos a sobrecargas se observan dos fenómenos inelásticos de gran importancia: el agrietamiento del concreto y la fluencia del refuerzo. A continuación se describe un modelo que cuantifica esos fenómenos, este modelo se denomina Modelo histerético de Daño Concentrado con fatiga de bajo ciclaje (MDC) [15].

Para caracterizar el estado de agrietamiento se introducen dos conjuntos de variables llamadas variables de daño por flexión ($\{D^+\} = \{d_i^+, d_j^+\}$) y ($\{D^-\} = \{d_i^-, d_j^-\}$), Ver Figura 4.8.

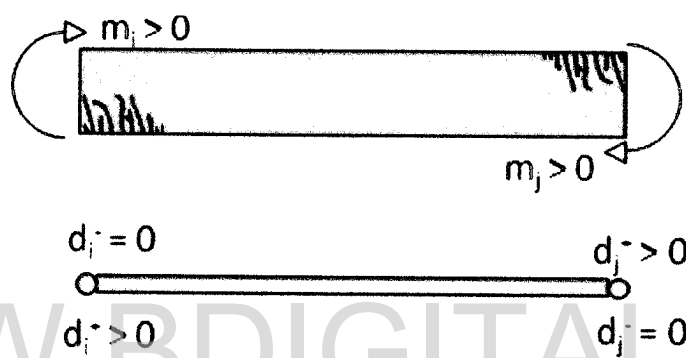


Figura 4.8 Representación del estado de daño de un miembro de concreto armado, bajo las acciones positivas a flexión [39].

Estas variables toman valores entre 0 y 1, el cero representa la ausencia de grietas, mientras que el 1 representa daño total. Las variables con superíndice + corresponde a daños debido a momentos positivos y viceversa. Los subíndices i y j representan las rótulas en las cuales está concentrado este agrietamiento.

La evolución del daño por flexión debido a las acciones positivas, no tienen ninguna influencia sobre el comportamiento del miembro bajo acciones negativas. En miembros de concreto armado este tipo de comportamiento puede justificarse como consecuencia del cierre de grietas cuando la carga cambia de signo.

La fluencia del refuerzo se manifiesta por medio de rotaciones permanentes en el elemento que se supondrán concentradas en las rótulas

plásticas. Estas rotaciones se incluyen en la matriz de rotaciones plásticas $\{\phi^p\} = \{\phi_i^p, \phi_j^p, 0\}$, donde ϕ_i^p, ϕ_j^p representan las rotaciones plásticas en las rótulas i y j respectivamente, ver figura 4.9.

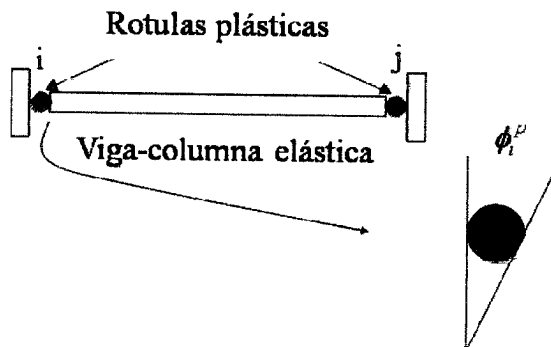


Figura 4.9 Representación del estado de daño de un miembro de concreto armado, bajo las acciones positivas a flexión.

Ley de estado del modelo histerético degradable

La ley de estado según [15] se expresa como:

$$\{\phi - \phi^p\} = [F(D^+)] \langle M \rangle_+ + [F(D^-)] \langle M \rangle_- \quad (4.17)$$

Los términos $[F(D^+)]$ y $[F(D^-)]$ representan las matrices de flexibilidad de un miembro agrietado las cuales dependen del daño positivo y negativo respectivamente, en la expresión (4.18) se muestran la matriz de flexibilidad para el daño positivo.

$$[F(D^+)] = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI(1-d_i^+)} & -\frac{L}{6EI} & 0 \\ -\frac{L}{6EI} & \frac{L}{3EI(1-d_j^+)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{EA} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Donde A representa el área de la sección transversal, I la inercia, E el módulo de elasticidad y L la longitud del elemento.

Los términos $\langle M \rangle_+$ y $\langle M \rangle_-$ representan la parte positiva y negativa de la matriz de esfuerzos generalizados. Esto es:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$\langle M \rangle_+ = \begin{cases} M & \text{si } M \geq 0 \\ 0 & \text{si } M < 0 \end{cases} \quad \text{y} \quad \langle M \rangle_- = \begin{cases} M & \text{si } M < 0 \\ 0 & \text{si } M \geq 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Ley de evolución del daño

La energía de deformación complementaria del miembro dañado se obtiene a partir de la ley de estado (4.17) como:

$$U^* = \frac{1}{2} \{M\}^T \{\phi - \phi^p\} = \frac{1}{2} \{M\}^T [F(D^+)] \langle M \rangle_+ + \frac{1}{2} \{M\}^T [F(D^-)] \langle M \rangle_- \quad (4.20)$$

Por lo tanto se emplean dos tasas de disipación de energía para cada rótula. Las tasas de disipación para la rótula i son:

$$G_i^+ = \frac{\partial U^*}{\partial d_i^+} = \frac{F_{11}^o \langle m_i \rangle_+^2}{2(1-d_i^+)^2}; \quad G_i^- = \frac{\partial U^*}{\partial d_i^-} = \frac{F_{11}^o \langle m_i \rangle_-^2}{2(1-d_i^-)^2} \quad (4.21)$$

Las leyes de evolución de las variables de daño se obtienen a partir del criterio de Griffith modificado [40,15], para las acciones positivas y negativas de la rótula i se tiene:

$$\begin{cases} \dot{d}_i^+ = \left(\frac{\dot{G}_i^+}{G_i^+} \right) \frac{(G_i^+)^2}{(R_i^+)^2} \frac{\partial R_i^+}{\partial d_i^+} & \text{si } G_i^+ \geq G_{cr} \\ \dot{d}_i^+ = 0 & \text{si } G_i^+ < G_{cr} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{d}_i^- = \left(\frac{\dot{G}_i^-}{G_i^-} \right) \frac{(G_i^-)^2}{(R_i^-)^2} \frac{\partial R_i^-}{\partial d_i^-} & \text{si } G_i^- \geq G_{cr} \\ \dot{d}_i^- = 0 & \text{si } G_i^- < G_{cr} \end{cases} \quad (4.22)$$

R_i^+ , R_i^- definen la resistencia al agrietamiento para la parte positiva y negativa en la rótula i

$$R_i^+ = G_{cr}^+ + q_i^+ \frac{\ln(1-d_i^+)}{1-d_i^+}; \quad R_i^- = G_{cr}^- + q_i^- \frac{\ln(1-d_i^-)}{1-d_i^-}; \quad (4.23)$$

Donde G_{cr} , y q_i son parámetros que dependen de las propiedades del material del miembro, su geometría y de la fuerza axial, y se determinan en función del momento de agrietamiento y del momento último [10].

Función de fluencia de la plasticidad

Utilizando el concepto de esfuerzo efectivo descrito en el capítulo 3, se puede demostrar [15] que la función de fluencia de las rótulas i y j se expresan como:

$$f_i = \max \left(\frac{m_i}{1-d_i^+} - 0.8c_i^+ \phi_i^p - (m_{yi}^+ + 0.2c_i^+ p_i), -\frac{m_i}{1-d_i^-} + c_i^- \phi_i^p - (m_{yi}^- + 0.2c_i^- p_i) \right)$$

$$f_j = \max \left(\frac{m_j}{1-d_j^+} - 0.8c_j^+ \phi_j^p - (m_{yj}^+ + 0.2c_j^+ p_j), -\frac{m_j}{1-d_j^-} + c_j^- \phi_j^p - (m_{yj}^- + 0.2c_j^- p_j) \right)$$

(4.24)

Donde $c^{+/-}$ y $m_{y}^{+/-}$ son coeficientes que dependen de las propiedades del material del miembro y de la fuerza axial. p es la rotación plástica máxima en valor absoluto.

4.3 Teoría del daño concentrado para el caso de pórticos tridimensionales [38]

En este punto se describe un modelo basado en la Teoría del Daño Concentrado para pórticos tridimensionales. Este modelo toma en cuenta el proceso de daño debido a la flexión biaxial y considera la posibilidad de cargas axiales variables y momentos torsionales.

4.3.1 Cinemática de pórticos tridimensionales [38]

Desplazamientos generalizados tridimensionales

Al igual que para el caso de pórticos planos, para estudiar el movimiento de una estructura tridimensional se considera que el pórtico espacial de la figura 4.10 está compuesto por m miembros estructurales conectados entre sí por n nodos.

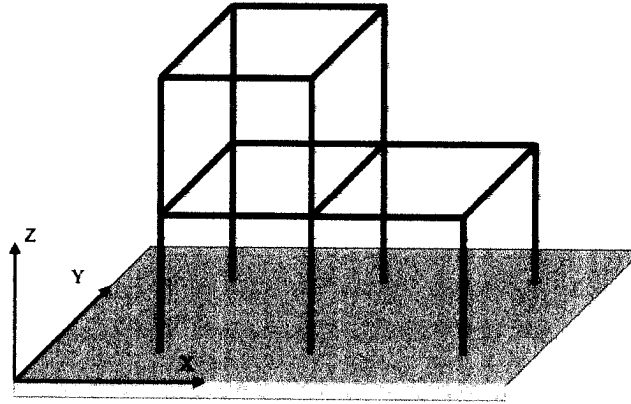


Figura 4.10 Representación de un pórtico espacial [38].

Para representar entonces el movimiento de la estructura se definen las siguientes variables:

- Los desplazamientos generalizados del nodo "i" se agrupan en la matriz columna $\{u\}_i^t = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$ donde u_1, u_2 y u_3 indican los desplazamientos del nodo en las direcciones X, Y y Z, u_4, u_5 y u_6 indican las rotaciones del nodo alrededor de los ejes X, Y y Z, todos con respecto a su posición en la configuración inicial.
- La matriz de desplazamientos generalizados de un elemento b entre los nodos i y j está compuesta por los desplazamientos de ambos nodos y se agrupan en la matriz columna $\{q\}_b^t = \{\{u\}_i^t, \{u\}_j^t\} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}\}$.
- La matriz columna $\{U\}^t = \{\{u\}_1^t, \{u\}_2^t, \dots, \{u\}_n^t\} = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_{6n}\}$ representa los desplazamientos de todos los nodos de la estructura.

Deformaciones generalizadas tridimensionales

La matriz de deformaciones generalizadas está dada por: $\{\phi\}_b^t = \{\phi_{iy}, \phi_{jy}, \delta, \phi_{iz}, \phi_{jz}, \phi_x\}$ donde ϕ_{iy} y ϕ_{jy} son las rotaciones por flexión de la tangente del miembro en los extremos con respecto a la cuerda en el plano XZ mientras que ϕ_{iz} y ϕ_{jz} son las rotaciones por flexión en el plano XY. δ representa el alargamiento axial y ϕ_x la rotación torsional. Estas deformaciones se muestran en la figura 4.11 y se miden con respecto a la configuración inicial.

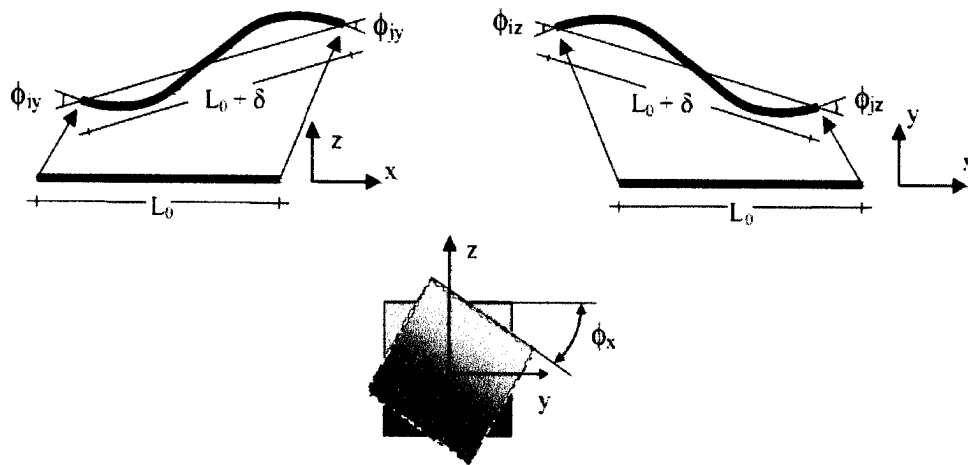


Figura 4.11 Deformaciones generalizadas de un miembro de pórtico espacial [38].

Ecuaciones cinemáticas tridimensionales

Las ecuaciones cinemáticas que relacionan las deformaciones con los desplazamientos generalizados están dadas por:

$$\{\dot{\phi}\}_b = [B(U)]_b \{\dot{U}\} \quad \text{o} \quad \{\phi\}_b = \int_0^t [B(U)]_b \{\dot{U}\} dt \quad (4.25)$$

Donde la matriz de transformación $[B(U)]_b$ se define en el caso tridimensional como:

$$[B]_b = \begin{bmatrix} -\frac{m_1}{L} & -\frac{m_2}{L} & -\frac{m_3}{L} & n_1 & n_2 & n_3 & \frac{m_1}{L} & \frac{m_2}{L} & \frac{m_3}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m_1}{L} & -\frac{m_2}{L} & -\frac{m_3}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{m_1}{L} & \frac{m_2}{L} & \frac{m_3}{L} & n_1 & n_2 & n_3 \\ -t_1 & -t_2 & -t_3 & 0 & 0 & 0 & t_1 & t_2 & t_3 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{n_1}{L} & \frac{n_2}{L} & \frac{n_3}{L} & m_1 & m_2 & m_3 & -\frac{n_1}{L} & -\frac{n_2}{L} & -\frac{n_3}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{n_1}{L} & \frac{n_2}{L} & \frac{n_3}{L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{n_1}{L} & -\frac{n_2}{L} & -\frac{n_3}{L} & m_1 & m_2 & m_3 \\ 0 & 0 & 0 & -t_1 & -t_2 & -t_3 & 0 & 0 & 0 & t_1 & t_2 & t_3 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Donde t , m , y n son los vectores unitarios en las direcciones X , Y y Z respectivamente.

4.3.2 Dinámica de pórticos tridimensionales [38]

Esfuerzos generalizados tridimensionales

Los esfuerzos generalizados se agrupan en la matriz $\{M^t\} = \{m_{iy}, m_{jy}, n, m_{iz}, m_{jz}, m_x\}$. Como se puede observar en la figura 4.12, n representa la carga axial, m_x el torque, m_{iy} y m_{jy} representan los momentos flectores en los extremos i y j del elemento en el plano XZ y m_{iz} y m_{jz} representan los momentos flectores en i y j en el plano XY.

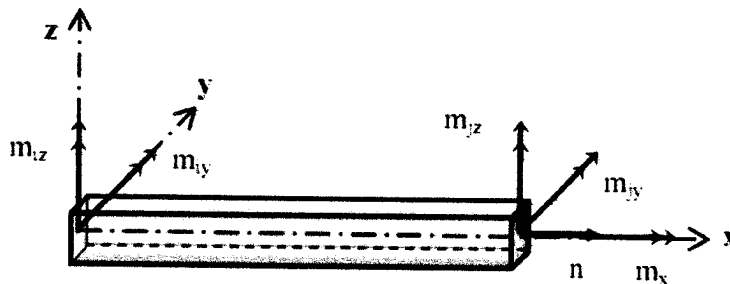


Figura 4.12 Esfuerzos generalizados en un miembro de pórtico espacial [38].

Fuerzas externas sobre los nodos del pórtico tridimensional

Las fuerzas externas se definen por medio de la matriz $\{P\}^t = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, \dots, P_{6n-2}, P_{6n-1}, P_{6n}\}$, los términos $P_1, P_7, \dots, P_{6n-5}$ representan las fuerzas en la dirección del eje X aplicadas en los nudos $1, 2, \dots, n$ respectivamente, $P_2, P_8, \dots, P_{6n-4}$ representan las fuerzas en dirección del eje Y, mientras que $P_3, P_9, \dots, P_{6n-3}$ representan las fuerzas en dirección del eje Z. De igual manera $P_4, P_{10}, \dots, P_{6n-2}$ representan los momentos actuantes alrededor del eje X, $P_5, P_{11}, \dots, P_{6n-1}$ representan los momentos alrededor del eje Y, y $P_6, P_{12}, \dots, P_{6n}$ representan los momentos actuantes alrededor del eje Z.

Fuerzas de inercia de un pórtico tridimensional

De igual manera que para el caso de los pórticos planos, la matriz $\{I\}$ de las fuerzas de inercia del pórtico espacial se construye sumando las fuerzas de inercia de todos los miembros:

$$\{I\} = \sum_{b=1}^m \{I_g\}_b = \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \{\ddot{U}\} = [masa] \{\ddot{U}\} \quad (4.27)$$

Donde $[masa] = \sum_{b=1}^m [masa_g]_b$ es denominada matriz de masas del pórtico espacial.

Ecuaciones de equilibrio dinámico tridimensional

La ecuación de equilibrio dinámico de un pórtico tridimensional tiene la misma forma de la ecuación 4.16, es decir:

$$\sum_{b=1}^m [B]_b^T \{M\}_b + \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \left\{ \ddot{U}^* \right\} = \{P\} \quad (4.28)$$

Donde el primer término del lado izquierdo de la ecuación corresponde a las fuerzas internas y el segundo a las fuerzas de inercia.

4.3.3 Leyes de comportamiento de pórticos elastoplásticos con daño tridimensional [38].

Así como en la sección 4.2.3 para describir el fenómeno inelástico asociado con el agrietamiento del concreto se introducen dos grupos variables internas: $\{D^+\} = \{d_{iy}^+, d_{jy}^+, d_{iz}^+, d_{jz}^+\}$ y $\{D^-\} = \{d_{iy}^-, d_{jy}^-, d_{iz}^-, d_{jz}^-\}$. Estas variables de daño representan el agrietamiento debido a acciones positivas y negativas respectivamente como se muestra en la figura 4.13.

Los parámetros de daño pueden tomar valores entre cero y uno. Cero representa una rótula sin daño y uno representa una rótula totalmente dañada sin ningún tipo de rigidez.

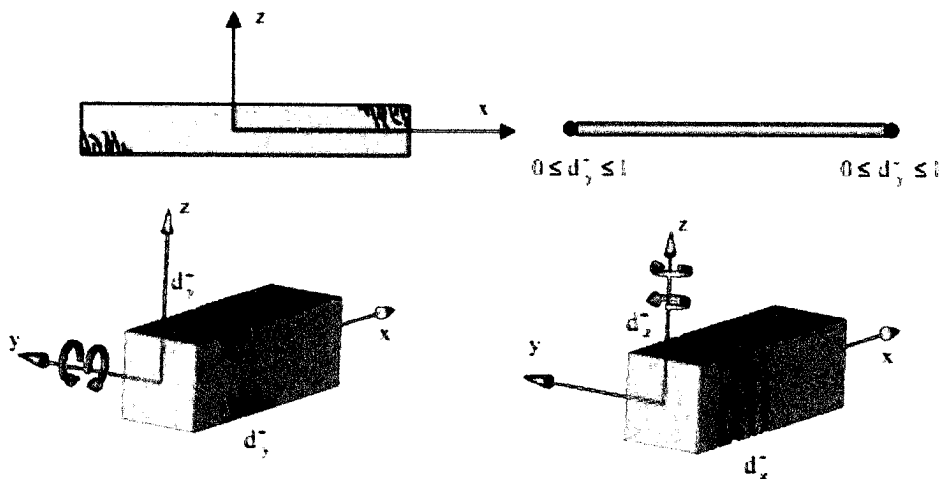


Figura 4.13 Representación del agrietamiento en un pórtico de concreto armado [38].

De igual forma la fluencia del refuerzo se representa por medio de las rotaciones permanentes concentradas en las rótulas plásticas. Estas

rotaciones se incluyen en la matriz de rotaciones plásticas $\{\phi^p\} = \{\phi_{iy}^p, \phi_{jy}^p, 0, \phi_{iz}^p, \phi_{jz}^p, 0\}$, que contiene las rotaciones plásticas de las rótulas i y j en los planos XZ y XY.

Ley de estado tridimensional

La ley de elasticidad de un miembro de pórtico tridimensional elastoplástico con daño tiene la misma forma de la ecuación (4.17):

$$\{\Phi - \Phi^p\} = [F(D^+)]\{M\}_+ + [F(D^-)]\{M\}_- \quad (4.29)$$

Donde los términos $[F(D^+)]$ y $[F(D^-)]$ depende igualmente de la variable daño. Para el daño positivo se tiene la ecuación (4.30):

$$[F(D^+)] = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI_y(1-d_{iy}^+)} & -\frac{L}{6EI_y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{L}{6EI_y} & \frac{L}{3EI_y(1-d_{jy}^+)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{AE} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L}{3EI_z(1-d_{iz}^+)} & -\frac{L}{6EI_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{L}{6EI_z} & \frac{L}{3EI_z(1-d_{jz}^+)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{GJ} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Leyes de evolución del daño tridimensional

Las leyes de evolución de las variables de daño se obtienen, al igual que en el caso de los pórticos planos, mediante de la aplicación de una forma generalizada del criterio de Griffith modificado [40,15].

Para cada rótula del miembro del pórtico se tienen dos matrices de tasas de disipación de energía:

$$\{G^+\} = \begin{cases} G_{iy}^+ = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{iy}^+} = \frac{F_{11}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{iy} \rangle_+}{1-d_{iy}^+} \right)^2 \\ G_{jy}^+ = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{jy}^+} = \frac{F_{22}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{jy} \rangle_+}{1-d_{jy}^+} \right)^2 \\ G_{iz}^+ = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{iz}^+} = \frac{F_{44}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{iz} \rangle_+}{1-d_{iz}^+} \right)^2 \\ G_{jz}^+ = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{jz}^+} = \frac{F_{55}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{jz} \rangle_+}{1-d_{jz}^+} \right)^2 \end{cases} \quad \{G^-\} = \begin{cases} G_{iy}^- = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{iy}^-} = \frac{F_{11}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{iy} \rangle_-}{1-d_{iy}^-} \right)^2 \\ G_{jy}^- = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{jy}^-} = \frac{F_{22}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{jy} \rangle_-}{1-d_{jy}^-} \right)^2 \\ G_{iz}^- = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{iz}^-} = \frac{F_{44}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{iz} \rangle_-}{1-d_{iz}^-} \right)^2 \\ G_{jz}^- = -\frac{\partial U^*}{\partial d_{jz}^-} = \frac{F_{55}^0}{2} \left(\frac{\langle m_{jz} \rangle_-}{1-d_{jz}^-} \right)^2 \end{cases} \quad (4.31)$$

Las leyes de evolución de las variables de daño para la rótula i son:

$$\begin{cases} \dot{d}_{iy}^+ = \begin{pmatrix} \dot{G}_{iy}^+ \\ (R_{iy}^+)^2 \frac{\partial R_{iy}^+}{\partial d_{iy}^+} \end{pmatrix} \frac{(G_{iy}^+)^2}{\partial d_{iy}^+} \quad si \quad G_{iy}^+ \geq G_{cr} \\ \dot{d}_{iy}^+ = 0 \quad si \quad G_{iy}^+ < G_{cr} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{d}_{iy}^- = \begin{pmatrix} \dot{G}_{iy}^- \\ (R_{iy}^-)^2 \frac{\partial R_{iy}^-}{\partial d_{iy}^-} \end{pmatrix} \frac{(G_{iy}^-)^2}{\partial d_{iy}^-} \quad si \quad G_{iy}^- \geq G_{cr} \\ \dot{d}_{iy}^- = 0 \quad si \quad G_{iy}^- < G_{cr} \end{cases} \\ \begin{cases} \dot{d}_{iz}^+ = \begin{pmatrix} \dot{G}_{iz}^+ \\ (R_{iz}^+)^2 \frac{\partial R_{iz}^+}{\partial d_{iz}^+} \end{pmatrix} \frac{(G_{iz}^+)^2}{\partial d_{iz}^+} \quad si \quad G_{iz}^+ \geq G_{cr} \\ \dot{d}_{iz}^+ = 0 \quad si \quad G_{iz}^+ < G_{cr} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{d}_{iz}^- = \begin{pmatrix} \dot{G}_{iz}^- \\ (R_{iz}^-)^2 \frac{\partial R_{iz}^-}{\partial d_{iz}^-} \end{pmatrix} \frac{(G_{iz}^-)^2}{\partial d_{iz}^-} \quad si \quad G_{iz}^- \geq G_{cr} \\ \dot{d}_{iz}^- = 0 \quad si \quad G_{iz}^- < G_{cr} \end{cases} \end{cases} \quad (4.32)$$

Igualmente las funciones de resistencia al agrietamiento R, para la rótula i son:

$$R(d_{iy}^+) = G_{criy}^+(n, m_x) + q_{iy}^+(n, m_x) \frac{\ln(1-d_{iy}^+)}{1-d_{iy}^+};$$

$$R(d_{iy}^-) = G_{criy}^-(n, m_x) + q_{iy}^-(n, m_x) \frac{\ln(1-d_{iy}^-)}{1-d_{iy}^-};$$

$$R(d_{iz}^+) = G_{criz}^+(n, m_x) + q_{iz}^+(n, m_x) \frac{\ln(1-d_{iz}^+)}{1-d_{iz}^+};$$

$$R(d_{iz}^-) = G_{criz}^-(n, m_x) + q_{iz}^-(n, m_x) \frac{\ln(1 - d_{iz}^-)}{1 - d_{iz}^-}, \quad (4.33)$$

Donde G_{cr} y q son propiedades del material [10,38].

Leyes de evolución de las deformaciones plásticas

Para el caso de pórticos elastoplásticos tridimensionales se obtiene las siguientes funciones de fluencia según [38]:

$$f_i = \left[\max \left(\frac{1}{M_{iy}^+(n, m_x)} \left\langle \frac{m_{iy}}{1 - d_{iy}^+} - c_{iy}^+(n, m_x) \phi_{iy}^P \right\rangle; \frac{1}{M_{iy}^-(n, m_x)} \left\langle \frac{-m_{iy}}{1 - d_{iy}^-} + c_{iy}^-(n, m_x) \phi_{iy}^P \right\rangle \right) \right]_+^v +$$

$$\left[\max \left(\frac{1}{M_{iz}^+(n, m_x)} \left\langle \frac{m_{iz}}{1 - d_{iz}^+} - c_{iz}^+(n, m_x) \phi_{iz}^P \right\rangle; \frac{1}{M_{iz}^-(n, m_x)} \left\langle \frac{-m_{iz}}{1 - d_{iz}^-} + c_{iz}^-(n, m_x) \phi_{iz}^P \right\rangle \right) \right]_+^v - 1$$

$$f_j = \left[\max \left(\frac{1}{M_{jy}^+(n, m_x)} \left\langle \frac{m_{jy}}{1 - d_{jy}^+} - c_{jy}^+(n, m_x) \phi_{jy}^P \right\rangle; \frac{1}{M_{jy}^-(n, m_x)} \left\langle \frac{-m_{jy}}{1 - d_{jy}^-} + c_{jy}^-(n, m_x) \phi_{jy}^P \right\rangle \right) \right]_+^v +$$

$$\left[\max \left(\frac{1}{M_{jz}^+(n, m_x)} \left\langle \frac{m_{jz}}{1 - d_{jz}^+} - c_{jz}^+(n, m_x) \phi_{jz}^P \right\rangle; \frac{1}{M_{jz}^-(n, m_x)} \left\langle \frac{-m_{jz}}{1 - d_{jz}^-} + c_{jz}^-(n, m_x) \phi_{jz}^P \right\rangle \right) \right]_+^v - 1$$

(4.34)

Las leyes de evolución de las deformaciones plásticas se definen a través de la Ley de Normalidad como:

Para la rótula i:

$$\dot{\phi}_{iy}^P = \dot{\lambda}_i \frac{\partial f_i}{\partial m_{iy}}; \quad \dot{\phi}_{iz}^P = \dot{\lambda}_i \frac{\partial f_i}{\partial m_{iz}}; \quad (4.35a)$$

Para la rótula j:

$$\dot{\phi}_{jy}^P = \dot{\lambda}_j \frac{\partial f_j}{\partial m_{jy}}; \quad \dot{\phi}_{jz}^P = \dot{\lambda}_j \frac{\partial f_j}{\partial m_{jz}};$$

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_i = 0 & \text{si } f_i < 0 \text{ o } \dot{f}_i < 0 \\ \dot{\lambda}_i < 0 & \text{si } f_i = 0 \text{ o } \dot{f}_i = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\lambda}_j = 0 & \text{si } f_j < 0 \text{ o } \dot{f}_j < 0 \\ \dot{\lambda}_j < 0 & \text{si } f_j = 0 \text{ o } \dot{f}_j = 0 \end{cases} \quad (4.35b)$$

Finalmente la ley de estado (4.29) y las leyes de evolución del daño (4.32) y de las deformaciones plásticas (4.35) constituyen la ley de comportamiento generalizada del modelo elastoplástico con daño. Esta ley de comportamiento conjuntamente con las ecuaciones cinemáticas y las de equilibrio definen completamente el comportamiento de la estructura.

En el anexo B se describen las propiedades y parámetros usado por el modelo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 5

Elemento para estructuras duales de concreto armado

En este capítulo se describe un modelo de comportamiento para el análisis no lineal de estructuras duales de concreto armado. Este tipo de estructura esta conformada por muros de corte y pórticos dúctiles a flexión. Para describir los efectos inelásticos asociados a fuerzas cortantes y/o flexión en muros, vigas, columnas cortas y pórticos esbeltos, se usa la mecánica de la fractura y la teoría del daño.

A través de este modelo el usuario puede con un sólo elemento discretizar estructuras complejas con falla dominante a flexión, corte o de tipo combinado, sin que tenga que hacer consideraciones adicionales o usar diferentes elementos para representar cada efecto inelástico.

Teoría de estructuras duales de concreto armado [46]

A continuación se presenta una teoría de estructuras duales, la cual permite definir el conjunto de ecuaciones que relaciona los desplazamientos nodales de la estructura con las deformaciones generalizadas de los elementos (ecuaciones cinemáticas), las fuerzas externas nodales (verticales y laterales) con los esfuerzos generalizados de los elementos (ecuaciones dinámicas), y la ley de comportamiento de elementos estructurales sometidos a deformaciones por flexión y corte.

5.1 Cinemática de estructuras duales planas

Desplazamientos generalizados de estructuras duales planas

Considérese una estructura dual plana como la indicada en la figura 5.1 formada por “m” miembros conectados entre sí por “n” nodos. Para representar el movimiento de la estructura en el intervalo $(0,T)$, es necesario definir la posición de cada nodo con respecto a un sistema de ejes coordenados ortogonales o de referencia “X-Z”. Los desplazamientos generalizados de un nodo cualquiera “i” son representados por el vector $(u)_i = (u_1, u_2, u_3)$, donde: la componente u_1 representa el desplazamiento del nodo en la dirección “X”, la componente u_2 representa el desplazamiento del nodo en la dirección “Z” y la componente u_3 la rotación del nodo. La interpretación física de cada componente es mostrada en la figura 5.1.

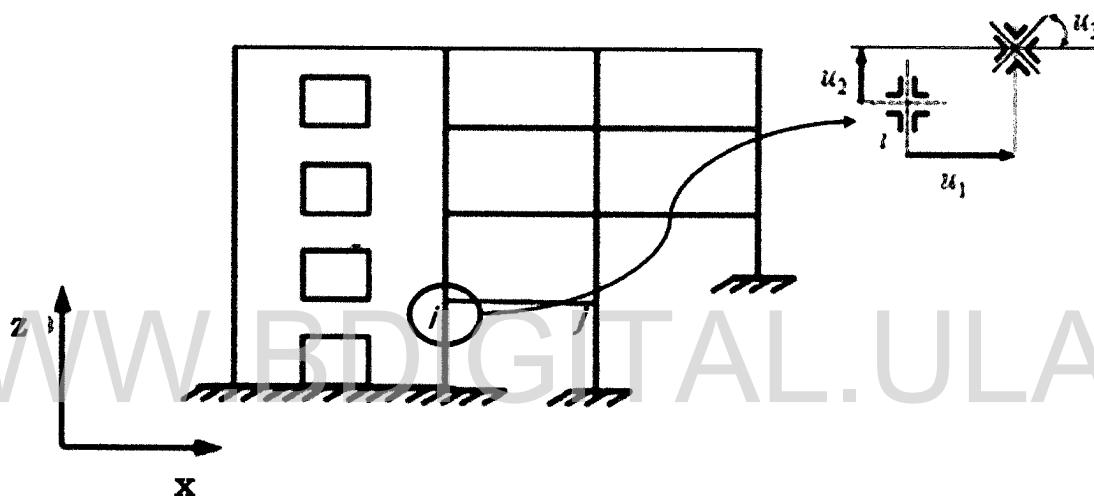


Figura 5.1 Representación de una estructura dual plana [46].

Los desplazamientos generalizados de un elemento cualquiera “m” entre dos nodos “i” y “j” de la estructura dual plana queda definido por el desplazamiento de ambos nodos. Los desplazamientos del elemento son expresados en un vector $\{q\}_b^e = (\{u\}_i^e; \{u\}_j^e) = (q_1, q_2, \dots, q_6)$.

La interpretación física de los desplazamientos generalizados de un elemento cualquiera es mostrada en la figura 5.2.

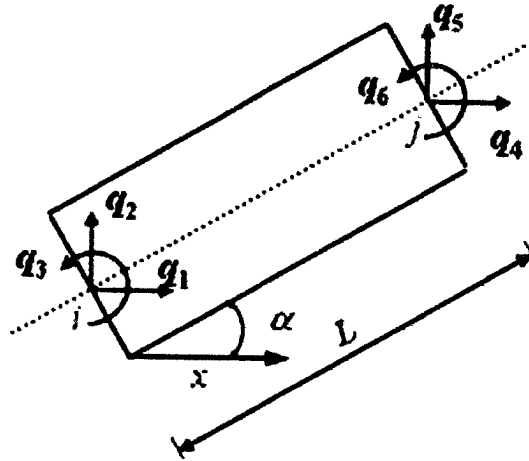


Figura 5.2 Desplazamientos generalizados del elemento "m" [46].

Los desplazamientos generalizados de la estructura están representados por un vector $\{U\}$ cuyas componentes son los desplazamientos de todos y cada uno de sus nodos en un instante de tiempo, es decir:

$$\{U\}^T = (\{u\}_1^T, \{u\}_2^T, \{u\}_3^T, \dots, \{u\}_n^T) \quad (5.1)$$

Con la finalidad de garantizar la estabilidad de la estructura dual plana, algunos de sus desplazamientos deben ser restringidos (sus valores son conocidos o impuestos). Los desplazamientos restringidos son representados por un vector " U_k ".

$$U_k = U_k^d(t) \quad \forall K \in N_u \quad (5.2)$$

Alternativamente pueden definirse velocidades o aceleraciones en los apoyos. El conocimiento de algunas de estas variables más las condiciones iniciales para $t_0=0$ permiten determinar la historia de los desplazamientos en los apoyos mediante la integración en el tiempo.

Deformaciones generalizadas de estructuras duales planas

Las deformaciones generalizadas (ver figura 5.3) caracterizan el cambio de forma de un elemento cualquiera entre los nodos "i" y "j". Considerando efectos de flexión y corte las deformaciones generalizadas se expresan en forma matricial como: $\{\phi\}_b^T = (\phi_i, \phi_j, \delta)$.

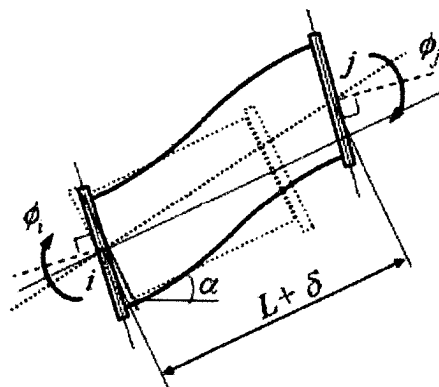


Figura 5.3 Deformaciones generalizadas del elemento "m" [46].

Ecuaciones cinemáticas de estructuras duales planas

La ecuación cinemática para pequeños desplazamientos viene dada por la expresión matricial:

$$\{d\phi\} = [B_0] \{dq\} \quad (5.3)$$

Donde: $[B_0]$ es la matriz de transformación local en la configuración inicial del elemento.

$$[B_0] = \begin{bmatrix} \frac{\text{sen}\alpha}{L} & -\frac{\text{cos}\alpha}{L} & 1 & -\frac{\text{sen}\alpha}{L} & \frac{\text{cos}\alpha}{L} & 0 \\ \frac{\text{sen}\alpha}{L} & -\frac{\text{cos}\alpha}{L} & 0 & -\frac{\text{sen}\alpha}{L} & \frac{\text{cos}\alpha}{L} & 1 \\ -\text{cos}\alpha & -\text{sen}\alpha & 0 & \text{cos}\alpha & \text{sen}\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

5.2 Dinámica de estructuras duales planas

Tomando en consideración el principio del trabajo virtual, se pueden establecer las relaciones entre fuerzas externas, esfuerzos generalizados y fuerzas de inercia que actúan sobre las estructuras duales planas.

Un punto importante es la caracterización de las fuerzas externas y la definición de las variables que indican la forma de distribución de estas fuerzas externas entre los diferentes elementos constitutivos de la estructura, siendo necesario la introducción del concepto de esfuerzo generalizado asociado a las deformaciones generalizadas, cuya representación se indica en la figura 5.4.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

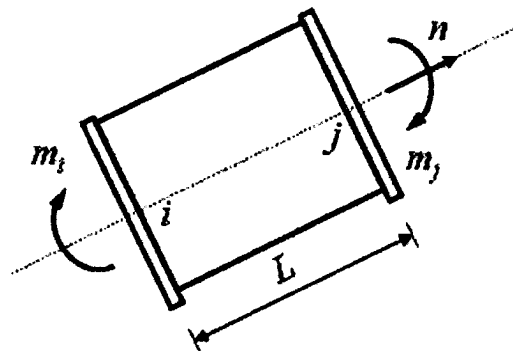


Figura 5.4 Esfuerzos generalizados en un elemento m [46].

Esfuerzos generalizados de estructuras duales planas

Considerando sólo las rotaciones en los extremos “i” y “j” y el alargamiento de la cuerda se tiene que los esfuerzos generalizados del elemento asociados a las deformaciones generalizadas quedan definidos en forma matricial por el vector:

$$\{M\}_b^t = \{m_i, m_j, n\} \quad (5.5)$$

Donde m_i y m_j son los momentos flectores en los extremos del miembro, y n la fuerza axial, como se muestra en la figura 5.4.

Fuerzas externas de estructuras duales planas

Las fuerzas externas de la estructura están definidas por medio del vector $\{P\}^t = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_{3n-2}, P_{3n-1}, P_{3n}\}^t$, donde los términos del vector $P_1, P_4, \dots, P_{3n-2}$ definen las fuerzas en la dirección del eje X aplicadas en los nodos 1, 2, ..., n respectivamente; los términos $P_2, P_5, \dots, P_{3n-1}$ representan las fuerzas en la dirección del eje Z aplicadas en las juntas 1, 2, ..., n; mientras que los términos $P_3, P_6, \dots, P_{3n}$ definen los momentos sobre los nodos 1, 2, ..., n, como se muestra en la figura 5.5.

Las fuerzas externas que corresponden al conjunto n_u de grados de libertad restringidos de la estructura son llamadas “reacciones” de los apoyos. Estas reacciones son a priori desconocidas y forman parte de las incógnitas del problema. Todos los grados de libertad que no se incluyen en n_u se agrupan en el conjunto n_p llamado conjunto de nodos no

restringidos. Las fuerzas externas que corresponden a los grados de libertad contenidos en n_p son datos impuestos por el analista.

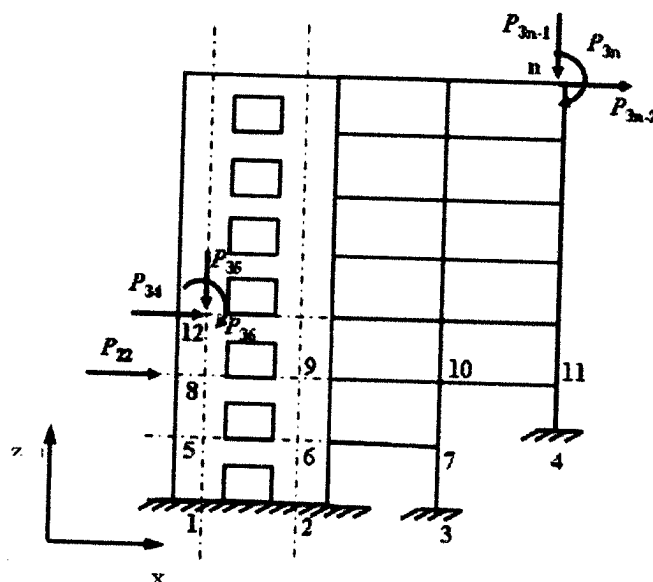


Figura 5.5 Fuerzas externas nodales en una estructura dual [46].

Fuerzas de inercia de estructuras duales planas

Las fuerzas de inercia en una estructura se construyen sumando las fuerzas de inercia de todos los miembros y se representa por medio de la matriz $\{I\}$, donde:

$$\{I\} = \sum_{b=1}^m \{I_g\}_b = \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \{\ddot{U}\} = [masa] \{\ddot{U}\} \quad (5.6)$$

Donde $[masa] = \sum_{b=1}^m [masa_g]_b$ es denominada matriz de masas del pórtico.

Ecuaciones de equilibrio dinámico de estructuras duales planas

Al igual que en el capítulo 4, la ecuación de equilibrio de una estructura dual plana puede obtenerse a través del principio del trabajo virtual, la cual se expresa como:

$$\sum_{b=1}^m [B_0]_b \{M\}_b + \sum_{b=1}^m [masa_g]_b \{\ddot{U}\} = \{P\} \quad (5.7)$$

Si se consideran sólo cargas estáticas actuando en la estructura la ecuación de equilibrio resulta igual a:

$$\sum_{b=1}^m [B_0]_b^T \{M\}_b = \{P\} \quad (5.8)$$

5.3 Modelo elastoplástico degradable para estructuras duales de concreto armado [46].

Este modelo está basado en los conceptos de plasticidad, mecánica de la fractura y teoría del daño. A través del mismo es posible representar el comportamiento inelástico (deformaciones plásticas y degradación de rigidez) de estructuras duales de concreto armado, combinando los efectos de flexión y corte. En el caso de elementos elastoplásticos que se degradan por corte se usa un modelo que considera la posibilidad de que los efectos inelásticos, por elevadas fuerzas cortantes ocurran distribuidos de manera uniforme en la longitud del elemento, además se supone que la degradación por flexión es despreciable.

Se consideran dos funciones inelásticas para el elemento a corte “ f_s ” y “ g_s ”. La función “ f_s ” permite representar la fluencia por efecto de la fuerza cortante, indica cuando hay incrementos de las rotaciones plásticas por corte, depende de la fuerza cortante efectiva y de los términos de endurecimiento. La función “ g_s ” permite representar el daño de la viga-columna-muro a corte según el criterio de Griffith, indica cuando hay incrementos del daño y depende de la resistencia al agrietamiento del concreto armado a corte.

Ley de estado de estructuras duales planas

La degradación de rigidez y resistencia por corte y por flexión se incluye en el modelo a través de un conjunto de variables internas adicionales correspondientes a los daños. En flexión, usando el modelo de disipación concentrada, este conjunto de variables denominado $\{D\}^t = (d_i, d_j, 0)$ representan los daños para las rótulas “i” y “j”. En corte, usando el modelo de disipación distribuida, el conjunto denominado $\{D_s\}^t = (d_s, d_s, 0)$ representa el daño para la viga-columna-muro.

La ley de estado en el modelo elastoplástico degradable de un elemento de una estructura dual se obtiene usando el concepto de esfuerzo efectivo y equivalencia de deformaciones, de donde resulta:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$\{\phi - \phi^p - \phi_s^p\} = [F(d)]\{M\} \quad (5.9)$$

Donde $\{\phi_s^p\}$ representa la rotación plástica por corte. La matriz $[F(d)]$ constituye la flexibilidad de un elemento degradable a corte y flexión, la cual es definida de la forma siguiente:

$$[F(d)] = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI(1-d_i)} + \frac{1}{GA_vL(1-d_s)} & -\frac{L}{6EI} + \frac{1}{GA_vL(1-d_s)} & 0 \\ -\frac{L}{6EI} + \frac{1}{GA_vL(1-d_s)} & \frac{L}{3EI(1-d_j)} + \frac{1}{GA_vL(1-d_s)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{EA} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad del material

A = área de la sección transversal

A_v = área efectiva a corte, usualmente el área de la sección transversal dividido por 1,2 para secciones rectangulares

I = momento de inercia de la sección transversal

G = módulo de elasticidad a cortante

L = longitud del elemento

En la matriz de flexibilidad de un elemento degradable los términos " d_i " y " d_j " son variables internas correspondientes a los daños debidos al agrietamiento por flexión en las rótulas " i " y " j " y " d_s " es la variable interna correspondiente al daño debido al agrietamiento por corte en la viga-columna-muro, ver figura 5.6.

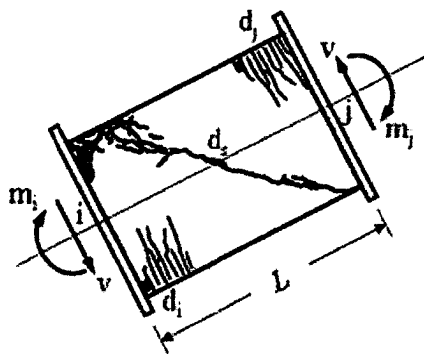


Figura 5.6 Representación de las variables de daño por flexión y corte [46].

Funciones de fluencia acopladas al daño por flexión

Las funciones de fluencia para el modelo de disipación concentrada a flexión, considerando endurecimiento cinemático e isótropo, se definen en función del esfuerzo efectivo para las rótulas “i” y “j” como:

$$f_i = \left| \frac{m_i}{(1-d_i)} - 0.8c_i\phi_i^p \right| - 0.2c_i p_i - m_{yi} \quad (5.11)$$

$$f_j = \left| \frac{m_j}{(1-d_j)} - 0.8c_j\phi_j^p \right| - 0.2c_j p_j - m_{yj}$$

Donde: “f_i” y “f_j” son las funciones de fluencia acopladas al daño de las rótulas “i” y “j”, “m_i” y “m_j” son los momentos flectores en las rótulas “i” y “j” respectivamente, “d_i” y “d_j” son las variables de daño para las rótulas inelásticas, las cuales permiten representar el agrietamiento del concreto por flexión.

Los parámetros de identificación de las funciones de fluencia c_i, c_j, m_{yi}, m_{yj} se calculan en función de las propiedades de la sección del elemento cuando son sometidas a flexión. La variable “p” representa la rotación plástica máxima acumulada durante toda la historia de carga para flexión.

Funciones de fluencia acopladas al daño por corte

La función de fluencia para el modelo de disipación distribuida a corte considerando endurecimiento cinemático e isótropo, se define en función del esfuerzo efectivo para la viga-columna-muro como:

$$f_s = \left| \frac{v}{(1-d_s)} - 0.6\phi_s^p \right| - 0.4c_s p_s - v_y \quad (5.12)$$

Donde: “f_s” es la función de fluencia acoplada al daño por corte, $v = \frac{(m_i + m_j)}{L}$ es la fuerza cortante en la viga-columna-muro, “d_s” es la variable de daño, la cual permite representar el agrietamiento del concreto por corte.

Los parámetros de identificación de las funciones de fluencia c_i, v_y se calculan en función de las propiedades de la sección cuando son

sometidas a corte. La variable “ p_s ” representa la rotación plástica máxima acumulada durante toda la historia de carga para corte.

Ley de evolución del daño por flexión

La energía de deformación complementaria se obtiene a partir de la ley de estado (5.9) como:

$$U^* = \frac{1}{2} \{m\}^T \{\phi - \phi^p - \phi_s^p\} = \frac{1}{2} \{M\}^T [F(d)] \{m\} \quad (5.13)$$

Derivando la energía de deformación con respecto al daño por flexión, se obtiene la tasa de restitución de energía para cada rótula inelástica.

$$G_i = \frac{\partial U^*}{\partial d_i} = \frac{L}{6EI(1-d_i)^2} m_i^2 \quad (5.14)$$

$$G_j = \frac{\partial U^*}{\partial d_j} = \frac{L}{6EI(1-d_j)^2} m_j^2$$

La función de daño se expresa como:

$$g(d) = G - R(d) \quad (5.15)$$

Siendo $R(d) = G_{cr} + q \frac{\ln(1-d)}{(1-d)}$ la función de resistencia al agrietamiento; donde: “ G_{cr} ” y “ q ” son parámetros de identificación de la función [10], y “ d ” la variable de daño.

Esta expresión de “ g ” indica que para que exista un incremento en el valor del daño, el momento debe ser tal que la tasa de restitución de energía alcance un valor crítico “ G_{cr} ” más un término de endurecimiento proporcional a la constante “ q ”. Considerando una función de daño para cada rótula se tiene que las leyes de evolución pueden ser expresadas como:

$$g_i = G_i - G_{cr} - q_i \frac{\ln(1-d_i)}{(1-d_i)} \quad (5.16)$$

$$\begin{cases} \dot{d}_i = 0 & \text{si } g_i(d_i) < 0 \text{ y } \dot{g}_i(d_i) < 0 \\ \dot{d}_i > 0 & \text{si } g_i(d_i) = 0 \text{ y } \dot{g}_i(d_i) = 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

$$g_j = G_j - G_{crj} - q_j \frac{\ln(1 - d_j)}{(1 - d_j)} \quad (5.18)$$

$$\begin{cases} \dot{d}_j = 0 & \text{si } g_j(d_j) < 0 \text{ y } \dot{g}_j(d_j) < 0 \\ \dot{d}_j > 0 & \text{si } g_j(d_j) = 0 \text{ y } \dot{g}_j(d_j) = 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

Ley de evolución del daño por corte

La función de daño por corte se expresa como:

$$g_s = G_s - G_{crs} - q_s \frac{\ln(1 - d_s)}{(1 - d_s)} \quad (5.20)$$

Donde: “ G_s ” es la tasa de restitución de energía para corte, “ G_{crs} ” y “ q_s ” son un parámetros de identificación de la función y “ d_s ” la variable de daño por corte.

Esta expresión de “ g_s ” indica, que para que exista un incremento en el valor del daño, la fuerza cortante; $\nu = \frac{(m_i + m_j)}{L}$ debe ser tal que la tasa de restitución de energía alcance un valor crítico “ G_{crs} ” más un término de endurecimiento proporcional a la constante “ q_s ”. La ley de evolución del daño para la viga-columna-muro degradable por corte puede ser expresada como:

$$\begin{cases} \dot{d}_s = 0 & \text{si } g_s(d_s) < 0 \text{ y } \dot{g}_s(d_s) < 0 \\ \dot{d}_s > 0 & \text{si } g_s(d_s) = 0 \text{ y } \dot{g}_s(d_s) = 0 \end{cases} \quad (5.21)$$

Finalmente la ley de estado, y las leyes de evolución del daño por corte y flexión constituyen la ley de comportamiento del modelo. Esta ley de comportamiento conjuntamente con las ecuaciones cinemáticas y las de equilibrio definen completamente el comportamiento de la estructura.

Capítulo 6

La e-ciencia y el Portal de Pórticos 3D

La filosofía clásica de los programas de elementos finitos conlleva al uso de sofisticadas herramientas y modelos matemáticos, para la evaluación de un amplio rango de problemas de la ingeniería estructural. Su concepción se basa en programas de aplicaciones generales, que comparten el mismo preproceso, proceso y postproceso, independientemente del tipo de análisis. Esto trae como consecuencia que su uso requiera de un personal altamente capacitado para el manejo y evaluación de resultados, es decir están diseñados para especialistas.

Actualmente está surgiendo la idea de una investigación abierta, que involucre al ciudadano común, no especialista, en la solución de problemas planteados en estudios científicos. A este nuevo modo de producción de conocimiento se le conoce como Ciencia Ciudadana [9]. Por lo tanto, la filosofía que sigue la presente tesis doctoral consiste en promover y proveer de herramientas que permitan ampliar el espectro de diseño en el uso de los elementos finitos, de manera que puedan estar al alcance tanto del personal especialista como técnico, todo esto sin poner en riesgo la capacidad tecnológica y científica.

Para lograr este objetivo es necesario hacer uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), utilizando su elemento más poderoso "Internet", ya que la capacidad de cálculo no debe depender del usuario, sino del poder de cómputo de un centro de computación de alto rendimiento. En tal sentido el usuario podrá acceder a la herramienta vía

Web usando una PC, portátil, tabletas o dispositivos móviles. De igual manera para una mayor simplicidad, es necesario desarrollar portales de aplicaciones específicas.

Por ejemplo, uno de los problemas de la ingeniería estructural es el colapso masivo de edificios bajo cargas sísmicas, este colapso se debe principalmente a deficiencias en los materiales o debilidades en el diseño y/o construcción. Muy probablemente existen centenares de miles de edificaciones en el mundo, miles de ellas en Venezuela que no son seguras y necesitan ser reforzadas. Por lo tanto, la identificación de estas estructuras inseguras es una tarea urgente. Uno de los procedimientos que pueden ser usados para el diagnostico de la seguridad de edificaciones existentes es la simulación numérica. Sin embargo, dada la magnitud del problema a resolver, este es un trabajo que no puede ser resuelto por un pequeño grupo de especialista, por el contrario debe ser solucionado por un grupo numeroso de ingenieros y técnicos localizados en cada zona a evaluar. Inicialmente para satisfacer esta necesidad se desarrolló en Venezuela, específicamente en la Universidad de Los Andes, el programa Portal de Pórticos 2D (sección 6.2), el cual es una herramienta que puede ser accedida via internet para la simulación numérica de pórticos planos de concreto armado.

Consecuentemente con el fin de proveer de herramientas con características de libre acceso, simples, y con capacidad tecnológica y científica de alto nivel, en esta tesis se propone el Portal de Pórticos 3D (sección 6.3). El cual constituye la primera aplicación de uso específico empleando el programa de elementos finitos PEEF. Este portal está diseñado bajo los mismos criterios del Portal de Pórticos 2D, pero permite la simulación de estructuras aporricadas tridimensionales de concreto armado.

La teoría y modelos matemáticos de los elementos finitos que sustentan ambos programas constituyen un aporte netamente venezolano, desarrollado por estudiantes y profesores de la Universidad de Los Andes (ULA) y de la Universidad Lisandro Alvarado (UCLA). En tal sentido para lograr una herramienta sencilla pero de alto nivel científico, fue necesario proponer una nueva teoría denominada Teoría del daño concentrado, la cual combina la mecánica de la fractura, la teoría del daño continuo, y el

concepto de rótula plástica. Las mismas fueron descritas en el capítulo 3 de la presente tesis.

6.1 Uso de las TIC en actividades científico técnicas

Las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) forman parte de la nueva cultura tecnológica, pues constituyen un factor de cambio de la sociedad actual. Las TIC se mueven al ritmo de los avances tecnológicos, y dentro de un mundo globalizado provocan continuas transformaciones en las estructuras económicas, sociales y culturales, permitiendo una redefinición radical del funcionamiento de la sociedad.

De todos los elementos que conforman las TIC, sin duda el más poderoso y revolucionario es Internet, ya que la información es accedida, procesada y consolidada mediante técnicas de representación del conocimiento y minería de datos por intermedio de interfaces WEB, con agentes y programas de búsqueda cada vez más inteligentes. El significativo poder de cómputo para simulaciones y las inmensas bases de datos accesibles a través de INTERNET, transforman a la red en el computador, y los recursos de la red se acceden a través del WEB.

En la actualidad la Tecnología de la Información y Comunicación (TIC) juega un papel importante en el desarrollo de las actividades científico-técnicas. Su utilización intensiva ha ido transformando a la actividad científico-técnica, convirtiendo a la computación para (y por) usuarios en una disciplina emergente que abre sus propios métodos y soluciones. Las TIC se constituyen en el eje central de la nueva "e-ciencia" al permitir el registro, la acumulación, el acceso a datos experimentales, facilitar tanto el modelado como la simulación de escenarios posibles y promover, dentro la comunidad académica, una nueva manera de relacionarse para la producción y disseminación del conocimiento científico, favoreciendo que un mayor número de usuarios tengan acceso a la investigación global para su manipulación y sus aplicaciones en las diferentes áreas de la sociedad.

Los requerimientos computacionales por parte de la comunidad científica para la resolución de problemas, son cada vez mayores y complejos. Como respuesta a esta necesidad se desarrollaron los clusters. Sin embargo, al existir un cambio en la manera como se crea y se difunde el conocimiento, surgen nuevos requerimientos como lo son el uso de

hardwares heterogéneos y la posibilidad de compartir recursos distribuidos geográficamente. Atendiendo a estas nuevas necesidades surge la tecnología Grid.

6.1.1 Tecnología Cluster [11]

Un cluster es definido como un grupo de computadores que trabajan en conjunto, de tal manera que, pueden ser vistos como un único computador. Los componentes de un cluster están comúnmente conectados a través de redes de área local, y son desplegados con el fin de mejorar el rendimiento y la disponibilidad que pueda proveer una única maquina.

Las aplicaciones paralelas escalables requieren: buen rendimiento, baja latencia, comunicaciones que dispongan de gran ancho de banda, redes escalables y acceso rápido a archivos. Un clúster puede satisfacer estos requisitos usando los recursos que tiene asociados a él. Los clústeres ofrecen las siguientes características a un costo relativamente bajo:

- Alto rendimiento.
- Alta disponibilidad.
- Alta eficiencia.
- Escalabilidad.

La tecnología clúster permite a las organizaciones incrementar su capacidad de procesamiento usando tecnología estándar, tanto en componentes de hardware como de software que pueden adquirirse a un costo relativamente bajo. Entre las aplicaciones que se les ha dado a los clusters está el de ejecutar cálculos intensivos, data mining, servidores de base de datos, servidores Web, ejecutar simulaciones y renderizar gráficos.

Los clústeres pueden clasificarse según sus características en:

- HPCC (High Performance Computing Clusters: clústeres de alto rendimiento).
- HA o HACC (High Availability Computing Clusters: clústeres de alta disponibilidad).
- HT o HTCC (High Throughput Computing Clusters: clústeres de alta eficiencia).

Alto rendimiento (HPCC): Son clústeres en los cuales se ejecutan tareas que requieren de gran capacidad computacional, grandes cantidades de memoria, o ambos a la vez.

Alta disponibilidad (HA): Son clústeres cuyo objetivo de diseño es el de proveer disponibilidad y confiabilidad. Estos clústeres tratan de brindar la máxima disponibilidad de los servicios que ofrecen.

Alta eficiencia (HT): Son clústeres cuyo objetivo de diseño es el ejecutar la mayor cantidad de tareas en el menor tiempo posible. Existe independencia de datos entre las tareas individuales.

Los clusters de aplicaciones científicas se suelen caracterizar por ser aplicaciones computacionalmente intensivas. Sus necesidades de recursos son muy importantes en almacenamiento y especialmente memoria. Requieren nodos y sistemas dedicados, en entornos HPCC y HT.

6.1.2 Tecnología Grid [18]

Actualmente surge un nuevo paradigma de la computación distribuida denominado Tecnología Grid. Su objetivo es permitir gestionar y distribuir la potencia de cálculo disponible, de tal forma que los usuarios se beneficien de la potencia de ordenadores infrautilizados que se encuentran dispersos geográficamente.

La idea del Grid es muy parecida a una red eléctrica:

- Cualquier hardware que tenga conexión a la red debe poder ser integrado al Grid.
- La conexión es provista en cualquier lugar.
- Altamente confiable (Todos los días a toda hora).
- Se comparten recursos (hardware, software, data, dispositivos de almacenamiento).
- Siempre existirá suficiente capacidad de cálculo.
- Es transparente al usuario.
- Simple.
- Disponible en cualquier momento.

Un Grid Computacional es una forma de computación distribuida que comprende coordinar y compartir recursos, aplicaciones, datos, almacenamiento o recursos de red entre organizaciones dinámicas y geográficamente distribuidas. Ofreciendo a las organizaciones beneficios

como el de aumentar su capacidad de cómputo y almacenamiento al compartir los recursos existentes y de esta manera ahorrar dinero evitando la adquisición de nuevos equipos.

El hardware de un grid presenta las siguientes particularidades:

- Es numeroso.
- Pertenece y es manejado por organizaciones y/o individuos con diferentes políticas de seguridad y distintas prácticas.
- Esta expuesto a fallas.
- Es heterogéneo.
- Está conectado por redes diferentes y a distintos niveles.
- Está esparcido geográficamente.

El software llamado middleware, es el encargado de coordinar todo este sistema entre organizaciones dinámicas y distribuidas geográficamente, denominadas Organizaciones Virtuales o VOs por sus siglas en ingles.

Finalmente la red Grid es un paso más allá de Internet, pues incorpora gran ancho de banda, alta velocidad de procesamiento, y bases de datos de gran tamaño con recursos disponibles tanto para la industria, como para los científicos como para los ciudadanos en general. La interconexión entre ordenadores usando la tecnología Grid permite a un número elevado de usuarios obtener información sin determinar a qué ordenador quieren conectarse.

6.1.3 Diferencia entre la tecnología Cluster y Grid [16]

La computación es un proceso en constante desarrollo y su historia ha demostrado una evolución tecnológica, de arquitecturas, softwares y aplicaciones. Los cluster proporcionan mayor poder de cómputo que una simple PC o estación de trabajo, permitiendo cálculos paralelos y distribuidos para un amplio rango de aplicaciones. Sin embargo dadas las nuevas tendencias, el próximo paso en esta evolución son los Grid computacionales.

La tecnología Grid se diferencia de los clusters en algunos aspectos, entre ellos se encuentran:

- Están distribuidos geográficamente.
- Son heterogéneos.

- Los recursos son compartidos entre diversas organizaciones.
- Son administrados por múltiples administradores, como consecuencia de esto se manejan diferentes políticas de uso.
- El acceso es transparente al usuario.
- Ofrecen recursos computacionales, capacidad de cálculo y de almacenamiento, sobre demanda.

6.2 Portal de Pórticos 2D

Dadas las nuevas herramientas, cada vez es menos necesario conocer los detalles de operación de un sistema de computación para poder utilizarlo. Por ello, la tendencia es que las aplicaciones científicas dispongan de una interfaz WEB que permite su manipulación y, sobre todo su ubicuidad de acceso. Esta facilidad tiene un importante beneficio adicional que es la popularización del uso de sofisticadas aplicaciones científicas mediante el uso de Portales.

6.2.1 Portales de cálculo [52]

Los portales son interfaces que permiten a las comunidades de usuarios acceder de forma segura, a las aplicaciones, a los datos, además permiten compartir y difundir los conocimientos. La utilidad misma de los portales como herramientas de interacción y producción de conocimiento ha ido cambiando la definición misma de portales y existe una amplia variedad. Los portales de aplicaciones científicas se constituyen en un importante tipo. Si bien los portales de aplicaciones científicas poseen algunas características similares a los sitios Web comerciales (autenticación, personalización del ambiente de trabajo, registro histórico de su actividad y ubicuidad de uso, por mencionar algunos de los más comunes), son sistemas mucho más sofisticados que van más allá de una simple interfaz WEB.

Entre, los servicios a los cuales se tiene acceso a través de este tipo de interfaces se pueden enumerar:

Seguridad en el acceso: Los usuarios son autenticados, bien sea a través de claves de acceso o certificados digitales.

Manejo de datos: Permite el acceso a una estructura de archivos, datos y metadatos, tanto locales como remotos. Igualmente permite la transferencia de archivos de datos entre los sistemas remotos y locales.

Ejecución y seguimiento de procesos: Permite ubicar y reubicar procesos en distintos sistemas computacionales remotos, así como el seguimiento del estado de su ejecución.

Servicios de información: Provee información sobre la disponibilidad de recursos (CPU, almacenamiento, comunicación entre los distintos nodos).

Servicios y herramientas de colaboración: algunos portales incorporan herramientas (videoconferencias, chats, Voz sobre IP) para que la comunidad pueda interactuar y compartir la información.

Servicios de visualización y análisis de datos: Permite analizar los datos a través de ambientes de visualización, minería de datos y/o análisis estadísticos de datos, compartiendo estos resultados con otros miembros de la comunidad.

Bajo estas características fue desarrollado el programa Portal de Pórticos (PDP), cuyo objetivo principal es proporcionar instrumentos teóricos, numéricos y computacionales para que puedan ser usados en la reducción del riesgo sísmico, mediante la simulación numérica del proceso de daño estructural y del colapso de edificaciones de concreto armado cuyos modelos matemáticos se basan en la Teoría del daño concentrado.

6.2.2 Características del Portal de Pórticos 2D [52]

El programa Portal de Pórticos es un programa de elementos finitos no lineal que ha sido diseñado para ser accedido exclusivamente a través de navegadores comerciales como Netscape o Explorer, el mismo se encuentra disponible en: <http://portaldeporticos.ula.ve>. El programa permite la simulación numérica del proceso de agrietamiento y posible colapso de pórticos de concreto armado sometidos a solicitaciones sísmicas o desplazamientos extraordinarios de sus apoyos. Estas simulaciones numéricas están basadas en modelos de comportamiento originales desarrollados en el marco de la Teoría del Daño Concentrado y que fueron descritos en capítulo 4 del presente trabajo.

Para su utilización se requiere que el usuario deba abrir una cuenta, digitalizar el pórtico, generar el archivo de entrada y colocarlo en su cuenta en el servidor ya que las simulaciones numéricas no se realizan en la computadora personal del usuario sino en el servidor de alto rendimiento.

Una vez realizado el análisis se accede a un post-procesador gráfico para visualizar los resultados.

La estructura general del portal está conformada por tres módulos principales: Preprocesador, Procesador y Postprocesador. Las pantallas principales correspondientes a cada módulo se muestran en la figura 6.1.

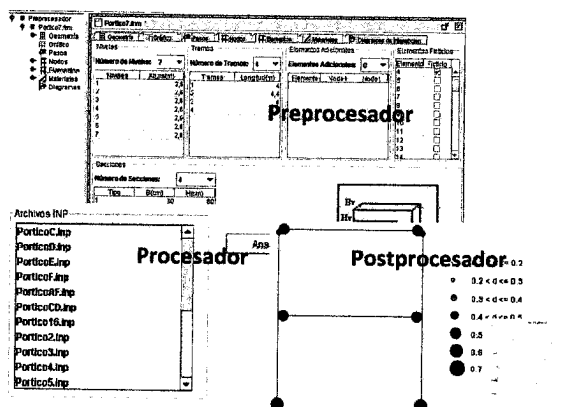


Figura 6.1 Pantallas que representan cada uno de los módulos del programa: Preprocesador, Procesador, Postprocesador.

Módulo Preprocesador: Permite la digitalización del pórtico y sus solicitaciones. Esta digitalización consiste en describir la geometría del pórtico, las solicitaciones, las propiedades de las secciones transversales, descripción de los materiales (concreto y el acero) utilizado.

Módulo Procesador: Es una interfaz con el programa de elementos finitos que se encuentra residenciado en el centro de cómputo de alto rendimiento. Este programa de elementos finitos permite el análisis inelástico, estático o dinámico y geoméricamente no lineal de la estructura. En el Procesador se accede a la lista de archivos que el usuario tiene en su cuenta y se escoge cual debe ser procesado mediante el programa de elementos finitos.

Módulo Postprocesador: Permite visualizar los resultados del análisis mediante gráficas de variable contra variable, variables contra tiempo y mapas de distribución de daños en cualquier instante del análisis, es decir, permite mostrar al usuario por medio de gráficos, distribuciones y animaciones el comportamiento de la estructura analizada.

6.2.3 Portal de Pórticos 2D en ambiente cluster

El programa Portal de Pórticos 2D en su versión cluster, es un programa de elementos finitos basado en la Web que sirve para el análisis de estructuras aporticadas de concreto armado, tal y como se describió en la sección anterior. Este es un portal de aplicación científica, por lo tanto fue desarrollado bajo las mismas condiciones que los portales de este tipo: Seguridad en el acceso, manejo de datos, ejecución y seguimiento de procesos, servicios de información, servicios y herramientas de colaboración, servicios de visualización y análisis de datos.

Al ser una interfaz grafica que puede ser accedida usando un navegador comercial (Explorer, Netscape, etc.) permite establecer una comunicación entre el usuario y un servidor remoto que contiene el programa principal de elementos finitos. Este servidor remoto se encuentra ubicado y administrado por CeCalCULA (Centro de Cálculo Científico de la Universidad de Los Andes). El programa está caracterizado por 3 componentes principales: Un Applet (programa que se ejecuta en la maquina del cliente incrustado en una página Web), el Servlet (que se ejecuta del lado del servidor), y los programas Fortran que ejecutan los cálculos.

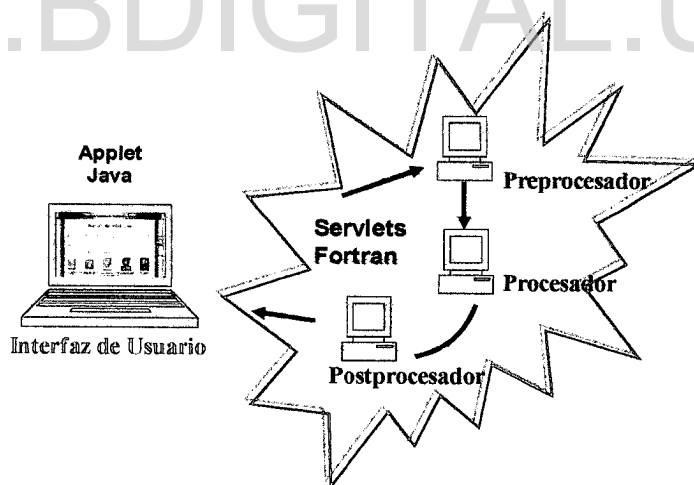


Figura 6.2 Arquitectura del Portal de Pórticos en ambiente cluster.

6.2.4 Portal de Pórticos 2D en ambiente Grid [16]

En la migración del programa Portal de Pórticos al ambiente Grid se mantiene la misma arquitectura usada en el ambiente cluster, es decir, el programa consta de tres módulos: Preprocesador, Procesador y

Postprocesador, con el fin de que el uso del Grid sea transparente al usuario mientras se obtienen los mismos resultados.

La migración del Portal se llevó a cabo en el Grid de la ULA. Para este desarrollo se utilizó el GridPort, este posee un conjunto de herramientas que permite el rápido desarrollo de portales Grid altamente funcionales que simplifican el uso de los servicios Grid subyacentes al usuario final. El GridPort comprende de un juego de portlets, un portlet puede definirse como un componente Web hecho en Java y manejado a través de un contenedor que procesa las peticiones de los clientes y produce contenido dinámico.

Una característica importante de los portlets bases del GridPort es que permite una única autenticación del usuario. También permiten la: personalización del perfil, administración del portal, creación de usuarios y grupos. Además de ser de código abierto y 100% gratis. El marco de este portal es GridSphere el cual provee un portal Web de código abierto.

Para la implementación del Portal de Pórticos en Grid se instaló en una misma máquina el GridPort y un User Interface utilizando el middleware gLite 3.0.1. Entre los requerimientos que debían ser cubiertos para lograr el funcionamiento del mismo estaban:

- Modificar el código del GridPort con la finalidad de que los trabajos sean enviados, monitoreados y recuperados utilizando los comandos propios del middleware de gLite.
- El portlet debe generar para el envío de los trabajos a través del portal un archivo JDL en el cual se especifica los archivos de entrada, de salida y los requerimientos para que el trabajo sea ejecutado utilizando el middleware gLite.
- Para el diseño de la interfaz del portal se utilizó la interfaz de entrada del portal original, con la diferencia que el usuario puede enviar varios trabajos de manera consecutiva al grid, otro cambio es la manera de recuperar los archivos de salida de los trabajos enviados.

El portal envía los archivos de entrada y el ejecutable del Portal de Pórticos al grid, de esta manera lo único que es necesario tener instalado en los nodos de trabajo es el compilador g95, lo que hace que pueda ser ejecutado sin la instalación de ningún otro componente adicional en los diferentes sitios del Grid. La arquitectura del Portal de Pórticos en el grid es mostrada en la siguiente figura:

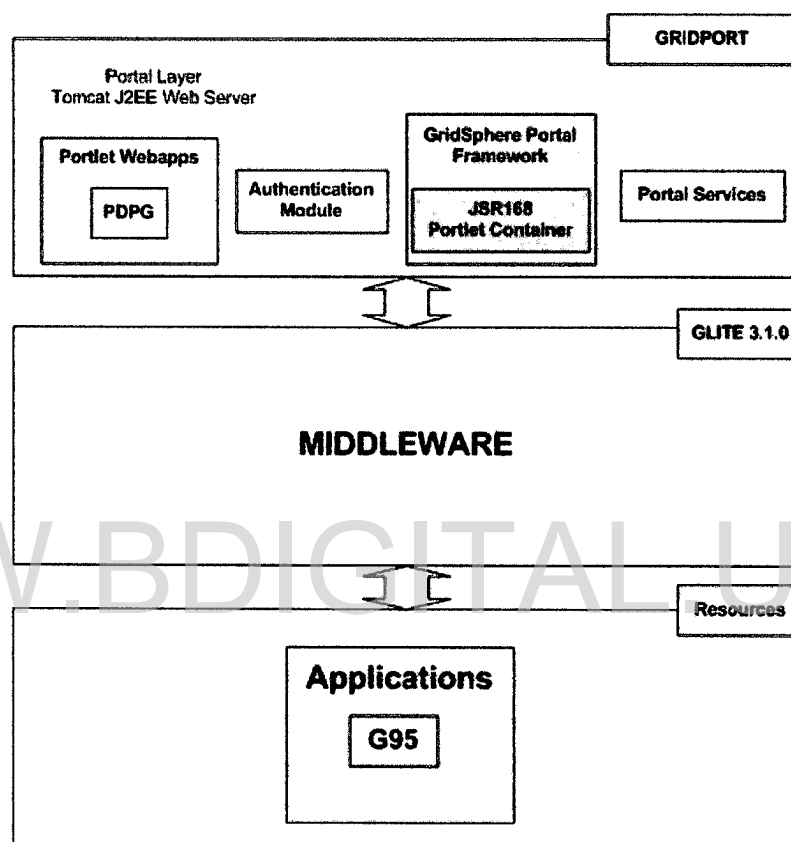


Figura 6.3 Arquitectura del Portal de Pórticos en Grid [16].

Para validar y mostrar las ventajas del uso del Portal de Pórticos en Grid se analizaron tres estructuras, tal y como se muestran en la figura 6.4.

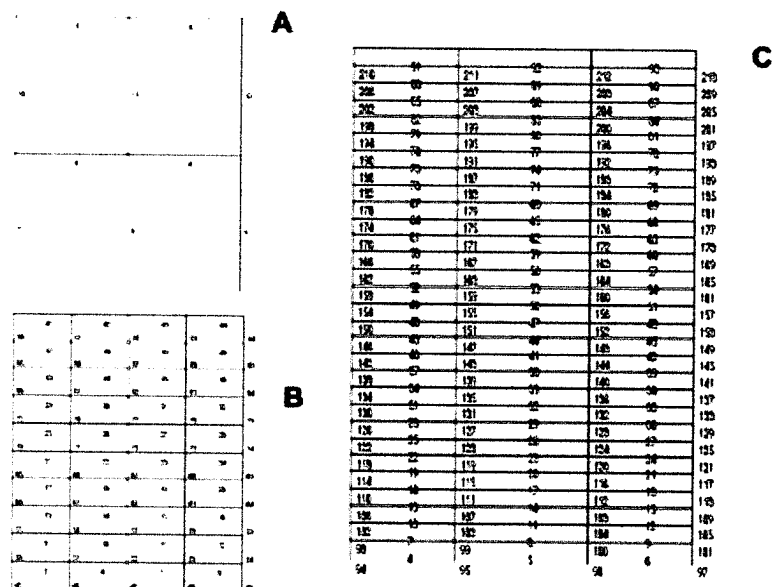


Figura 6.4 A) Pórtico de dos niveles. B) Pórtico de 10 niveles. C) Pórtico de 30 niveles.

El pórtico (A) está conformado por dos tramos y dos niveles. El pórtico (B) consta de cuatro tramos y 10 niveles, y el (C) de tres tramos y 30 niveles. En la siguiente tabla se indica el número total de elementos y nodos que posee cada pórtico.

Tabla 6.1 Número total de nodos y elementos para cada pórtico.

Pórtico	Número de elementos	Numero de nodos
A	10	9
B	90	55
C	210	124

Los pórticos se analizaron a través de la pagina Web <http://portaldeporticos.ula.ve> (versión cluster), y en los computadores pertenecientes al Grid de la ULA así como en sitios externos utilizando la VO EELA.

Ambiente Cluster

El cluster donde actualmente se ejecuta el Portal de Pórticos consta de 6 computadores, cada uno de ellos con las siguientes características: un procesador Pentium IV, 1GB de memoria RAM y un disco duro de 80GB. Tiene instalado Rocks 4.2 (Hallasan), el cual es una colección de

herramientas de software libre que permiten construir, manejar y monitorear cluster computacionales. Para manejar las colas se utiliza el Sun Grid Engine versión 5.3. Entre las aplicaciones utilizadas en el despliegue de este portal se encuentran: java, tomcat, y el postgresql como base de datos.

Ambiente Grid

El Grid de la ULA localizado en CeCalCULA tiene instalado como sistema operativo Scientific Linux versión 3.0.8. El middleware usado es gLite 3.1.0. En la tabla 6.2 se describe el hardware usado en los proyectos Grid.

Tabla 6.2 Hardware usado en los proyectos Grid.

Cantidad	Marca	Modelo	Memoria	Disco duro
4	SUN	V20z	4GB	147 GB
4	SUN	X4100	8GB	147 GB
8	White box	Pentium IV	512 MB	147 GB

Es importante destacar que al enviar un trabajo al Grid este no especifica los recursos en los cuales se va a ejecutar, por lo tanto al analizar los pórticos en diferentes sitios Grid del proyecto EELA, se usaron diferentes recursos y versiones del middleware.

En la tabla 6.1 se puede observar que el número de nodos y elementos se incrementa de un pórtico a otro, en consecuencia la comparación se hace en función del tamaño del problema a resolver. Cada uno de los pórticos fue ejecutado en el cluster de CeCalCULA, en el Grid ULA, y en el Grid Europeo usando la VO de EELA. En la tabla 6.3 se muestran los mejores resultados en tiempo de CPU para el análisis en Grid y cluster.

Tabla 6.3 Tiempo en CPU del análisis para cada pórtico.

Pórtico	Tiempo CPU Cluster	Tiempo CPU Grid ULA	Tiempo CPU Grid EELA
A (2 niveles)	437.743	236.770	193.800
B (10 niveles)	3101.666	1709.860	1732.794
C (30 niveles)	9885.170	4902.440	3442.150

Los resultados obtenidos al ejecutar cada uno de los pórticos, fueron satisfactorios, sin embargo observamos que a medida que se incrementa el número de elementos, el tamaño del problema a resolver es mayor, implicando aumento en los tiempos de ejecución. Se puede concluir que el tiempo en CPU del cluster es aproximadamente el doble del obtenido en el Grid ULA o Grid EELA, debido a las limitaciones en la capacidad de computo del cluster. Por otra parte, aunque existen algunas diferencias entre los resultados obtenidos entre el Grid ULA y el Grid EELA, estos son bastantes cercanos y representan una buena alternativa para la calculo de este tipo de problemas.

6.3 Portal de Pórticos 3D

El programa Portal de Pórticos 3D, es un programa de elementos finitos con el que se realizan modelos estructurales de sistemas aporticados de concreto armado, con el fin de hacer el análisis y evaluación del daño que puedan presentar las estructuras ante diferentes solicitaciones. Para hacer este análisis el programa de elementos finitos PEEF, cuenta con el elemento viga-columna 3D de concreto armado descrito en el capítulo 3, sección 3.2.

La diferencia principal del programa en desarrollo con respecto a los demás, radica en que este será un programa al que los usuarios podrán acceder via WEB, conectándose a un servidor remoto de alto rendimiento para realizar el modelado, simulación y análisis de resultados.

Las características más resaltantes del Portal de Pórticos 3D con respecto a los programas disponibles en el mercado son:

- El programa Portal de Pórticos 3D, es capaz de medir la densidad de agrietamiento y el daño que se genera en las estructuras. Programas avanzados como el SAP2000 permiten el cálculo de las rótulas plásticas, más no el daño por agrietamiento. Otros como ABAQUS son capaces de calcular la propagación de una grieta, sin embargo no logran adaptar la mecánica de la fractura al problema sísmico que se presenta en las estructuras de la ingeniería civil.
- El programa Portal de Pórticos 3D cuenta con una interfaz gráfica mucho más amigable que su predecesor Portal de Pórticos 2D. Actualmente, el usuario cuenta con cinco módulos para la creación del modelo. La forma en que los módulos están estructurados

favorecen la digitalización de la estructura, optimizando el tiempo empleado en la generación del modelo.

- Una ventaja de la interfaz grafica con respecto al Portal 2D, es que la geometría de la estructura es siempre observada en los distintos módulos, pues se cuenta con una vista 3D y una vista 2D para la visualización de cada uno de los pórticos.

6.3.1 Módulos del programa [36]

El programa Portal de Pórticos 3D cuenta con 5 módulos que permiten definir la geometría del modelo, realizar el análisis y revisar los resultados obtenidos. Estos módulos son (figura 6.5):

- Módulo Geometría: Permite definir la geometría del modelo.
- Módulo Secciones: Permite generar y asignar las secciones a cada uno de los elementos de la estructura.
- Módulo Solicitaciones: Permite definir el tipo de análisis que se desea realizar, así como las restricciones iniciales del modelo.
- Módulo Análisis: Permite realizar el análisis del modelo.
- Módulo Resultados: Muestra a través de gráficos y distribuciones el comportamiento de la estructura analizada.

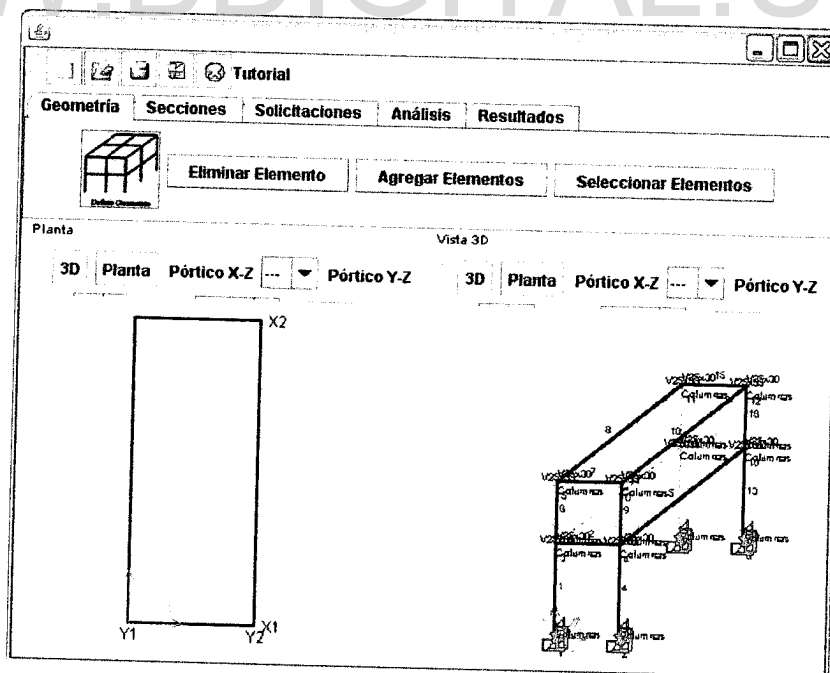


Figura 6.5 Pantalla principal del programa Portal de Pórticos 3D.

A continuación se describen cada uno de los módulos del programa:

Módulo Geometría

En este módulo se define la geometría del modelo, indicando el número de niveles y tramos de la estructura 3D. Se tiene acceso a tres opciones:

- Eliminar elementos.
- Agregar elementos.
- Seleccionar elementos

En la opción “eliminar elementos”, se despliega una ventana con un listado de todos los elementos que se crearon en la geometría. Aquí es posible seleccionar el/los elementos que se desean borrar. Esto podrá ser chequeado en las vistas que se mantienen activas durante todo el proceso. Si se quiere recuperar algún elemento bastará con volver a la ventana anterior y quitar la selección.

Por el contrario si lo que se desea es agregar algún elemento extra a la geometría de la estructura, por medio de la opción “agregar elementos” esto es posible, basta con indicar el número de elementos a agregar y los nodos i y j de los extremos correspondientes. Esto puede ser visualizado en la interfaz gráfica.

En la tercera opción, “seleccionar elementos”, se deben asignar todos los elementos a un conjunto, de manera de asignarle posteriormente áreas de acero, solicitaciones, propiedades de los materiales, etc. Es importante destacar que en esta opción, es posible agrupar elementos con idénticas secciones transversales, longitudes y solicitaciones. El programa muestra gráficamente los elementos agrupados en un subconjunto y los marcara en color rojo.

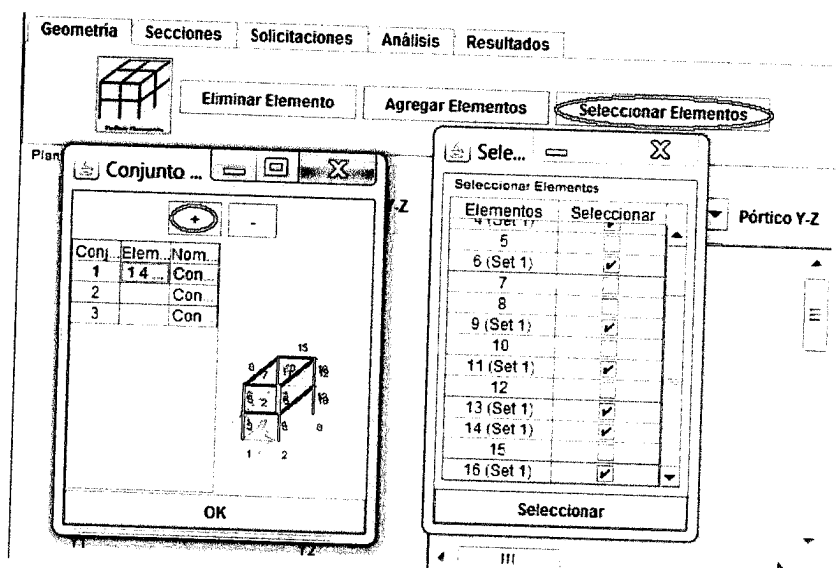


Figura 6.6 Módulo geometría.

Módulo Secciones

En este módulo se indican y asignan los diferentes tipos de secciones que poseen los elementos de la estructura (vigas, columnas o cualquier otro elemento diagonal que pertenezca al sistema aporticado). Es posible crear una nueva sección, modificarla o incluso eliminarla. Al definir una sección, se indica el nombre, tipo de sección, (columna, viga en X, viga en Y, etc.), características de los materiales, masa del elemento, y áreas de aceros longitudinales y transversales respectivamente.

El programa admite como mínimo dos (2) capas de acero longitudinal (Asinf-Assup), cuyo número mínimo de barras por capa es también de dos (2). Además es posible asignar hasta cinco (5) capas de acero intermedias, para tener un máximo de siete (7) capas para la sección transversal. La información referente a los estribos depende del tipo de estribo:

- Tipo A: Son estribos rectangulares con ganchos. Se definen según el número de ramas actuantes en cada dirección.
- Tipo B: Son estribos solapados, se definen por la longitud (perímetro) total del estribo.

Luego de suministrada la información el programa genera los diagramas de interacción de la sección, estos son los diagramas del Momento Crítico o de Agrietamiento (M_{cr}), Momento Plástico (M_p) y

Momento Último (M_u). La salida de este diagrama es de manera gráfica además de presentar tabulada la información de los puntos de dicho diagrama. También el programa presenta de manera similar el diagrama de Curvatura correspondiente a la carga axial. Los diagramas de interacción pueden ser modificados, esto con el fin de aumentar o disminuir la resistencia de los elementos de la estructura.

Se tiene además en este módulo la opción de “asignar sección”, aquí es posible asignar a cada conjunto de elementos la sección que se creó previamente.

Definir sección

Sección

Nombre de la sección: Columnas

Area:

b (cm)	h (cm)	Eje Yb
30.0	30.0	0.1 0

☒ Columna
☐ Viga X
☐ Viga Y
☐ Otro

Def. Materiales

Masas (Ton)s²/cm: 0.0006

Aceros Longitudinales

Capa	# Aceros	Area Total	x (cm)	y (cm)	Rec (cm)
AsInf	2	5.7		4.5	4.5
AsSup	2	5.7		25.5	4.5

Vista

Diagrama de la sección:

Estribos

Tipo	Rx	Ry	L (cm)	de (cm)	s (cm)	rv	rh
A	2	2	0	0.953	12.5	3.0	3.0

Tipo A: estribo con ganchos Tipo B: estribo solapado

Diag. Interacción Aceptar Cancelar

Figura 6.7 Módulo secciones.

Módulo Solicitaciones

En este módulo se definen las condiciones iniciales y las solicitaciones para el análisis del modelo. En él se encuentran tres opciones: Seleccionar nodos, Condiciones iniciales y la opción Pasos de análisis. En la primera opción, “seleccionar nodos”, es posible crear los conjuntos de nodos, y agruparlos de acuerdo a las solicitaciones o restricciones que le correspondan. Luego de generar los conjuntos de nodos se deben asignar a través de la opción “condiciones iniciales” las

restricciones del nodo o grupos de nodos del modelo. Dichas restricciones corresponden a los tres desplazamientos (U_x , U_y , U_z) y a las tres rotaciones (θ_x , θ_y , θ_z) posibles para el modelo 3D. Además en esta opción se puede cargar un archivo contentivo al daño previo en nodos. En la opción “pasos de análisis”, se realiza la configuración del paso. Se pueden realizar análisis estáticos imponiendo fuerzas o desplazamientos, y/o análisis dinámicos imponiendo un registro de aceleraciones. Las diferentes solicitaciones se describen indicando la duración de los pasos, el incremento inicial y la frecuencia. Estas solicitaciones se cargan sobre los conjuntos de nodos creados previamente. También es posible asignar cargas uniformemente repartidas sobre conjuntos de elementos.

Descripción del paso

Nombre: Paso1 Incremento Inicial (Seg): 1.00

Duración del Paso (Seg): 1.00 Frecuencia: 1

Fuerza en Elementos (Ton)

Fuerzas

Qx	Qy	Qz	Masas	Factor
0	0	-1993.0	0	1

Aceptar Cancelar

os... Aceleraciones (T...

Conj. Elementos	Fuerzas Elementos (Ton)
ConjElem3	Qz

Ok

Figura 6.8 Módulo solicitaciones.

Módulo Análisis

Luego de crear la geometría, las secciones, solicitaciones y pasos de análisis del modelo, se realiza el análisis de la estructura. El proceso de análisis puede ser monitoreado a través de una ventana emergente que indica el tiempo total y paso de análisis.

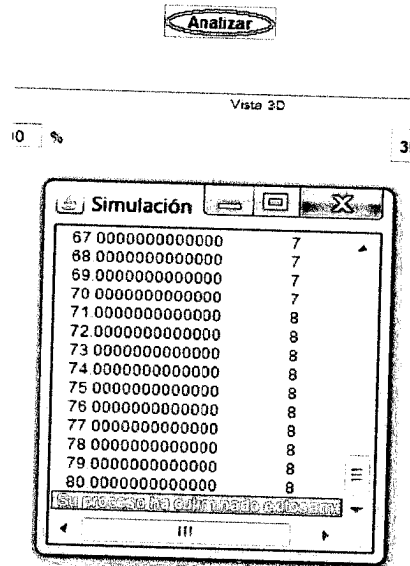


Figura 6.9 Módulo análisis.

Módulo Resultados

En este módulo se grafican y visualizan las variables calculadas durante el análisis. Se presentan tres opciones: Gráficas, Mapas de daño y Desplazamientos. En la primera opción se realizan las gráficas correspondientes a nodos o elementos. Las variables a graficar están constituidas por dos componentes "X" y "Y". Si se desean graficar para un nodo se visualizan las siguientes variables: tiempo, desplazamientos, rotaciones, fuerzas y momentos respecto a los ejes X, Y, Z respectivamente. Si se desea graficar para elementos aparecen los valores correspondientes a deformaciones, esfuerzos, variables internas y fuerzas termodinámicas. En la opción "mapa de daño", se muestra el daño de la estructura en función del tiempo. Y en la opción "desplazamientos" es posible ver gráficamente y tabulado el desplazamiento de la estructura en función del tiempo.

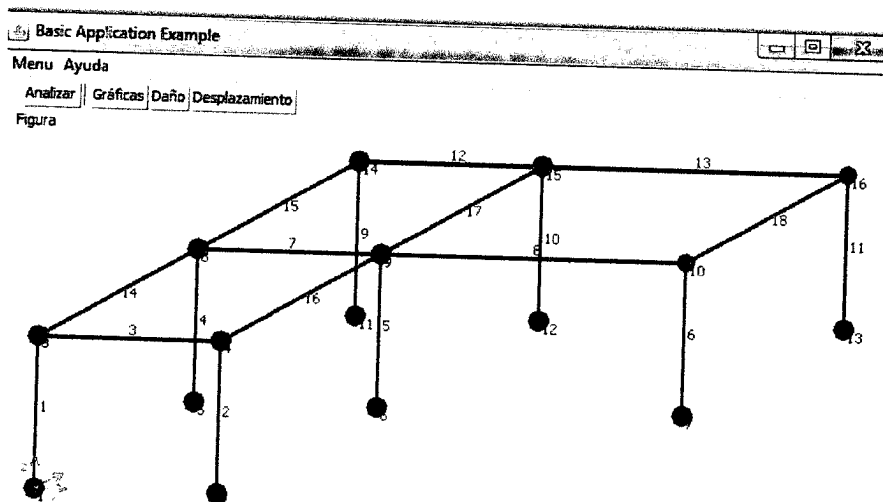


Figura 6.10 Módulo de resultados.

6.3.2 Estado actual y futuro del programa Portal de Pórticos 3D

Actualmente el programa funciona a nivel local, en PC sin conexión a Internet, y a través de los distintos módulos se puede definir la geometría, secciones transversales, aplicar solicitaciones, realizar el análisis y visualizar los resultados mediante las distintas interfaces del portal, es decir:

- Es posible digitalizar estructuras con formas irregulares en planta y elevación.
- Solamente se pueden definir secciones transversales cuadradas y rectangulares para las vigas y columnas, con hasta siete capas de acero.
- Las solicitaciones pueden ser estáticas y dinámicas. Las cargas son aplicadas sobre nodos y elementos.
- Los resultados son visualizados mediante graficas de variables contra variables tanto para nodos como elementos.
- El programa es capaz de generar y mostrar el mapa de daño en cada instante de tiempo para la estructura tridimensional, así como también por pórticos.

En líneas generales, todos estos pasos le permiten al usuario estimar el nivel de daño o colapso de la estructura, para así realizar una evaluación en función de los resultados obtenidos. En el anexo 3 se

presenta un tutorial, el cual constituye una guía paso a paso para modelar estructuras aporticadas de concreto armado en tres dimensiones.

Con el fin de ampliar el espectro de uso del programa, el siguiente paso es que la herramienta sea accedida exclusivamente a través de cualquier navegador comercial, y se pueda manejar desde PC, portátiles, tabletas o cualquier dispositivo móvil conectado a Internet. Para ello el programa deberá funcionar como cualquier portal de aplicación científica, que cumpla con las condiciones de seguridad en el acceso, manejo de datos, ejecución y seguimiento de procesos, así como servicios de información y herramientas de colaboración. Para su utilización se requerirá que el usuario abra una cuenta, digitalice el pórtico, genere el archivo de entrada y lo coloque en su cuenta en el servidor, ya que las simulaciones numéricas no se realizarán en la computadora personal del usuario sino en el servidor de alto rendimiento. Luego del análisis, el usuario podrá visualizar los resultados usando la misma interfaz gráfica y descargar la información que considere necesaria (gráficas, imágenes o archivos.txt). Igualmente dada la magnitud del problema a resolver el usuario tendrá la opción de analizar su estructura en ambiente cluster o en ambiente Grid.

Dadas las características y expectativas del Portal en Desarrollo, es posible adaptarlo al nuevo paradigma de producción de conocimiento científico conocido como Ciencia Ciudadana [9].

“Ciencia ciudadana es un modo de contribución al conocimiento científico a través de la participación de ciudadanos voluntarios y capacitados que generalmente no son especialistas en el tema a investigar y que contribuyen con su colaboración a la solución de interrogantes planteadas en estudios científicos. Un científico ciudadano es un voluntario que recolecta y o procesa datos como parte de una investigación científica”.

Una ventaja de los proyectos de Ciencia Ciudadana es que es una herramienta flexible que puede ser adaptada a varios propósitos y ambientes operativos, posee el potencial de cambiar las actitudes del público hacia la ciencia, fomentando una experiencia de educación informal.

El factor más importante para mantener un proyecto de este tipo es el de proporcionar una rápida retroalimentación sobre el estatus de los esfuerzos realizados por los voluntarios. Proporcionando espacios para que los participantes interactúen, asegurando que se sientan valorados y, a su vez, le den importancia a los objetivos del proyecto. Por lo tanto, deben existir foros de discusión en línea en donde los participantes pueden discutir el proyecto.

En general, ciudadanos alrededor de todo el mundo tendrán problemas en sus edificaciones si ocurre un movimiento sísmico, por lo tanto ellos pueden digitalizar las estructuras del área donde viven, hacer sus propias evaluaciones y enviar los resultados vía Internet, y entonces verán los datos combinados de miles de "ciudadanos científicos" llevando a cabo proyectos similares alrededor de todo el globo terráqueo. A partir de esta información equipos de especialistas podrán sacar conclusiones sobre la influencia de métodos de diseño, técnicas de construcción, tipos de materiales, tipo de suelo, etc.

Entonces la participación del "ciudadano científico" en el proyecto Portal de Pórticos 3D puede estar limitada de acuerdo al conocimiento y nivel de capacitación, consecuentemente ellos podrán contribuir en:

1. Digitalizar y evaluar estructuras aporticadas de concreto armado.
2. Colaborar en la revisión de contenidos, tutoriales y manuales de libre acceso.
3. Aportar fotografías sobre grietas, fallas parciales o colapso de edificaciones.

Aunque hay muchas organizaciones que operan proyectos de Ciencia ciudadana en Europa y Estados Unidos, aquí listo dos desarrolladas en Latinoamérica: La primera es llevada a cabo por el Instituto Nacional de ecología de México [41], la cual está enfocada en el monitoreo de especies de aves. Así mismo en Ecuador el Centro Jambatu de Investigación y Conservación de Anfibios [14], está recolectando datos sobre anfibios ecuatorianos.

Capítulo 7

Ejemplos Numéricos

Con el fin de validar PEEF y la implementación numérica de cada uno de los elementos finitos de la librería, así como mostrar sus posibles aplicaciones, a continuación se presentan algunas simulaciones numéricas realizadas, y cuyos resultados se comparan con los obtenidos en los ensayos experimentales o mediante los programas: Portal de Pórticos 2D y Abaqus.

7.1 Ejemplos numéricos para elementos Viga-Columna 2D de Concreto Armado (VC2DCA):

El primer grupo de ejemplos corresponden a ensayos experimentales encontrados en la literatura para el caso de análisis estáticos y pseudo-dinámico. El segundo grupo simula el proceso de daño de dos edificios reales considerando análisis dinámicos.

7.1.1 Simulación numérica de ensayos experimentales 2D, caso estático:

Simulación del ensayo de Abrams et al. [2]: Con el fin de evaluar la influencia de la variación de la fuerza axial en el comportamiento histerético a flexión en columnas de concreto armado, Abrams et al. ensayaron diez (10) especímenes de columnas sometidas a desplazamientos laterales reversibles. A continuación se muestran los resultados obtenidos usando PEEF para el caso de la simulación (C1), la cual consiste en un elemento vertical sometido a carga axial constante.

Las características geométricas se muestran en la figura 7.1. Para el esfuerzo de fluencia del acero (F_y) se usó el valor de 423Mpa, y para la resistencia última del concreto 42.3Mpa.

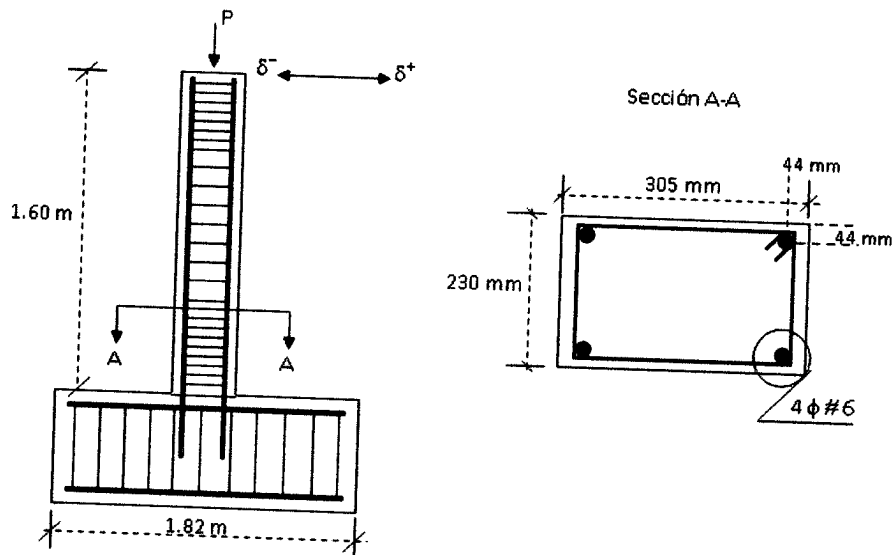


Figura 7.1 Características geométricas de la columna ensayada por Abrams et al [2].

En la simulación del ensayo (C1) la columna se sometió a una fuerza axial de compresión constante de 310KN y a una historia de desplazamiento lateral (δ), como se muestra en la figura 7.2.

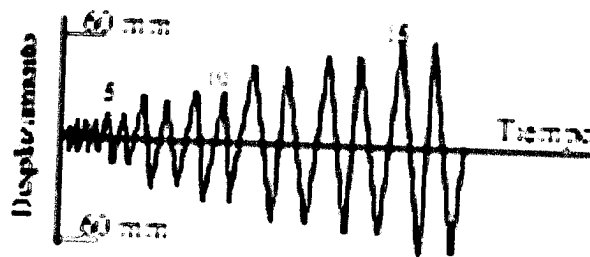


Figura 7.2 Historia de desplazamiento lateral [33].

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica usando el programa de elementos finitos (PEEF) y el programa Portal de Pórticos 2D, y el resultado experimental.

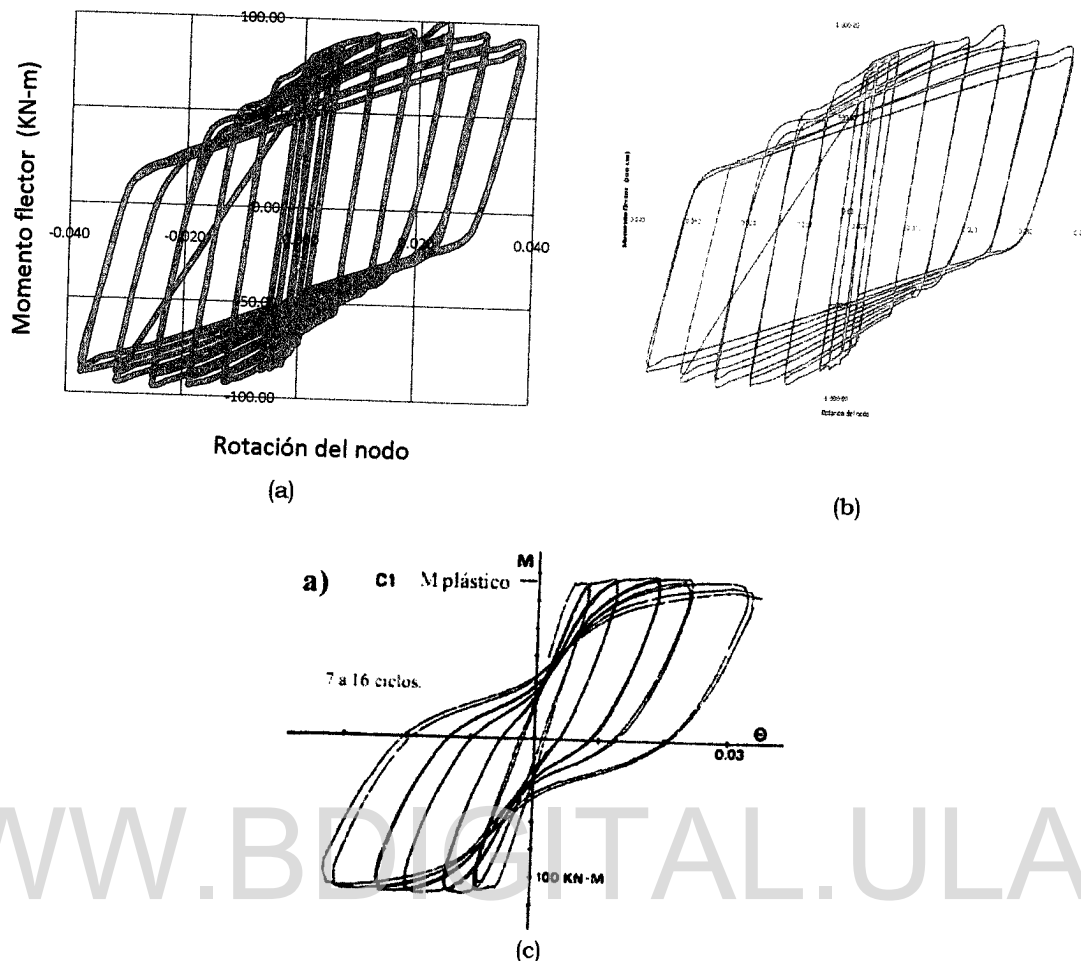


Figura 7.3 Grafica de la Rotación total del nodo vs. Momento flector (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con el Portal de Pórticos 2D, (c) Ensayo experimental [2].

En la figura 7.3 se puede observar que los resultados obtenidos con PEEF son bastante similares a los de la simulación numérica usando el programa Portal de Pórticos 2D, a su vez también existe una buena semejanza con la grafica experimental del ensayo.

Simulación del ensayo de Bertero et al. [5]: Para conocer el comportamiento histerético de elementos en voladizo Bertero et al. ensayó varios especímenes de vigas en volado con diferentes secciones transversales y longitudes. Con el fin de verificar la correspondencia entre los resultados obtenidos con PEEF y el programa Portal de Pórticos se seleccionó el ensayo experimental (R3) para la simulación.

Esta simulación consiste en una viga en volado con longitud de 1.5875 metros, empotrada en uno de sus extremos y sometida a desplazamientos histeréticos en el extremo libre. Los detalles de la sección transversal, sus características geométricas y la historia de desplazamientos aplicados se muestran en la figura 7.4.

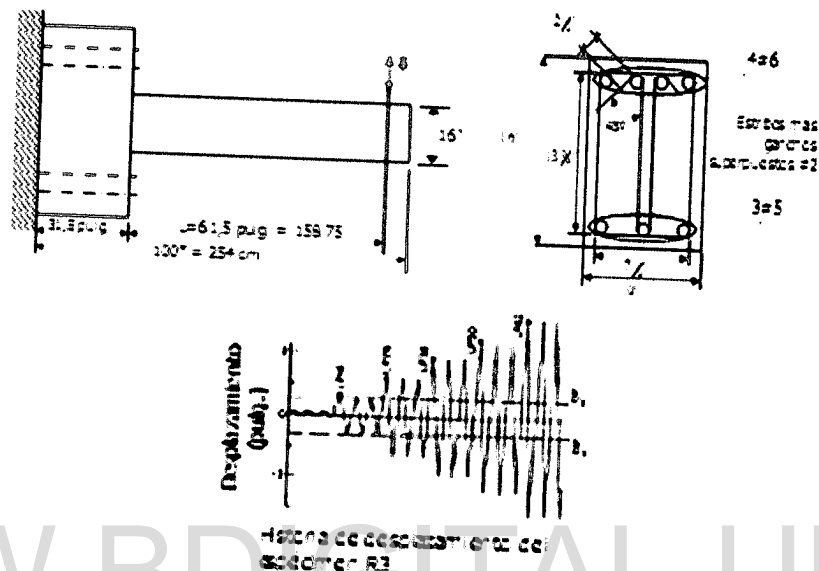
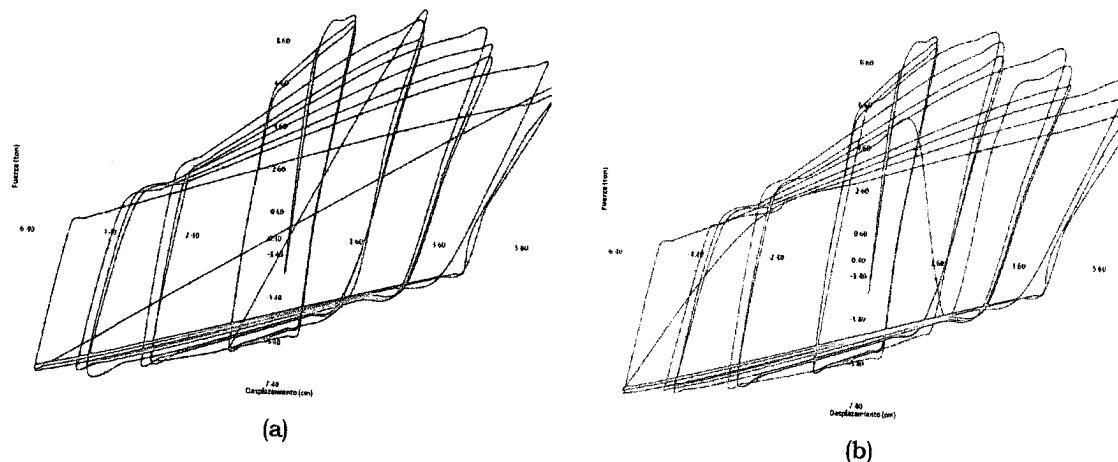
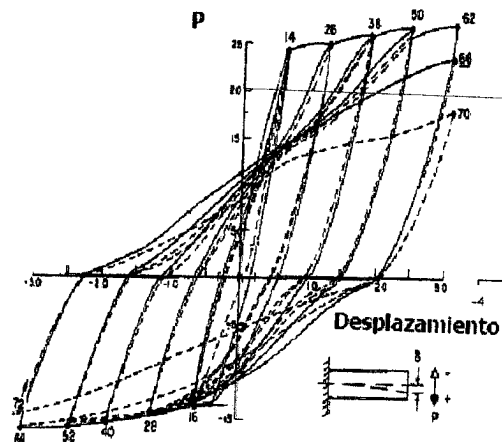


Figura 7.4 Características Geométricas e historia de desplazamientos [33].

En la figura 7.5 se muestra los resultados obtenidos de la simulación numérica usando PEEF y el programa Portal Pórticos. Las graficas muestran la curva de comportamiento fuerza-desplazamiento para el nodo libre de la viga.





(c)
Figura 7.5 Gráfica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo libre (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con el Portal de Pórticos, (c) Ensayo experimental [5].

Simulación del ensayo de Vecchio et al. [53]: El análisis corresponde a un pórtico construido a escala real, de un tramo, cuya luz es de 3500 mm, y dos niveles de entrepiso. El primer nivel posee una altura de 2200 mm, mientras que la altura del segundo nivel es de 2000 mm. Los detalles de las secciones y del pórtico son dados en la figura 7.6. Se usó para la resistencia del concreto 30 Mpa = 305.91 Kg/cm² y para la resistencia del acero 418 Mpa = 4262.35 Kg/cm².

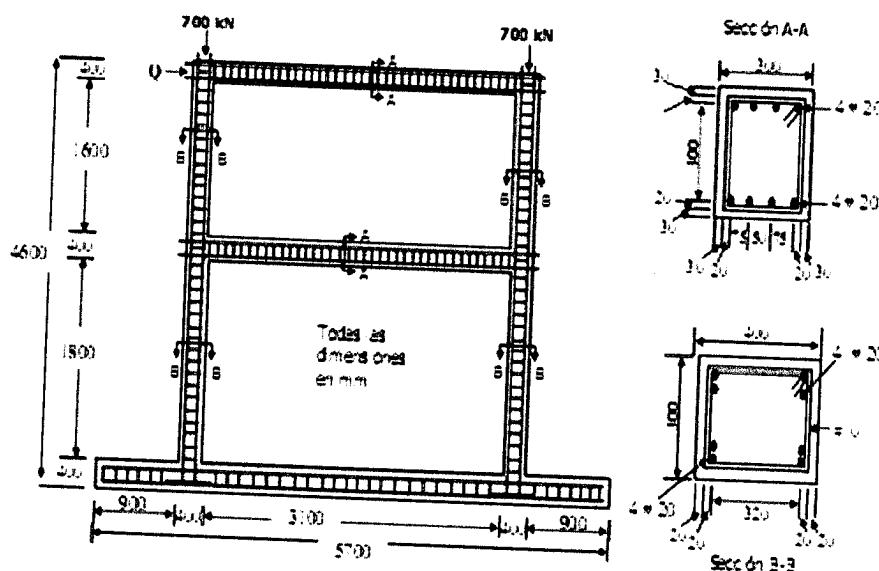
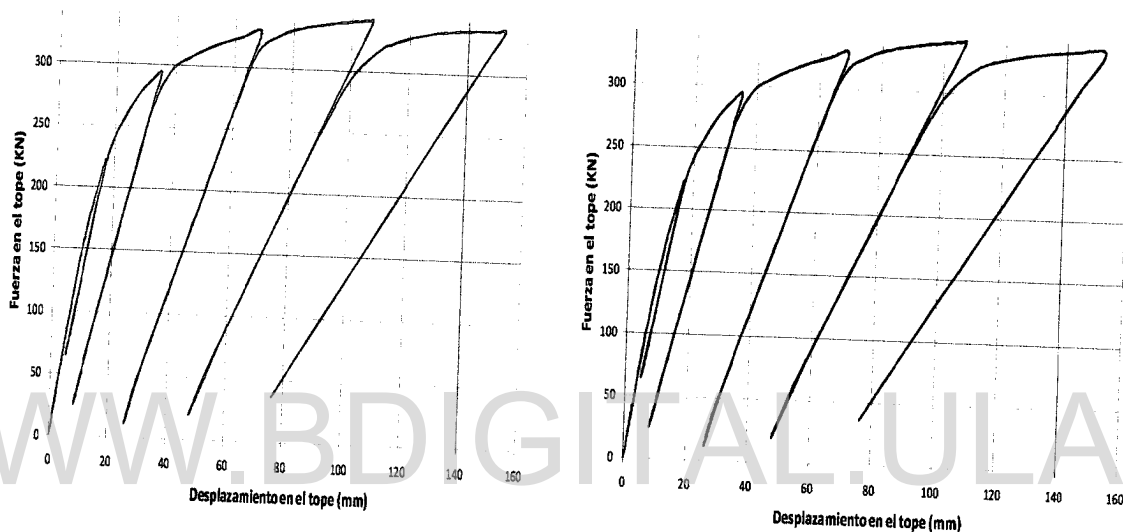


Figura 7.6 Características geométricas del pórtico ensayado por Vecchio et al [53].

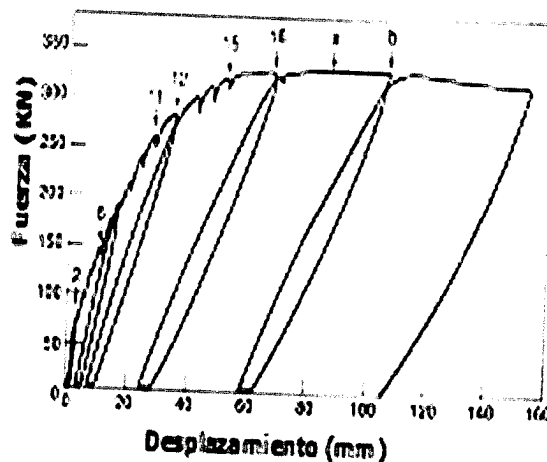
El pórtico analizado se sometió a cargas axiales constante de 700KN en cada columna, combinada con una carga lateral aplicada monotónicamente en la viga del nivel superior del pórtico hasta llegar a su capacidad última.

En la figura 7.7a y 7.7b se muestra con una buena aproximación la respuesta carga-deformación del pórtico usando PEEF y el programa Portal de Pórticos respectivamente. La figura 7.7c representa los resultados obtenidos experimentalmente.



(a)

(b)



(c)

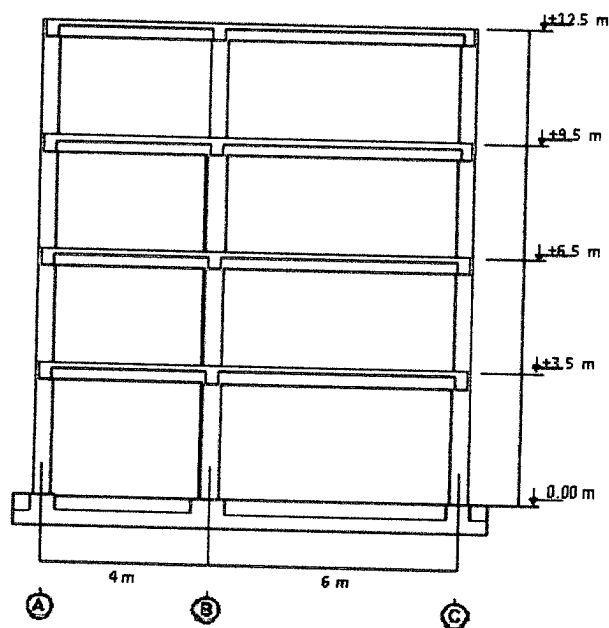
Figura 7.7 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento en el tope del pórtico (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con el Portal de Pórticos 2D, (c) Ensayo experimental [53].

7.1.2 Simulación numérica de un ensayo experimental 2D, caso pseudo-dinámico:

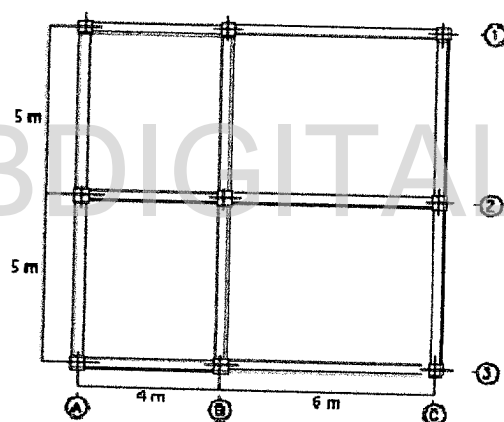
Prueba experimental de un pórtico de concreto armado en Elsa [42,47]:
La estructura aporticada se corresponde a una prueba experimental de un edificio de concreto armado sometido a un acelerograma artificial, que se desarrolló en el Laboratorio Europeo para la Evaluación Estructural (ELSA), en Ispra, Italia. La primera prueba consistió en imponer el desplazamiento derivado del acelerograma artificial, y al cual se le denominó sismo de bajo-nivel. En la segunda prueba se multiplicó por 1.5 el acelerograma correspondiente, denominándose sismo de alto-nivel.

El modelo se fijó al piso de reacción y las cargas se aplicaron mediante un controlador pseudo-dinámico a través de la acción de un gato hidráulico entre la estructura y el muro de reacción. Las pruebas llevadas a cabo de acuerdo a este método pseudo-dinámico son ejecutadas en una escala de tiempo extendida.

La estructura analizada corresponde a un edificio de cuatro pisos. Las dimensiones en el plano son 10m*10m, medidos desde el eje de la columna. La altura de entrepiso es 3.0m, excepto el primer piso con 3.5m, como se muestra en la figura 7.8a. La estructura es simétrica en una dirección (ver figura 7.8b), con dos longitudes iguales de 5m, mientras que en la otra dirección es ligeramente irregular debido a las diferentes longitudes de 6m y 4m respectivamente.



(a)



(b)

Figura 7.8 a) Vista lateral de los pórticos, b) Vista en planta de la estructura [47].

Todas las columnas tienen sección transversal cuadrada con 400mm de lado, como se muestra en la figura 7.9a, excepto las columnas internas las cuales tienen 450mm*450mm (ver figura 7.9b). Todas las vigas tienen sección transversal rectangular, con altura total de 450mm y ancho de 300mm como se muestra en la figura 7.10.

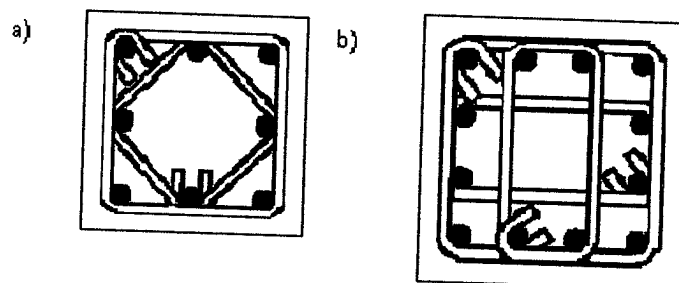


Figura 7.9 Sección transversal para las columnas a) externas b) Internas [47].

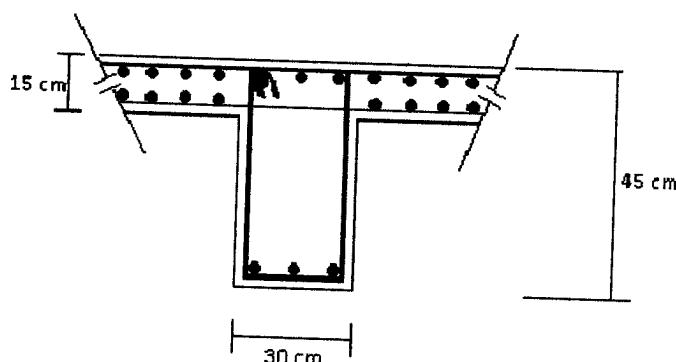


Figura 7.10 Sección transversal de las vigas de la estructura [47].

El diseño preliminar fue llevado a cabo de acuerdo con el Eurocódigo 2 y 8, suponiendo cargas típicas (Carga viva adicional 2.0 KN/m^2 , para representar piso concluido y particiones, y carga viva 2.0 KN/m^2), y alta sismicidad (aceleración pico del suelo $0.3g$, suelo tipo B, factor de importancia=1).

Las propiedades mecánicas del concreto y de los aceros correspondientes a la estructura en estudio se definen a continuación:

- Resistencia del concreto (f'_c , en Kg/cm^2) = 250.0
- Esfuerzo de fluencia (F_y , en Kg/cm^2) = 6800.0
- Esfuerzo ultimo del acero (f_{su} , en kg/cm^2) = 4500.0
- Esfuerzo de fluencia del acero del refuerzo Transversal (f_{yh} , en Kg/cm^2) = 4200.0

La historia de desplazamientos impuestos a cada nivel se muestra en la figura 7.11. Estos desplazamientos corresponden a los resultados experimentales obtenidos en Elsa, para el sismo de bajo-nivel.

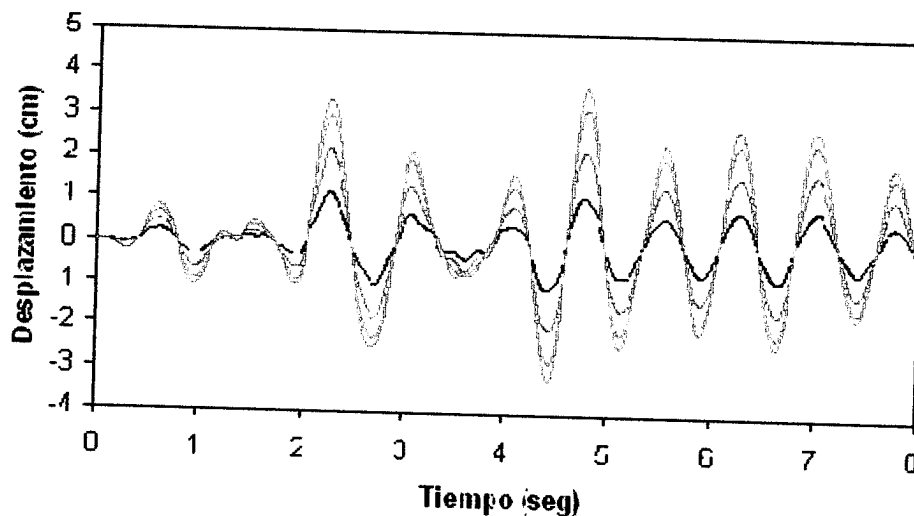


Figura 7.11 Historia de desplazamiento aplicada a la estructura, sismo de bajo nivel [47].

En la gráfica 7.12 se muestran la historia de tiempo vs. el cortante basal, tanto experimentalmente como la simulación numérica, y se puede observar la perfecta correlación entre ambos resultados.

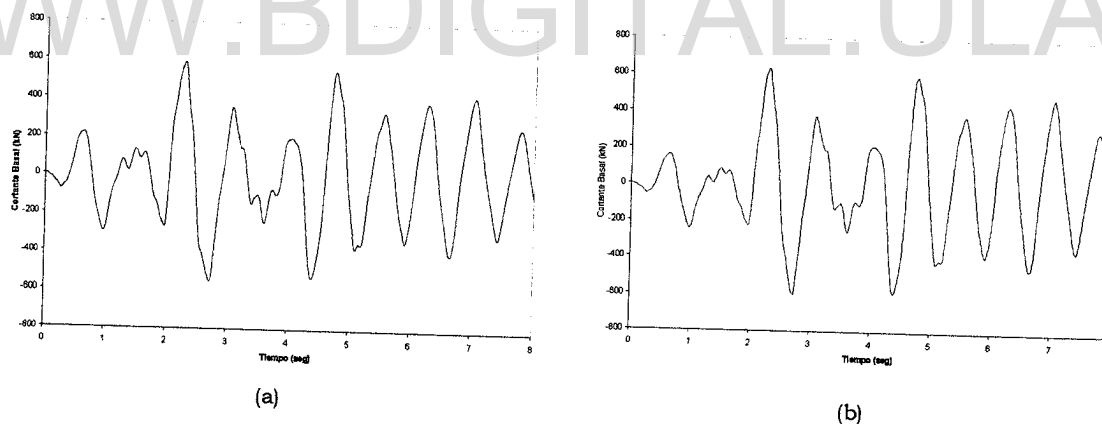


Figura 7.12 Gráfica Cortante basal vs. Tiempo (a) Ensayo experimental [42], (b) Simulación numérica usando PEEF.

A continuación se observa la buena correlación entre los resultados experimentales y los que son producto de la simulación numérica para el caso del cortante basal vs. el desplazamiento en el tope, como se muestra en la figura 7.13.

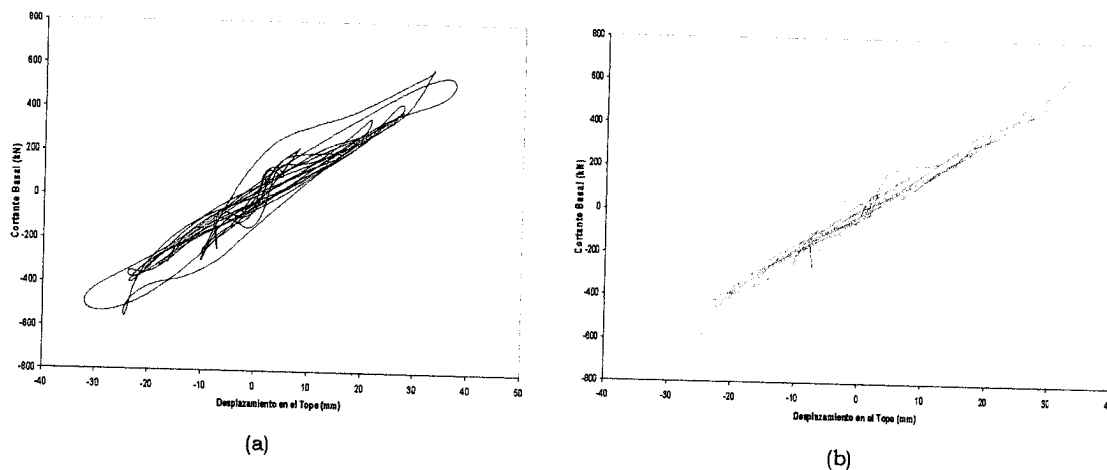


Figura 7.13 Grafica Cortante basal vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental [42], (b) Simulación numérica.

A continuación se observan las gráficas experimentales producidas en ELSA y sus correspondientes de la simulación numérica. Para el caso donde se impuso la misma historia de desplazamiento para cada piso que se generó experimentalmente, pero para el sismo de Alto-nivel, el cual se obtuvo de multiplicar por 1.5, el acelerograma correspondiente.

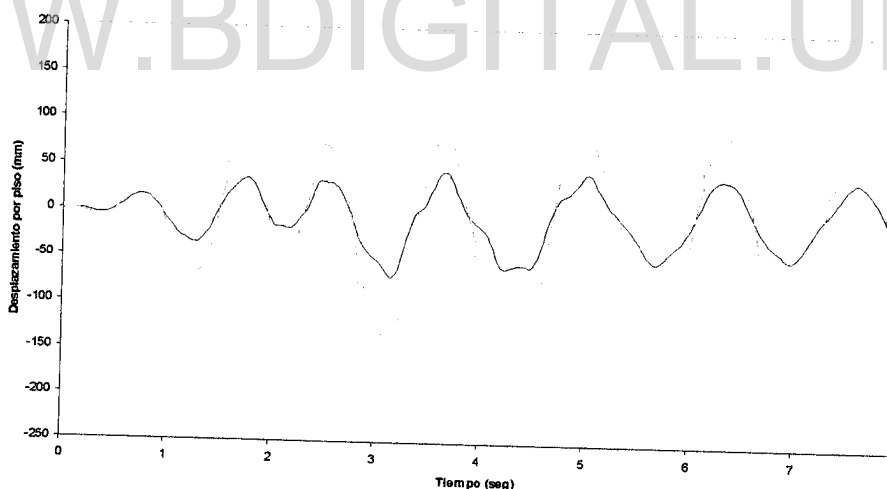
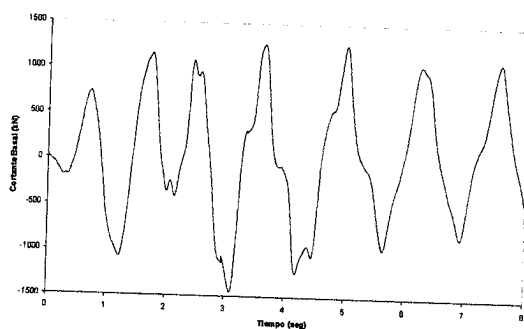
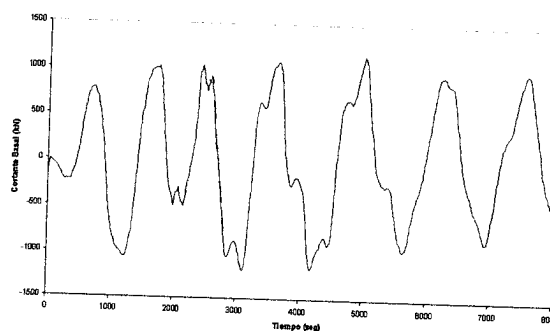


Figura 7.14 Historia de desplazamiento aplicada a la estructura, sismo de alto nivel [47].

Igualmente para el caso del sismo alto-nivel, se puede observar la buena concordancia de los resultados experimentales del edificio de cuatro pisos realizado en ELSA, con las gráficas que son producto de la simulación numérica, en los casos de la historia de tiempo vs. cortante basal, que se muestran en las figuras 7.15.



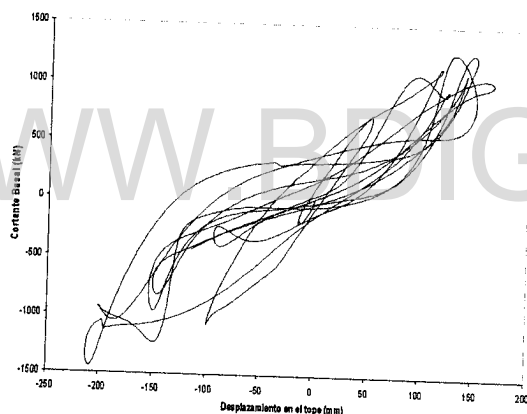
(a)



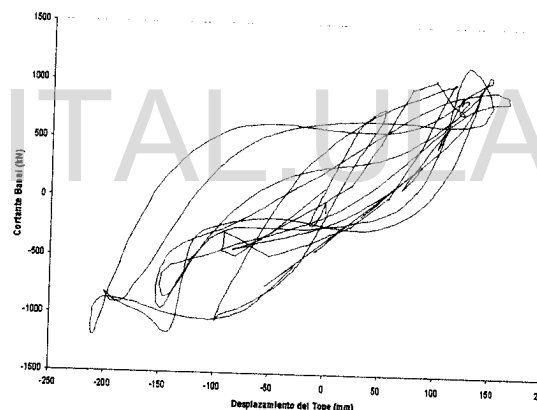
(b)

Figura 7.15 Grafica Cortante basal vs. Tiempo (a) Ensayo experimental [42], (b) Simulación numérica usando PEEF.

Así mismo se observan los resultados experimentales y los obtenidos de la simulación numérica para el caso del cortante basal vs. el desplazamiento en el tope, como se muestra en la figura 7.16.



(a)



(b)

Figura 7.16 Grafica Cortante basal vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental [42], (b) Simulación numérica usando PEEF.

7.1.3 Simulación numérica de dos edificios reales 2D, caso dinámico:

Con el fin de mostrar una de las posibles aplicaciones del elemento finito Viga-Columna 2D de Concreto Armado (VC2DCA), se muestra a continuación la simulación numérica de dos edificios reales, sometidos a un registro de aceleraciones. En estas simulaciones se persigue evaluar el

comportamiento del edificio ante el sismo más probable según su zona de construcción, y a través del mapa de daño determinar su comportamiento.

El primero pertenece a un edificio diseñado y construido en la última década, por lo tanto se espera un buen comportamiento. El segundo corresponde a la estructura "Tipo" de escuelas y liceos que construyó el Ministerio de Obras Públicas de Venezuela en la década de los '70, y de la cual se tienen antecedentes de un mal desempeño estructural durante el sismo de Cariaco de 1997.

Simulación numérica del edificio Los Chaguaramos: El edificio analizado se encuentra ubicado en la av. Urdaneta, Municipio Libertador, Mérida, Venezuela. Corresponde a un edificio residencial aporticado de concreto armado de 8 pisos de altura.

Para el análisis dinámico se utilizó un acelerograma generado artificialmente "Z5S2GB2", con una duración de 29 seg. La selección del sismo se basó en la Norma COVENIN 1756-98 (Rev. 2001) donde,

Z5: Según el mapa de zonificación, para Mérida, Municipio Libertador le corresponde zona 5.

S2: Forma espectral tipificada de acuerdo al terreno de fundación.

GB2: Clasificación de la edificación según el uso ("Edificación de uso público o privado, de baja ocupación menos de 3000 personas").

A continuación se presentan las tablas con las características mecánicas y geométricas de cuatro pórticos del edificio, con sus respectivos resultados, esto es, mapa de daño y una grafica desplazamiento tiempo de uno de los nodos del tope. Es importante destacar que estos pórticos fueron los que presentaron mayor daño al final del análisis.

Secciones referidas al tipo de columnas:

Tabla 7.1 Tipos de columnas.

Col	N1	N2 = N3	N4	N5 = N6 = N7	NT
B-4, B-6, C-4, D-4, E-3, E-4, E-5, E-6	C-1	C-2	C-2	C-4	C-6
B-3, C-3, C-5, C-6, C-7,	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6

D-3, D-5, D-6, E-1, E-7, G-6, G-7					
B-2, B-5, B-7, C-2, C-8, D-7, F-3, F-4	C-3	C-4	C-5	C-6	C-6
B-8, D-1, D-8, E-8, F-1	C-3	C-5	C-6	C-6	-

Áreas de acero:

Tabla 7.2 Áreas de acero para columnas de 4 ramas.

Col	Sección	Capa 1(cm ²)	Capa 2(cm ²)	Capa 3(cm ²)	Capa 4 (cm ²)
C - 1	60x60	40.54	10.13	10.13	40.54
C - 2	60x50	40.54	10.13	10.13	40.54
C - 3	60x50	31.83	5.70	5.70	31.83
C - 4	60x40	40.54	10.13	10.13	40.54
C - 5	60x40	31.83	5.70	5.70	31.83
C - 6	60x40	14.41	5.70	5.70	14.41

Características:

- Resistencia del concreto: 210 kg/cm².
- Recubrimiento: Rv = 2.5 cm., Rh = 2.5cm
- Separación de estribos en la zona de confinamiento: 12 cm.
- Estribo ($\phi=3/8"$) tipo A de dos ramas para vigas.
- Estribo ($\phi=3/8"$) tipo A de cuatro ramas para columnas.

Pórtico 1

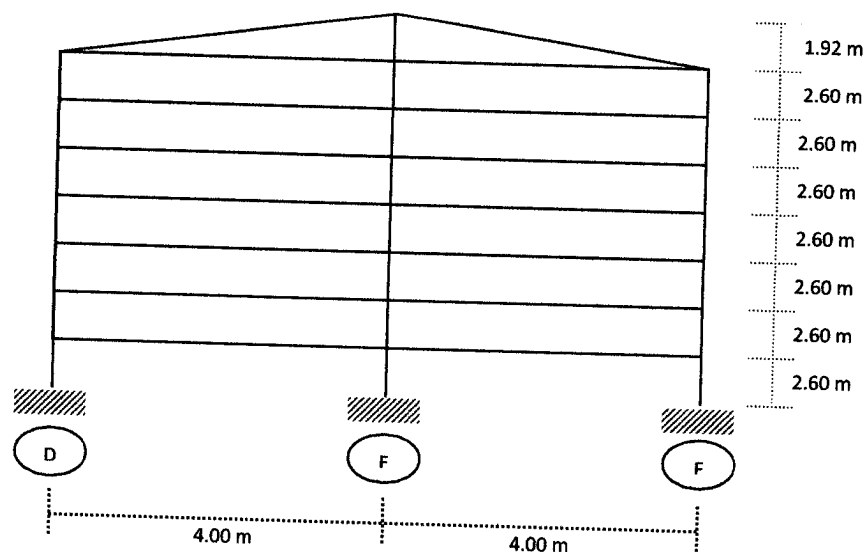


Figura 7.17 Características geométricas del pórtico 1.

La carga sobre las vigas son:

- V: 30x60 Carga distribuida = 0.0360 tn/cm 1-6 Nivel
V: 30x70 Carga distribuida = 0.0360 tn/cm 7 Nivel
V: 20x30 Carga distribuida = 0.0310 tn/cm Techo

Tabla 7.3 Áreas de acero en vigas del pórtico 1.

Tramo	D-E(i,j)		E-F(i,j)	
V1: Ass	25.34	25.34	25.34	25.34
V1: Asi	25.34	25.34	25.34	25.34
V2: Ass	25.34	25.34	25.34	25.34
V2: Asi	25.34	25.34	25.34	25.34
V3: Ass	25.34	25.34	25.34	25.34
V3: Asi	25.34	25.34	25.34	25.34
V4: Ass	25.34	25.34	25.34	25.34
V4: Asi	25.34	25.34	25.34	25.34
V5: Ass	15.83	15.83	15.83	15.83
V5: Asi	15.83	15.83	15.83	15.83
V6: Ass	15.83	15.83	15.83	15.83
V6: Asi	15.83	15.83	15.83	15.83
V7: Ass	11.40	11.40	11.40	11.40
V7: Asi	8.55	8.55	8.55	8.55
VT: Ass	3.96	3.96	3.96	3.96
VT: Asi	3.96	3.96	3.96	3.96

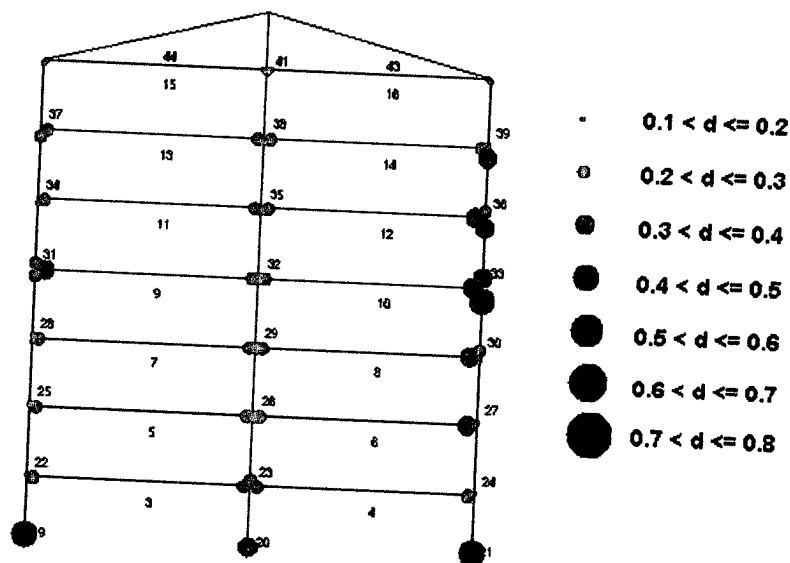


Figura 7.18 Mapa de daño del pórtico 1.

El máximo daño del Pórtico 1 se presentó en las columnas de planta baja. La magnitud del daño alcanzado fue de 0.44. En las vigas el máximo daño fue de 0.31.

Pórtico 6

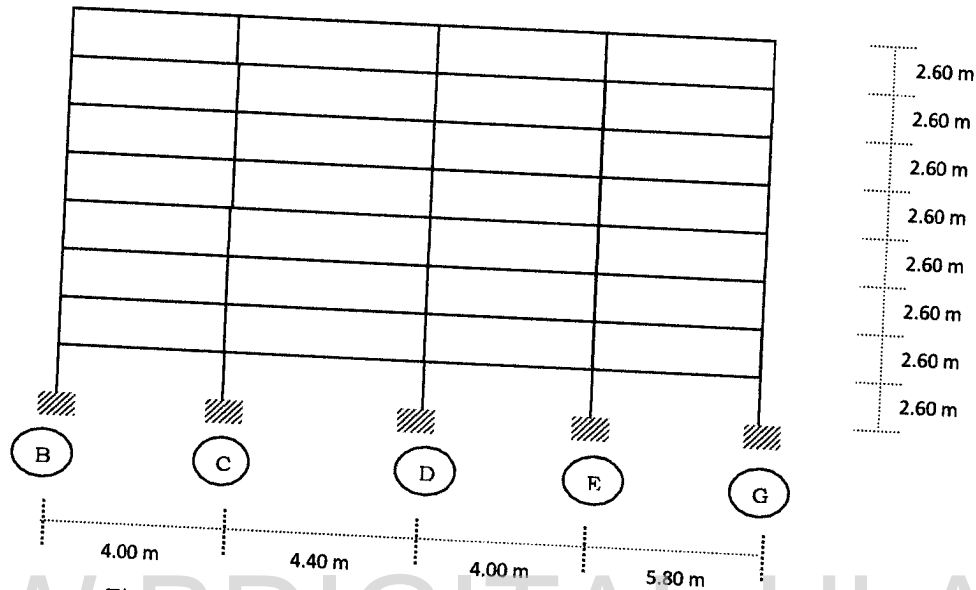


Figura 7.19 Características geométricas del pórtico 6.

La carga sobre las vigas es:

- V: 30x60 Carga distribuida = 0.0350 tn/cm 1-6 Nivel
- V: 30x70 Carga distribuida = 0.0350 tn/cm 7 Nivel
- V: 30x60 Carga distribuida = 0.0330 tn/cm Techo

Tabla 7.4 Áreas de acero en vigas del pórtico 6.

Tramo	B-C(i,j)		C-D(i,j)		D-E(i,j)		E-G(i,j)	
V1:Ass	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V1:Asi	30.40	15.20	15.20	30.40	30.40	15.20	15.20	30.40
V2:Ass	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V2:Asi	30.40	15.20	15.20	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V3:Ass	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V3:Asi	30.40	15.20	15.20	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V4:Ass	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V4:Asi	30.40	15.20	15.20	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40
V5:Ass	20.27	18.68	18.68	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10
V5:Asi	17.10	8.55	8.55	17.10	17.10	8.55	8.55	17.10

V6:Ass	20.27	18.68	18.68	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10
V6:Asi	17.10	8.55	8.55	17.10	17.10	8.55	17.10	17.10
V7:Ass	20.27	15.83	15.83	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
V7:Asi	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55
VT:Ass	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40	11.40
VT:Asi	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55

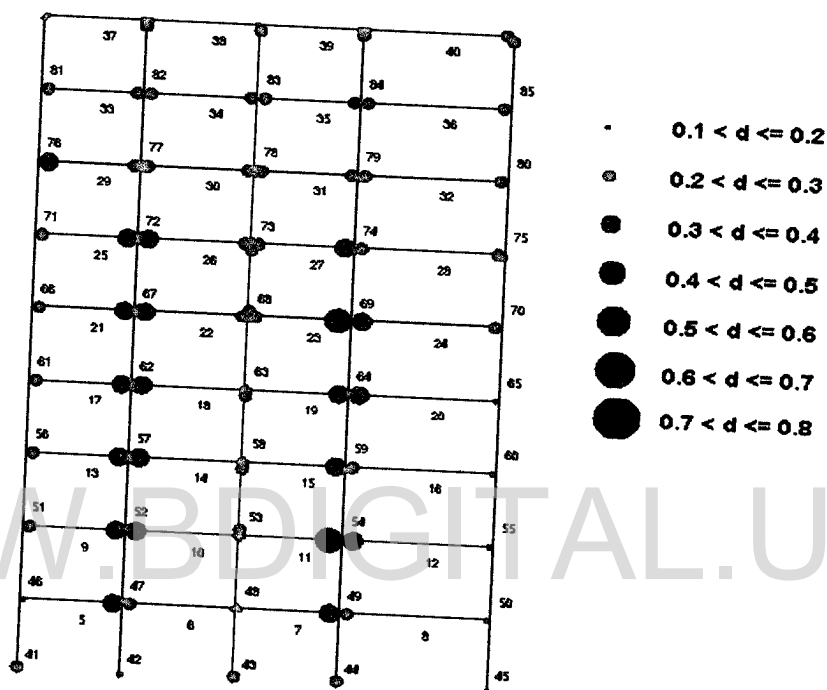


Figura 7.20 Mapa de daño del pórtico 6.

El máximo daño en el Pórtico 6 se alcanzó en las vigas del 2do y del 5to nivel con un valor de 0.41.

Pórtico B=C

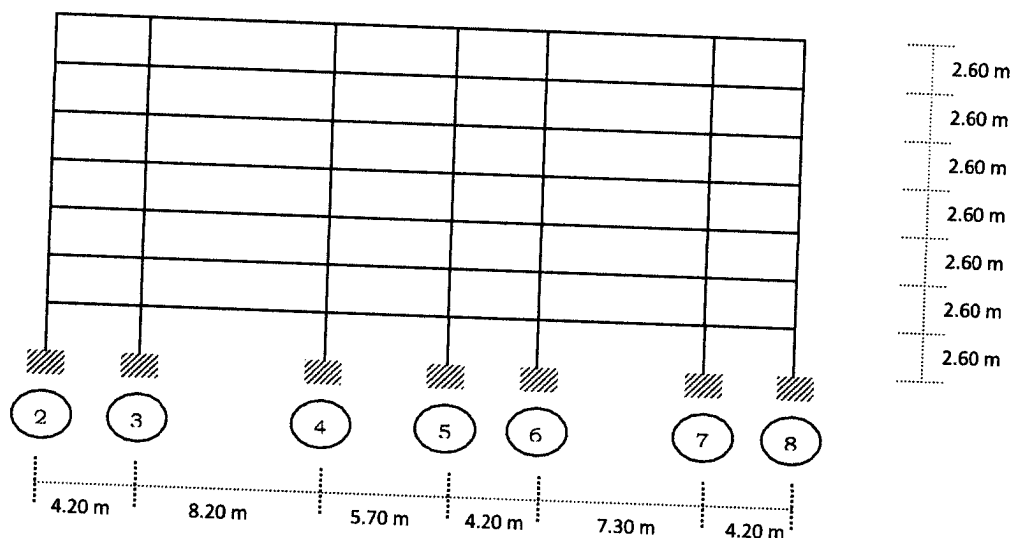


Figura 7.21 Características geométricas del pórtico B=C.

La carga sobre las vigas es:

V: 30x70 Carga distribuida = 0.0390 tn/cm 1-6 Nivel

V: 30x70 Carga distribuida = 0.0340 tn/cm 7 Nivel

Tabla 7.5 Áreas de acero en vigas del pórtico B=C.

Tramo	2-3(i,j)		3-4(i,j)		4-5(i,j)		5-6(i,j)		6-7(i,j)		7-8(i,j)	
V1:Ass	30.40	30.40	30.40	40.54	40.54	30.40	30.40	35.47	35.47	30.40	30.40	30.40
V1:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V2:Ass	30.40	30.40	30.40	40.54	40.54	30.40	30.40	35.47	35.47	30.40	30.40	30.40
V2:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V3:Ass	30.40	30.40	30.40	40.54	40.54	30.40	30.40	35.47	35.47	30.40	30.40	30.40
V3:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V4:Ass	30.40	30.40	30.40	40.54	40.54	30.40	30.40	35.47	35.47	30.40	30.40	30.40
V4:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V5:Ass	20.27	25.34	25.34	40.54	40.54	25.34	25.34	30.40	30.40	25.34	25.34	20.27
V5:Asi	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
V6:Ass	20.27	25.34	25.34	40.54	40.54	25.34	25.34	30.40	30.40	25.34	25.34	20.27
V6:Asi	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
V7:Ass	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V7:Asi	10.13	10.13	15.20	15.20	10.13	10.13	10.13	10.13	15.20	15.20	10.13	10.13

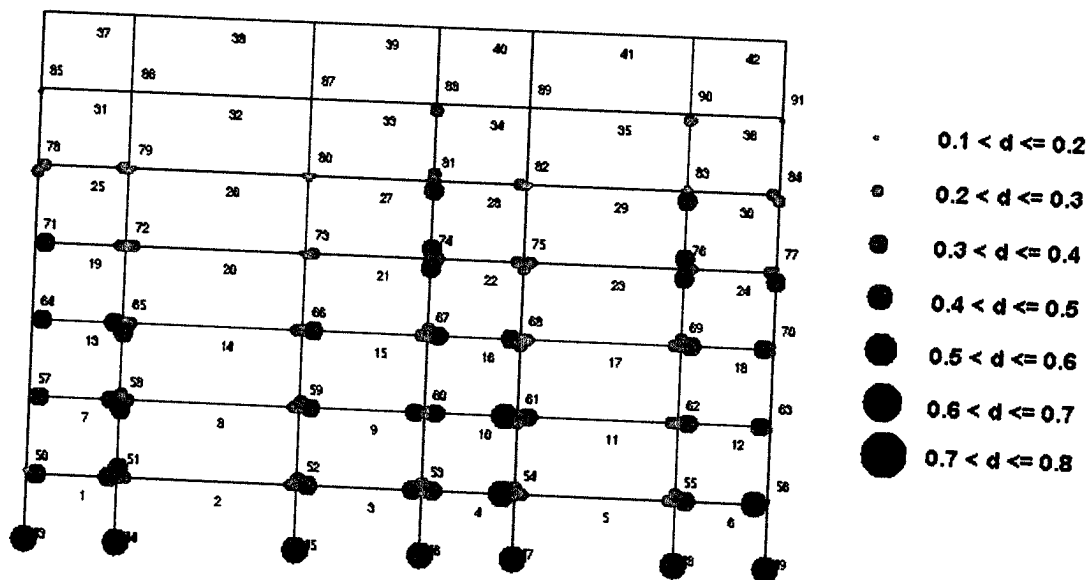


Figura 7.22 Mapa de daño del pórtico B=C.

En el pórtico B=C el máximo daño alcanzado en el análisis fue de 0.48 en las columnas de la base. En las vigas el máximo daño alcanzado fue de 0.44.

Pórtico E

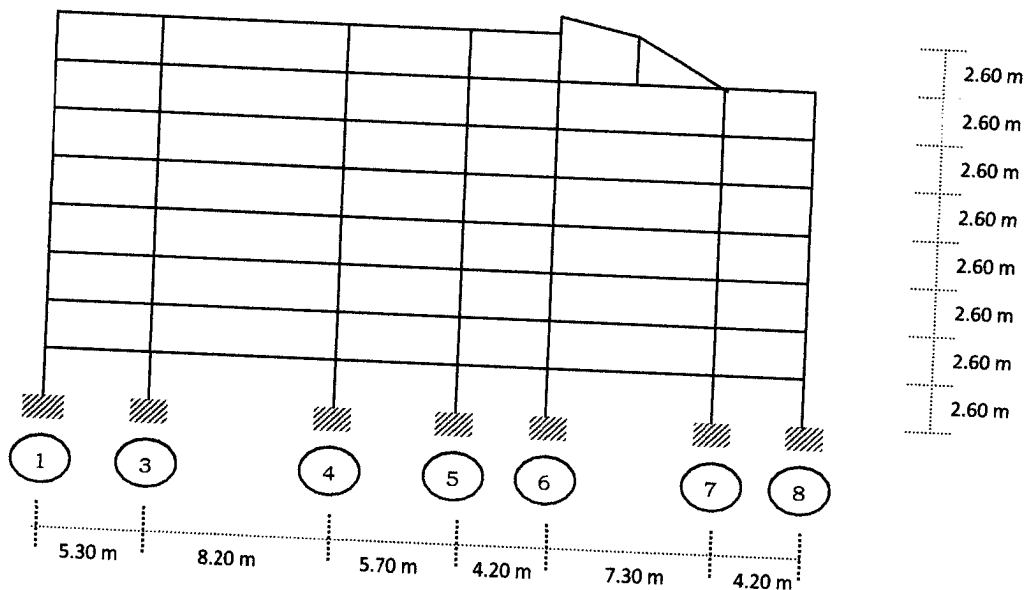


Figura 7.23 Características geométricas del pórtico E.

La carga sobre las vigas es:

V: 30x70 Carga distribuida = 0.0350 tn/cm 1-7 Nivel

V: 20x30 Carga distribuida = 0.0300 tn/cm Techo

Tabla 7.6 Áreas de acero en vigas del pórtico E.

Tramo	1-3(i,j)		3-4(i,j)		4-5(i,j)		5-6(i,j)		6-7(i,j)		7-8(i,j)	
V1:Ass	30.40	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	30.40
V1:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V2:Ass	30.40	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	30.40
V2:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V3:Ass	30.40	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	20.27
V3:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V4:Ass	30.40	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	30.40
V4:Asi	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V5:Ass	30.40	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	30.40
V5:Asi	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
V6:Ass	30.40	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	30.40
V6:Asi	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20	15.20
V7:Ass	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27	20.27
V7:Asi	10.13	10.13	15.20	15.20	10.13	10.13	10.13	10.13	15.20	15.20	10.13	10.13
VT:Ass	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	-	-
VT:Asi	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	-	-

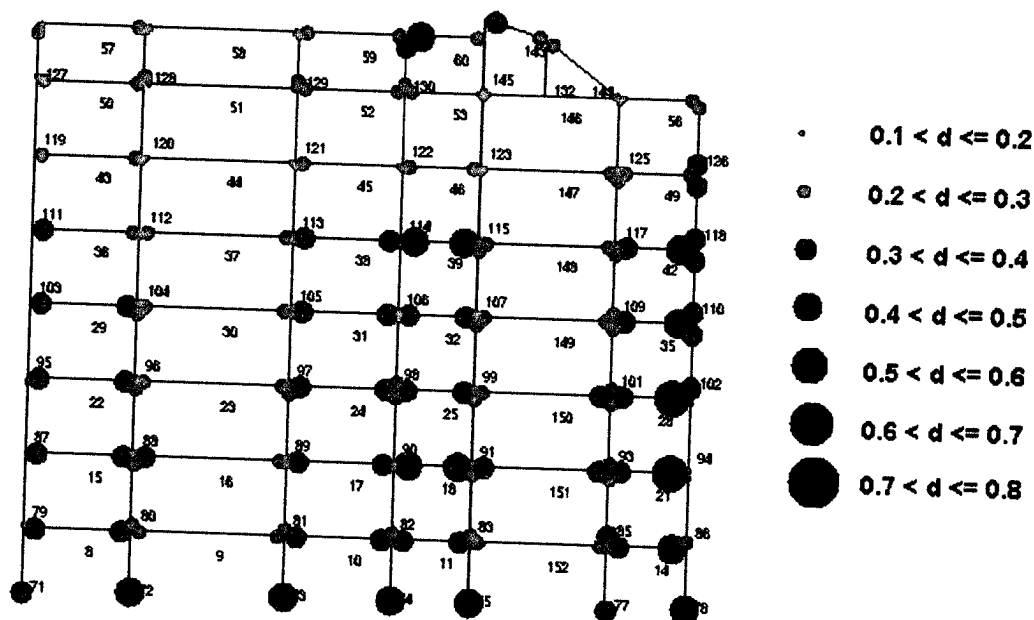


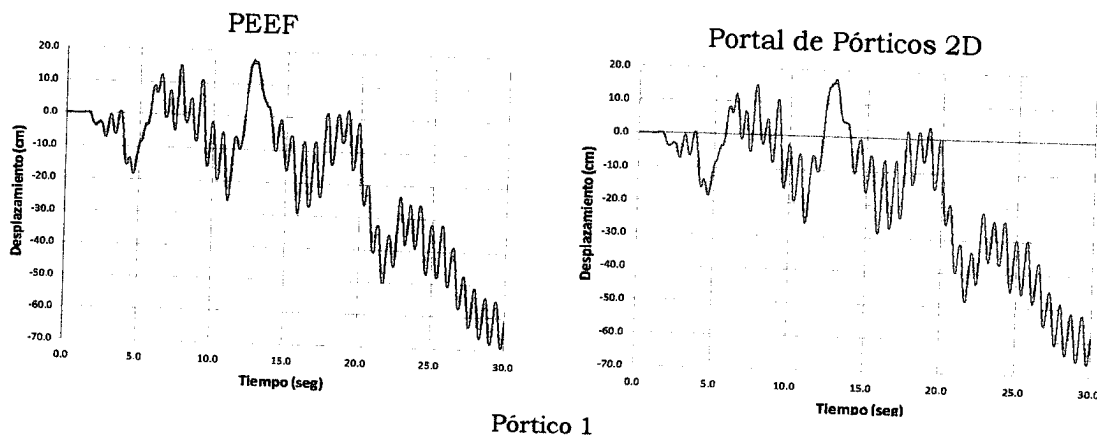
Figura 7.24 Mapa de daño del pórtico E.

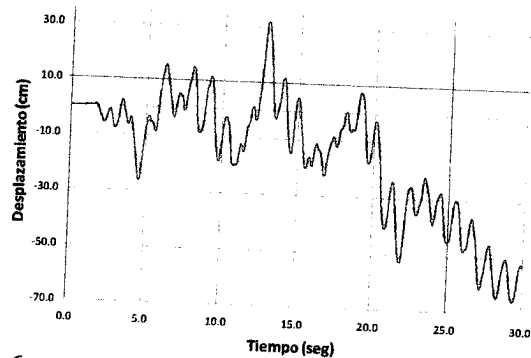
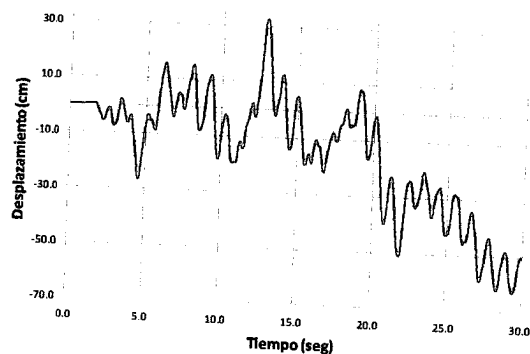
El máximo daño en el Pórtico E es de 0.51 en las vigas del segundo y tercer nivel. El máximo daño en las columnas fue de 0.48.

Al finalizar el análisis y observar los mapas de daño, se puede concluir lo siguiente:

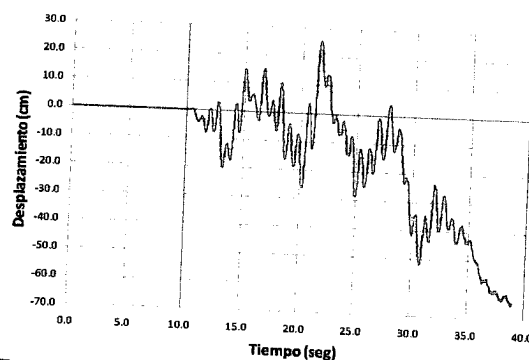
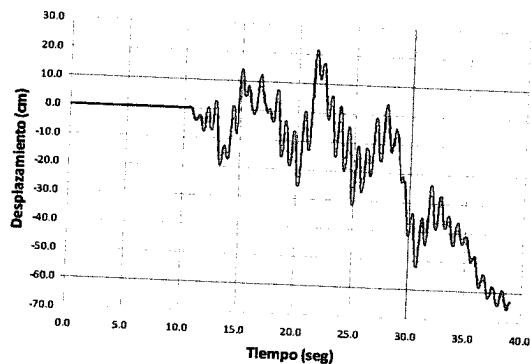
- Los elementos de los pórticos más dañados fueron los de las vigas, con valores promedio de daño entre 0.30-0.45, y un máximo de 0.51 en el pórtico E.
- Se observó daño entre 0.40-0.48 en las columnas de planta baja, siendo el máximo de 0.48 en el pórtico E. En los pisos superiores no se observó daño o este fue inferior a 0.20.
- Al considerar que el edificio se sometió al sismo más probable según la zona de construcción se puede concluir que la estructura se comporta bien y no necesita ser reforzada.

Con el fin de validar los resultados obtenidos con PEEF, en las siguientes graficas se muestra el desplazamiento vs. el tiempo para los pórticos 1, 6, B y E, correspondiente al nodo del tope, y se compara con los obtenidos mediante el programa Portal de Pórticos 2D. En ellas se puede observar la gran exactitud entre los resultados.

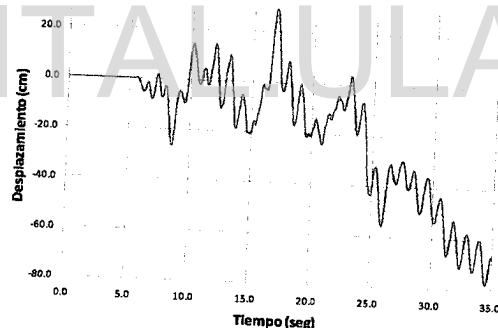
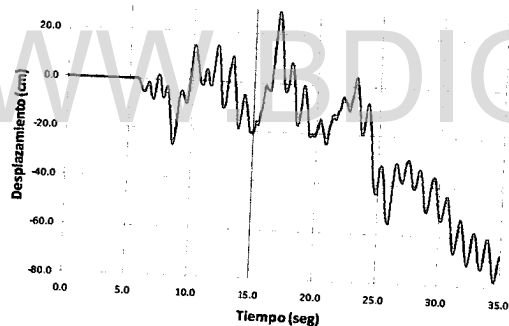




Pórtico 6



Pórtico B=C



Pórtico E

Figura 7.25 Grafica Desplazamiento vs. Tiempo, nodo del tope.

Simulación numérica de un Ciclo Básico Tipo, para 960 alumnos: El edificio analizado corresponde a la estructura tipo de escuelas y liceos que construyó el Ministerio de Obras Públicas de Venezuela en la década de los '70. El edificio es una estructura aporricada de concreto armado de 3 pisos de altura.

Dado que el proyecto de esta estructura fue hecho para escuelas a ser reproducidas en diferentes zonas del país, que hoy en día se conocen con el nombre de escuelas tipo "Cajetón", se eligió para el

análisis dinámico un acelerograma generado artificialmente "Z7S1GA", con una duración de 29 seg. La selección del sismo se basó en la Norma COVENIN 1756-98 (Rev. 2001) donde,

Z7: Zona de mayor peligro sísmico (Estado Sucre).

S1: Forma espectral tipificada de acuerdo al terreno de fundación.

GA: Clasificación de la edificación según el uso ("Edificaciones esenciales").

A continuación se presentan las tablas con las características mecánicas y geométricas de cuatro pórticos del edificio, con sus respectivos resultados, esto es, mapa de daño y una grafica desplazamiento vs. tiempo de uno de los nodos del tope.

Secciones referidas al tipo de columnas:

Tabla 7.7 Tipos de columnas, unidad Ciclo Básico.

Col	N1	N2	N3
C-1	A-1, A-2, A-3, A-7, B-1, B-7, C-1, C-3, C-5, C-7, D-1, D-3, D-5, D-7, E-1, E-7, F-1, F-2, F-3, F-7	A-1, A-5, A-6, A-7, B-1, B-6, B-7, C-1, C-3, C-5, C-6, C-7, D-1, D-3, D-5, D-6, D-7, E-1, E-6, E-7, F-1, F-5, F-6, F-7	B-7, C-5, C-7, D-5, D-7, E-7
C-2	A-4, B-2, B-3, C-2, D-2, E-2, E-3, F-4	B-5, E-5	-
C-3	A-5, A-6, F-5, F-6	-	-
C-4	B-4, B-6, E-4, E-6	-	-
C-5	B-5, E-5	-	-
C-6	C-6, D-6	-	-
C-7	-	A-2, A-3, A-4, B-2, B-3, B-4, C-2, D-2, E-2, E-3, E-4, F-2, F-3, F-4	A-4, A-5, A-6, A-7, B-4, B-5, B-6, C-6, D-6, E-4, E-5, E-6, F-4, F-5, F-6, F-7

Áreas de acero:

Tabla 7.8 Áreas de acero para columnas, unidad Ciclo Básico.

Col	Sección	Capa 1 (cm ²)	Capa 2 (cm ²)	Capa 3 (cm ²)	Capa 4 (cm ²)	Estribo tipo A	Estribo tipo B
C - 1	35x35	7.68	3.96	7.68	-	-	2.54 m
C - 2	35x35	7.76	7.76	-	-	2 ramas	-
C - 3	35x35	15.20	7.76	15.20	-	-	2.52 m
C - 4	35x40	15.20	7.76	15.20	-	-	2.70 m
C - 5	35x40	19.08	7.76	7.76	19.08	4 ramas	-
C - 6	35x40	25.21	10.13	25.21	-	-	2.70 m
C - 7	35x35	5.70	5.70	-	-	2 ramas	-

Características:

- Resistencia del concreto: 200 kg/cm².
- Recubrimiento: Rv = 2.5 cm., Rh = 2.5cm
- Separación de estribos en la zona de confinamiento: 10 cm.
- Estribo ($\phi=3/8"$) tipo A de dos ramas para vigas.
- Estribo ($\phi=3/8$ para columnas.

Pórtico 1

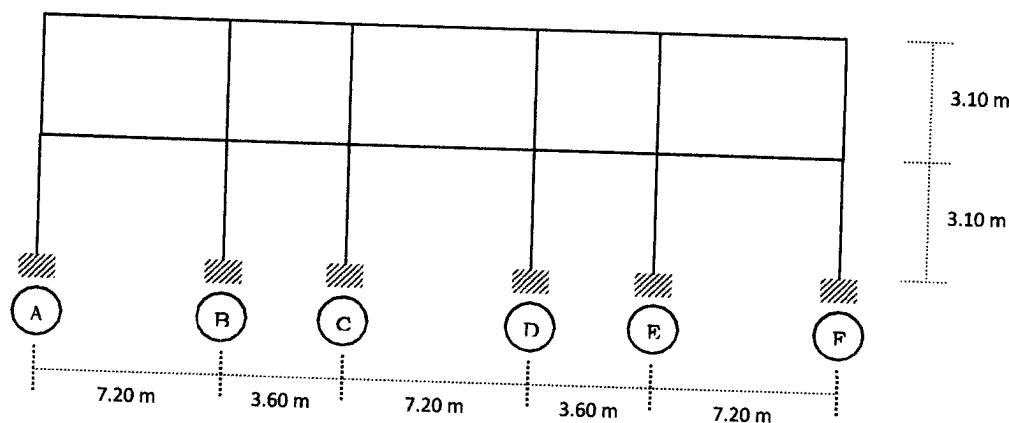


Figura 7.26 Características geométricas del pórtico 1, unidad Ciclo Básico.

La carga sobre las vigas es:

V: 45x25 Carga distribuida = 0.0228 tn/cm 1 Nivel

V: 45x25 Carga distribuida = 0.0126 tn/cm 2 Nivel

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 7.9 Áreas de acero en vigas del pórtico 1, unidad Ciclo Básico.

Tramo	A-B(i,j)		B-C(i,j)		C-D(i,j)		D-E(i,j)		E-F(i,j)	
V1:Ass	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88
V1:Asi	11.88	11.88	5.94	5.94	11.88	11.88	5.94	5.94	11.88	11.88
V2:Ass	6.33	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	6.33
V2:Asi	6.33	8.87	3.80	3.80	8.87	8.87	3.80	3.80	8.87	6.33

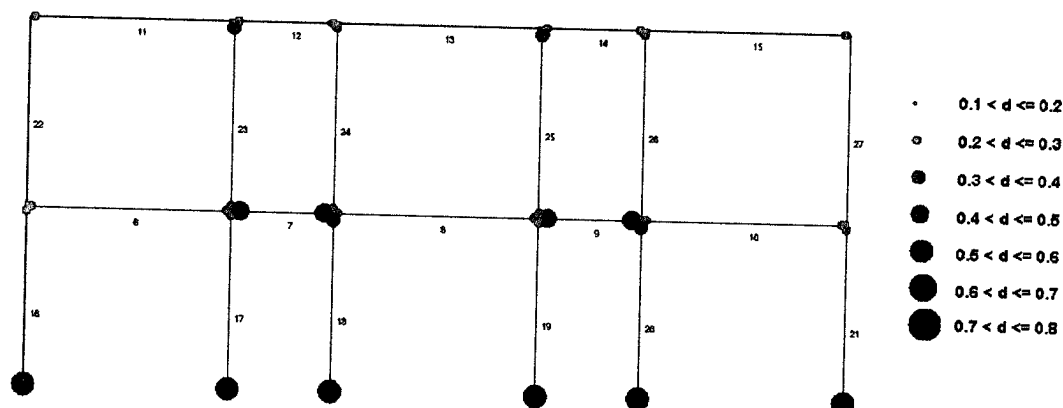


Figura 7.27 Mapa de daño del pórtico 1, unidad Ciclo Básico.

En el pórtico 1 el mayor daño ocurre en las columnas de la base alcanzando un máximo de 0.55. En las vigas el máximo daño alcanzado fue de 0.43.

Pórtico 5

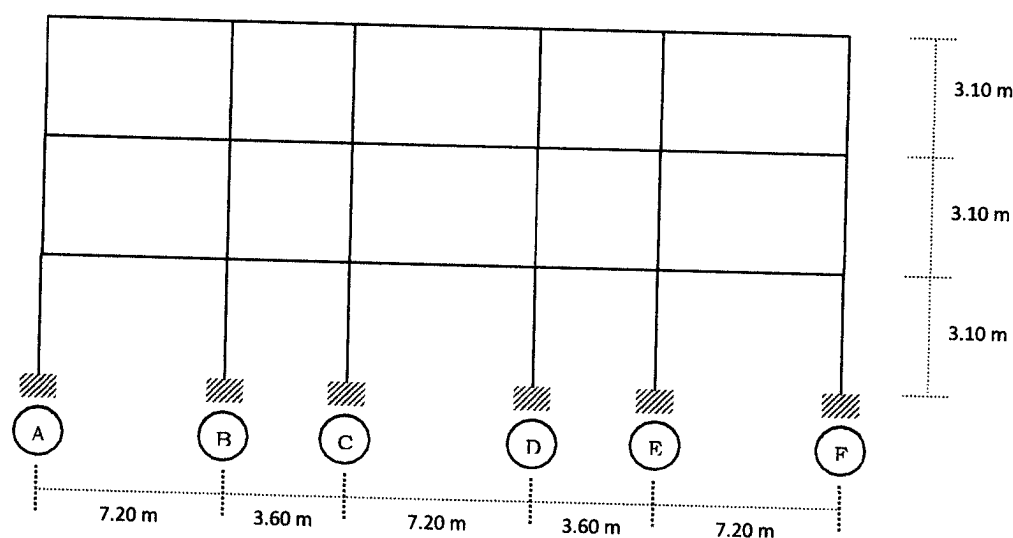


Figura 7.28 Características geométricas del pórtico 5, unidad Ciclo Básico.

La carga sobre las vigas es:

V: 45x25 Carga distribuida = 0.0228 tn/cm 1-2 Nivel

V: 45x25 Carga distribuida = 0.0203 tn/cm 3 Nivel

Tabla 7.10 Áreas de acero en vigas del pórtico 5, unidad Ciclo Básico.

Tramo	A-B(i,j)		B-C(i,j)		C-D(i,j)		D-E(i,j)		E-F(i,j)	
V1:Ass	15.84	13.86	13.86	11.88	11.88	11.88	11.88	13.86	13.86	15.84
V1:Asi	15.84	13.86	5.94	5.94	13.86	13.86	5.94	5.94	13.86	15.85
V2:Ass	12.99	10.13	10.13	10.13	10.13	10.13	10.13	10.13	10.13	12.99
V2:Asi	12.99	10.13	5.07	5.07	10.13	10.13	5.07	5.07	10.13	12.99
V3:Ass	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07
V3:Asi	5.07	7.60	3.80	3.80	7.60	7.60	3.80	3.80	7.60	5.07

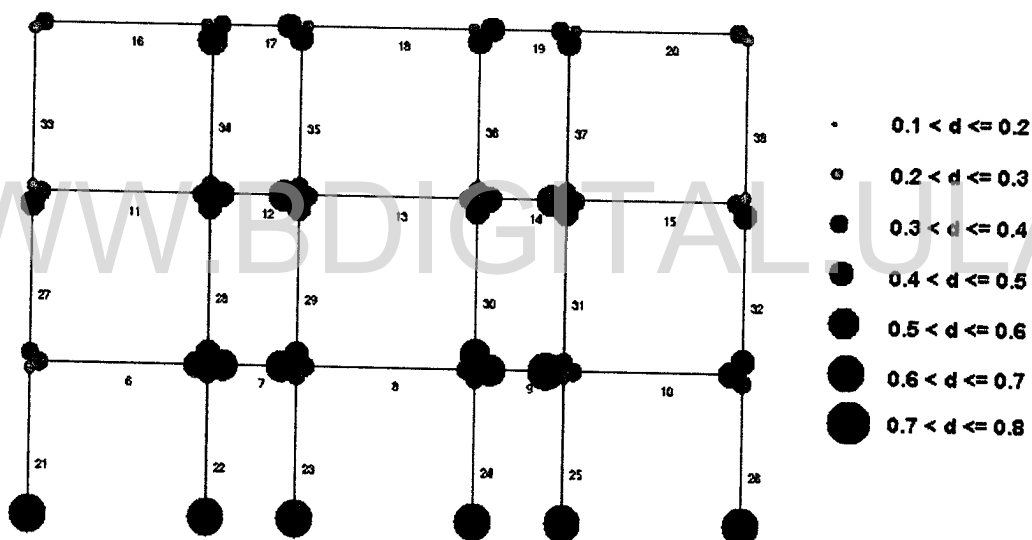


Figura 7.29 Mapa de daño del pórtico 5, unidad Ciclo Básico.

En el pórtico 5 se observan daños considerables en vigas y columnas, alcanzando un daño de 0.68 en las columnas de planta baja.

En las siguientes graficas se muestra el desplazamiento vs. el tiempo para los pórticos 1, y 5, correspondiente al nodo del tope. En ellas se puede observar la gran exactitud entre los resultados obtenidos con PEEF y el programa Portal de Pórticos 2D.

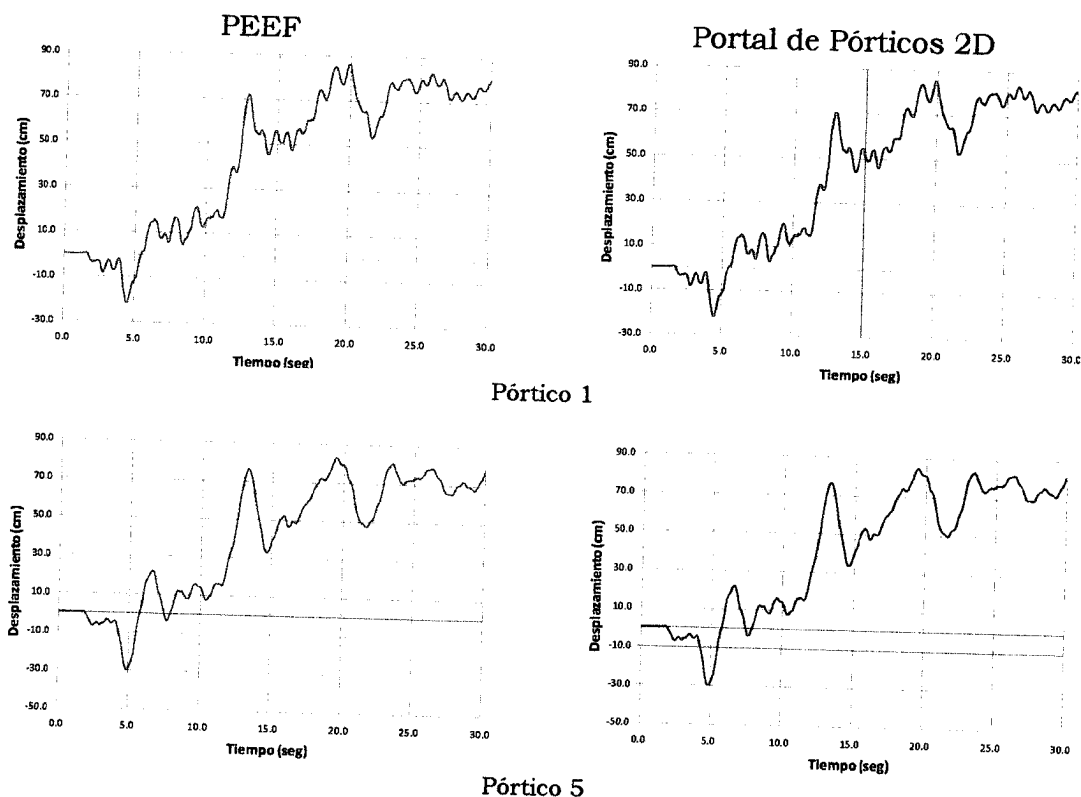


Figura 7.30 Grafica Desplazamiento vs. Tiempo, nodo del tope, unidad Ciclo Básico.

Los pórticos A, B, C, D, E y F no culminaron el análisis dinámico al que se sometieron, debido a que presentaron daños superiores a los 0.70 en los primeros segundos del sismo. A continuación se muestran los mapas de daños correspondientes a los pórticos A=F y C=D. Los tiempos alcanzados usando PEEF fueron de 4.85 seg y 15.87 seg respectivamente.

Pórtico A=F

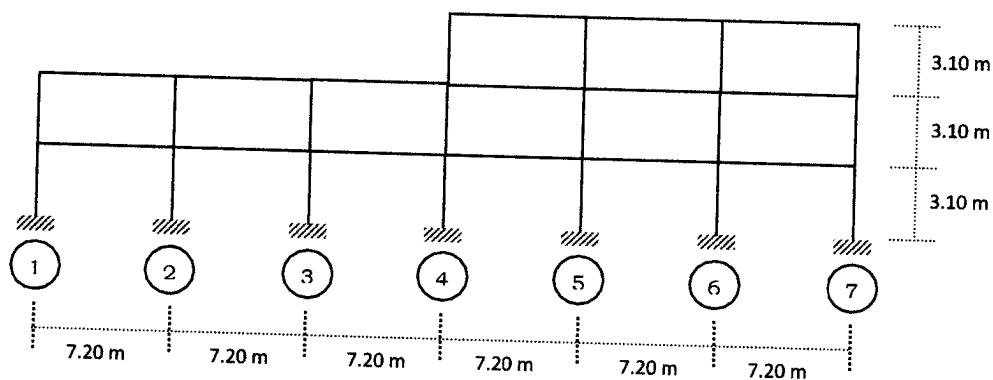


Figura 7.31 Características geométricas del pórtico A=F, unidad Ciclo Básico.

La carga sobre las vigas es:

V: 35x70 Carga distribuida = 0.0684 tn/cm 1-2 Nivel

V: 35x70 Carga distribuida = 0.0598 tn/cm 3 Nivel

Tabla 7.11 Áreas de acero en vigas del pórtico A=F, unidad Ciclo Básico.

Tramo	1-2(i,j)		2-3(i,j)		3-4(i,j)		4-5(i,j)		5-6(i,j)		6-7(i,j)	
V1:Ass	8.55	19.39	19.39	17.33	17.33	19.39	19.39	17.33	17.33	19.39	19.39	8.55
V1:Asi	11.63	11.63	5.70	5.70	10.61	10.61	10.61	10.61	5.70	5.70	11.63	11.63
V2:Ass	5.70	25.34	25.34	15.51	15.51	19.39	19.39	17.33	17.33	19.39	19.39	7.76
V2:Asi	11.63	11.63	10.14	10.13	10.61	10.61	10.61	10.61	7.76	7.76	11.63	11.63
V3:Ass	-	-	-	-	-	-	5.94	19.39	19.39	19.39	19.39	5.94
V3:Asi	-	-	-	-	-	-	11.63	11.63	10.61	10.61	11.63	11.63

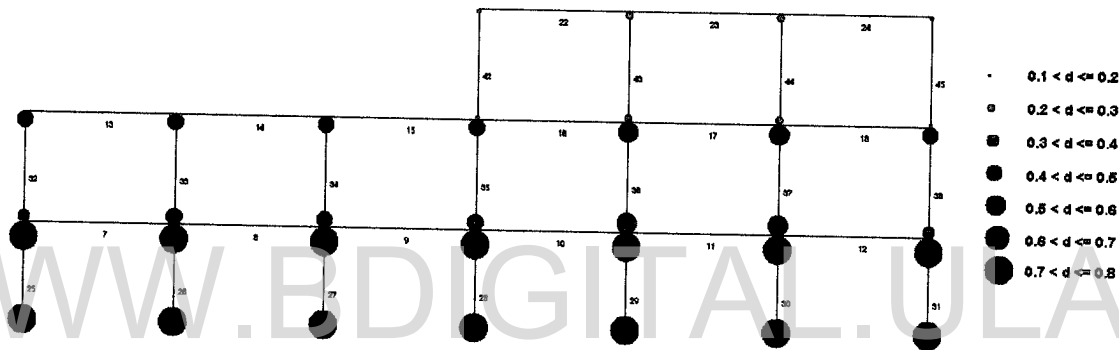


Figura 7.32 Mapa de daño del pórtico A=F, unidad Ciclo Básico.

Pórtico C=D

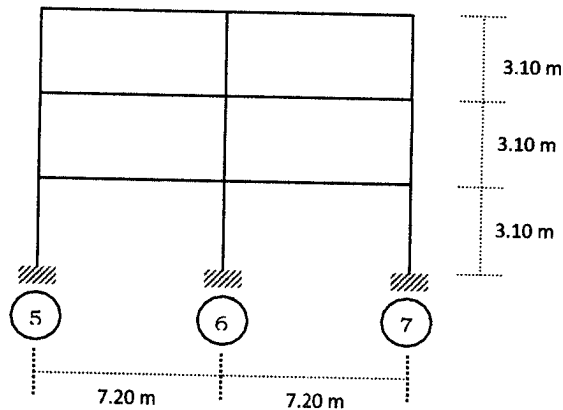


Figura 7.33 Características geométricas del pórtico C=D, unidad Ciclo Básico.

La carga sobre las vigas es:

V: 35x70 Carga distribuida = 0.0807 tn/cm 1-2 Nivel

V: 35x70 Carga distribuida = 0.0677 tn/cm 3 Nivel

Tabla 7.12 Áreas de acero en vigas del pórtico C=D, unidad Ciclo Básico.

Tramo	5-6(i,j)		6-7(i,j)	
V1:Ass	8.55	23.27	23.27	8.55
V1:Asi	11.44	11.44	11.63	11.63
V2:Ass	11.63	23.27	23.27	8.55
V2:Asi	11.63	11.63	11.63	11.63
V3:Ass	5.94	19.39	19.39	5.94
V3:Asi	10.61	10.61	10.61	10.61

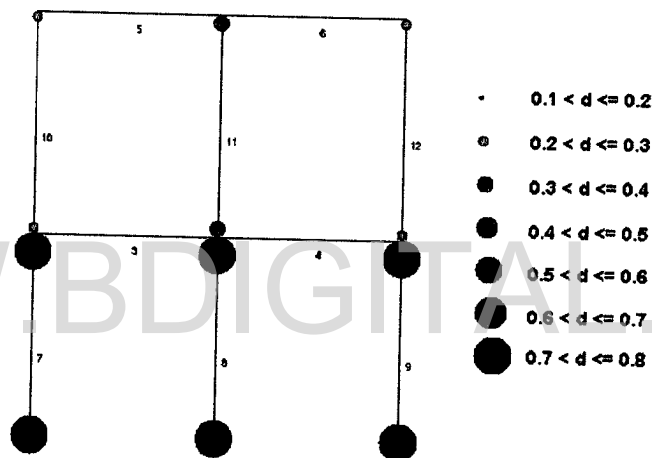


Figura 7.34 Mapa de daño del pórtico A=F, unidad Ciclo Básico.

En los pórticos A=F y C=D se observan daños considerables en todas las columnas de planta baja, alcanzando un daño máximo de 0.79 con una duración del sismo de 4.85 seg y 15.87 seg respectivamente.

Al realizar el análisis se puede concluir que esta estructura tiene un mal comportamiento. Se observa en varios pórticos un mecanismo de colapso en las columnas de planta baja, pues sus daños son muy superiores a 0.60. Una estructura con estas características se considera como insegura y altamente peligrosa. Dado su uso (escuelas y liceos) necesita ser reforzada.

7.2 Ejemplos numéricos para elementos Viga-Columna 3D de Concreto Armado (VC3DCA):

Con el fin de mostrar los tipos de estructuras que actualmente pueden ser analizadas con el programa Portal de Pórticos 3D, así como la validación de la implementación del elemento finito VC3DCA en PEEF, se describen seis simulaciones numéricas. Las tres primeras corresponden a la simulación numérica de los ensayos experimentales realizados por Bousias et al. [7] sobre una columna de concreto armado, bajo cargas estáticas. La cuarta simulación se refiere a un edificio en forma de "L" de dos niveles, sometido a fuerzas laterales obtenidas mediante el método Estático Equivalente. El quinto y sexto ejemplo permite mostrar el comportamiento dinámico de dos edificios tridimensionales de concreto armado.

7.2.1 Simulación numérica de ensayos experimentales 3D, caso estático:

Simulaciones numéricas de ensayos experimentales realizados por Bousias et al. [7]: Bousias et al. llevaron a cabo un programa experimental con el fin de estudiar el comportamiento de elementos de concreto armado sometidos a flexión biaxial y fuerzas axiales. Los especímenes consistieron en columnas cuadradas de concreto armado de 1.5 metros de altura con una sección transversal de 25 x 25 centímetros como se muestra en la figura 7.35a.

El refuerzo longitudinal de la columna consistió de 8 barras de 16 milímetros de diámetro uniformemente distribuidas en el perímetro. Como refuerzo transversal se utilizaron estribos de 2 ramas de 8 milímetros de diámetro y espaciados a 7 centímetros. La resistencia del concreto a compresión durante las pruebas varió según el espécimen, por lo tanto se especificará cuando se describa cada ensayo. Las barras de refuerzo presentaron un esfuerzo de cedencia de 470 Mpa y un esfuerzo último de 710 Mpa.

Las historias de carga y/o desplazamientos fueron aplicadas por dos actuadores de 150 kilonewtons de capacidad. Cada actuador fue montado en el pórtico de reacción y conectado a una placa metálica delgada colocada en el tope de la columna como se muestra en la figura 7.35b.

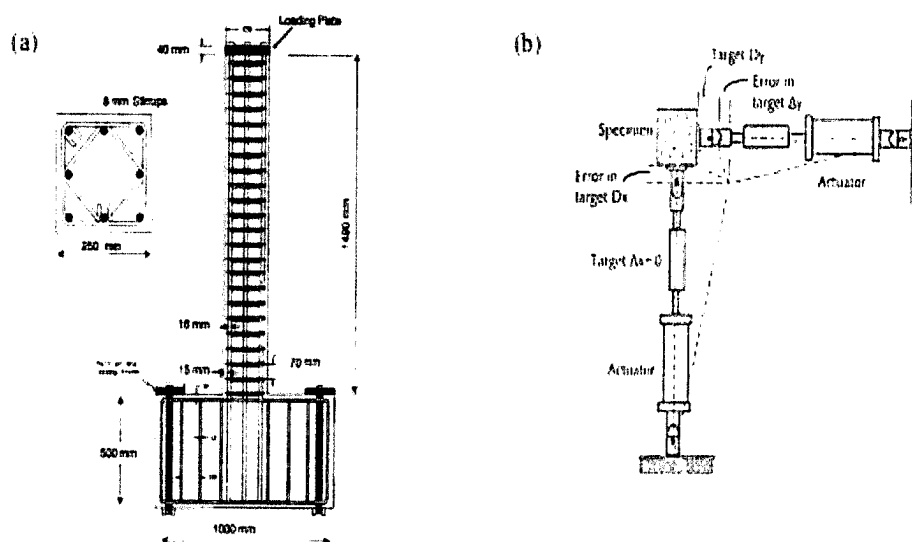
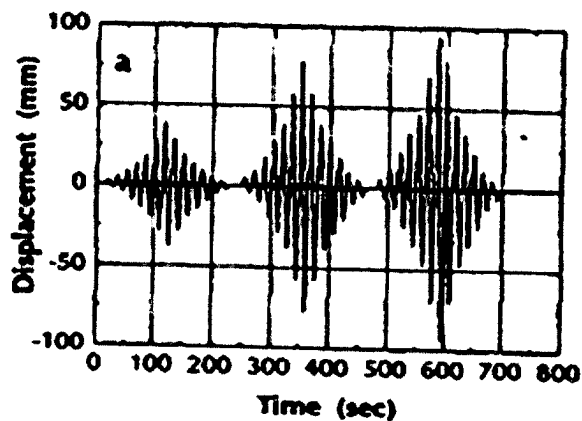


Figura 7.35 Destalle de refuerzo de los especímenes ensayados por Bousias et al [7].

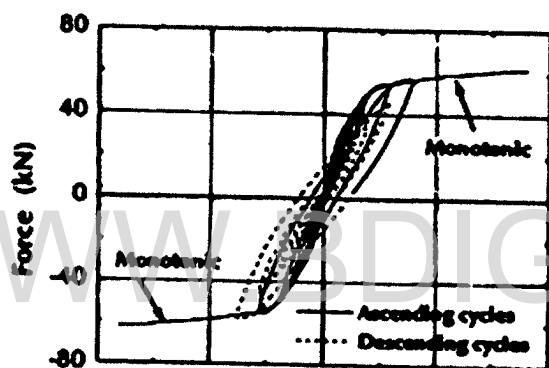
A continuación se presentan las simulaciones numéricas de algunos de los ensayos experimentales realizados por Bousias et al [7].

Simulación numérica del ensayo S0: Este es un ensayo cíclico uniaxial con carga axial constante. La resistencia del concreto a compresión durante la prueba fue de 30,75 Mpa. La historia de carga consistió, como se muestra en la figura 7.36a, en la secuencia de tres ciclos de desplazamientos aplicados en una sola dirección lateral. Los resultados experimentales registrados así como las correspondientes simulaciones numéricas durante cada secuencia se muestran en la figura 7.36b. Como se puede observar en la figura existe mucha similitud entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas logradas con PEEF.

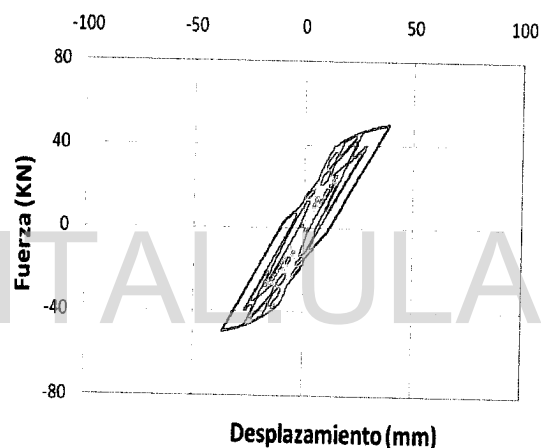


(a)

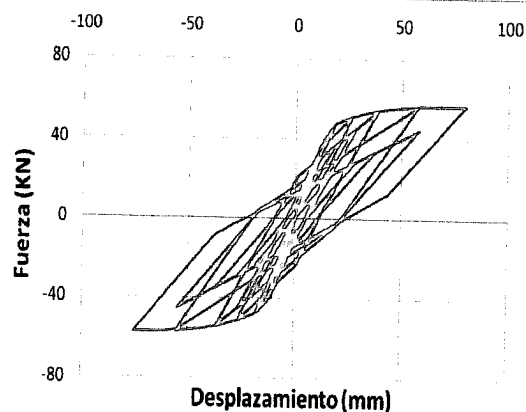
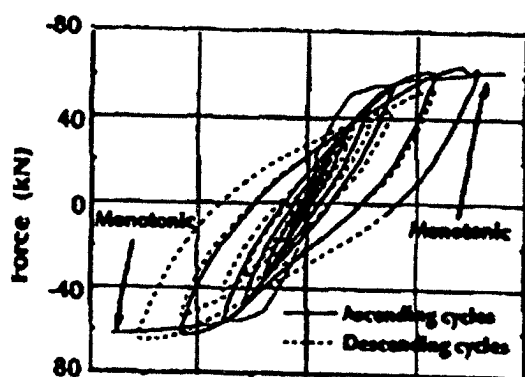
Ensayo Experimental



PEEF



Un ciclo



Dos ciclos

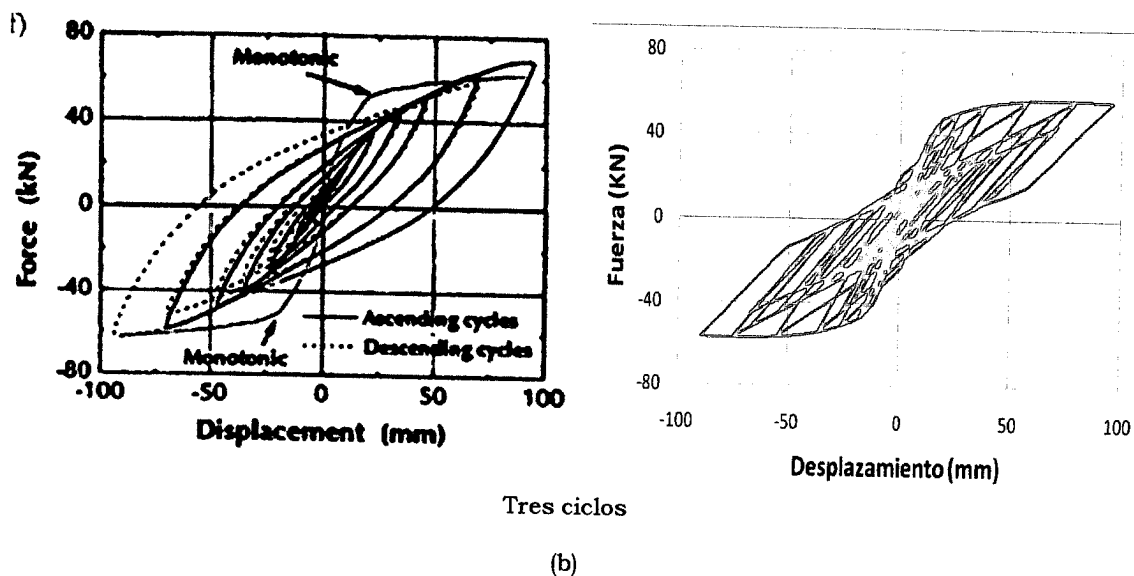
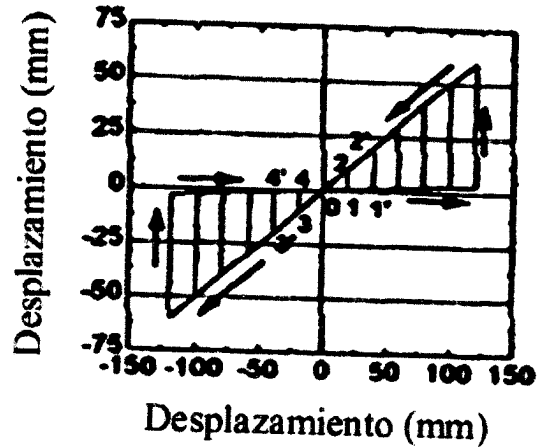


Figura 7.36 a) Historia de desplazamiento. b) Resultados experimentales [7], y simulación numérica del ensayo S0.

Simulación numérica del ensayo S6: En este ensayo se aplicaron historias de deflexiones en forma de mariposa en las dos direcciones ortogonales como es muestra en la figura 7.37a. Específicamente, las deflexiones en Y se incrementan uniaxialmente desde cero hasta el punto 1, y son mantenidas constantes mientras las deflexiones en X se incrementan desde cero hasta un valor máximo igual a la mitad del aplicado en la dirección Y (punto 2). Entonces, las deflexiones en Y y en X se llevan a cero simultáneamente y posteriormente son llevadas al punto 3 que es la imagen del punto 2, manteniendo constante la relación 2:1.

Las deflexiones son llevadas a cero de forma independiente, primero en la dirección X (mientras se mantiene constante la deflexión en la dirección Y hasta el punto 4) y entonces se lleva a cero en la dirección Y y así sucesivamente se repite la historia pasando por los puntos 1', 2', 3' y 4', etc. Como se puede observar, durante algunos estados de carga, ambos desplazamientos cambian simultáneamente.

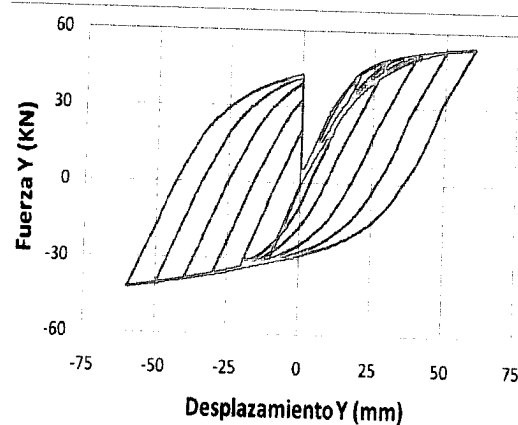
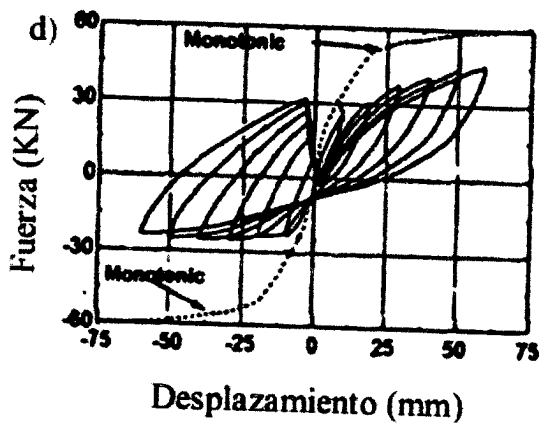
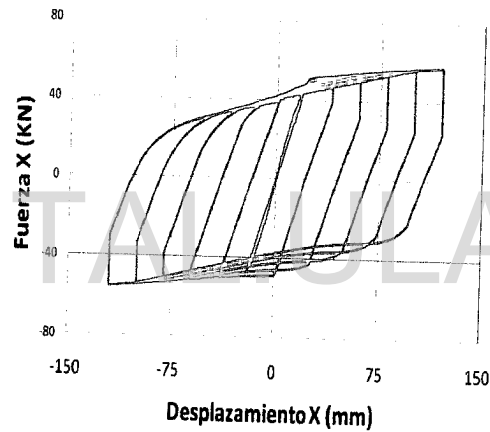
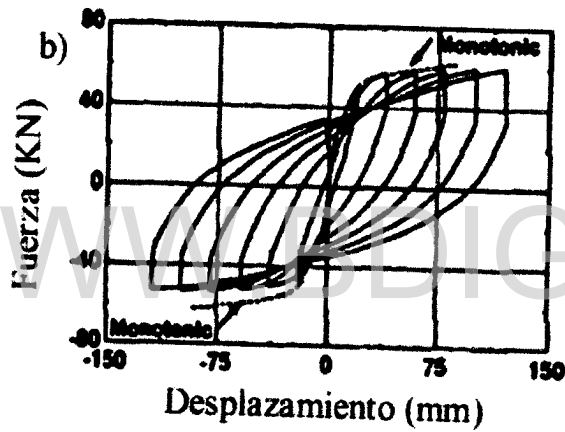
La resistencia del concreto a compresión durante la prueba fue de 25.70 Mpa. En la figura 7.37b se muestran los resultados experimentales y las simulaciones numéricas obtenidas con PEEF.



(a)

Ensayo Experimental

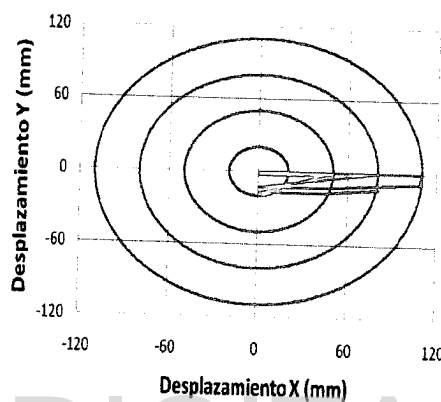
PEEF



(b)

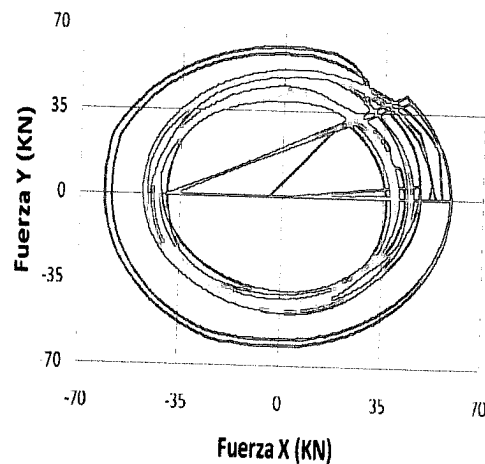
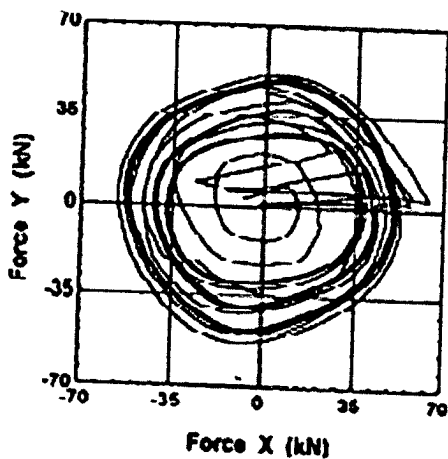
Figura 7.37 a) Historia de desplazamiento. b) Resultados experimentales [7], y simulación numérica del ensayo S6.

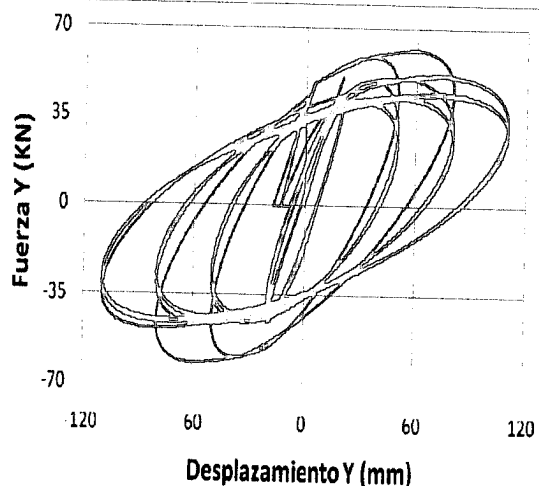
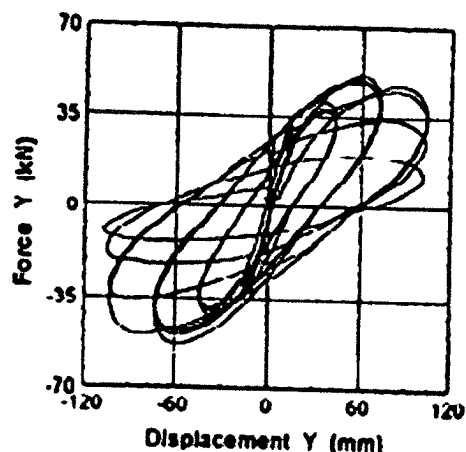
Simulación numérica del ensayo S9: En este ensayo la historia de carga puede ser descrita como sigue. Se imponen trayectorias de deflexión circular (ver figura 7.38a) que consisten en 4 ciclos de radios constantes correspondientes a 20, 50, 80 y 110 mm. Durante los primeros dos ciclos, la carga axial se mantiene baja ($0.03 A_c f_c$) y es entonces incrementada a $0.15 A_c f_c$ durante los últimos dos ciclos. La resistencia del concreto a compresión durante la prueba fue de 23.90 Mpa. Las respuestas experimentales y las simulaciones numéricas se muestran en la figura 7.38b.



Ensayo Experimental

PEEF





(b)

Figura 7.38 a) Historia de desplazamiento. b) Resultados experimentales [7], y simulación numérica del ensayo S9.

Simulación numérica de una estructura en "L" y dos niveles [36]: Se tiene una estructura aporticada de dos niveles en forma de L, cuyos tramos en el eje X miden 3 metros cada uno y los tramos transversales en el eje Y son de 5 metros. La altura de entrepiso es de 3 metros para cada nivel. Los pórticos en dirección X, son identificados como 1, 2 y 3 a partir del origen del sistema de ejes coordenados y los pórticos en la dirección de Y como C, B y A. La geometría se puede observar en la 7.39.

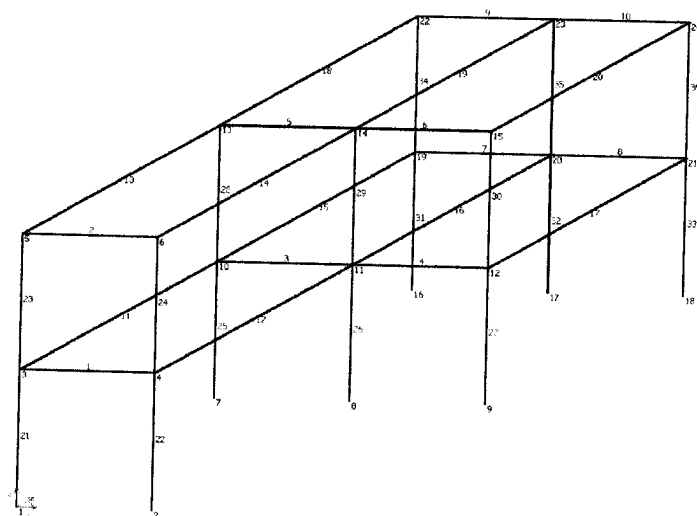


Figura 7.39 Estructura 3D en L, dos niveles.

Para esta estructura se tienen secciones de columnas de 35x35cm, las cuales poseen acero longitudinal de $6\phi\frac{3}{4}$ ", cuyo recubrimiento es de 4.5cm, y acero transversal de $\phi\frac{3}{8}$ " con recubrimiento de 3cm, éstos estribos están espaciados cada 10cm. Las vigas de los pórticos en dirección X, son de 25x30cm, con acero longitudinal de $4\phi\frac{1}{2}$ " y recubrimientos de 4.135cm, con estribos de $\phi\frac{3}{8}$ ", separados cada 10cm y con recubrimiento de 3.0cm.

Las vigas en dirección Y son de 25x35cm, y los aceros varían según los pórticos: para los pórticos C y A, se tiene un área de acero longitudinal de $4\phi\frac{5}{8}$ ", cuyo recubrimiento es de 4.3cm. Éstas vigas poseen estribos de $\phi\frac{3}{8}$ " separados cada 10cm y con recubrimiento de 3cm. Las vigas del pórtico interno B, elementos 16 y 19 del modelo, poseen acero transversal y longitudinal igual a las vigas de los pórticos A y C, mientras que las vigas de los elementos 12 y 14 poseen aceros longitudinales de $4\phi\frac{3}{4}+2\phi\frac{1}{2}$ " y recubrimientos de 4.5cm, los estribos de igual forma se encuentran espaciados cada 10cm con igual recubrimiento.

Con el fin de considerar el peso propio de los elementos así como el efecto del peso de la losa, se impuso una carga vertical uniformemente repartida sobre los elementos vigas. Las vigas de los pórticos 1, 2 y 3 están sometidas a una carga de -0.0018ton/cm. Para los pórticos C y A, y los elementos del pórtico B 12 y 14, tienen una carga vertical uniformemente repartida de -0.025ton/cm. La carga sobre los elementos 16 y 19 es de -0.04ton/cm.

Además de las cargas verticales, la estructura esta sometida a unas cargas horizontales obtenidas mediante el Método Estático Equivalente, estas cargas se resumen en la tabla 7.13.

Tabla 7.13 Fuerzas en los Nodos por Nivel.

PÓRTICOS DIRECCIÓN X	PÓRTICO	NIVEL	Fi(ton)	PÓRTICOS DIRECCIÓN Y	PÓRTICO	NIVEL	Fi(ton)
	1	PISO 2	7.029		A	PISO 2	7.029
		PISO 1	3.310			PISO 1	3.310
	2	PISO 2	10.542		B	PISO 2	10.542
		PISO 1	4.959			PISO 1	4.959
	3	PISO 2	10.542		C	PISO 2	10.542
		PISO 1	4.959			PISO 1	4.959

Una vez realizado el análisis es posible visualizar el daño sufrido por la estructura. En la figura 7.40 se puede observar que el daño se encuentra entre valores de 0.5 y 0.6, con lo cual se concluye que la estructura está gravemente dañada. También durante la simulación numérica se observó que los elementos columnas (26 y 29) ubicados en la esquina de la edificación fueron los primeros en dañarse.

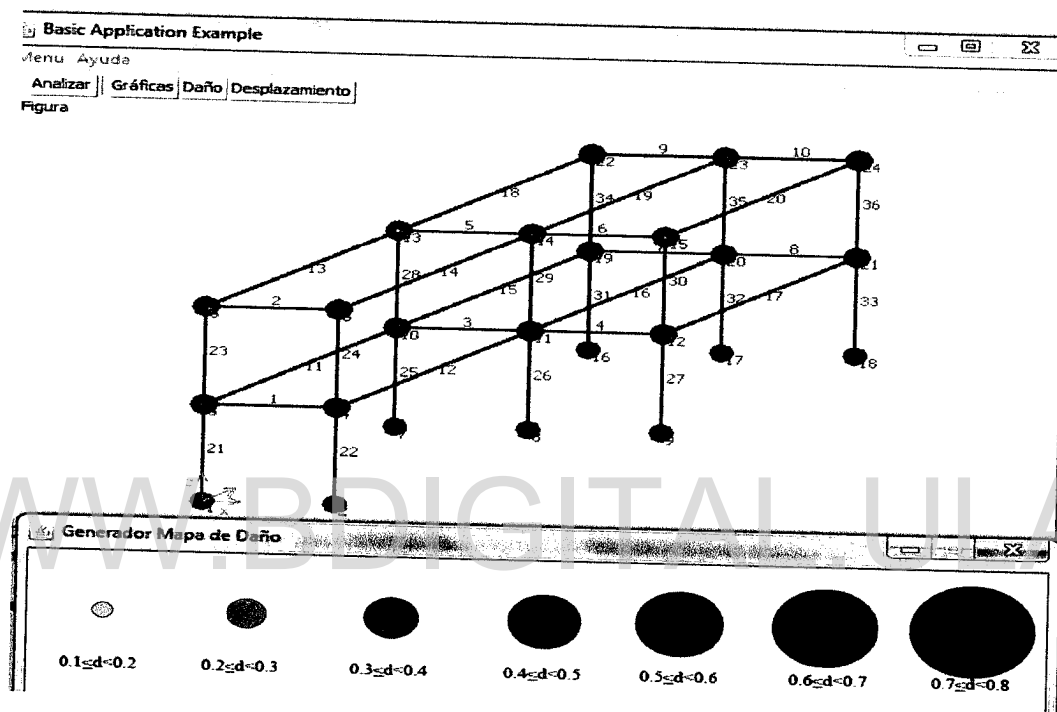


Figura 7.40 Mapa de daño al final del análisis.

En la figura 7.41 se puede observar la estructura deformada, producto de las cargas horizontales impuestas. Y en la 7.42 se muestra una grafica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo 13 del tope del pórtico A.

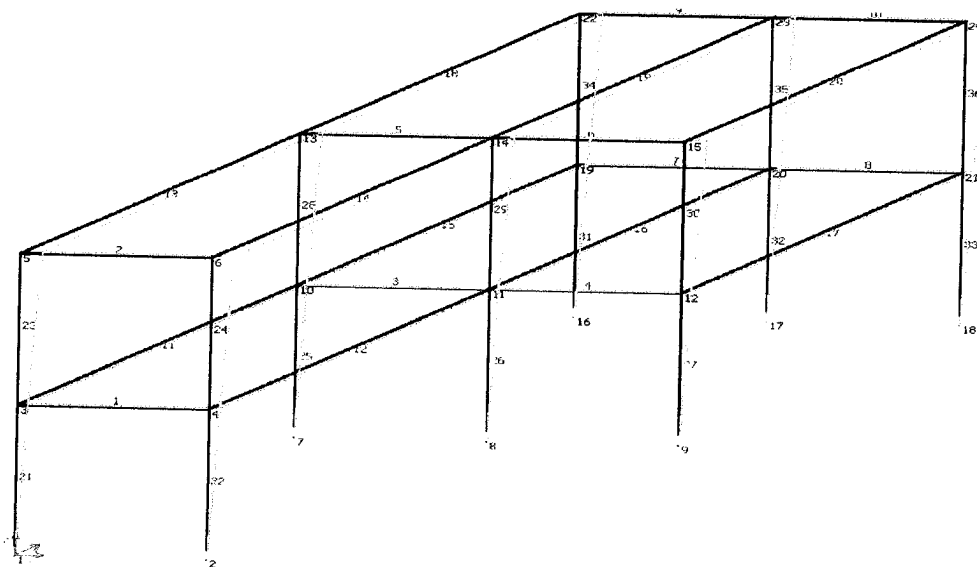


Figura 7.41 Estructura 3D deformada.

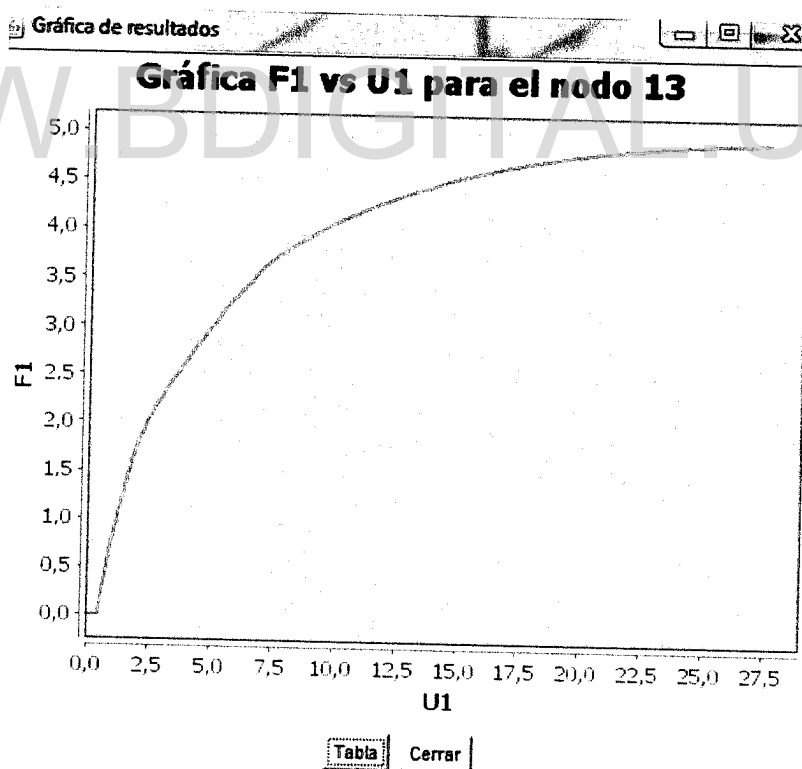


Figura 7.42 Fuerza vs Desplazamiento en sentido X para el nodo 13.

7.2.2 Simulaciones numéricas 3D, caso dinámico:

Simulación numérica de una estructura en "L" y dos niveles: En este caso la estructura de la figura 7.39, se sometió varias veces a historias de aceleraciones en su base derivadas del sismo artificial Z5S2GB2 donde,

Z5: Según el mapa de zonificación (Mérida, Municipio Libertador).

S2: Forma espectral tipificada de acuerdo al terreno de fundación.

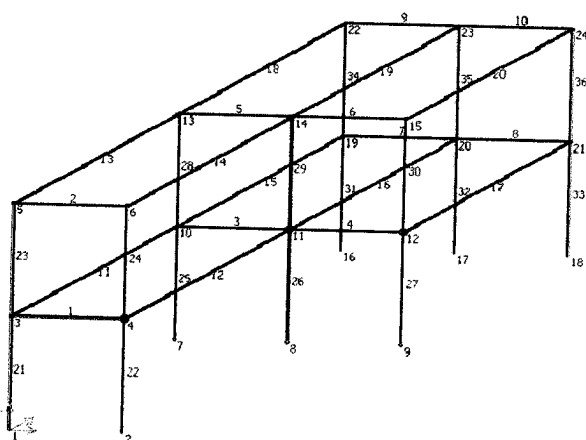
GB2: Clasificación de la edificación según el uso.

Se realizaron un total de 6 simulaciones numéricas, en donde el registro de aceleraciones se multiplicó por una magnitud según la tabla 7.14, para las direcciones X y Y respectivamente:

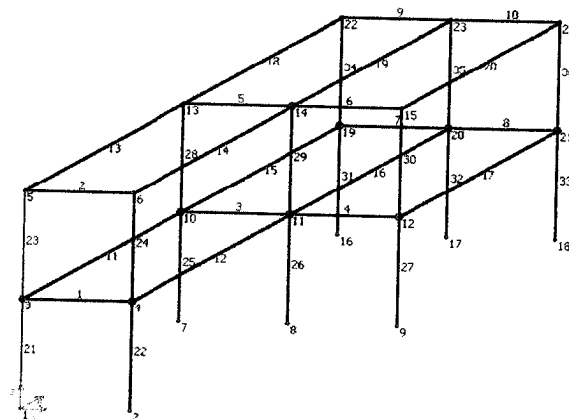
Tabla 7.14 Magnitud de la variable aceleración del registro de aceleraciones.

Simulación	Sismo en X	Sismo en Y
1	0.20g	0.10g
2	0.40g	0.20g
3	0.60g	0.30g
4	0.80g	0.40g
5	1.00g	0.50g
6	1.20g	0.60g

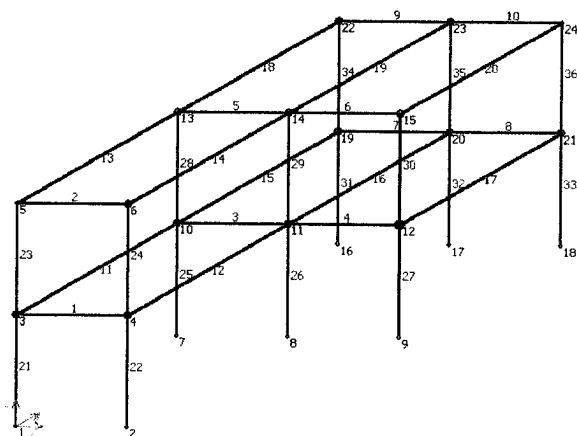
En la figura 7.43 se muestra el mapa de daño obtenido en cada simulación.



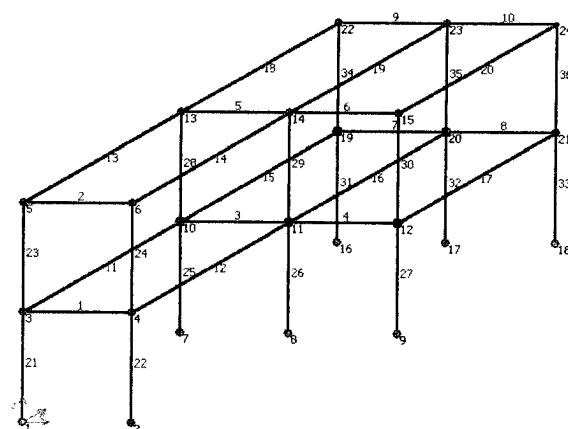
Simulación 1



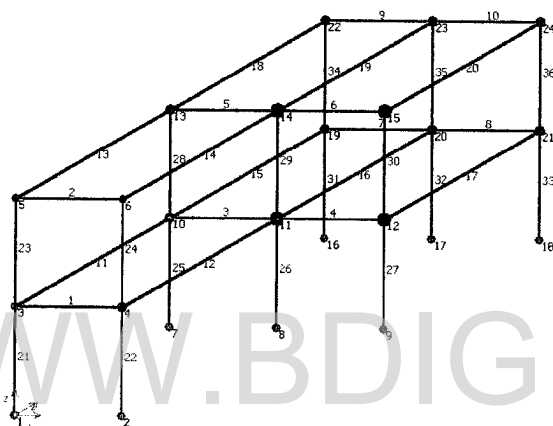
Simulación 2



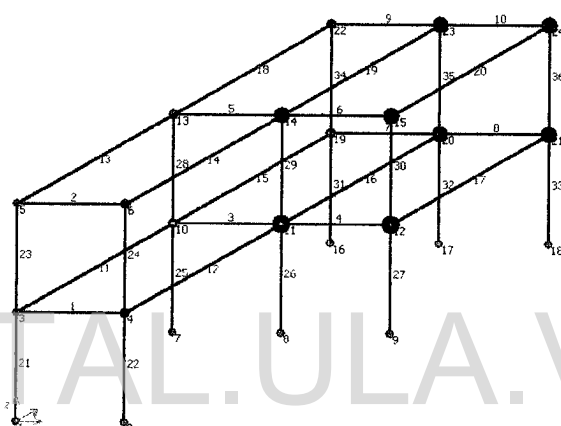
Simulación 3



Simulación 4



Simulación 5



Simulación 6

Figura 7.43 Mapa de daño al final de cada simulación.

En la simulación 1 y 2 los valores de daños son muy pequeños, inferiores en la mayoría de los elementos a 0.20, el máximo ocurre en la viga 4 con un valor de daño de 0.24. También se puede observar que los daños en las columnas aparecen a partir de la simulación 5, sin embargo no se incrementan de forma considerable en las simulaciones 6 y 7, y se mantiene con valores inferiores a 0.40. Por el contrario, en las vigas 4, 6, 8 y 10 el daño aumenta con cada simulación, alcanzando valores entre 0.50 y 0.60 en la última simulación.

En la figura 7.44 se muestra una curva de capacidad dinámica para dos de los elementos más dañados (viga 4 y 6). En ella se puede observar que cuando un elemento alcanza valores de daño superiores a 0.30 se vuelve más vulnerable, ya que el proceso de deterioro de sus propiedades mecánicas se incrementa de manera más rápida.

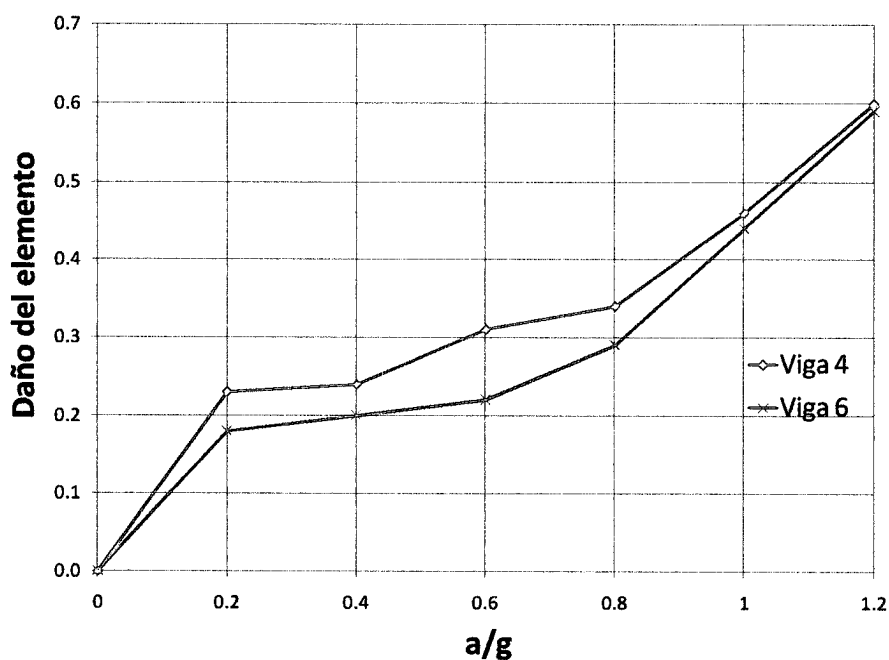


Figura 7.44 Curva capacidad dinámica de dos elementos viga.

Simulación numérica del ensayo experimental realizado por Oliva y Clough (1987) [43]: La estructura aporticada que se muestra en la figura 7.45, fue sometida a una historia de desplazamientos en su base derivadas del registro del sismo Taft. El ensayo se realizó en una mesa vibratoria, y la estructura se ubicó de manera que su eje longitudinal formase un ángulo de 25° con el eje de la mesa como se muestra en la figura 7.45, para así someterla a sollicitaciones biaxiales. La aceleración pico aplicada fue de 0.685g.

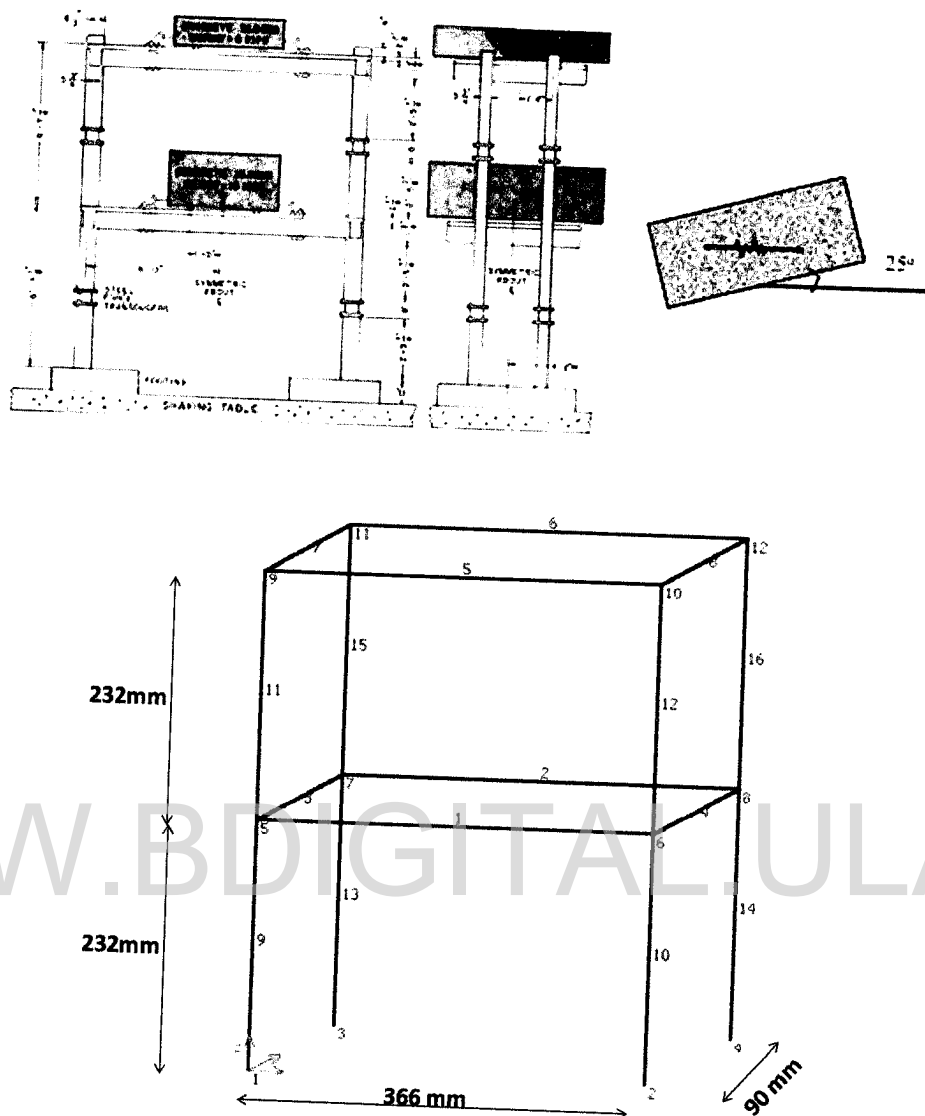


Figura 7.45 Características geométricas de la estructura ensayada por Oliva y Clough.

Los detalles de las secciones transversales de las vigas y columnas se muestran en la figura 7.46. El registro sísmico utilizado en la simulación numérica fue obtenido de la base de datos PEER (versión para la Web [44]), correspondiente al sismo Taft.

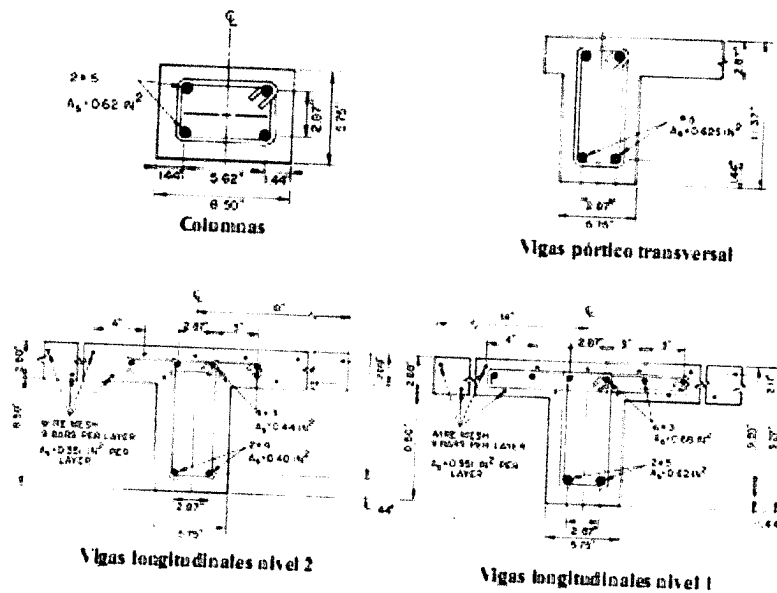


Figura 7.46 Detalle de las secciones transversales del pórtico ensayado por Oliva y Clough [43].

En la figura 7.47 se puede observar el mapa de daño después de la aplicación del sismo. En esta figura se muestra que el máximo daño se encuentra en las columnas de la base, alcanzando un valor de 0.55.

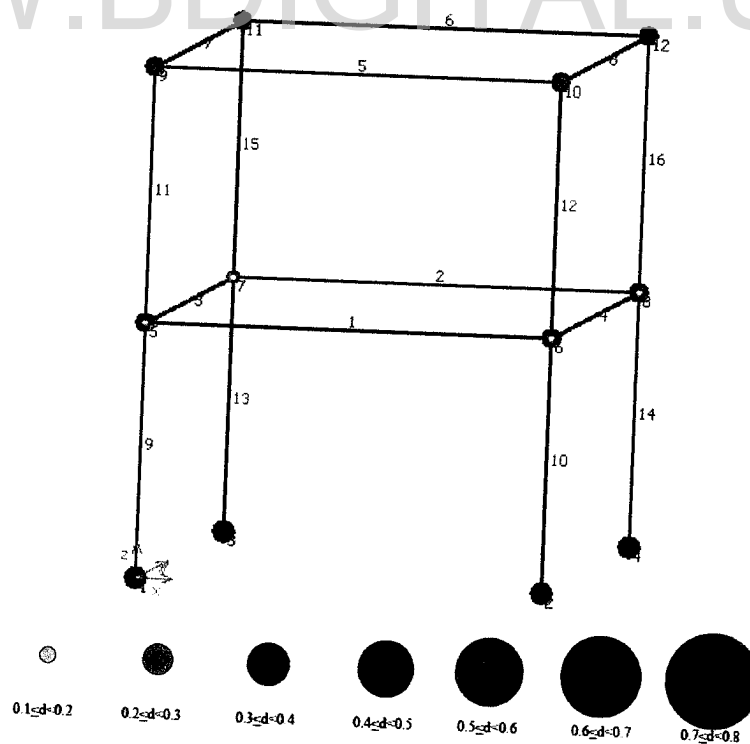
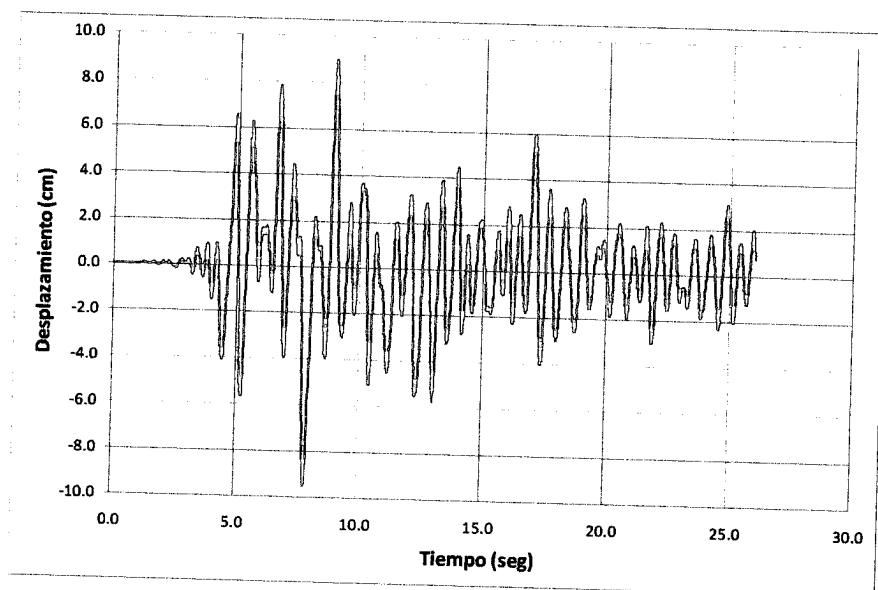
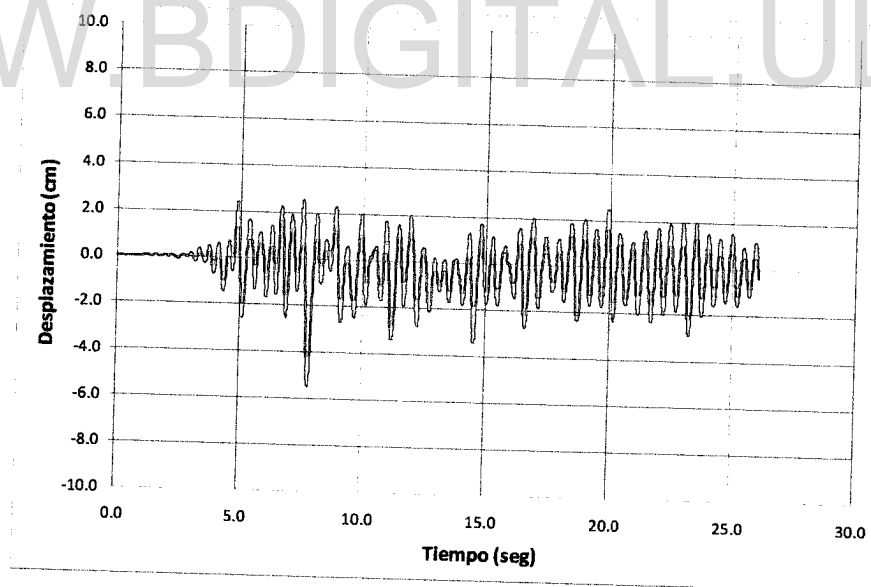


Figura 7.47 Mapa de daño luego de aplicar el sismo.

En la figura 7.48 se presentan los desplazamientos longitudinales (eje X), y transversales (eje Y) del segundo piso, correspondientes a la simulación numérica.



(a)



(b)

Figura 7.48 Desplazamientos segundo nivel (a) Longitudinal, (b) Transversal.

7.3 Ejemplos numéricos para elementos Muros 2D de Mampostería de Relleno (M2DMR):

Con el fin de validar y verificar la adaptación del elemento finito de mampostería junto con el elemento de pórtico de concreto armado 2D, se realizaron tres simulaciones numéricas de ensayos experimentales encontrados en la literatura. Las dos primeras simulaciones corresponden a las descritas en el capítulo 4 del presente trabajo, para el caso de cargas monotónicas y cíclicas. La tercera simulación pertenece a una prueba experimental de un edificio de concreto armado sometido a un acelerograma artificial.

Pórtico con mampostería monotónico [6]: El pórtico con mampostería se corresponde a un ensayo experimental del programa experimental de la tesis de maestría de Borges [6], realizado en el Laboratorio de Materiales y Ensayos, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. El pórtico se construyó de concreto armado de un vano y un nivel, de 1.60m de altura y de 1.60m de luz libre. Las vigas y columnas se construyeron de 20x20cm, con refuerzo metálico de 4 cabillas de 3/8" para el acero a flexión y estribos de barras de 5mm, separados a 10cm en zonas no confinadas y a 7cm en zonas confinadas. El concreto se preparó con una resistencia última a compresión de 450 kg/cm². El relleno de la mampostería se hizo con ladrillos con 3 huecos de arcilla, de dimensiones de 5x10x20cm, para el mortero se preparo una mezcla con relación 5:1. En la figura 7.49 se muestran las características del pórtico.

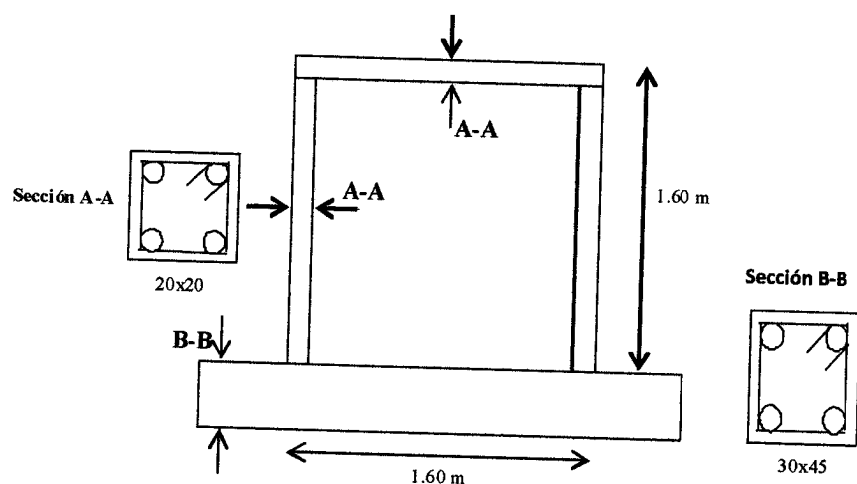


Figura 7.49 Características del espécimen ensayado.

Para el ensayo se usó un actuador hidráulico, que es básicamente un cilindro con un pistón. Con dicho actuador se impuso un desplazamiento en la esquina superior derecha y se incrementaron los desplazamientos en forma monótonica, hasta obtener una degradación apreciable de la resistencia del espécimen.

Los parámetros del modelo usados en la simulación son: S_o (ton/cm²)= 22.0, c (ton/cm²)=0.58, n_y (ton)=6.5, m (1/cm)=0.20, α =10.0, P_{cr} (cm)=1.40.

En la Figura 7.50a se muestra la respuesta del muro ensayado, y en la figura 7.50b los resultados de la simulación numérica.

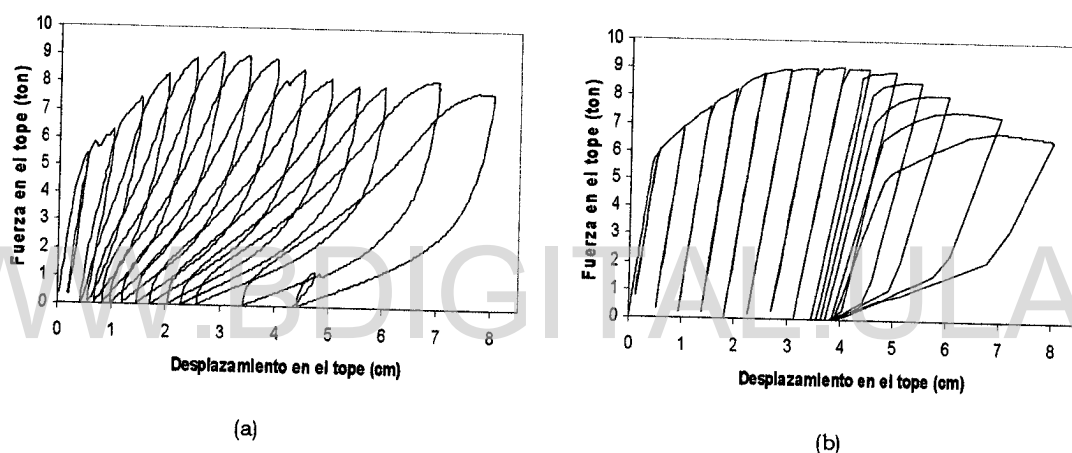


Figura 7.50 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental [6], (b) Simulación numérica.

Como puede verse de la comparación del ensayo con la simulación, el modelo implementado es capaz de representar de forma muy similar la combinación de los dos elementos (elemento de daño concentrado con fatiga de bajo ciclaje en pórticos de concreto armado y elemento de mampostería de relleno), por lo que el modelo descrito es capaz de representar el comportamiento de este tipo de estructuras.

Pórtico con mampostería cíclico [47]: El pórtico con mampostería cíclico se corresponde a un ensayo experimental del programa experimental de la tesis Doctoral de Puglisi [47], realizado en el Laboratorio de Materiales y Ensayos, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Al igual que para el ensayo monótonico se

usó un actuador hidráulico, con el cual se impuso un desplazamiento en la esquina superior derecha y se incrementaron los desplazamientos en forma cíclica, hasta obtener una degradación apreciable de la resistencia del espécimen. El pórtico usado posee iguales características al pórtico con mampostería monotónico.

En la Figura 7.51a se muestra la respuesta del muro ensayado y los resultados de la simulación numérica 7.51b. Al igual que para el caso monotónico se obtiene una buena representación del comportamiento observado en el ensayo experimental.

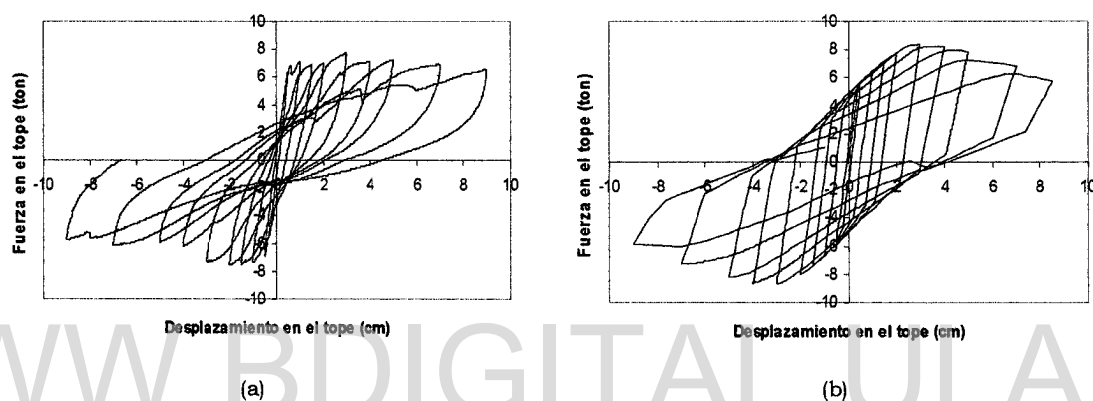


Figura 7.51 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Ensayo experimental [47], (b) Simulación numérica.

Estructura aporticada con mampostería [47]: La estructura aporticada con mampostería se corresponde a una prueba experimental de un edificio de concreto armado sometido a un acelerograma artificial, que se desarrolló en el Laboratorio Europeo para la Evaluación Estructural (ELSA por sus siglas en inglés), en Ispra, Italia, mediante el método pseudodinámico (PSD).

Esta prueba se realizó en un muro de reacción, y las cargas se aplicaron a través de un controlador pseudo-dinámico mediante la acción de un gato hidráulico entre la estructura y el muro. El edificio inicialmente se analizó sin mampostería de relleno. Los resultados obtenidos y las características geométricas, se encuentran en la sección 7.1.2 de ejemplos numéricos para elementos de concreto armado 2D del presente capítulo.

Posteriormente, al edificio se le colocó mampostería de relleno solamente en los pórticos 1 y 3, ver figura 7.52. El relleno de la mampostería se realizó con bloques (usados en Italia) de dimensiones de 245x112x190mm. Para el mortero se preparó una mezcla con relación 1:1:5.

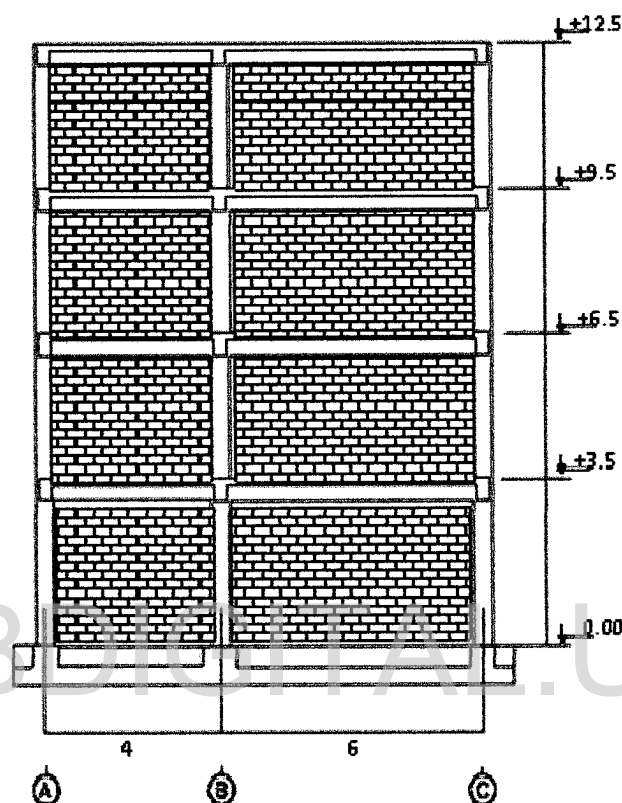


Figura 7.52 Vista lateral del pórtico 1 [47].

Los parámetros del modelo para la mampostería usados en la simulación son:

Tabla 7.15 Parámetros del modelo del pórtico con mampostería (ELSA).

Nivel	S_o (ton/cm ²)	c (ton/cm ²)	n_y (ton)	m (1/cm)	α	P_{cr} (cm)
1-2	75.7	0.58	35.7	0.52	8	1.4
3	70.7	0.58	35.7	0.52	8	1.4
4	55.7	0.58	35.7	0.52	8	1.4

La historia de desplazamientos impuestos a cada nivel se muestra en la figura 7.53.

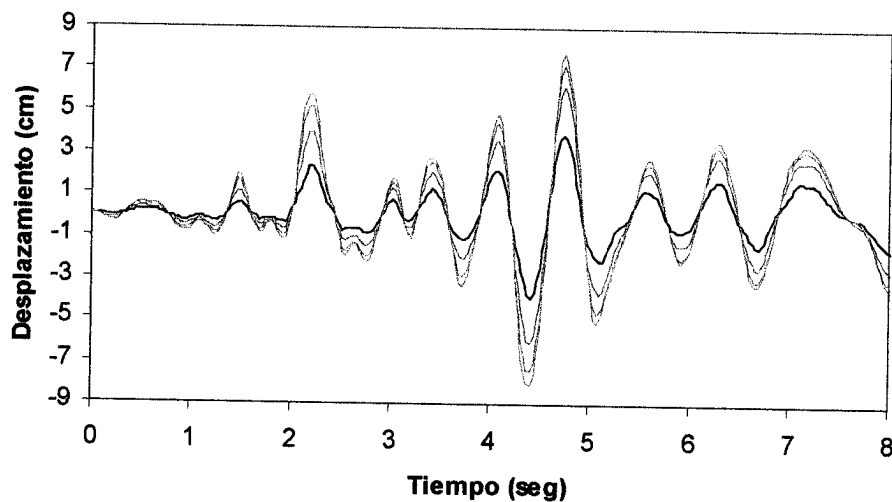
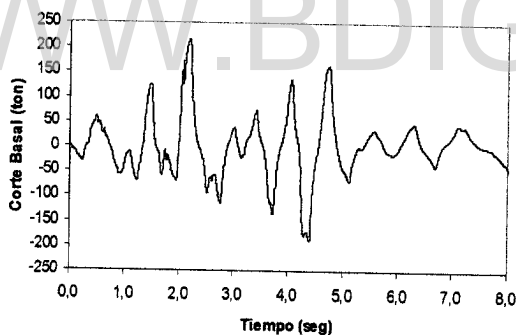
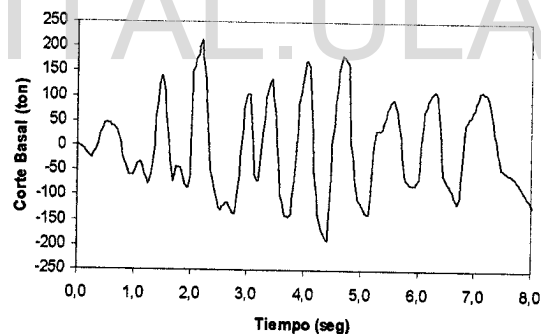


Figura 7.53 Historia de desplazamiento aplicada a la estructura [47].

En la Figura 7.54a se muestra la respuesta de la estructura ensayada, y en la Figura 7.54b los resultados de la simulación obtenidos a través de la implementación numérica.



(a)



(b)

Figura 7.54 Grafica Cortante basal vs. Tiempo (a) Ensayo experimental [47], (b) Simulación numérica.

Como puede verse de la comparación del ensayo con la simulación, el modelo propuesto es capaz de representar la combinación de los dos elementos (elemento de daño concentrado con fatiga de bajo ciclaje en pórticos de concreto armado y elemento de mampostería de relleno), sin embargo existe una discrepancia al final de la grafica debido a que el modelo ensayado considera amortiguamiento, mientras que el modelo implementado no lo toma en cuenta.

7.4 Ejemplos numéricos para elementos Viga – Columnas – Muros de Corte 2D de Concreto Armado (VCM2DCA):

Con el fin de validar y verificar la adaptación del elemento finito para estructuras duales de concreto armado, se presentan a continuación los resultados obtenidos de 7 simulaciones numéricas. En ellos se puede observar la exactitud entre PEEF y Abaqus modificado. Estas simulaciones corresponden al estudio experimental realizado por Perdomo [46].

7.4.1 *Simulaciones de muros sin carga axial*: Un total de 4 muros con cuatro características geométricas diferentes, se ensayaron bajo carga lateral cíclica no reversible sin carga axial para evaluar el comportamiento inelástico hasta la falla. Los muros se diseñaron para que su resistencia a cortante resultara menor que su resistencia a flexión con relaciones de aspecto menores a 2.5.

Muro tipo I: Especimen de dimensiones 100x600mm con relación de aspecto igual a 1.48, se reforzó longitudinalmente con 5 cabillas de diámetro 5.0mm y 3 cabillas de diámetro 1/2" en los bordes. El acero longitudinal de resistencia cedente igual 550 MPa para las cabillas de diámetro 5.0 mm y de 412 MPa para las cabillas de diámetro 1/2". El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cerrados de diámetro 5.0mm espaciados a cada 200mm. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm. En la figura 7.55 se muestran los detalles constructivos del muro tipo I.

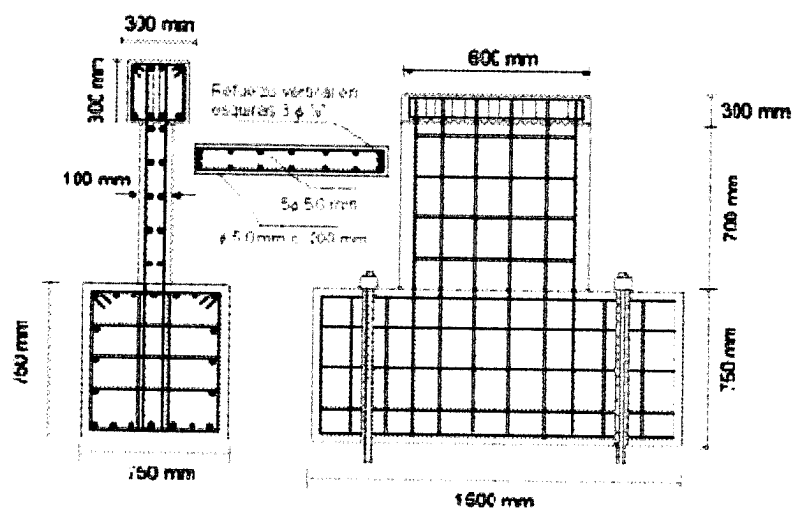


Figura 7.55 Características geométricas del muro tipo I [46].

La tabla 7.16 muestra los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño usados en la simulación del muro tipo I.

Tabla 7.16 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo I.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	v_y	q_s	c_s
SW28.7-85I	0.029	172.0	-0.70	362000	0.005	66.2	-0.25	48900

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica usando el programa de elementos finitos (PEEF) y Abaqus modificado, así como el resultado experimental.

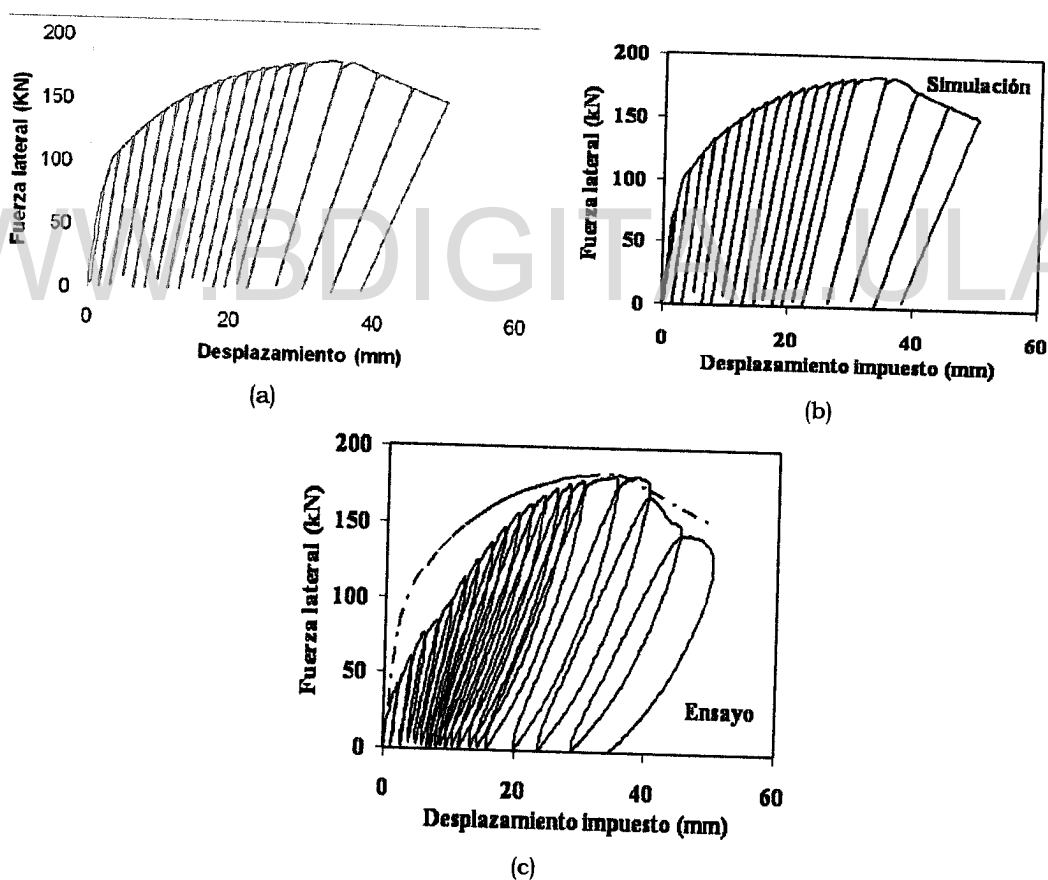


Figura 7.56 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

Muro tipo II: Un espécimen de dimensiones 150 x 450mm con relación de aspecto igual a 1.27, se reforzó longitudinalmente con 5 cabillas de diámetro 1/2" de resistencia cedente igual a 412 MPa. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cerrados de diámetro 3/8" espaciados a cada 200mm en toda la longitud del elemento. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm.

En la figura 7.57 se muestran los detalles de diseño de la probeta.

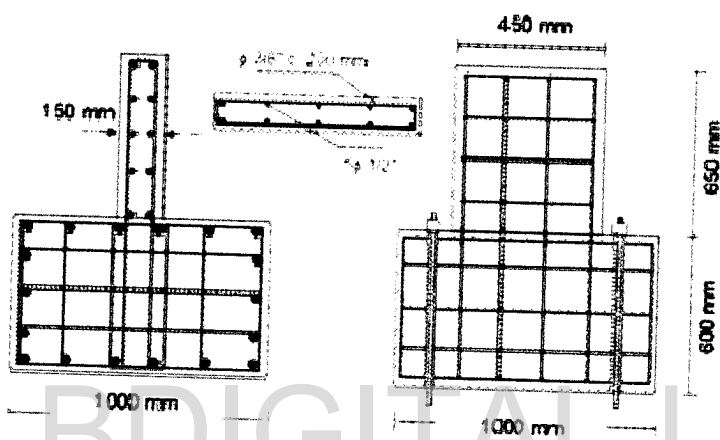


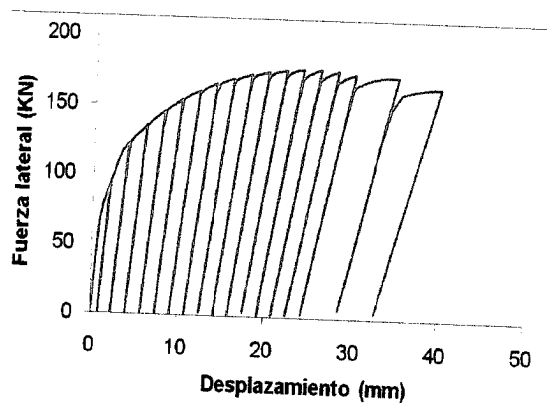
Figura 7.57 Características geométricas del muro tipo II [46].

En la tabla 7.17 se muestran los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño para el muro tipo II.

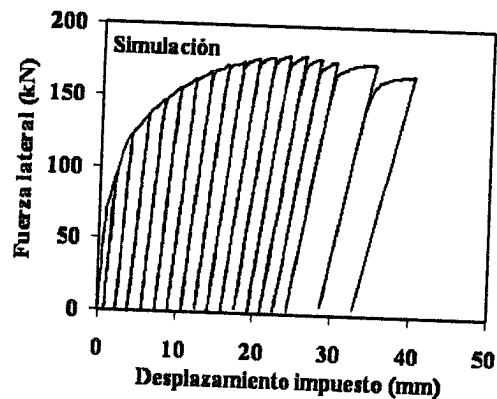
Tabla 7.17 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo II.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	ν_y	q_s	c_s
SW18.8-54.5II	0.007	75.4	- 0.33	190000	0.003	72.1	- 0.17	21100

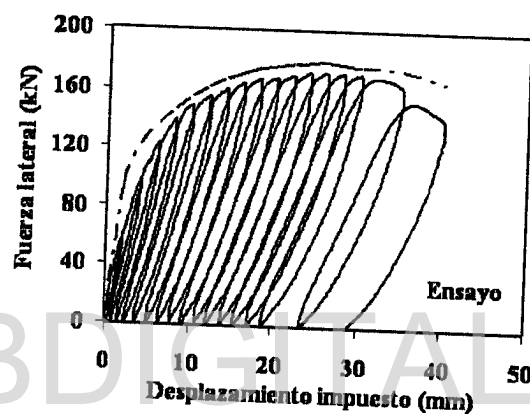
En la figura 7.58 se muestra la curva carga-desplazamiento experimental y las simulaciones numéricas (PEEF y Abaqus modificado) del muro tipo II.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.58 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

Muro tipo III: Un espécimen de dimensiones 125x 600mm con relación de aspecto 1.04, se reforzó longitudinalmente con 14 cabillas de diámetro 3/4" de resistencia cedente igual a 412 MPa. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cerrados de diámetro 3/8" espaciados a cada 300mm en toda la longitud del elemento. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm.

En la figura 7.59 se muestran los detalles de diseño del muro tipo III.

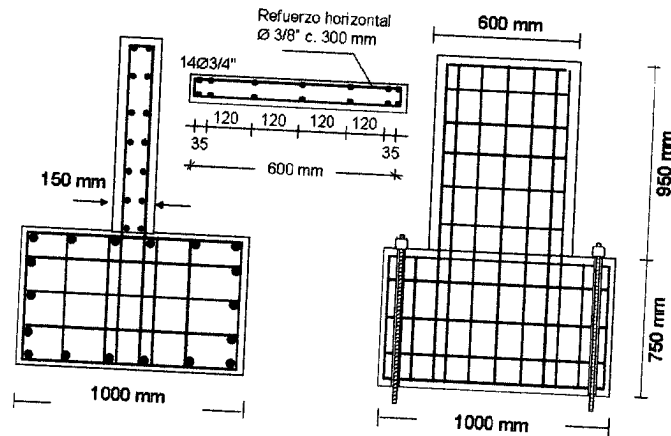


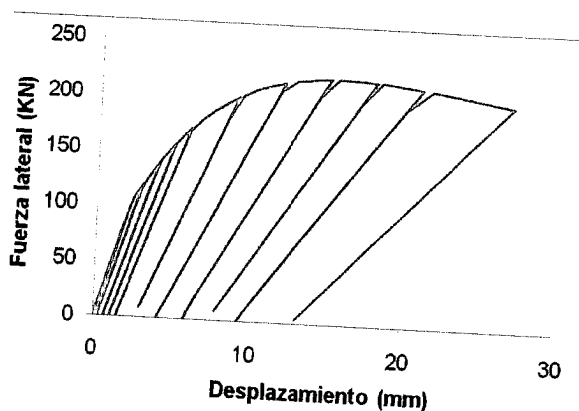
Figura 7.59 Características geométricas del muro tipo III [46].

En la tabla 7.18 se muestran los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño para el muro tipo III.

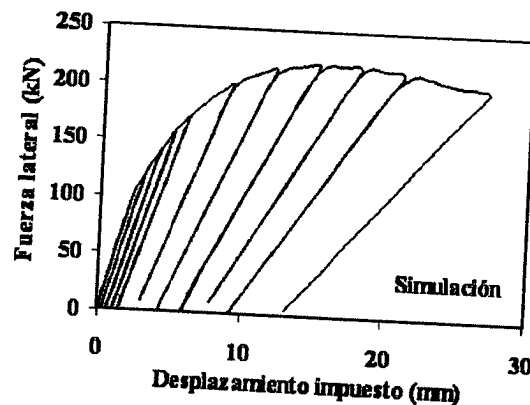
Tabla 7.18 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo III.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	v_y	q_s	c_s
SW24.2-60III	0.018	565	- 1.02	1410000	0.010	114.0	- 0.60	47000

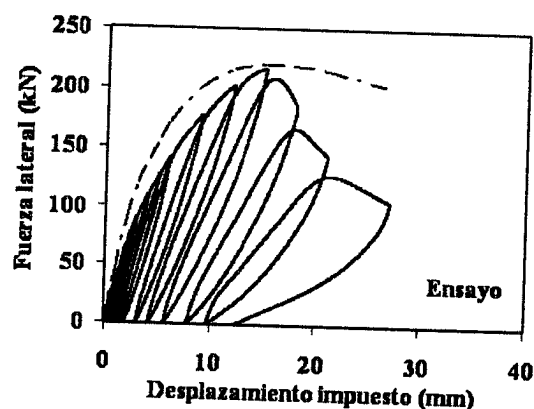
En la figura 7.60 se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica usando el programa de elementos finitos (PEEF) y Abaqus modificado, así como el resultado experimental.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.60 Gráfica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

Muro tipo IV: Un espécimen de dimensiones 125x500 mm, con relación de aspecto de 2.11, se reforzó longitudinalmente con 12 cabillas de diámetro 3/4" de resistencia cedente igual a 412Mpa. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cuadrados de diámetro 3/8" espaciados a cada 300mm en toda la longitud del elemento. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm.

En la figura 7.61 se muestran los detalles de diseño del muro tipo IV.

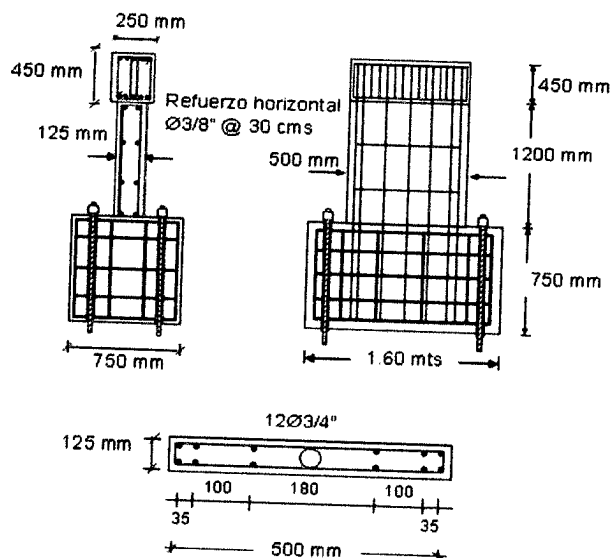


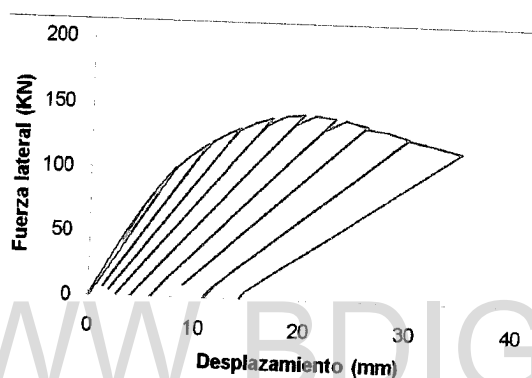
Figura 7.61 Características geométricas del muro tipo IV [46].

En la tabla 7.19 se muestran los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño para el muro tipo IV.

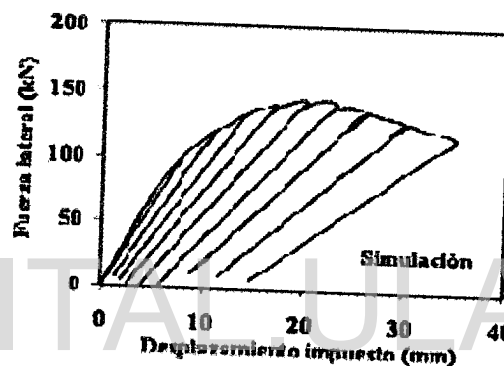
Tabla 7.19 Parámetros de las funciones inelásticas del muro tipo IV.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	ν_y	q_s	c_s
SW16.7-100IV	0.041	434.0	-2.27	835000	0.006	121.0	-0.30	67600

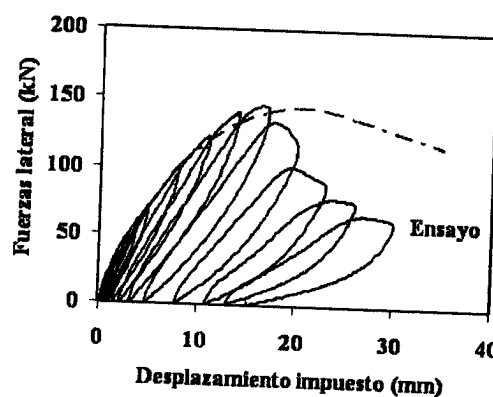
En la figura 7.62 se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica usando el programa de elementos finitos (PEEF) y Abaqus modificado, así como el resultado experimental.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.62 Gráfica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

7.4.2 *Simulaciones de elementos de pórticos sin carga axial*: Un total de 3 elementos de pórtico con características geométricas diferentes se ensayaron bajo carga lateral cíclica no reversible sin carga axial, para evaluar el comportamiento inelástico hasta la falla, con la finalidad de validar el modelo elastoplástico degradable por corte y flexión en estructuras duales.

Elemento de pórtico tipo I: Un espécimen de dimensiones 200x200mm con relación de aspecto de 8.1, se reforzó longitudinalmente con 6 cabillas de diámetro 1/2" de resistencia cedente igual a 412 MPa. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cerrados de diámetro 3/8" espaciados a cada 100mm en toda la longitud del elemento. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm.

En la figura 7.63 se muestran los detalles de diseño.

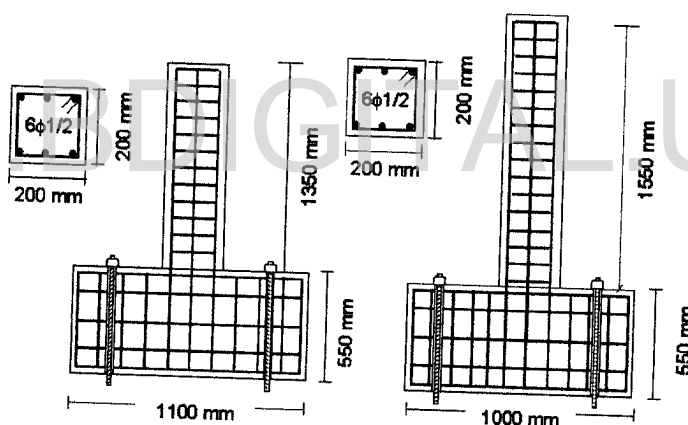


Figura 7.63 Características del elemento de pórtico tipo I [46].

En la tabla 7.20 se muestran los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño para el elemento de pórtico tipo I, calculados con las propiedades resistentes de la sección.

Tabla 7.20 Parámetros de las funciones inelásticas del elemento de pórtico tipo I.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	v_y	q_s	c_s
EP26.0-141I	0.008	35.1	-0.36	12100	0.003	60.6	-0.09	11200

En la figura 7.64 se muestra la curva fuerza-desplazamiento para la simulación numérica usando PEEF, Abaqus modificado y el resultado experimental.

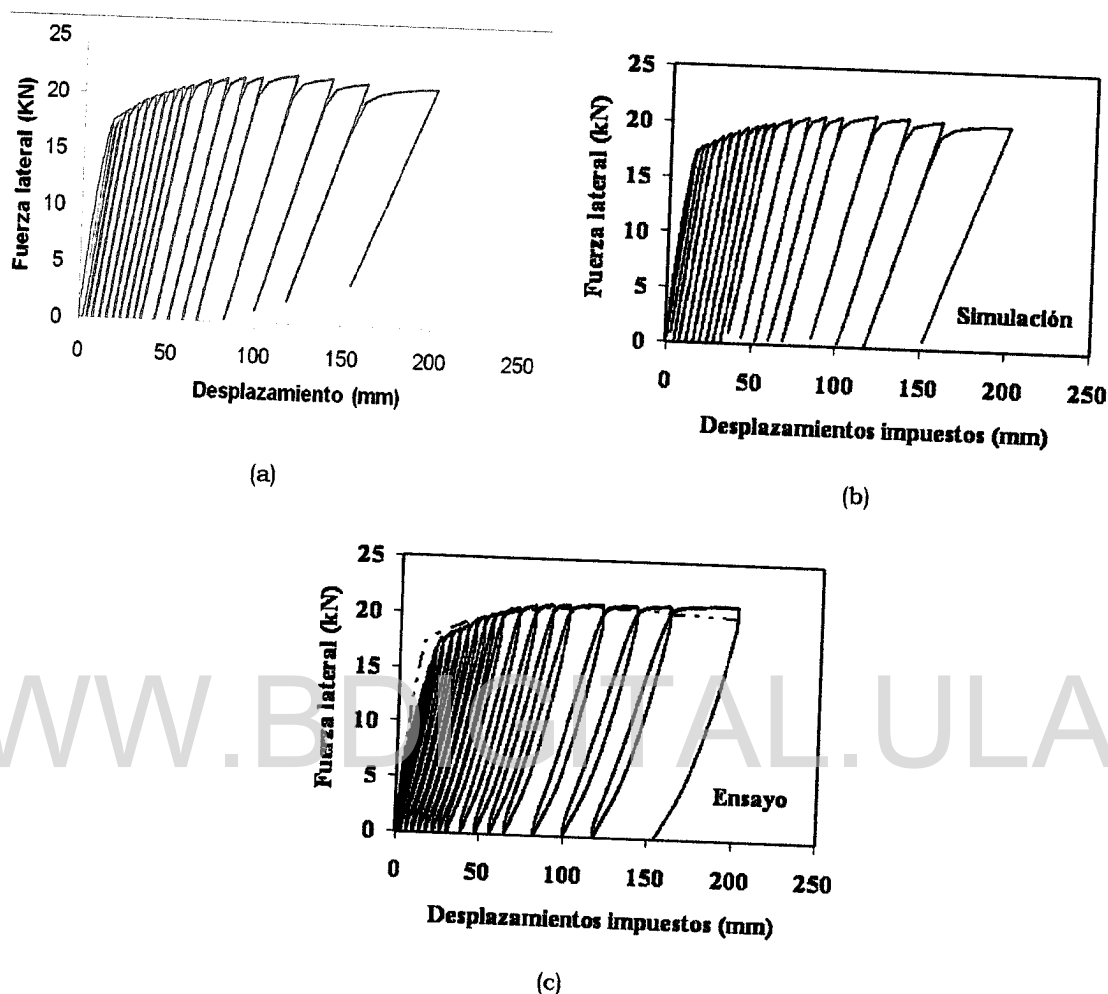


Figura 7.64 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

Elemento de pórtico tipo II: Un espécimen de dimensiones 250x250mm con relación de aspecto de 2.67, se reforzó longitudinalmente con acero de resistencia cedente igual a 412MPa. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cerrados de resistencia cedente igual a 412MPa. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm.

En la figura 7.65 se muestran los detalles de diseño.

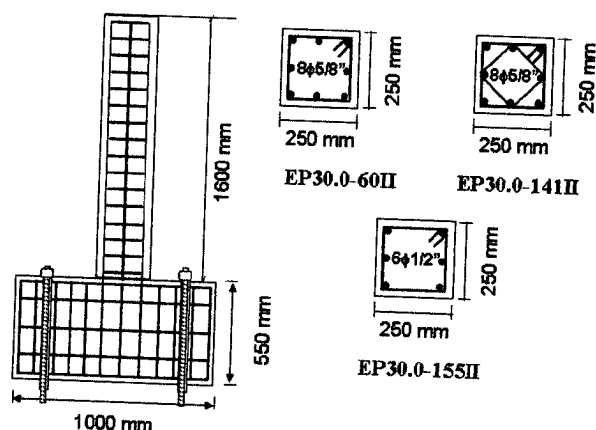


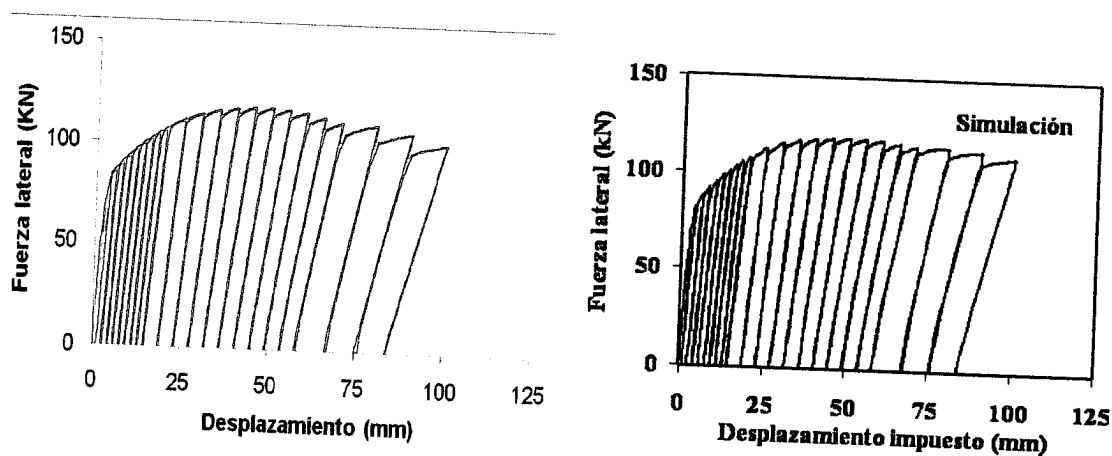
Figura 7.65 Características del elemento de pórtico tipo II [46].

En la tabla 7.21 se muestran los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño para el elemento de pórtico tipo II.

Tabla 7.21 Parámetros de las funciones inelásticas del elemento de pórtico tipo II.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	v_y	q_s	c_s
EP30.0-60II	0.006	62.0	-0.55	29400	0.004	69.4	-0.10	18500

En la figura 7.66 se muestra la curva fuerza-desplazamiento para la simulación numérica usando PEEF, Abaqus modificado y el resultado experimental.



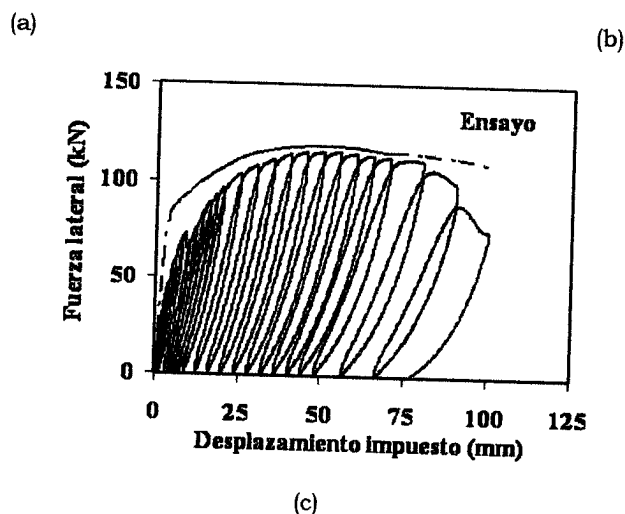


Figura 7.66 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

Elemento de pórtico tipo III: Un espécimen de dimensiones 250x250mm con relación de aspecto de 3.55, se reforzó longitudinalmente con 6 cabillas de diámetro 1/2" de resistencia cedente igual a 412 MPa. El recubrimiento del refuerzo longitudinal es de 25mm. El acero de refuerzo transversal consiste en estribos cerrados de diámetro 3/8" espaciados a cada 80mm en toda la longitud del elemento. El recubrimiento del refuerzo transversal es de 12mm.

En la figura 7.67 se muestran los detalles de diseño.

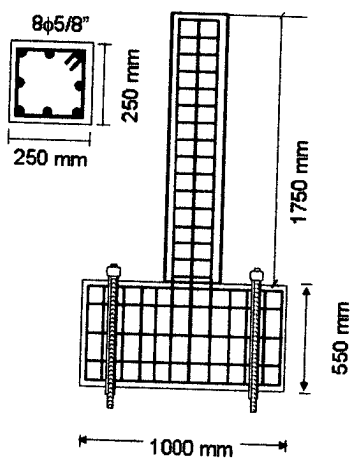


Figura 7.67 Características del elemento de pórtico tipo III [46].

En la tabla 7.22 se muestran los valores de los parámetros de identificación de las funciones de fluencia y de daño para el elemento de pórtico tipo III.

Tabla 7.22 Parámetros de las funciones inelásticas del elemento de pórtico tipo III.

Probeta	G_{cr}	m_y	q	c	G_{crs}	v_y	q_s	c_s
EP31.7-80III	250	250	800	225	3.55	2.53	1.03	31.7

En la figura 7.68 se muestra la curva fuerza-desplazamiento para la simulación numérica usando PEEF, Abaqus modificado y el resultado experimental.

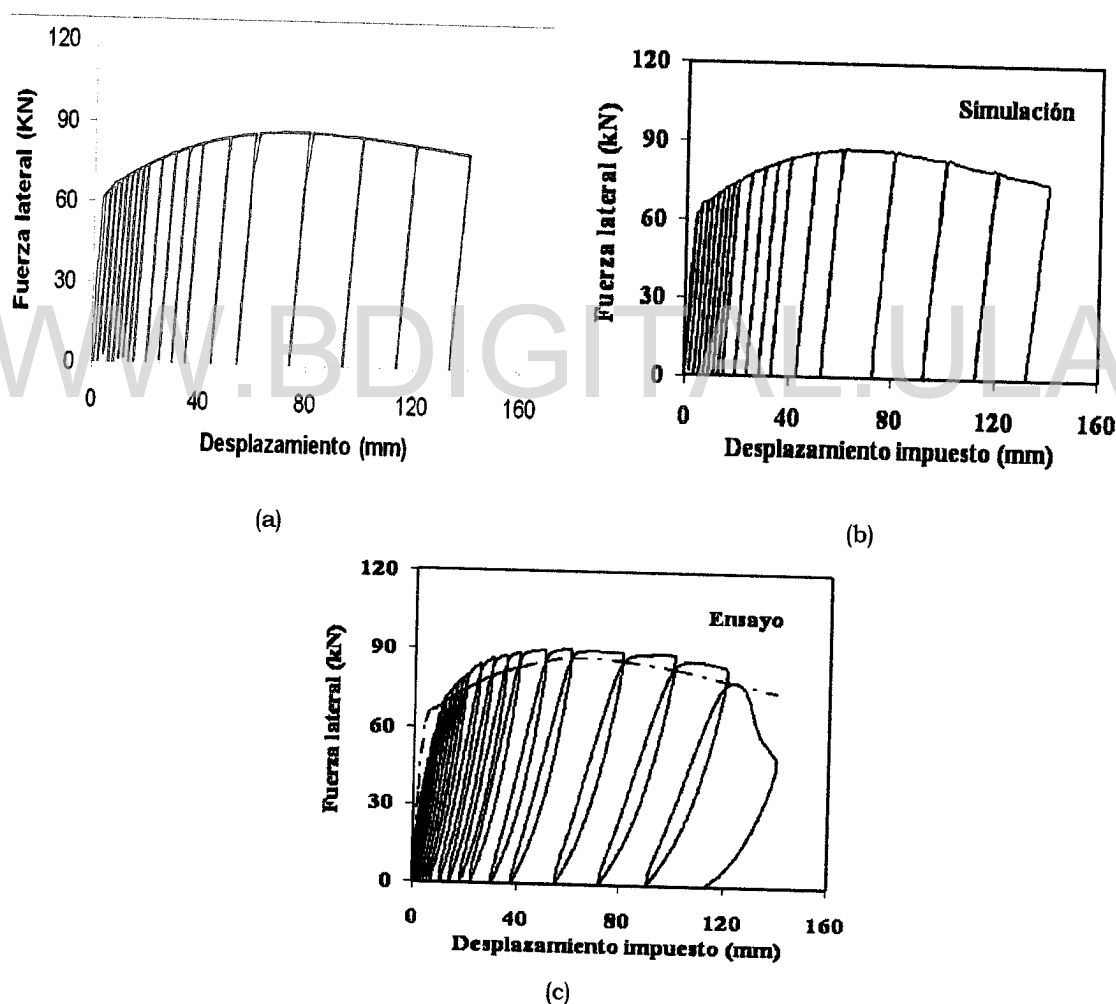


Figura 7.68 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento (a) Simulación Numérica obtenida con PEEF, (b) Simulación Numérica obtenida con Abaqus modificado [46], (c) Ensayo experimental [46].

Conclusiones

Desde 1990 en la Universidad de Los Andes (ULA), se ha llevado a cabo un programa de investigación en el área de la simulación numérica del proceso de daño en estructuras, alcanzando especial desarrollo en un marco conceptual original, denominado Teoría del Daño Concentrado. Mediante esta teoría ha sido posible escribir una serie de elementos finitos que permiten el análisis de estructuras de concreto armado.

En busca de un instrumento computacional de apoyo, en este trabajo se presentó un programa de elementos finitos de propósito general denominado "Programa Endógeno de Elementos Finitos (PEEF)", por medio del cual fue posible incorporar las subrutinas de elementos existentes. Actualmente a través de PEEF es viable realizar simulaciones numéricas lineales y no lineales de estructuras aporticadas de concreto armado en dos y tres dimensiones, incluyendo la mampostería de relleno, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas. Adicionalmente, PEEF se estructuró de tal manera que permite la inclusión de nuevas librerías de elementos finitos, independientemente del número de nodos y grados de libertad que posea el elemento.

Específicamente la librería de PEEF cuenta con los siguientes elementos finitos:

VC2DCA: Elemento viga-columna 2D de concreto armado.

VC3DCA: Elemento viga-Columna 3D de concreto armado.

M2DMR: Muro 2D de mampostería de relleno.

VCM2DCA: Viga - columna - muro de corte 2D de concreto armado.

Para verificar la correcta implementación de cada uno de los elementos finitos de la librería, se llevó a cabo la simulación numérica de un gran número de ejemplos correspondientes a ensayos experimentales encontrados en la literatura o de edificios reales. Estos resultados fueron comparados de manera exitosa con los obtenidos experimentalmente o mediante los programas: Portal de Pórticos 2D y Abaqus.

Para facilitar el uso del programa PEEF, se escribió un manual de usuario, el cual ofrece una documentación completa sobre: definición de un modelo, descripción de palabras claves, y tipos de elementos finitos.

Adicionalmente, en este trabajo se propone un enfoque diferente al uso clásico de la tecnología de los elementos finitos, en donde el usuario es un especialista que dispone de sofisticadas herramientas computacionales. Por lo tanto, el objetivo que se persigue es aumentar el espectro de uso, de manera que esté al alcance de un mayor número de usuarios de mediano y alto nivel, manteniendo el nivel tecnológico y científico. Para lograrlo se propone que los programas de elementos finitos sean accedidos vía Web a través de aplicaciones específicas, evitando por ejemplo la compra de costosas licencias de uso.

Como aplicación directa de esta filosofía se presenta el “Portal de Pórticos 3D”, el cual es una herramienta computacional que permite el análisis de pórticos tridimensionales de concreto armado, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas. Y constituye la primera aplicación de uso específico usando PEEF.

En el marco de la nueva filosofía, el programa Portal de Pórticos 3D cuenta con las siguientes características:

- *Libre acceso:* Podrá ser accedido vía Web, usando PC, portátiles o cualquier dispositivo móvil.
- *Simple:* Es un portal de aplicación específica con interfaces agradables al usuario.
- *Alta capacidad tecnológica:* Las simulaciones numéricas no se realizarán en la computadora personal del usuario sino en un servidor de alto rendimiento, que puede ser usando ambiente cluster o Grid.
- *Alta capacidad científica:* Las teorías fueron reescritas bajo la nueva visión, dando como resultado la “Teoría del Daño Concentrado”.

Finalmente, el presente trabajo ofrece a la comunidad científica una herramienta basada en el método de los elementos finitos denominada "PEEF", para la solución numérica de problemas de mecánica de sólidos. Al ser un programa de propósito general, usuarios especializados podrán incorporar sus elementos y validar sus modelos. Una vez validados, el siguiente paso consistirá en la creación de portales de aplicaciones específicas, los cuales se constituyen en el vínculo entre los avances científicos y la sociedad en general.

Así mismo, para los elementos finitos existentes en la librería de PEEF, es necesario el desarrollo de nuevos portales de aplicaciones, inspirados en una investigación abierta, que involucre al ciudadano común, no especialista, en la solución de problemas planteados en estudios científicos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

187
Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Referencias bibliográficas

1. ABAQUS. User's manual. Hibbitt: Karlsson&Sorensen,Inc;2001.
2. Abrams Daniel P. "Influence of Axial Force Variations on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns." ACI Structural Journal, Vol. 84 N° 3, May-June 1987, pp. 246-254.
3. Andreaus U, Cerone M., D'Asdia P., and Iannozzi F. "A Finite Element Model for the Analysis of Masonry Structures under Cyclic Actions", Proceeding of the Seventh Internacional Brick and masonry Conference", Melbourne, Australia, February, Vol. 1, 1985, pp. 479-488.
4. Benallal, A., Billardon, R., and Doghri, I. "An integration algorithm and the corresponding consistent tangent operator for fully coupled elastoplastic and damage equations". Communications in Applied Numerical Methods, 4, 731-740, 1988.
5. Bertero,V., Popov E. y Shao-Yeh, M. "Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular ant T-Beams", University of California, Mayo 1976.
6. Borges, Eva E., "Modelado de pórticos de concreto armado con mampostería de relleno bajo cargas monotónicas", Tesis de Magíster Scientiae en Ingeniería Estructural. Universidad de Los Andes, 2003.
7. Bousias Stathis N., Verzeletti Guido, Fardis Michael N. and Gutierrez Eugenio. "Load-Path Effects in Column Biaxial Bending with Axial Force." Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121 N° 5, May 1995, pp. 596-605.
8. Chopra, A., "Dynamics of structures". Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 1981.

9. Ciencia ciudadana. Recuperado de:
<http://www.openscientist.org/2011/09/finalizing-definition-of-citizen.html>.
10. Cipollina A., López Inojosa A. and Flórez López J. "A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames". *Comp. & Struct.*, Vol. 54 N° 6. pp. 1113-1126, 1995.
11. Clasificación de los cluster. Recuperado de:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Cluster>.
12. Dhatt, G., Touzot, G. "Une présentation de la méthode des éléments finis". Maloine S. A Éditeur Paris et Les presses de L'Université Laval Québec, 1981.
13. Doudoumis I and Mitsopoulou E. "Non-linear Analysis of multistory infilled frames for unilateral contact conditions", *Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, 1986, Vol. 3, pp. 6.5/63-70.
14. Ecuador. Centro Jambatu de Investigación y Conservación de Anfibios. Recuperado de: <http://www.anfibioswebecuador.ec>
15. Flórez López J. "Plasticidad y Fractura en Estructuras Aporticadas." *Monografías de Ingeniería Sísmica*. Editor A. H. Barbat. Monografía CIMNE IS-35 1999. Universidad Politécnica de Madrid.
16. Floréz-López J., Hamar V., Hernández A., Hoeger H., León R., Núñez L. A., Ruíz N., Uzcátegui M., "Portal of Damage on Grid". *Proceedings 3 Ibergrid Conference*. Abril 2008.
17. Griffith AA. The phenomenon of ruptura and flow in solids. *Phil Trans R Soc Lond* 1921; A221:163-97.
18. Hamar, Vanessa. Grids computacionales. In *proceedings of Conferencia Latinoamericana de Computación de Alto Rendimiento CLCAR*, Santa Marta, Colombia (2007). Disponible en <http://clcar.ula.ve>

19. Holmes M. "Steel frames with brickwork and concrete infilling". Proc. Inst. of Civil Eng. London England. Part 2. Vol.19, 1961.
20. <http://civil.eng.buffalo.edu/idarc2d50/>
21. <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Text/>
22. http://okok.org/forum/attachments/57/571198-IDARC_17-embed.jpg
23. <http://www.ansys.com/>
24. <http://www.construaprende.com/csi/etabs>
25. <http://www.construaprende.com/csi/Sap2000>
26. <http://www.csiberkeley.com/>
27. <http://www.designworldonline.com/articles/4910/244/NEi-Software-Announces-NEi-Explicit-for-Nastran.aspx>
28. <http://www.iberisa.com/productos/nxnastran.htm>
29. <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/AU/intro>
30. <http://www.portaldeporticos.ula.ve/>
31. <http://www.simulia.com>
32. Informe Técnico. "Análisis del anillo de descarga de una turbina". Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2007.
33. Jaramillo S. Nayive: "Portal de Pórticos: un programa de elementos finitos basado en la WEB", Tesis de Magíster Scientiae en Ingeniería Estructural. Universidad de Los Andes, 2004.

34. Klingner R. Y Bertero V. "Infilled Frames in Earthquake-Resistant Construction, University of California, Berkeley, Report No.EERC 76-32, December, 1976.
35. Lemaitre J. y Chaboche J. L., *Mécanique des matériaux solides*. Dunod (1985).
36. Maldonado C. Lisbeth, Uzcátegui A. Diego: "Desarrollo de una herramienta computacional, con interfaz Web, para realizar análisis en tres dimensiones de la vulnerabilidad sísmica de estructuras civiles". Trabajo de Grado presentado para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Los Andes, Abril 2012.
37. Mallick D. Y Severn R. "The Behaviour of Infilled Frames under Static Loading", *Proceeding of the Institution of Civil Engineering*, Vol.38, 1967, pp.639-656.
38. Marante G. Maria E.: "Evaluación de la seguridad estructural. Contribuciones a la Teoría del Daño Concentrado, a la Mecánica Computacional de la Fractura y a la Teoría de Localización". Tesis de Doctorado en Ciencias Aplicadas a la Ingeniería. Universidad de Los Andes, 2004.
39. M. E. Marante, L. Suárez, A. Quero, J. Redondo, B. Vera, M. Uzcategui, S. Delgado, L. R. León, L. Núñez, and J. Flórez-López. "Portal of damage: a web-based finite element program for the analysis of framed structures subjected to over loads". *Advances in Engineering Software*, 36(5): 346-358, May 2005.
40. Marigo J. J., "Modelling of brittle and fatigue damage for elastic material by growth of microvoids". *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 21, Issue 4, 1985, Pages 861-874.
41. México. Instituto Nacional de ecología. Departamento de Ciencia de la Información del Laboratorio de Ornitología. Recuperado de: <http://www.ine.gob.mx/index.php>.

42. Negro, P., Verzeletti, G., Magonette, G.E., Pinto, A.V. "Test on a four-storey full-scale R/C frame designed according to eurocodes 8 and 2: Preliminary report. European Laboratory for Structural Assessment.
43. Oliva M. G. y Clough R. W., "Biaxial seismic response of R/C frames". J.Struct. Engrg.-ASCE, 113 (6): 1264-1281, 1987.
44. Pacific Earthquake Engineering Center (PEER), Disponible en <http://peer.berkeley.edu/>
45. Paulay T. and Priestley M. Seismic design of Reinforced Concrete and masonry Building, John Wiley & Sons inc., 1992 744p.
46. Perdomo, María E., "Fractura y daño en estructuras duales de concreto armado", Tesis de Doctorado en Ciencias Aplicadas a la Ingeniería. Universidad de Los Andes, 2010.
47. Puglisi, M., "Modelado de la mampostería de relleno mediante la teoría del daño concentrado". Tesis de Doctorado en Ciencias Aplicadas a la Ingeniería. Universidad de Los Andes, 2007.
48. Puglisi M, Uzcategui M, Florez-Lopez J. "Modeling of masonry of infilled frames, Part I: The plastic concentrator". Engineering Structures 2009; 31:113-118.
49. Puglisi M, Uzcategui M, Florez-Lopez J. Modeling of masonry of infilled frames, Part II: Cracking and damage. Engineering Structures 2009; 31:119-124.
50. Reinhorn A., Madam A, Valles R., Reichmann Y. And Mander J. "Modelling of Masonry Infill panels for Structural Analysis, National Centre for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-95-0018, Dec., 1995.
51. Smailbegovic F., Gaydadjiev G., Vassiliadis S., "Sparse Matrix Storage Format". Computer Engineering Laboratory. Recuperado de: http://ce.et.tudelft.nl/publicationfiles/1106_547_smailbegovic.pdf

52. Uzcátegui M., Vera B., Puglisi M., Núñez L., Florez J. "Un portal de cálculo para la simulación numérica del colapso de estructuras de concreto armado". IEEE 5° Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, 2007, Cuernavaca, México.
53. Vecchio Frank J. and Emara Mohamed Basil. "Shear Deformations in Reinforced Concrete Frames." ACI Structural Journal, Technical Paper, Title no. 89-S6, January-February 1992, pp. 46-56.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Anexo A

Manual de usuario del programa endógeno de elementos finitos (PEEF)

Este manual constituye una guía para los usuarios del programa de elementos de finitos, ya que ofrece una documentación completa sobre: definición de un modelo, descripción y definición de palabras claves, y tipos de elementos finitos.

PARTE I

DEFINICIÓN DE UN MODELO

I.1 INTRODUCCION

El análisis de un modelo a través de un programa de elementos finitos se realiza por medio de un archivo de entrada, el cual contiene en una serie de líneas, opciones (palabras claves), líneas de datos y líneas de comentarios, que son interpretadas por el programa de elementos finitos (PEEF). El archivo de entrada está inspirado en la notación usada por el programa Abaqus [1]. Este archivo, puede ser creado usando un editor de texto o a través del programa Portal de Pórticos 3D para el caso de elementos viga-columna 3D de concreto armado.

La gran mayoría de los archivos de entrada contienen la misma estructura básica, por lo tanto en los siguientes párrafos se describen las reglas de sintaxis, convenios (sistema coordinado, grados de libertad,

unidades y tiempo) usados por programa de elementos finitos, así como las partes que definen un modelo.

1.2 REGLAS DE SINTAXIS PARA ARCHIVOS DE ENTRADA

El programa permite dos tipos de archivos: archivo con extensión (.inp) y archivo de historia de datos con extensión (.amp). El primero constituye un archivo que es leído por el programa para el análisis del modelo, y contiene tres tipos de líneas: líneas de palabras claves, líneas de datos y líneas de comentario; el segundo sólo contiene líneas de datos, pues es usado cuando el análisis requiere una gran cantidad de valores tabulados, que pueden ser de aceleración o desplazamiento.

Los tipos de líneas pueden ser:

- Líneas de palabras claves: Estas líneas introducen palabras claves y a menudo parámetros conocidos por el programa, las cuales se encuentran en frases separadas por comas. Los parámetros son usados para definir el comportamiento de una opción.
- Líneas de datos: Se usan para la entrada de datos que pueden ser numéricos o alfanuméricos.
- Líneas de comentarios: Son líneas que se utilizan para escribir comentarios en el archivo de entrada.

Las palabras claves y parámetros son definidos en la Parte II del presente manual, el cual describe cada una de las opciones correspondientes a cada palabra.

1.2.1 Reglas generales para las líneas de palabras claves

- Toda línea debe comenzar con un asterisco (*).
- Si un parámetro es dado, la palabra clave debe estar seguida por una coma (,).
- Los parámetros deben estar separados por comas.
- Una línea de palabras claves no puede contener más de 256 caracteres incluyendo los espacios en blancos.
- Un espacio en blanco dentro de las líneas de comando es ignorado.
- Si un parámetro tiene un valor, se usa el signo igual (=). El valor puede ser entero, real, o carácter.
- Si el último carácter es una coma, la próxima línea es interpretada como una continuación de la palabra clave.

I.2.2 Reglas generales para las líneas de datos

- Las líneas de datos deben ser escritas después de una Palabra Clave, de esta manera los datos son asignados a una opción determinada.
- Cuando se tienen un grupo de datos estos deben estar separados por coma (,).
- Una línea de datos no puede contener más de 256 caracteres incluyendo los espacios en blanco.
- Una línea de datos sólo debe contener el número de datos especificados.
- Las líneas de datos enteros están formadas por datos cuyos caracteres numéricos no llevan el punto decimal.
- Un dato real es una cantidad formada por una parte entera y otra fraccionada, para ello, el punto decimal (.) es usado para definir este tipo de datos.
- La parte fraccionada en un tipo de dato real no puede llevar más de 8 caracteres numéricos o dígitos.
- Un número real puede ser escrito de forma exponencial, de ser así, el exponente será precedido por E y la opción (-) o (+) debe ser colocada.
- Una cadena de datos carácter no pueden contener una longitud superior a 30 caracteres.
- Para datos del tipo carácter el primer dígito no debe comenzar con caracteres numéricos ni especiales.

I.2.3 Reglas generales para líneas de comentarios

- Toda línea de comentario debe comenzar con doble asterisco (**).
- Pueden estar localizadas en cualquier parte del archivo de entrada.
- Son ignoradas por el programa de elementos finitos.
- Pueden contener cualquier tipo de información y se permiten caracteres alfanuméricos y especiales.
- Una línea de comentario no puede contener más de 256 caracteres incluyendo los espacios en blanco.

I.3 CONVENIOS

Los convenios que son usados a través del programa de elementos finitos están definidos en esta sección. Los siguientes tópicos son discutidos: Sistema coordinado, grados de libertad, unidades y tiempo.

I.3.1 Sistema coordenado

El sistema coordenado usado por el programa, es el sistema cartesiano, cuyo convenio de signo positivo se muestra en la figura A-1, y debe coincidir con la regla de la mano derecha.

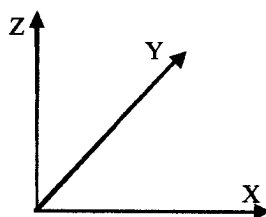


Figura A-1 Sistema coordenada cartesiano.

I.3.2 Grados de libertad

El programa considera actualmente los grados de libertad que se muestran en la tabla A-1.

Tabla A-1 Grados de libertad considerados por el programa de elementos finitos.

(1)	Desplazamiento en X
(2)	Desplazamiento en Y
(3)	Desplazamiento en Z
(4)	Rotación alrededor del eje X
(5)	Rotación alrededor del eje Y
(6)	Rotación alrededor del eje Z
(7)	
(8)	
..	

Estos sólo son activados cuando el análisis lo requiere, ya que cada elemento finito usa los grados de libertad correspondientes.

I.3.3 Unidades

El programa no especifica las unidades a utilizar, por lo tanto, las unidades elegidas deben ser consistentes entre si. Por ejemplo se muestran en la tabla A-2, las unidades utilizadas por Sistema Internacional de unidades (SI), y en la tabla A-3 la usada en el Sistema Técnico (ST).

Tabla A-2 Ejemplo de símbolos y unidades usadas para el Sistema Internacional.

Variable	Indicador	Unidades S.I
Longitud	L	Metro
Masa	M	Kilogramo masa
Tiempo	T	Segundo
Fuerza	F	Newton

Tabla A-3 Ejemplo de símbolos y unidades Técnicas.

Variable	Indicador	Unidades S.T
Longitud	L	Metro
Masa	M	Unidad técnica de masa
Tiempo	T	Segundo
Fuerza	F	Kilogramo fuerza

I.3.4 Tiempo

Se consideran dos medidas de tiempo: tiempo del paso de análisis y tiempo total. El tiempo del paso del análisis es medido desde el comienzo de cada paso partiendo desde cero, mientras que el tiempo total es medido de forma acumulada hasta el último paso del análisis.

I.4. DESCRIPCIÓN DE UN MODELO

I.4.1 Archivo de entrada

La gran mayoría de los archivos de entrada contienen la misma estructura básica, por lo tanto en los siguientes párrafos se describen las partes que definen un modelo de elementos finitos:

1. Un archivo de entrada debe comenzar con la opción *Heading, la cual es usada para definir el título del modelo a analizar.
2. Después del título, el archivo de entrada contiene una sección de datos del modelo para definir: nodos, elementos, propiedades de los materiales, condiciones iniciales, etc.
3. Finalmente, el archivo contiene una historia de datos que definen el tipo de análisis, cargas y salidas requeridas.

La palabra Step divide el modelo en dos tipos de datos: datos del modelo e historia de datos, es decir, todo lo que está por encima de la

palabra **step** se refiere a los datos del modelo y lo que aparece a continuación de la palabra **Step** son la historia de datos.

I.4.1.1 Datos del modelo

Los datos del modelo definen los nodos, elementos, propiedades, tipo de elemento finito o de usuario a usar, condiciones iniciales, etc. La siguiente data debe ser incluida de forma obligatoria dentro del archivo de entrada:

- **Geometría:** La geometría del modelo es definida por los elementos y sus nodos. Las reglas y métodos para definir los nodos y elementos se describen en la Parte II del presente manual. Las Palabras Claves relacionadas son: **Node**, **Nset**, **Element**, **Elset**.
- **Propiedades de los Materiales:** Las propiedades de los materiales deben estar asociadas a los elementos y dependen del tipo de elemento finito o de usuario a utilizar. La palabra clave es: **Property**.
- **Condiciones de contorno:** Se refiere a las restricciones de contornos que son aplicadas a los nodos o grupos de nodos de la estructura y son impuestas antes del análisis de la estructura. La palabra clave relacionada con este tipo de datos es: **Boundary**.

Como dato opcional se tiene:

Condiciones Iniciales: Se refiere a valores iniciales dados a las variables de estado. Las variables de estado dependen del tipo de elemento finito a usar, estas son descritas en la Parte II del presente manual. La palabra clave es: **Initial Conditions**.

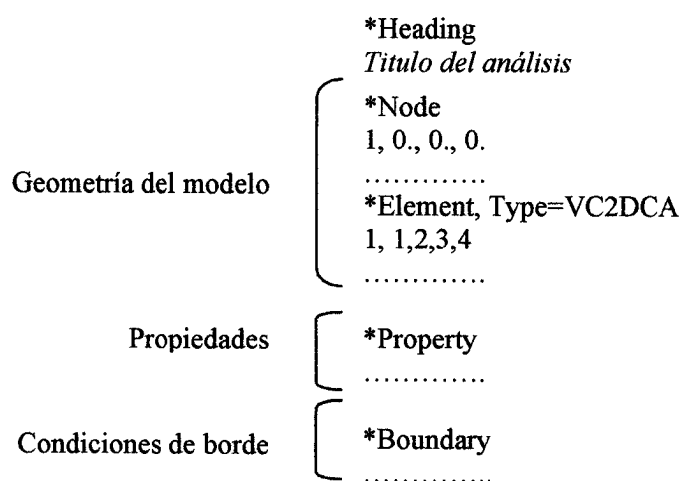


Figura A-2 Líneas de datos y palabras claves usadas en el modelo.

I.4.1.2 Historia de datos

El propósito de un análisis es predecir la respuesta de un modelo sometido a una carga externa. A través de los Steps se introducen cambios en las condiciones de contorno, en las cargas o del tipo de análisis, es importante destacar que no existe límite en el número de steps dentro de un análisis.

El programa de elementos finitos considera dos tipos de steps que están íntimamente relacionados con el tipo de análisis y donde los parámetros requeridos para la palabra clave Step difieren. Los tipos de Steps son: Step estático y Step dinámico (Para mayor información ver Parte II), y pueden ser cambiado de un step a otro.

El estado de la estructura al final de un Step provee las condiciones iniciales para el próximo paso del análisis, obteniéndose fácilmente simulaciones consecutivas de condiciones de cargas para un modelo; por ejemplo, se puede obtener la respuesta dinámica de una estructura luego de ser sometida a cargas estáticas iniciales.

Finalmente, para considerar la historia de datos se debe incluir en el archivo de entrada el tipo de análisis, esta opción permite definir el tipo de análisis que se va a utilizar, debe estar escrita inmediatamente después de la palabra Step.

La historia de datos puede ser incluida de forma opcional a través de un archivo externo. Los datos pueden ser de aceleración o desplazamiento. La palabra clave utilizada para definir un archivo externo dentro de la opción Step es: Amplitude.

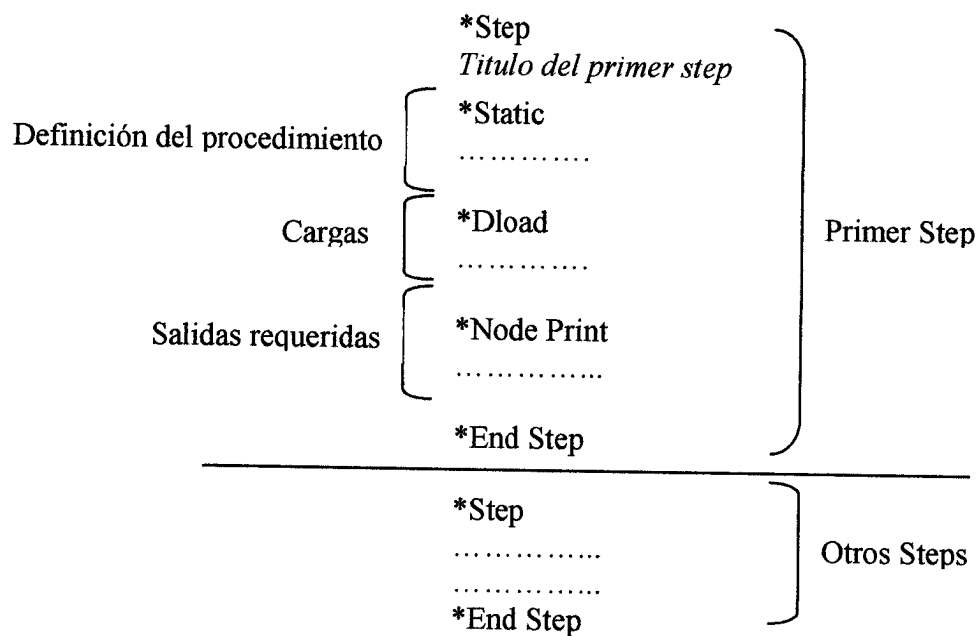


Figura A-3 Palabras claves usadas en una historia de datos en el modelo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

PARTE II

DESCRIPCION Y DEFINICIÓN DE PALABRAS CLAVES

II.1 *AMPLITUD: *Define la amplitud de una curva.*

Esta opción permite variaciones arbitrarias de tiempo o frecuencias, en la magnitud de las variables de cargas, desplazamientos o aceleraciones, dadas en un step.

Ubicación: Historia de datos

Parámetros requeridos:

VALUE

Se usa para definir la magnitud de los valores pertenecientes a la curva. El tipo de magnitud puede ser relativa o absoluta.

VALUE=RELATIVE, magnitudes relativas.

VALUE=ABSOLUTE, magnitudes absolutas.

TYPE

Se usa para especificar el tipo de datos que definen la curva, es decir, si son valores de aceleración o desplazamiento.

TYPE=DESPLAZAMIENTO, valores de desplazamientos.

TYPE=ACELERACION, valores de aceleración.

INPUT

Este parámetro es igual al nombre del archivo de entrada que contiene las líneas de datos para la opción TYPE. El archivo debe tener extensión .amp y debe estar escrito bajo el formato descrito en la sección 1.2.2.

NAME

Este parámetro es igual a la etiqueta o nombre que será asignado a la curva.

Líneas de datos para definir una data tabular:

Primera línea:

1. Tiempo o frecuencia.
2. Valor relativo o absoluto del primer punto.

3. Tiempo o frecuencia.
4. Valor relativo o absoluto del primer punto.
5. Etc., hasta cuatro pares por línea.
6. Repetir esta línea de datos hasta cuando sea necesario. Cada línea excepto la última debe tener cuatro pares de datos tiempo/magnitud o frecuencia/magnitud.

II.2 *BOUNDARY: *Especifica las condiciones de contorno.*

Esta opción permite definir las condiciones de contorno sobre los nodos o grupos de nodos de la estructura fuera o dentro de los steps.

Ubicación: Datos del modelo, Historia de datos.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos cuando se especifican condiciones de contorno fuera o dentro de los steps.

Parámetros opcionales (Sólo en la historia de datos):

AMPLITUDE

Este parámetro se usa sólo cuando las magnitudes de las variables no son ceros, y es igual al nombre de la amplitud de la curva definida en la opción *AMPLITUDE.

TYPE

Este parámetro acompaña la opción *BOUNDARY para especificar los tipos de datos que serán aplicados en el step, es decir, si son valores de aceleración o desplazamiento.

TYPE=DESPLAZAMIENTO, valores de desplazamientos.

TYPE=ACELERACION, valores de aceleración.

OP=NEW

El parámetro OP=NEW modifica las condiciones de borde existentes o añade nuevas condiciones a los grados de libertad que fueron previamente restringidos.

Líneas de datos para definir las condiciones de contorno:

Primera línea: Si es fuera de los steps

1. Nodo o grupo de nodo.
2. Primer grado de libertad a restringir.

3. Repetir el grado de libertad a restringir.
4. Repetir esta línea de datos hasta cuando sea necesario.

Primera línea: Si es dentro de los steps

1. Nodo o grupo de nodo.
2. Primer grado de libertad sobre el cual será aplicada la aceleración o desplazamiento.
3. Repetir el grado de libertad.
4. Magnitud de la variable aceleración o desplazamiento aplicada a los nodos o grupos de nodos, si se considera la opción *AMPLITUDE, los valores del archivo de entrada .amp, serán multiplicados por la magnitud especificada.

II.3 *CLOAD: *Especifica fuerzas concentradas y momentos.*

Esta opción es usada para aplicar fuerzas concentradas y momentos a cualquier nodo del modelo.

Ubicación: Historia de datos.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos cuando se aplican fuerzas concentradas y momentos a los nodos.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales cuando se aplican fuerzas concentradas y momentos a los nodos.

Líneas de datos para definir las fuerzas concentradas o momentos aplicados a los nodos:

Primera línea:

1. Nodo o grupo de nodo.
2. Grado de libertad donde será aplicada la carga.
3. Magnitud de la fuerza o momento a aplicar sobre el nodo.

II.4 *DYNAMIC: *Especifica un análisis dinámico de esfuerzos/desplazamientos.*

Esta opción es usada para resolver problemas dinámicos, es decir, cuyo análisis de esfuerzos y deformaciones, presente una respuesta no lineal.

Ubicación: Historia de datos.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos que se escriben a continuación de la palabra DYNAMIC:

Primera y única línea:

1. El primer valor sugiere el tamaño del incremento inicial del step que se está analizando.
2. Duración total del paso.
3. Incremento mínimo de tiempo. Durante el análisis del step, puede existir no convergencia en la resolución del sistema de ecuaciones, por lo tanto, el programa reduce el incremento de tiempo actual, hasta conseguir la convergencia o hasta llegar al mínimo valor especificado como “incremento mínimo de tiempo”, si esto sucede el programa es abortado.
4. Incremento de tiempo máximo. La rápida convergencia del programa conlleva al aumento del tamaño del paso, hasta el incremento máximo definido.

Sin embargo se recomienda usar el valor del incremento máximo igual al de el incremento inicial, ya que si se tiene un archivo de aceleraciones que está definido en el tiempo de forma incremental y constante, se tendrían valores que no se tomarían en cuenta en el análisis, causando inexactitud en los resultados si estos dos valores son diferentes.

II.5 *ELEMENT: *Define los elementos.*

Esta opción se usa para asignar los nodos que pertenecen a cada uno de los elementos de la estructura. Los elementos que no se definen a través de esta opción no serán tomados en cuenta para el análisis.

Ubicación: Data del modelo.

Parámetros requeridos:

TYPE

Este parámetro se usa para asignar el tipo de elemento finito al que pertenecen los elementos que aparecen en la línea de datos.

Los tipos de elementos finitos actualmente son:

VC2DCA: Viga - columna 2D de concreto armado.

VC3DCA: Viga - columna 3D de concreto armado.

M2DMR: Muro 2D de mampostería de relleno.

VCM2DCA: Viga – columna - muro de corte 2D de concreto armado.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Primera línea:

1. Número de elemento.
2. Primer nodo que pertenece al elemento.
3. Segundo nodo que pertenece al elemento.
4. Etc., hasta el último nodo perteneciente al elemento.

Repetir esta línea de datos para todos los elementos de la estructura que pertenecen al tipo de elemento finito que fue asignado en la opción TYPE.

El orden de los nodos para cada tipo de elemento finito es dado en la Parte III del presente manual de usuario.

II.6 *ELSET: *Asigna los elementos a un grupo de elementos.*

Esta opción se usa para asignar elementos de la estructura a grupos de elementos.

Ubicación: Data del modelo.

Parámetros requeridos:

ELSET

Este parámetro es igual al nombre del grupo de elemento al cual los elementos fueron asignados.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Líneas de datos requeridas:

Primera línea:

1. Se listan los elementos que pertenecen al grupo previamente definido con el parámetro ELSET. Los elementos se escriben separados por una coma (,) uno del otro.

Si no se tienen elementos iguales o si existe un elemento que por condiciones geométricas, de propiedades del material o restricciones es completamente diferente a los demás, se creara un grupo de elemento que lo incluya, ya que las propiedades del material sólo son asignadas a los grupos de elementos.

II.7 *END STEP: *Define el final de un step.*

Esta opción se usa para especificar que no existen otras líneas de palabras claves o de datos asociadas al step, indicando de esta manera el final.

Ubicación: Historia de datos.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

No existen líneas de datos requeridas para esta opción.

II.8 *HEADING: *Imprime el título sobre las salidas.*

Esta opción se usa para definir el título de un análisis.

Ubicación: Datos del modelo.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Licencia Creative Commons:

207

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Primera y única línea:

1. Título. El título no debe contener más de 40 caracteres incluyendo los espacios en blanco (). El primer carácter no puede ser ni numérico, ni especial.

II.9 *INITIAL CONDITIONS: *Especifica las condiciones iniciales para un modelo.*

Esta opción se usa para asignar valores no nulos a las variables de estado, por ejemplo para analizar una estructura con daño previo.

Ubicación: Datos del modelo.

Parámetros requeridos:

TYPE

Esta opción se usa para asignar el tipo de condición inicial que será impuesta en el análisis. Hasta los momentos sólo se permite incluir condiciones iniciales de las variables de daño. Los valores no nulos de las variables son asignados a través de un archivo de entrada.

TYPE=DAMAGE

INPUT

Este parámetro es igual al nombre del archivo de entrada que contiene las líneas de datos para la opción TYPE. El archivo debe tener extensión .txt y debe estar escrito bajo el formato descrito en la sección I.2.2 de la parte I.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Primera línea:

1. Elemento.
2. Primer valor de la variable de estado asociado al daño.
3. Segundo valor de la variable de estado asociado al daño.
4. Etc., hasta el número de variables de daño asociadas a un mismo tipo de elemento finito.

Repetir esta línea de datos hasta el número total de elementos que pertenecen al mismo tipo de elemento finito.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

II.10 *NODE: *Especifica las coordenadas de los nodos de un modelo.*

Esta opción se usa para especificar las coordenadas de los nodos. Las coordenadas nodales son dadas en esta opción a través del sistema cartesiano de la figura A-1.

Ubicación: Datos del modelo.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Primera línea:

1. Nodo.
2. Coordenada X del nodo.
3. Coordenada Y del nodo.
4. Coordenada Z del nodo.

Repetir esta línea de datos hasta el número total de nodos de la estructura.

Para mayor información sobre el sistema considerado por el programa, ver Parte I, sección I.3.1.

II.11 *NSET: *Asigna los nodos de la estructura a grupos de nodos.*

Esta opción es usada para asignar los nodos de la estructura a grupos de nodos.

Ubicación: Datos del modelo.

Parámetros requeridos:

NSET

Este parámetro es igual al nombre del grupo de nodos al cual fueron asignados.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Primera línea:

1. Se listan los nodos que pertenecen al grupo previamente definido con el parámetro NSET. Los nodos se escriben separados por una coma (,) uno del otro.

Los nodos sólo son agrupados con la finalidad de asignarles, las mismas cargas, momentos, desplazamientos, aceleraciones o restricciones. Se puede formar un grupo que contenga todos los nodos, o simplemente no se asignan nodos a ningún grupo.

II.12 *PROPERTY: *Define los valores de las propiedades a ser usada para el tipo de elemento.*

Esta opción es usada para asignar los valores de las propiedades a los grupos de elementos previamente definidos mediante la opción *ELSET.

Ubicación: Datos del modelo.

Parámetros requeridos:

ELSET

Este parámetro es igual al nombre del grupo de elementos al cual serán asignadas las propiedades.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Primera línea:

1. Se introducen los valores de las propiedades asignadas al grupo de elemento, primero se escriben las propiedades reales e inmediatamente después las enteras.

Por línea de datos sólo se permite ocho valores tanto enteros como reales.

II.13 *STATIC: *Análisis de fuerzas y desplazamientos del tipo estático.*

Esta opción se usa para indicar que el step será un análisis estático, de carga o desplazamiento.

Ubicación: Historia de datos.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos que se escriben a continuación de la palabra Static:

Primera y única línea:

1. El primer valor sugiere el tamaño del incremento inicial del step que se está analizando.
2. Duración total del paso.
3. Incremento mínimo de tiempo. Durante el análisis del step, puede existir no convergencia en la solución del sistema de ecuaciones, por lo tanto, el programa reduce el incremento de tiempo actual, hasta conseguir la convergencia o hasta llegar al mínimo valor especificado como “incremento mínimo de tiempo”, si esto sucede el análisis es abortado.
4. Incremento de tiempo máximo. La rápida convergencia del programa conlleva al aumento del tamaño del paso, hasta el incremento máximo definido.

II.14 *STEP: *Indica el comienzo de un step.*

Esta opción se usa para indicar el comienzo de un step, y debe estar seguida de una opción de definición de procedimiento, *STATIC ó *DYNAMIC.

Ubicación: Historia de datos.

Parámetros requeridos:

No existen parámetros requeridos.

Parámetros opcionales:

NLGEOM

Este parámetro se usa para considerar dentro del análisis la no linealidad geométrica.

Líneas de datos requeridas:

No existe líneas de datos requeridas.

Cada vez que se escriba la opción *STEP se debe indicar el final de las opciones asignadas al step con la palabra clave *END STEP.

II.15 *USER ELEMENT: *Introduce un elemento finito definido por el usuario.*

Esta opción se usa para introducir un elemento finito definido por el usuario.

Ubicación: Datos del modelo.

Parámetros requeridos:

NODES

Este parámetro es igual al número de nodos asociados al tipo de elemento finito.

UNSYMM

Este se usa porque las matrices para la solución del modelo no son simétricas.

TYPE

Este parámetro es igual a la palabra clave asignada para identificar el tipo de elemento finito.

COORDINATES

Este parámetro representa el número máximo de coordenadas necesarias para la subrutina.

I PROPERTIES

Este parámetro es igual al número de propiedades enteras requeridas.

PROPERTIES

Este parámetro es igual al número de propiedades reales.

VARIABLES

Este parámetro es igual al número de variables del elemento.

Parámetros opcionales:

No existen parámetros opcionales.

Líneas de datos requeridas:

Se introducen los grados de libertad que actúan para el elemento finito definido.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

PARTE III

ELEMENTOS

III.1 INTRODUCCION

El método de los elementos finitos supone que el comportamiento mecánico de un continuo, está conformado por un número finito de partes o elementos. Sobre estas partes o elementos son consideradas las propiedades del material y las relaciones constitutivas, donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre sí por un número discreto de puntos llamados nodos, localizados en sus contornos.

El programa cuenta actualmente con una librería de elementos finitos, que proporciona una poderosa herramienta para la solución de problemas de ingeniería, específicamente en el área de ingeniería estructural. Es importante destacar que la teoría usada en los siguientes elementos finitos, son un desarrollo exclusivamente venezolano. Esta teoría describe el comportamiento de los elementos mediante la Teoría de la Mecánica de la Fractura, la Teoría del Daño Continuo y el concepto de rótula plástica.

En este capítulo se describen las características más resaltantes de cada uno de los elementos de la librería. Se tiene un total de cuatro elementos finitos, para el análisis de pórticos de concreto armado en dos y tres dimensiones, estructuras duales y muros de mampostería de relleno.

En los capítulos 3, 4 y 5 de la presente tesis se encuentra la descripción de las teorías y modelos usados para los elementos.

III.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS

El nombre asignado a los distintos elementos finitos de la librería depende de tres aspectos:

- Tipo de elemento: Se refiere al tipo de elemento estructural, es decir, si es un elemento de viga, columna o muro.

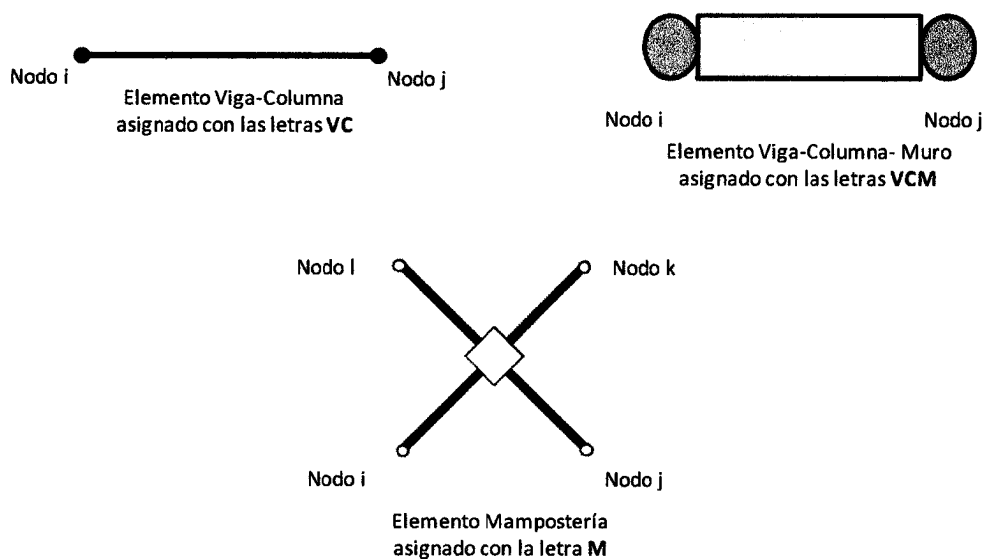


Figura A-4 Tipos de elementos estructurales de PEEF.

- Tipo de análisis, en el espacio: Se refiere si el análisis es en dos dimensiones, asignado con las siglas 2D, ó en tres dimensiones definido como 3D.
- Material: Define el tipo de material del cual está constituido el elemento finito, por ejemplo: Concreto armado se designa con las letras CA, y la mampostería de relleno con las letras MR.

En función de lo escrito anteriormente tenemos los siguientes nombres para identificar al elemento finito, por ejemplo:

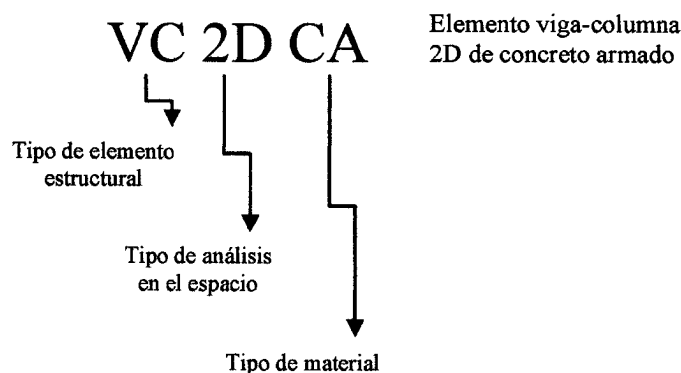


Figura A-5 Asignación del nombre para los elementos finitos.

En la tabla A-4 se muestran los nombres para los elementos finitos de la librería.

Tabla A-4 Nombre asignado para cada tipo de elemento finito.

Nombre	Tipo de elemento
VC2DCA	Elemento viga-columna 2D de concreto armado.
VC3DCA	Elemento viga-columna 3D de concreto armado.
M2DMR	Elemento muro 2D de mampostería de relleno.
VCM2DCA	Elemento viga-columna-muro de corte 2D de concreto armado.
ELU	Elemento de usuario

Los grados de libertad son variables fundamentales que son calculadas durante el análisis. Dichos grados de libertad dependen del tipo de elemento finito de la librería y son asignados a los nodos del elemento. Las propiedades del material son asignadas a los elementos, las cuales son divididas en propiedades enteras y propiedades reales. El programa de elementos finitos está estructurado de tal manera, que el usuario puede usar para un mismo modelo, la combinación de diferentes elementos finitos de la librería, con la finalidad de obtener un análisis más completo de la estructura analizada.

A continuación se describen las características más resaltantes de cada uno de los elementos finitos disponibles en PEEF.

III.2.1 Elementos viga-columna 2D de concreto armado:

Nombre: VC2DCA (Elemento viga columna 2D de concreto armado).

Análisis en el espacio: Análisis en el plano (2D).

Número de nodos: Dos nodos por elemento.



Figura A-6 Número de nodos asignados al elemento VC2DCA.

Grados de libertad activados: Se tienen 3 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1), desplazamiento en la dirección Z (3), rotación alrededor del eje Y (5).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 12 propiedades enteras.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 225 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 18 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos y dinámicos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado para definir elementos estructurales tales como vigas y columnas de concreto armado, para el análisis de pórticos planos.

III.2.2 Elementos viga-columna 3D de concreto armado:

Nombre: VC3DCA (Elemento viga columna 3D de concreto armado).

Análisis en el espacio: Análisis en el espacio (3D).

Número de nodos: Dos nodos por elemento.



Figura A-7 Número de nodos asignados al elemento VC3DCA.

Grados de libertad activados: Se tienen 6 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1), desplazamiento en la dirección Y (2), desplazamiento en la dirección Z (3), rotación alrededor del eje X (4), rotación alrededor del eje Y (5), rotación alrededor del eje Z (6).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 11 propiedades enteras.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 321 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 34 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos y dinámicos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado para definir elementos estructurales tales como vigas y columnas de concreto armado, para el análisis de estructuras tridimensionales.

III.2.3 Elementos muro 2D de mampostería de relleno:

Nombre: M2DMR (Elemento muro 2D de mampostería de relleno).

Análisis en el espacio: Análisis en el plano (2D).

Número de nodos: Cuatro nodos por elemento.

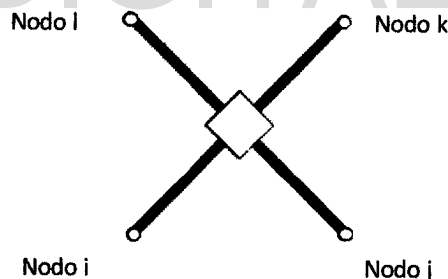


Figura A-8 Número de nodos asignados al elemento M2DMR.

Grados de libertad activados: Se tienen 2 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1) y desplazamiento en la dirección Z (3).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 1 propiedad entera.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 12 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 7 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado con la finalidad de incluir paneles de relleno en el análisis de estructuras aporticadas en dos dimensiones.

III.2.4 Elementos viga – columna - muro de corte 2D de concreto armado:

Nombre: VCM2DCA (Elemento Elemento viga-columna-muro de corte 2D de concreto armado.).

Análisis en el espacio: Análisis en el plano (2D).

Número de nodos: Dos nodos por elemento.



Figura A-9 Número de nodos asignados al elemento VCM2DCA.

Grados de libertad activados: Se tienen 3 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1), desplazamiento en la dirección Z (3), rotación alrededor del eje Y (5).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 16 propiedades enteras.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 337 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 24 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado para el análisis no lineal de estructuras duales de concreto armado. Este tipo de estructura está conformada por muros de corte y pórticos dúctiles a flexión.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

PARTE IV

EJEMPLO DE UN ARCHIVO DE ENTRADA (.inp)

En esta sección se muestran las líneas de palabras claves, de datos y comentarios que componen un archivo de entrada (.inp), de la estructura de la figura A-10. Dicha estructura está conformada por 8 elementos indicados en la figura por medio de números resaltados en color rojo, y 8 nodos enumerados en los extremos de los elementos a través de números en color azul y letra cursiva. Las columnas se encuentran empotradas en la base. Las solicitaciones son aplicadas en dos pasos de análisis de tipo estático, en el primero se aplica en los nodos 3, 4, 7, y 8 fuerzas de 400 kg en la dirección negativa del eje Z, en el segundo paso de análisis se aplica un desplazamiento de 10 cm en la dirección positiva del eje X en los nodos 3 y 7.

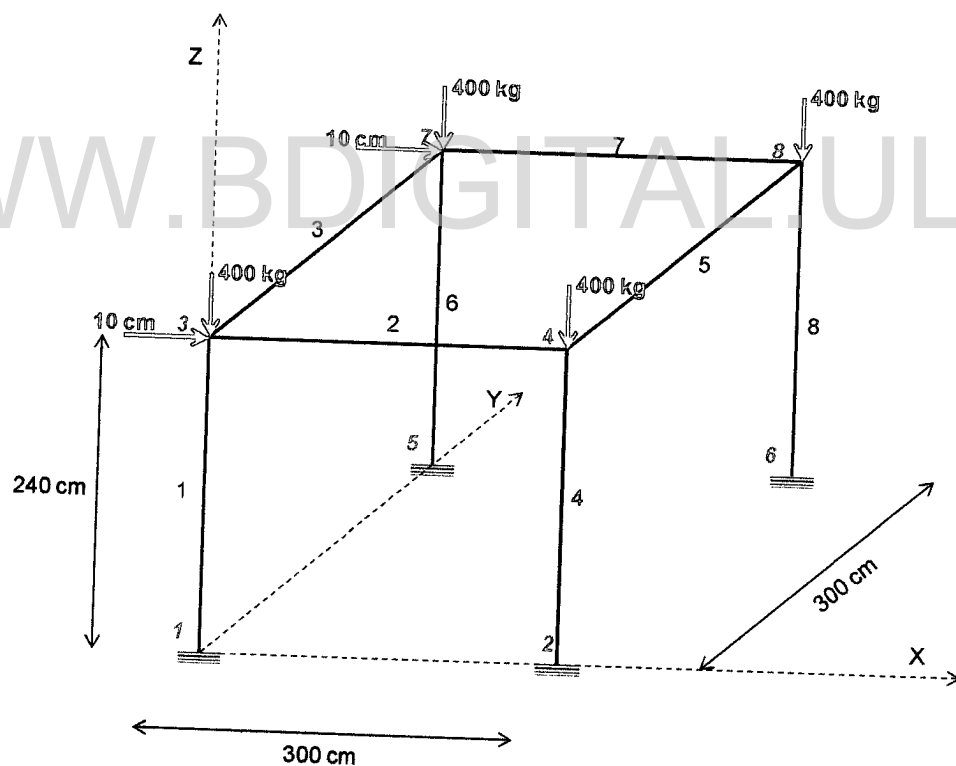


Figura A-10 Estructura tridimensional.

Las siguientes líneas que conforman el archivo de entrada (.inp) de la estructura de la figura A-11, se obtuvieron a través del programa Portal de Pórticos 3D.

```

*HEADING
Mesa3D
*NODE
*****
1,0.0,0.0,0.0
2,300.0,0.0,0.0
3,0.0,0.0,240.0
4,300.0,0.0,240.0
5,0.0,300.0,0.0
6,300.0,300.0,0.0
7,0.0,300.0,240.0
8,300.0,300.0,240.0
*****
*NSET,NSET=ConjNodo1
1,2,5,6
*****
*NSET,NSET=ConjNodo2
3,4,7,8
*****
*NSET,NSET=ConjNodo3
3,7
*****
**
Definicion del Elemento finito, elementos y grupos
*****
*ELEMENT,TYPE=VC3DCA
1,1,3
2,3,4
3,3,7
4,2,4
5,4,8
6,5,7
7,7,8
8,6,8
*****
*ELSET,ELSET=ConjElem1
1,4,6,8
*ELSET,ELSET=ConjElem2
2,7
*ELSET,ELSET=ConjElem3
3,5
*****
*PROPERTY,ELSET=ConjElem1
1.30421500E-7,1.30421500E-7,4.02666666E-5,1.18341023E-7,1.18341023E-7,1.0E-5,0.00756,0.00756,
9.31569230E-7,9.31569230E-7,8.27569230E-7,8.27569230E-7,9.31569230E-7,9.31569230E-7,8.47876923E-
7,8.47876923E-7,
1.304215E-7,1.304215E-7,1.18341023E-7,1.18341023E-7,0.13E+08,0.13E+08,0.18E+06,9.50625E+09,
900.0,114075.0,2.0.184E-05,0.25,27.5,27.5,25.7034,
26.6017,27.5,27.5,26.6017,25.7034,0.0,0.302E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,-.298E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,-.298E+03,0.000E+00,
0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,
0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,
-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,
-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.164E+03,-.344E+02,0.351E+03,
-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.756E+03,-.365E+02,0.107E+04,
-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,-.365E+02,0.109E+04,
-.675E+02,0.111E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.0.97690E-03,
-.675E+02,0.12334E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.166E+03,
-.339E+02,0.351E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.774E+03,
-.365E+02,0.107E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,
-.365E+02,0.109E+04,-.702E+02,0.110E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.92082E-03,-.702E+02,0.11986E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,

```

0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,-.298E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,-.298E+03,0.000E+00,
0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,
0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,
-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,
-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.166E+03,-.339E+02,0.351E+03,
-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.774E+03,-.365E+02,0.107E+04,
-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,-.365E+02,0.109E+04,
-.702E+02,0.110E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.92082E-03,
-.702E+02,0.11986E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.164E+03,
-.344E+02,0.351E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.756E+03,
-.365E+02,0.107E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,
-.365E+02,0.109E+04,-.675E+02,0.111E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,
0.,0.97690E-03,-.675E+02,0.12334E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.0,0.0,
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
1.0,50,10000,3, 6, 10, 4, 8,
4, 4, 5,4

*PROPERTY,ELSET=ConjElem2

1.30862875E-7,1.30862875E-7,4.9625E-5,9.40374E-8,9.40374E-8,1.0E-5,0.00999,0.00999,
1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.33225E-6,1.33225E-6,
1.30862875E-7,1.30862875E-7,9.40374E-8,9.40374E-8,0.18E+08,0.32E+08,0.24E+06,1.61987548E+10,
1200.0,194385.05859374997,2,0.111E-05,0.25,27.5,27.5,36.6017,
35.7034,27.5,27.5,35.7034,36.6017,0.0,0.397E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,-.438E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,-.459E+02,0.201E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,-.459E+02,0.205E+04,
-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.,0.52677E-03,
-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,
-.461E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,
-.685E+02,0.193E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,
-.685E+02,0.194E+04,-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.11216E-02,-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,-.461E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,-.685E+02,0.193E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,-.685E+02,0.194E+04,
-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.11216E-02,
-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,
-.438E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,
-.459E+02,0.201E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,
-.459E+02,0.205E+04,-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.,0.52677E-03,-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.0,0.0,
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
0.0,50,10000,3, 6, 10, 4, 8,
4, 4, 5,4

*PROPERTY,ELSET=ConjElem3

1.30862875E-7,1.30862875E-7,4.9625E-5,9.40374E-8,9.40374E-8,1.0E-5,0.00999,0.00999,
1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.33225E-6,1.33225E-6,
1.30862875E-7,1.30862875E-7,9.40374E-8,9.40374E-8,0.18E+08,0.32E+08,0.24E+06,1.619875485E+10,
1200.0,194385.05859374997,2,0.111E-05,0.25,27.5,27.5,35.7034,
36.6017,27.5,27.5,36.6017,35.7034,0.0,0.397E+02,0.000E+00,

0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,-.438E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,-.459E+02,0.201E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,-.459E+02,0.205E+04,
-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.52677E-03,
-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,
-.461E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,
-.685E+02,0.193E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,
-.685E+02,0.194E+04,-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.11216E-02,-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,-.461E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,-.685E+02,0.193E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,-.685E+02,0.194E+04,
-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.11216E-02,
-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,
-.438E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,
-.459E+02,0.201E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,
-.459E+02,0.205E+04,-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.52677E-03,-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.0,0.0,
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
0.0,50,10000,3, 6, 10, 4, 8,
4, 4, 5,4

*BOUNDARY

ConjNodo1,1,1
ConjNodo1,2,2
ConjNodo1,3,3
ConjNodo1,4,4
ConjNodo1,5,5
ConjNodo1,6,6

**Paso1

*STEP

*STATIC

1.00,100.00,5.0E-5,1.00

*CLOAD

3,3,-400.0

4,3,-400.0

7,3,-400.0

8,3,-400.0

*END STEP

**Paso2

*STEP

*STATIC

1.00,100.00,5.0E-5,1.00

*BOUNDARY

CONJUNODO3,1,1,10.0

*END STEP

Anexo B

Propiedades asignadas al elemento viga – columna 3D de concreto armado (VC3DCA)

El elemento finito viga – columna 3D de concreto armado está conformado por 321 propiedades reales y 11 propiedades enteras. A continuación se indican los valores de las líneas de datos asignadas a la palabra clave *Property para el elemento VC3DCA.

Propiedades reales

Los primeros 20 valores corresponden a los ceros numéricos para determinar la ley de estado (R), la ley de evolución (T) y la ley de normalidad (G) del modelo.

Fact: Factor igual a 1×10^{-5}

Long: Longitud del elemento

Tabla B-1 Ceros numéricos correspondientes a la ley de estado.

Prop	Propiedad
1	$CeroR1 = \text{Min}[\text{prop}(68), \text{prop}(102)] \times \text{Fact} \times 0.5 \times \text{Min}[\text{prop}(30), \text{prop}(31)]$
2	$CeroR2 = \text{Min}[\text{prop}(204), \text{prop}(238)] \times \text{Fact} \times 0.5 \times \text{Min}[\text{prop}(34), \text{prop}(35)]$
3	$CeroR3 = \frac{\text{prop}(39)}{\text{prop}(23)} \times \text{Fact} \times \text{Long}$

Grados de libertad activados: Se tienen 3 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1), desplazamiento en la dirección Z (3), rotación alrededor del eje Y (5).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 12 propiedades enteras.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 225 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 18 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos y dinámicos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado para definir elementos estructurales tales como vigas y columnas de concreto armado, para el análisis de pórticos planos.

III.2.2 Elementos viga-columna 3D de concreto armado:

Nombre: VC3DCA (Elemento viga columna 3D de concreto armado).

Análisis en el espacio: Análisis en el espacio (3D).

Número de nodos: Dos nodos por elemento.



Figura A-7 Número de nodos asignados al elemento VC3DCA.

Grados de libertad activados: Se tienen 6 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1), desplazamiento en la dirección Y (2), desplazamiento en la dirección Z (3), rotación alrededor del eje X (4), rotación alrededor del eje Y (5), rotación alrededor del eje Z (6).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 11 propiedades enteras.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 321 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 34 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos y dinámicos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado para definir elementos estructurales tales como vigas y columnas de concreto armado, para el análisis de estructuras tridimensionales.

III.2.3 Elementos muro 2D de mampostería de relleno:

Nombre: M2DMR (Elemento muro 2D de mampostería de relleno).

Análisis en el espacio: Análisis en el plano (2D).

Número de nodos: Cuatro nodos por elemento.

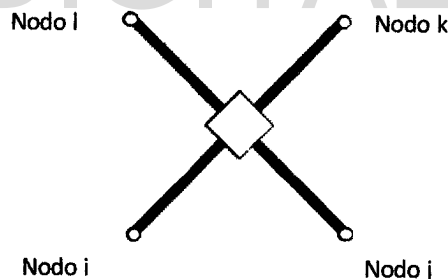


Figura A-8 Número de nodos asignados al elemento M2DMR.

Grados de libertad activados: Se tienen 2 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1) y desplazamiento en la dirección Z (3).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 1 propiedad entera.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 12 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 7 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado con la finalidad de incluir paneles de relleno en el análisis de estructuras aporticadas en dos dimensiones.

III.2.4 Elementos viga – columna - muro de corte 2D de concreto armado:

Nombre: VCM2DCA (Elemento Elemento viga-columna-muro de corte 2D de concreto armado.).

Análisis en el espacio: Análisis en el plano (2D).

Número de nodos: Dos nodos por elemento.



Figura A-9 Número de nodos asignados al elemento VCM2DCA.

Grados de libertad activados: Se tienen 3 grados de libertad activados, desplazamiento en la dirección X (1), desplazamiento en la dirección Z (3), rotación alrededor del eje Y (5).

Numero de propiedades enteras: El elemento está conformado por un total de 16 propiedades enteras.

Numero de propiedades reales: El elemento está conformado por un total de 337 propiedades reales.

Numero de variables: El elemento está conformado por un total de 24 variables.

Tipos de análisis disponible: Análisis estáticos.

Aplicaciones típicas: Este elemento es usado para el análisis no lineal de estructuras duales de concreto armado. Este tipo de estructura está conformada por muros de corte y pórticos dúctiles a flexión.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

PARTE IV

EJEMPLO DE UN ARCHIVO DE ENTRADA (.inp)

En esta sección se muestran las líneas de palabras claves, de datos y comentarios que componen un archivo de entrada (.inp), de la estructura de la figura A-10. Dicha estructura está conformada por 8 elementos indicados en la figura por medio de números resaltados en color rojo, y 8 nodos enumerados en los extremos de los elementos a través de números en color azul y letra cursiva. Las columnas se encuentran empotradas en la base. Las solicitaciones son aplicadas en dos pasos de análisis de tipo estático, en el primero se aplica en los nodos 3, 4, 7, y 8 fuerzas de 400 kg en la dirección negativa del eje Z, en el segundo paso de análisis se aplica un desplazamiento de 10 cm en la dirección positiva del eje X en los nodos 3 y 7.

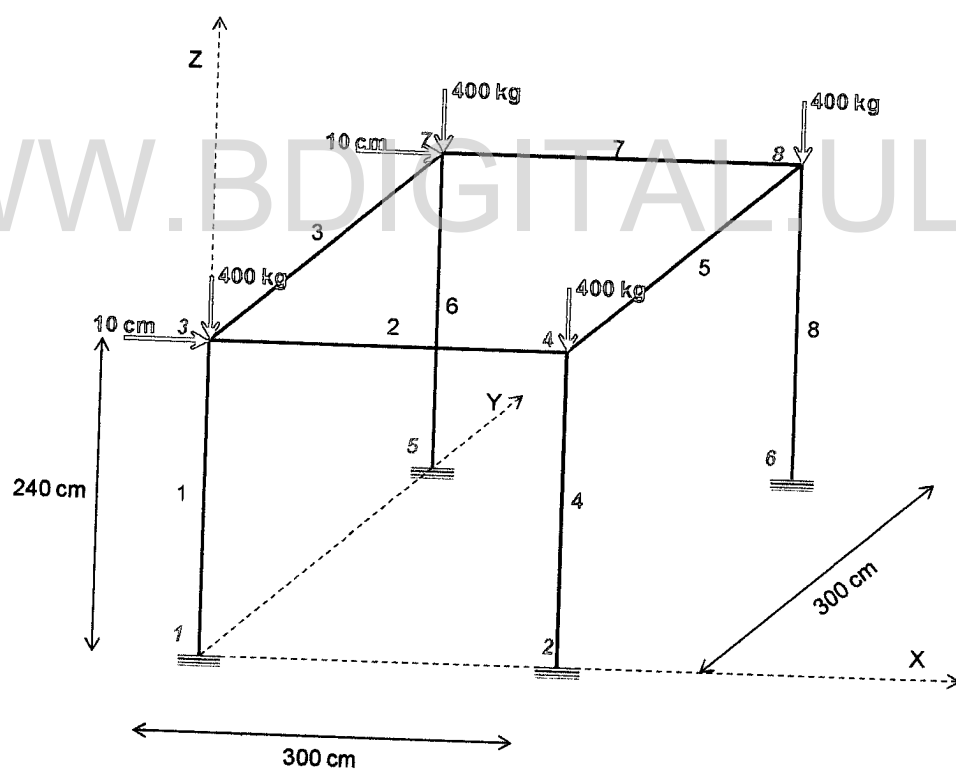


Figura A-10 Estructura tridimensional.

Las siguientes líneas que conforman el archivo de entrada (.inp) de la estructura de la figura A-11, se obtuvieron a través del programa Portal de Pórticos 3D.

```

*HEADING
Mesa3D
*NODE
*****
1,0.0,0.0,0.0
2,300.0,0.0,0.0
3,0.0,0.0,240.0
4,300.0,0.0,240.0
5,0.0,300.0,0.0
6,300.0,300.0,0.0
7,0.0,300.0,240.0
8,300.0,300.0,240.0
*****
*NSET,NSET=ConjNodo1
1,2,5,6
*****
*NSET,NSET=ConjNodo2
3,4,7,8
*****
*NSET,NSET=ConjNodo3
3,7
*****
**
Definicion del Elemento finito, elementos y grupos
*****
*ELEMENT,TYPE=VC3DCA
1,1,3
2,3,4
3,3,7
4,2,4
5,4,8
6,5,7
7,7,8
8,6,8
*****
*ELSET,ELSET=ConjElem1
1,4,6,8
*ELSET,ELSET=ConjElem2
2,7
*ELSET,ELSET=ConjElem3
3,5
*****
*PROPERTY,ELSET=ConjElem1
1.30421500E-7,1.30421500E-7,4.02666666E-5,1.18341023E-7,1.18341023E-7,1.0E-5,0.00756,0.00756,
9.31569230E-7,9.31569230E-7,8.27569230E-7,8.27569230E-7,9.31569230E-7,9.31569230E-7,8.47876923E-
7,8.47876923E-7,
1.304215E-7,1.304215E-7,1.18341023E-7,1.18341023E-7,0.13E+08,0.13E+08,0.18E+06,9.50625E+09,
900.0,114075.0,2.0.184E-05,0.25,27.5,27.5,25.7034,
26.6017,27.5,27.5,26.6017,25.7034,0.0,0.302E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,-.298E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,-.298E+03,0.000E+00,
0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,
0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,
-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,
-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.164E+03,-.344E+02,0.351E+03,
-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.756E+03,-.365E+02,0.107E+04,
-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,-.365E+02,0.109E+04,
-.675E+02,0.111E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.0.97690E-03,
-.675E+02,0.12334E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.166E+03,
-.339E+02,0.351E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.774E+03,
-.365E+02,0.107E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,
-.365E+02,0.109E+04,-.702E+02,0.110E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.92082E-03,-.702E+02,0.11986E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,

```

0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,-.298E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,-.298E+03,0.000E+00,
0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.174E+03,-.342E+02,0.370E+03,-.986E+02,0.000E+00,
0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.829E+03,-.429E+02,0.120E+04,-.295E+03,0.000E+00,
0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.122E+04,-.429E+02,0.123E+04,-.729E+02,0.124E+04,
-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.94852E-03,-.729E+02,0.11339E-03,
-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.166E+03,-.339E+02,0.351E+03,
-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.774E+03,-.365E+02,0.107E+04,
-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,-.365E+02,0.109E+04,
-.702E+02,0.110E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.92082E-03,
-.702E+02,0.11986E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.302E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.164E+03,
-.344E+02,0.351E+03,-.986E+02,0.000E+00,0.698E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.756E+03,
-.365E+02,0.107E+04,-.295E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.109E+04,
-.365E+02,0.109E+04,-.675E+02,0.111E+04,-.298E+03,0.000E+00,0.106E+03,0.000E+00,
0.,0.97690E-03,-.675E+02,0.12334E-03,-.298E+03,0.000E+00,0.0,0.0,
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
1.0,50,10000,3, 6, 10, 4, 8,
4, 4, 5,4

*PROPERTY,ELSET=ConjElem2

1.30862875E-7,1.30862875E-7,4.9625E-5,9.40374E-8,9.40374E-8,1.0E-5,0.00999,0.00999,
1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.33225E-6,1.33225E-6,
1.30862875E-7,1.30862875E-7,9.40374E-8,9.40374E-8,0.18E+08,0.32E+08,0.24E+06,1.61987548E+10,
1200.0,194385.05859374997,2,0.111E-05,0.25,27.5,27.5,36.6017,
35.7034,27.5,27.5,35.7034,36.6017,0.0,0.397E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,-.438E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,-.459E+02,0.201E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,-.459E+02,0.205E+04,
-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.,0.52677E-03,
-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,
-.461E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,
-.685E+02,0.193E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,
-.685E+02,0.194E+04,-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.11216E-02,-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,-.461E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,-.685E+02,0.193E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,-.685E+02,0.194E+04,
-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.11216E-02,
-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,
-.438E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,
-.459E+02,0.201E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,
-.459E+02,0.205E+04,-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.,0.52677E-03,-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.0,0.0,
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
0.0,50,10000,3, 6, 10, 4, 8,
4, 4, 5,4

*PROPERTY,ELSET=ConjElem3

1.30862875E-7,1.30862875E-7,4.9625E-5,9.40374E-8,9.40374E-8,1.0E-5,0.00999,0.00999,
1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.40625E-6,1.33225E-6,1.33225E-6,
1.30862875E-7,1.30862875E-7,9.40374E-8,9.40374E-8,0.18E+08,0.32E+08,0.24E+06,1.619875485E+10,
1200.0,194385.05859374997,2,0.111E-05,0.25,27.5,27.5,35.7034,
36.6017,27.5,27.5,36.6017,35.7034,0.0,0.397E+02,0.000E+00,

```

0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,-.438E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,-.459E+02,0.201E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,-.459E+02,0.205E+04,
-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.52677E-03,
-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,
-.461E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,
-.685E+02,0.193E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,
-.685E+02,0.194E+04,-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.11216E-02,-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,
0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,-.380E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,-.380E+03,0.000E+00,
0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.225E+03,-.449E+02,0.480E+03,-.130E+03,0.000E+00,
0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.999E+03,-.561E+02,0.150E+04,-.378E+03,0.000E+00,
0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.146E+04,-.561E+02,0.153E+04,-.870E+02,0.154E+04,
-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.95173E-03,-.870E+02,0.10990E-03,
-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.292E+03,-.461E+02,0.630E+03,
-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.111E+04,-.685E+02,0.193E+04,
-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.170E+04,-.685E+02,0.194E+04,
-.110E+03,0.198E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.11216E-02,
-.110E+03,0.82592E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.397E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.300E+03,
-.438E+02,0.630E+03,-.130E+03,0.000E+00,0.833E+02,0.000E+00,0.000E+00,0.148E+04,
-.459E+02,0.201E+04,-.378E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,0.000E+00,0.193E+04,
-.459E+02,0.205E+04,-.815E+02,0.207E+04,-.380E+03,0.000E+00,0.126E+03,0.000E+00,
0.52677E-03,-.815E+02,0.81683E-04,-.380E+03,0.000E+00,0.0,0.0,
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
0.0,50,10000,3, 6, 10, 4, 8,
4, 4, 5,4

```

***BOUNDARY**

```

ConjNodo1,1,1
ConjNodo1,2,2
ConjNodo1,3,3
ConjNodo1,4,4
ConjNodo1,5,5
ConjNodo1,6,6

```

****Paso1**

***STEP**

***STATIC**

1.00,100.00,5.0E-5,1.00

***CLOAD**

3,3,-400.0

4,3,-400.0

7,3,-400.0

8,3,-400.0

***END STEP**

****Paso2**

***STEP**

***STATIC**

1.00,100.00,5.0E-5,1.00

***BOUNDARY**

CONJUNODO3,1,1,10.0

***END STEP**

Anexo B

Propiedades asignadas al elemento viga – columna 3D de concreto armado (VC3DCA)

El elemento finito viga – columna 3D de concreto armado está conformado por 321 propiedades reales y 11 propiedades enteras. A continuación se indican los valores de las líneas de datos asignadas a la palabra clave *Property para el elemento VC3DCA.

Propiedades reales

Los primeros 20 valores corresponden a los ceros numéricos para determinar la ley de estado (R), la ley de evolución (T) y la ley de normalidad (G) del modelo.

Fact: Factor igual a 1×10^{-5}

Long: Longitud del elemento

Tabla B-1 Ceros numéricos correspondientes a la ley de estado.

Prop	Propiedad
1	$CeroR1 = \text{Min}[prop(68), prop(102)] \times Fact \times 0.5 \times \text{Min}[prop(30), prop(31)]$
2	$CeroR2 = \text{Min}[prop(204), prop(238)] \times Fact \times 0.5 \times \text{Min}[prop(34), prop(35)]$
3	$CeroR3 = \frac{prop(39)}{prop(23)} \times Fact \times Long$

4	$CeroR4 = \text{Min}[\text{prop}(136), \text{prop}(170)] \times \text{Fact} \times 0.5 \times \text{Min}[\text{prop}(32), \text{prop}(33)]$
5	$CeroR5 = \text{Min}[\text{prop}(272), \text{prop}(306)] \times \text{Fact} \times 0.5 \times \text{Min}[\text{prop}(36), \text{prop}(37)]$
6	$CeroR6 = \text{Fact}$

Tabla B-2 Ceros numéricos correspondientes a la ley de evolución.

Prop	Propiedad
7	$CeroT1 = \text{Min}[\text{prop}(68), \text{prop}(84), \text{prop}(118), \text{prop}(152)] \times \text{Fact}$
8	$CeroT2 = \text{Min}[\text{prop}(186), \text{prop}(220), \text{prop}(254), \text{prop}(288)] \times \text{Fact}$
9	$CeroT3 = \frac{[\text{prop}(42)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(21)}$
10	$CeroT4 = \frac{[\text{prop}(212)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(21)}$
11	$CeroT5 = \frac{[\text{prop}(110)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(22)}$
12	$CeroT6 = \frac{[\text{prop}(280)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(22)}$
13	$CeroT7 = \frac{[\text{prop}(76)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(21)}$
14	$CeroT8 = \frac{[\text{prop}(178)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(21)}$
15	$CeroT9 = \frac{[\text{prop}(144)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(22)}$
16	$CeroT10 = \frac{[\text{prop}(246)]^2 \times \text{Long} \times \text{Fact}}{6 \times \text{prop}(22)}$

Tabla B-3 Ceros numéricos correspondientes a la ley de normalidad.

Prop	Propiedad
17	$CeroG1 = CeroR1$
18	$CeroG2 = CeroR2$
19	$CeroG3 = CeroR3$
20	$CeroG4 = CeroR4$

Propiedades desde la 21 hasta la 38,

$$g = \frac{E}{2(1+0.2)}$$

$$j = d \times b^3 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{b}{d} \left(1 - \frac{b^4}{12d^4} \right) \right) \quad d \geq b$$

Tabla B-4 Propiedades reales desde la 21 hasta la 38.

Prop	Propiedad
21	EI_y = Modulo de elasticidad por el momento de inercia alrededor del eje Y local.
22	EI_z = Modulo de elasticidad por el momento de inercia alrededor del eje Z local.
23	EA = Modulo de elasticidad por el área de la sección transversal.
24	gj = Rigidez torsional.
25	Área = Área de la sección transversal.
26	j = Momento polar de inercia.
27	$Expo = 2$
28	Masa = Masa uniformemente repartida por unidad de longitud del elemento.
29	$Pnewdt = 0.25$
30	dy_{i_pos} = Altura útil (Ver figura B-1)
31	dy_{i_neg} = Altura útil (Ver figura B-1)
32	dz_{i_pos} = Altura útil (Ver figura B-1)
33	dz_{i_neg} = Altura útil (Ver figura B-1)
34	dy_{j_pos} = Altura útil (Ver figura B-1)
35	dy_{j_neg} = Altura útil (Ver figura B-1)
36	dz_{j_pos} = Altura útil (Ver figura B-1)
37	dz_{j_neg} = Altura útil (Ver figura B-1)
38	Libre = 0.0

Las distancias correspondientes a las propiedades 30 -37 dependen si el elemento analizado es una columna, viga en la dirección del X, o una viga en la dirección del eje Y global. Como se muestra en la figura B-1.

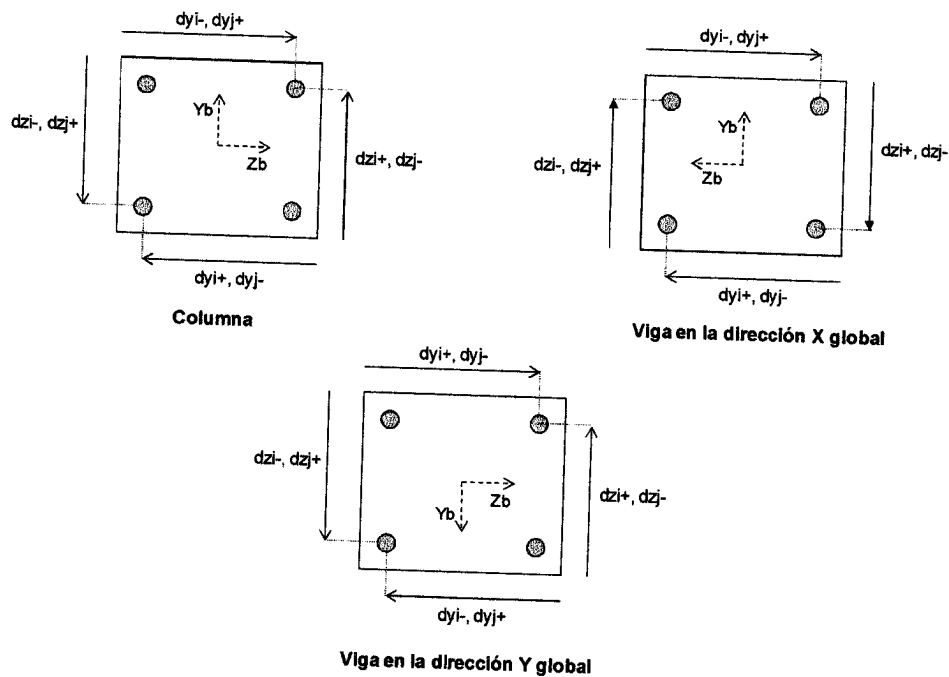


Figura B-1 Distancia a los ejes locales.

A partir de la propiedad 39 hasta la propiedad 310 se presentan los valores de los diagramas de interacción del momento crítico (M_{cr}), momento plástico (M_p), momento último (M_u) y curvatura (C_u), positivos y negativos para el eje Y y Z local, en el extremo i y j del elemento.

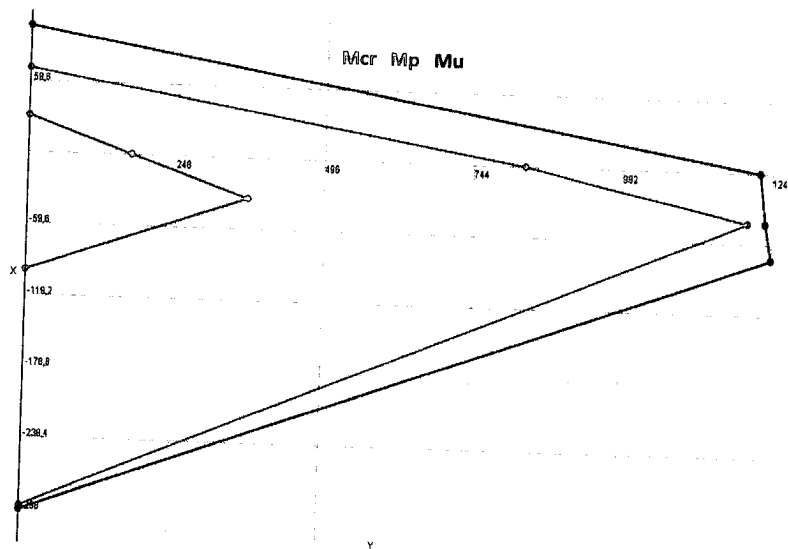


Figura B-2 Diagrama de interacción de momentos.

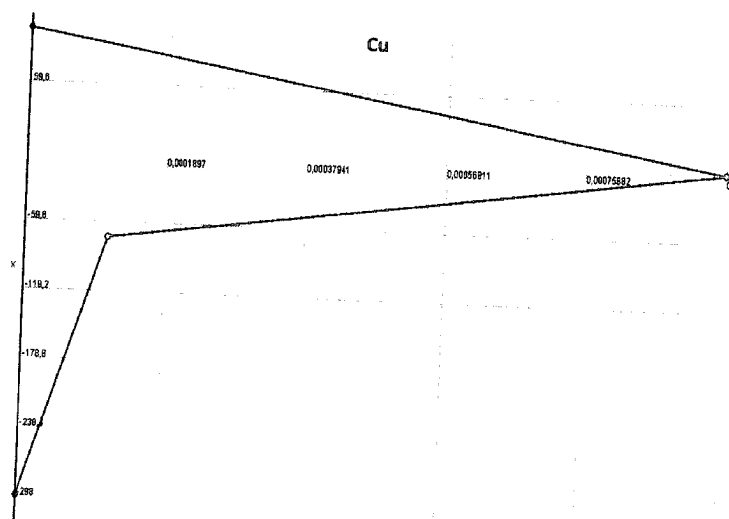


Figura B-3 Diagrama de curvatura última.

Tabla B-5 Propiedades reales desde la 39 hasta la 310.

Prop	Propiedad
39 - 46	Momento crítico positivo en i respecto al eje Y local.
47 - 54	Momento plástico positivo en i respecto al eje Y local.
55 - 64	Momento último positivo en i respecto al eje Y local.
65 - 72	Curvatura última positiva en i respecto al eje Y local.
73 - 80	Momento crítico negativo en i respecto al eje Y local.
81 - 88	Momento plástico negativo en i respecto al eje Y local.
89 - 98	Momento último negativo en i respecto al eje Y local.
99 - 106	Curvatura última negativa en i respecto al eje Y local.
107 - 114	Momento crítico positivo en i respecto al eje Z local.
115 - 122	Momento plástico positivo en i respecto al eje Z local.
123 - 132	Momento último positivo en i respecto al eje Z local.
133 - 140	Curvatura última positiva en i respecto al eje Z local.
141 - 148	Momento crítico negativo en i respecto al eje Z local.
149 - 156	Momento plástico negativo en i respecto al eje Z local.
157 - 166	Momento último negativo en i respecto al eje Z local.
167 - 174	Curvatura última negativa en i respecto al eje Z local.
175 - 182	Momento crítico negativo en j respecto al eje Y local.
183 - 190	Momento plástico negativo en j respecto al eje Y local.
191 - 200	Momento último negativo en j respecto al eje Y local.
201 - 208	Curvatura última negativa en j respecto al eje Y local.

209 – 216	Momento crítico positivo en j respecto al eje Y local.
217 – 224	Momento plástico positivo en j respecto al eje Y local.
225 – 234	Momento último positivo en j respecto al eje Y local.
235 – 242	Curvatura última positiva en j respecto al eje Y local.
243 – 250	Momento crítico negativo en j respecto al eje Z local.
251 – 258	Momento plástico negativo en j respecto al eje Z local.
259 – 268	Momento último negativo en j respecto al eje Z local.
269 – 276	Curvatura última negativa en j respecto al eje Z local.
277 – 284	Momento crítico positivo en j respecto al eje Z local.
285 – 292	Momento plástico positivo en j respecto al eje Z local.
293 – 302	Momento último positivo en j respecto al eje Z local.
303 – 310	Curvatura última positiva en j respecto al eje Z local.

Las propiedades 311 – 319 están libres, y la 320 – 321 se refieren a las dos primeras componentes del vector n.

Tabla B-6 Propiedades reales desde la 310 hasta la 321.

Prop	Propiedad
311	Libre = 0.0
312	Libre = 0.0
313	Libre = 0.0
314	Libre = 0.0
315	Libre = 0.0
316	Libre = 0.0
317	Libre = 0.0
318	Libre = 0.0
319	Libre = 0.0
320	Primera componente del vector n
321	Segunda componente del vector n

Las propiedades enteras se describen en la tabla B-7.

Tabla B-7 Propiedades enteras.

Prop	Propiedad
1	Número de máximo de iteraciones = 50
2	α límite = 10.000

3	Numero de coordenadas que definen el nodo = 3
4	Dimensión de las matrices de esfuerzo y deformación = 6
5	Número de variables internas con función de fluencia = 10
6	Número de variables internas sin función de fluencia = 4
7	Numero de fuerzas termodinámicas = 8
8	Número de puntos del diagrama de momento crítico = 4
9	Número de puntos del diagrama de momento plástico = 4
10	Número de puntos del diagrama de momento último = 5
11	Número de puntos del diagrama de curvatura = 4

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Anexo C

Portal de Pórticos 3D: Tutorial

Lisbeth Maldonado, Diego Uzcátegui y Maylett Uzcátegui [2]

La estructura en estudio consta de un tramo en la dirección X de 4 metros, un tramo en la dirección Y de 5 metros, y dos niveles de entrepiso de 3 metros cada uno. El análisis consiste en someter los nodos del tope a una historia de desplazamientos, con el fin de llevar la estructura a su capacidad última. Las características geométricas se muestran en las figuras C-1 y C-2.

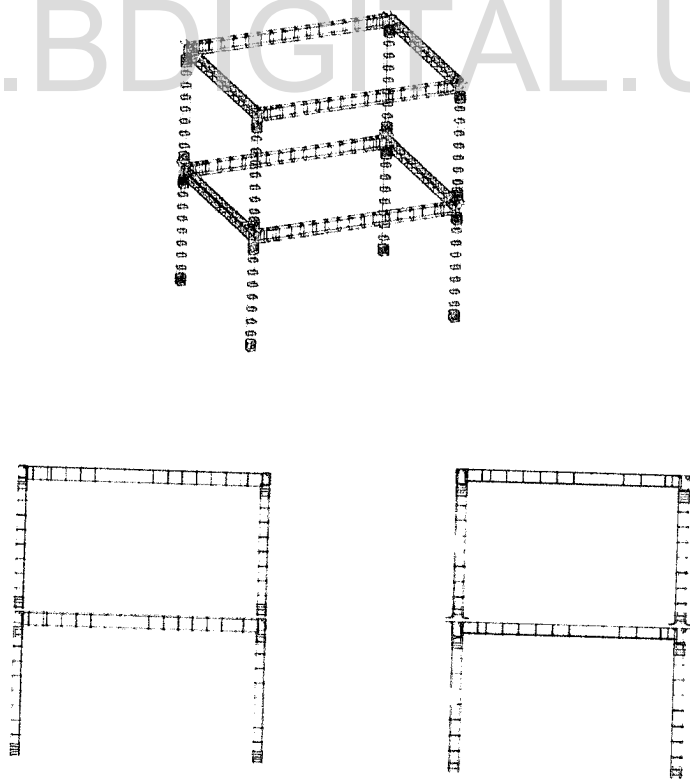


Figura C-1 Características geométricas.

En el análisis se usan las siguientes propiedades para describir los materiales. Estas propiedades son asignadas inicialmente por el programa, sin embargo el usuario tiene la opción de modificarlas.

Concreto:

Resistencia del concreto: 210 kg/cm²

Deformación máxima del concreto: 0.0020

Deformación última del concreto: 0.0030

Módulo de elasticidad: 200000 kg/cm²

Máxima deformación última del concreto confinado: 0.004

Acero:

Máxima deformación del acero: 0.03

Deformación de cedencia: 0.0022

Deformación al final de la cedencia: 0.01

Esfuerzo último: 6800 kg/cm²

Esfuerzo a tracción: 4500 kg/cm²

Esfuerzo a tracción del acero transversal: 4200 kg/cm²

La historia de desplazamiento impuesta a la estructura se muestra en la tabla C-1.

Tabla C-1.- Historia de desplazamientos impuestos.

Pasos	Desplazamiento (cm)
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10
6	12
7	14

Pasos a seguir para la generación del modelo,

1. Una vez abierto el programa se procede a hacer click en **Nuevo** y se escribe el nombre asignado al modelo, en este caso tendrá por nombre **Tutorial**, luego se presiona **Aceptar**.

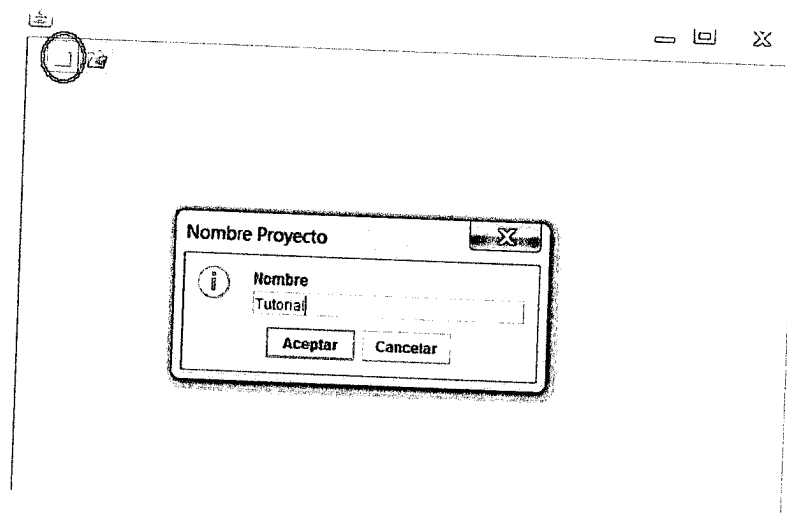


Figura C-3 Pantalla Inicial del Portal de Pórticos 3D.

2. En la siguiente pantalla se indica el número de niveles, tramos en X y tramos en Y, con sus respectivas dimensiones en centímetros, tal como se muestra en la figura C-4, y se presiona **Aceptar**.

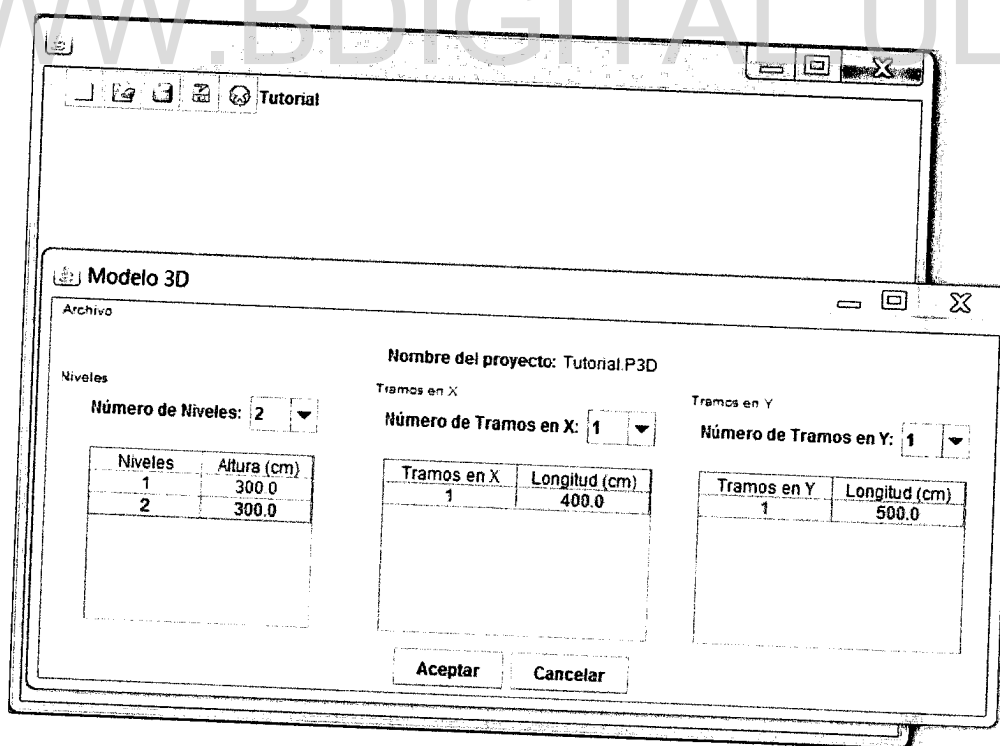


Figura C-4 Pantalla para la creación de la geometría.

3. La siguiente pantalla corresponde al módulo “Geometría”, a partir de este módulo es posible visualizar la geometría generada en el paso 2, así como cada uno de los pórticos que conforman la estructura.

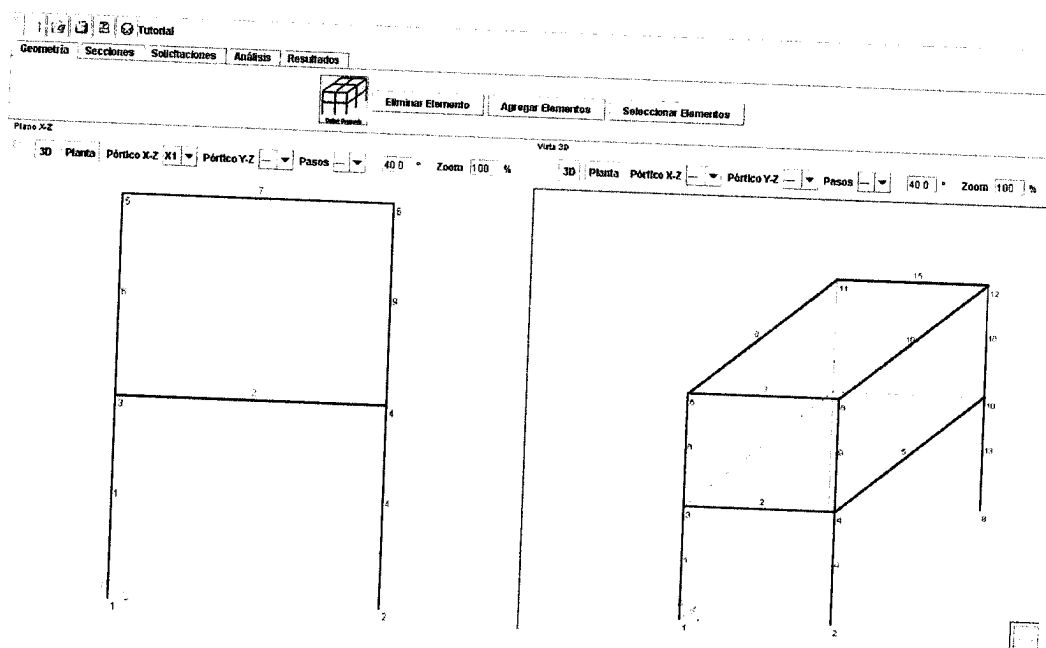


Figura C-5 Módulo geometría.

Cada elemento debe estar asignado a un grupo, por lo tanto los elementos que posean características geométricas y de condiciones de cargas idénticas pueden ser asignados a un mismo grupo.

Para el ejemplo en estudio se crean 3 grupos, ya que se tienen 3 secciones distintas, para ello se hace click en **Seleccionar Elementos** tal como se muestra en la figura C-6 y se procede a añadir cada uno de los conjuntos haciendo click en el icono del símbolo “+”. Una vez abierta la pantalla de selección de elementos se procede a elegir el primer grupo, el cual está conformado por los elementos columnas 1, 4, 6, 9, 11, 13, 14 y 16.

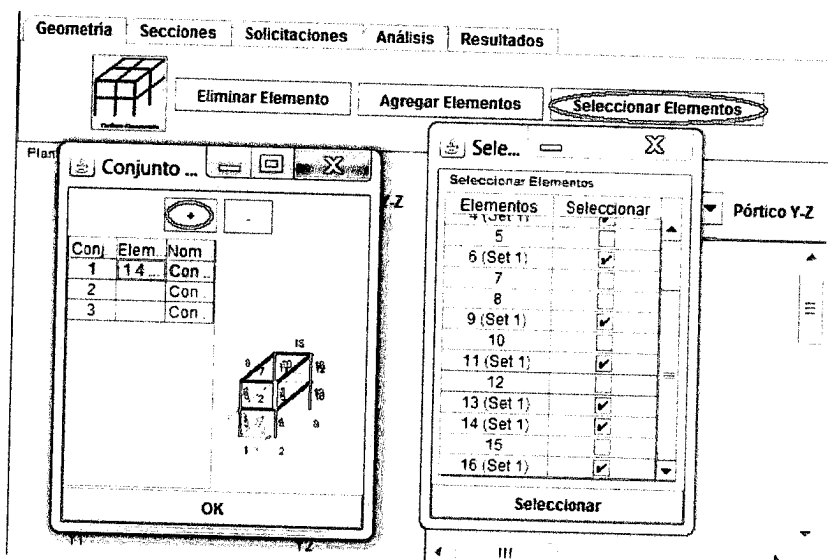


Figura C-6 Pantalla para la selección de los grupos de elementos.

Luego se repite el paso anterior para las vigas de amarre, las cuales son los elementos 2, 7, 12 y 15. Finalmente se seleccionan las vigas de carga, las cuales están conformadas por los elementos 3, 5, 8 y 10. Al finalizar, todos los elementos deben estar agrupados, se presiona **OK** y se continúa al siguiente paso.

4. El siguiente paso consiste en definir y asignar las secciones, para ello se procede a hacer click en el módulo "Secciones". Al hacer click aparecen dos botones, el primero llamado **Def. Sección** en el cual se definen las secciones que tendrán los elementos; y el segundo llamado **Asig. Sección** el cual sirve para asignar las secciones.

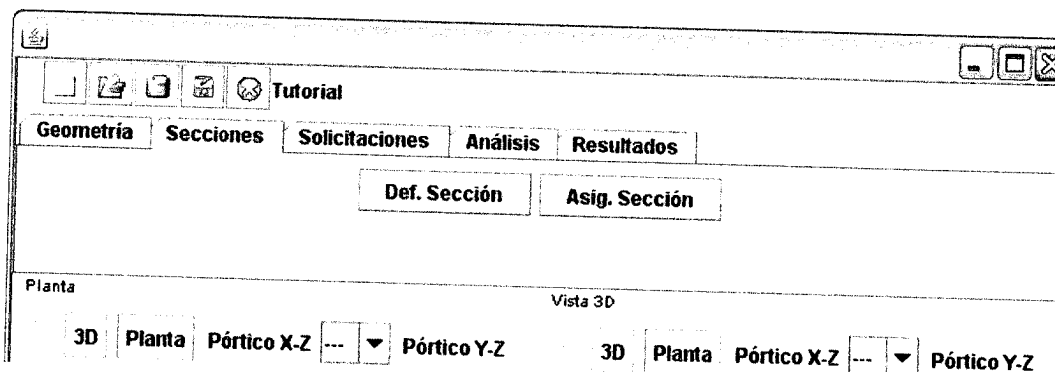


Figura C-7 Módulo secciones.

4.1 Las secciones se definen al hacer click en **Def. Sección**, luego click en **Nuevo** como aparece en la figura C-8.

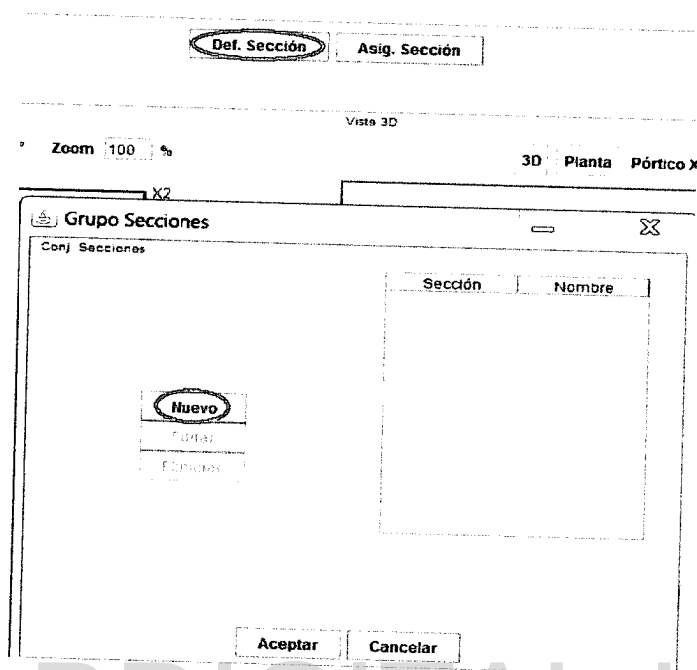


Figura C-8 Pantalla para crear sección.

En la pantalla **Definir Sección** (Ver figura C-9) se proporciona la información referente a los elementos columnas:

Nombre de la sección: Nombre asignado a la sección, "Columnas".

Tipo de sección: Se selecciona el tipo de sección (Columna, viga X, viga Y, otro), en este caso es "Columna".

Área: Se definen las dimensiones de la sección (b, h) según la vista mostrada, "b=30 cm, h=30cm".

Masa: La masa del elemento puede calcularse considerando el peso del elemento así como el porcentaje de rigidez del pórtico en la estructura. En este caso se usará el peso propio de cada elemento, calculado según la fórmula (1):

$$M_{col} = \frac{V_{col} * \gamma_{concreto}}{g} \quad (1)$$

$$M_{col} = \frac{(30 * 30 * 300) cm^3 * 2.4 \times 10^{-6} tn/cm^3}{981 cm/seg^2}$$

$$M_{col} = 0.0006 \frac{Tn * seg^2}{cm}$$

Definir sección

Sección

Nombre de la sección: Columnas

Area:

b (cm)	h (cm)	Eje Yb
30.0	30.0	0.1,0

Def. Materiales

Masas (Ton)s^2/cm: 0.0006

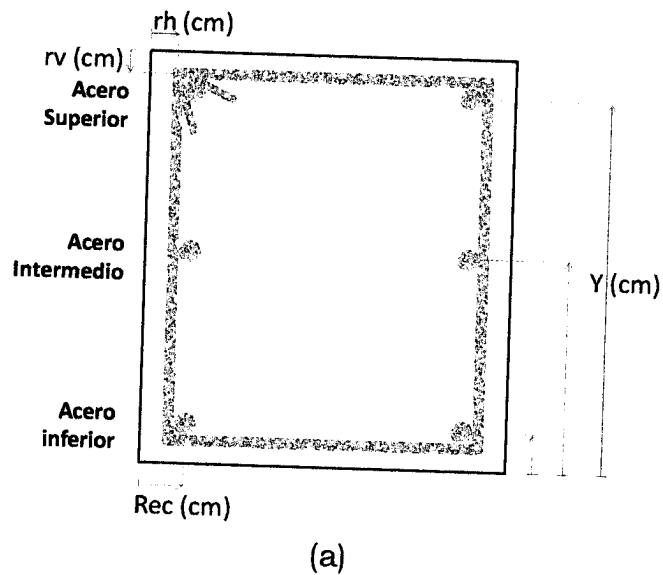
☒ Columna
☐ Viga X
☐ Viga Y
☐ Otro

Figura C-9 Información del conjunto "columnas".

En el acero longitudinal se indica el número de capas de acero que posee la sección transversal. Para ello en cada **Capa** se define la cantidad de barras de acero (# **Aceros**), área total (**Área total cm²**) y la distancia desde el borde inferior (distancia **Y** en cm) o lateral izquierdo (distancia **X** en cm) de la sección hasta el centroide de la barra de acero longitudinal. El recubrimiento (**Rec cm**) se refiere a la distancia opuesta asignada en **X** o **Y**.

En la opción de Estribos se introducen los datos correspondientes al acero transversal de los elementos, estos es: Tipo de estribo (**Tipo**), diámetro del estribo (**de cm**), separación en la zona de confinamiento (**S cm**), y el recubrimiento vertical y horizontal hasta el centro del estribo (**rv - rh cm**).

En la figura C-10 se puede observar una sección transversal de referencia donde están indicadas las distancias para el acero longitudinal y transversal, así como la información correspondiente al conjunto "Columnas".



Definir sección

Sección

Nombre de la sección: Columnas

Area:

b (cm)	h (cm)	Eje Yb
30.0	30.0	0.1 0.

Def. Materiales

Masas (Ton)s^2/cm: 0.0006

Aceros Longitudinales

Capa	# Aceros	Area Tota	x (cm)	y (cm)	Rec (cm)
AsInf	2	5.7		4.5	4.5
AsSup	2	5.7		25.5	4.5

Vista

Estribos

Tipo	Rx	Ry	L(cm)	de(cm)	s(cm)	rv	rh
A	2	2	0	0.953	12.5	3.0	3.0

Tipo A: estribo con ganchos

Tipo B: estribo solapado

Diag. Interacción

Aceptar

Cancelar

(b)

Figura C-10 a) Sección transversal de referencia. b) Definición de los aceros longitudinales y transversales de la sección "columnas".

Al hacer click en **Def. Materiales** se asignan las propiedades de los materiales, en el ejemplo se usan los valores que el programa trae por defecto, ver figura C-11.

Materiales

Concreto

Resistencia del concreto (f'_c)(Kg/cm²): 210.0

Deformación máxima del concreto ($\epsilon_{0.002}$): 0.0020

Deformación última del concreto ($\epsilon_{0.004}$): 0.0030

Módulo de elasticidad (E)(Kg/cm²): 200000.0

Máxima deformación última del concreto confinado ($\epsilon_{ccu} \geq 0.004$): 0.0040

Tasa de deformación: ☐ Alta ☒ Baja

Opciones de diseño: ☒ Confinado ☐ No Confinado

Acero

Máxima deformación (ϵ_{sm}): 0.03

Deformación de cedencia (ϵ_y): 0.0022

Deformación al final de la cedencia (ϵ_{sh}): 0.01

Esfuerzo último (f_{su})(Kg/cm²): 6800.0

Esfuerzo a tracción (f_y)(Kg/cm²): 4500.0

Esfuerzo a tracción de refuerzo transversal (f_{yh})(Kg/cm²): 4200.0

Nota: $\epsilon_y \leq \epsilon_{sh} \leq \epsilon_{sm}$, $f_{su} > f_y$

Figura C-11 Definición de las propiedades de los materiales.

Finalmente se hace click en **Diag. Interacción** para visualizar los diagramas del momento crítico (M_{cr}), momento plástico (M_p), momento último (M_u) y curvatura.

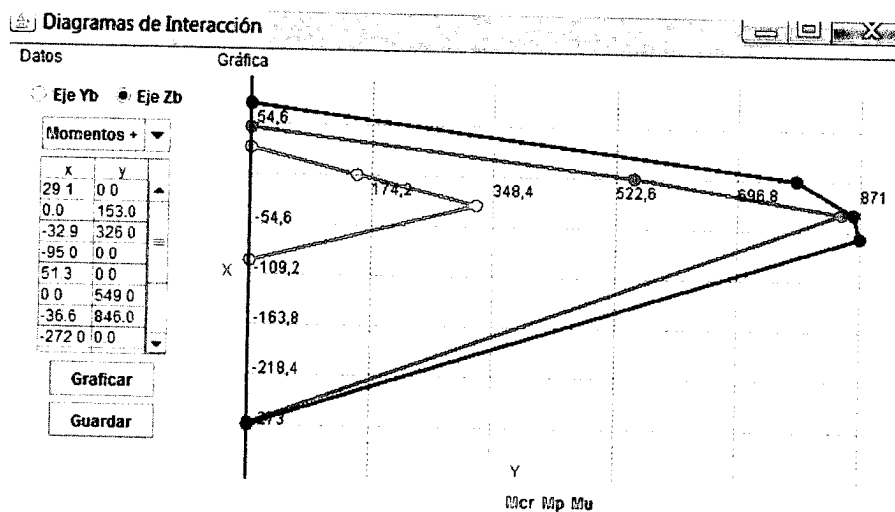


Figura C-12 Diagrama de interacción de la sección Columnas.

Se presiona **Aceptar** y se repite el mismo procedimiento para crear la sección de 25x35 cm correspondiente a las vigas orientadas en el eje Y, y la sección de 25x30 cm para las vigas orientadas en el eje X. En la figura C-13 se puede observar la información referente a cada sección.

Definir sección

Sección

Nombre de la sección: V25x35

Area:

b (cm)	h (cm)	Eje Yb
25.0	35.0	0.0 -1

Def. Materiales

Masas (Ton)s*2/cm: 0.001

Aceros Longitudinales

Capa	# Aceros	Area Total	x (cm)	y (cm)	Rec (cm)
AsInf	2	3.96		4.3	4.3
AsSup	2	3.96		30.7	4.3

Vista

Estribos

Tipo	Rx	Ry	L (cm)	de (cm)	s (cm)	nv	rh
A	2	2	0	0.953	12.5	3.0	3.0

Tipo A: estribo con ganchos

Tipo B: estribo solapado

Diag. Interacción OK

(a)

Definir sección

Sección

Nombre de la sección: V25x30

Area:

b (cm)	h (cm)	Eje Yb
25.0	30.0	0.0 -1

Def. Materiales

Masas (Ton)s*2/cm: 0.001

Aceros Longitudinales

Capa	# Aceros	Area Total	x (cm)	y (cm)	Rec (cm)
AsInf	2	2.53		4.13	4.13
AsSup	2	2.53		25.87	4.13

Vista

Estribos

Tipo	Rx	Ry	L (cm)	de (cm)	s (cm)	nv	rh
A	2	2	0	0.953	12.5	3.0	3.0

Tipo A: estribo con ganchos

Tipo B: estribo solapado

(b)

Figura C-13 Definición de los aceros longitudinales y transversales de la sección: a) Vigas en Y. b) Vigas en X.

4.2 El siguiente paso consiste en asignar las secciones creadas en el punto 4.1, para ello se hace click en **Asig. Sección**. En la pantalla aparecen los tres conjuntos de elementos creados previamente. Dado que los extremos de los elementos poseen la misma sección transversal, en el nodo i y j se asigna la misma sección, tal y como se muestra en la figura C-14.

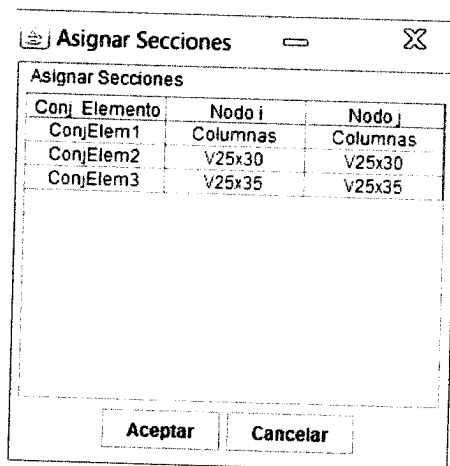


Figura C-14 Pantalla asignar sección.

Se hace click en **Aceptar** y se continúa al siguiente paso.

5. En el módulo “solicitaciones” se tienen 3 opciones, la primera, **Selecc. Nodos** es usada para crear grupos de nodos sobre los cuales será posible aplicar cargas, restricciones o desplazamientos; la segunda opción **Condiciones Iniciales**, como su nombre lo indica sirve para establecer las condiciones iniciales del análisis; y la tercera **Pasos de análisis**, es una opción usada para definir los pasos que posee el modelo.

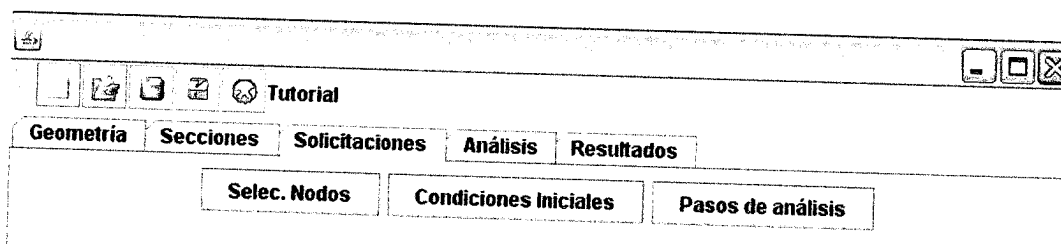


Figura C-15 Módulo solicitudes.

5.1 Primero se hace click en **Selecc. Nodos**, luego en la pantalla emergente se presiona en el símbolo “+” para así crear dos conjuntos de

nodos, uno para las condiciones iniciales y el segundo para la historia de desplazamientos. En el primer conjunto están agrupados los nodos 1, 2, 7 y 8; y en el segundo conjunto los nodos 5 y 6 tal como se muestra en la figura C-16. Click en **OK** y se continúa al siguiente paso.

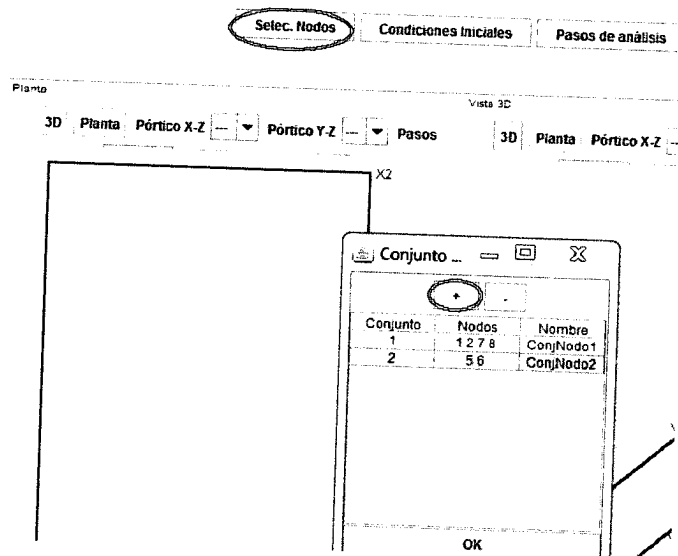


Figura C-16 Pantalla para la creación de los grupos de nodos.

5.2 Al hacer click en **Condiciones Iniciales** y para el conjunto de nodos "ConjNodo1" se restringe el movimiento en todas las direcciones, seleccionando U_x , U_y , U_z , θ_x , θ_y , θ_z . Luego click en **Aceptar**.

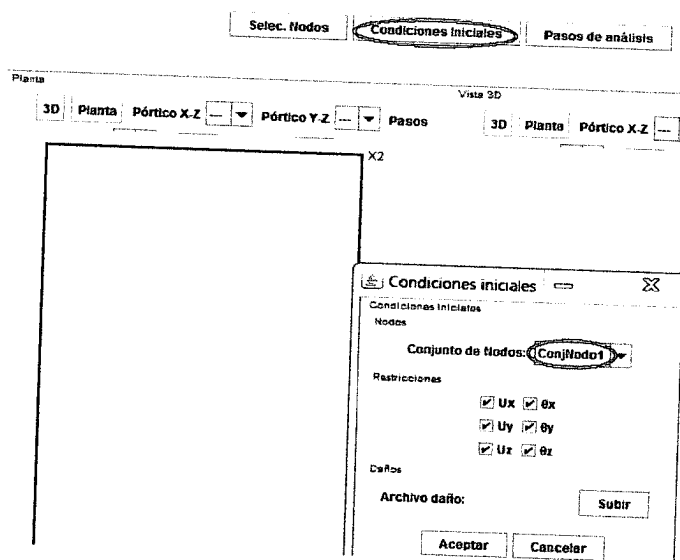


Figura C-17 Pantalla condiciones iniciales.

5.3 En la opción **Pasos de análisis** se crean 8 pasos de análisis. El primero para la aplicación de la carga uniformemente repartida sobre las vigas de carga y los siete restantes para la historia de desplazamientos indicados en la tabla C-1. Cada paso se crea al hacer click en **Nuevo**, como se muestra en la figura C-18.

Paso	Nombre
1	Paso1
2	Paso2
3	Paso3
4	Paso4
5	Paso5
6	Paso6
7	Paso7
8	Paso8

Figura C-18 Pantalla para la creación de los pasos.

Al hacer click en **Nuevo** aparece la pantalla de la figura C-19, en ella se selecciona en la opción **Conj. Elementos** el conjunto de elementos "ConjElem3", el cual representa las vigas de carga. En **Fuerzas Elementos** se despliega una pantalla adicional para asignar la fuerza distribuida sobre el conjunto, allí se coloca en **Qz** el valor de -1,993 tn/m. Luego click en **Aceptar** y **OK**. En **Descripción del paso** se dejan los valores que tiene por defecto.

Qx	Qy	Qz	Masas	Factor
0	0	-1993.0	0	1

Figura C-19 Pantalla para la asignación de la fuerza sobre las vigas de carga.

Para los siguientes pasos se modifica en **Descripción del paso** la opción **Duración del Paso** colocándose el valor de 10, esto con el objetivo de aplicar el desplazamiento de forma progresiva. En **Conj. Nodos** se selecciona el conjunto "ConjNodo2" y en la pestaña **Desplazamientos** se coloca el desplazamiento correspondiente a cada paso en la dirección del eje Y (**Uy**) según la tabla C-1. Por ejemplo para el paso 2 se muestra la figura C-20.

Definición de Paso

Descripción del paso

Nombre: Paso2 Incremento Inicial (Seg): 1.00

Duración del Paso (Seg): 10 Frecuencia: 1

Solicitaciones

Conj. Nodos	Fuerzas (Ton)	Desplazamientos...	Aceleraciones (T...
ConjNodo2			

Desplazamiento en Nodos (cm)

Desplazamientos Archivo

Ux	Uy	Uz	θx	θy	θz	Factor
0	2.0	0	0	0	0	1

Aceptar Cancelar

(Ton)

Ok

Figura C-20 Pantalla para la definición del paso 2.

6. Una vez completado todos los pasos de análisis se debe guardar el modelo con el fin de generar el archivo de datos .INP, para ello se hace click en el icono de la figura C-21.

Tutorial

Geometría Secciones Solicitaciones Análisis Resultados

Selec. Nodos Condiciones Iniciales Pasos de análisis

Figura C-21 Creación del archivo de datos Tutorial.INP.

7. En el módulo análisis se selecciona la opción **Analizar**. En la pantalla emergente se puede monitorear el análisis, pues en ella se indica el tiempo global y el número del paso para cada instante de tiempo. Una vez concluido el análisis se puede leer el mensaje “Su proceso ha culminado exitosamente”.

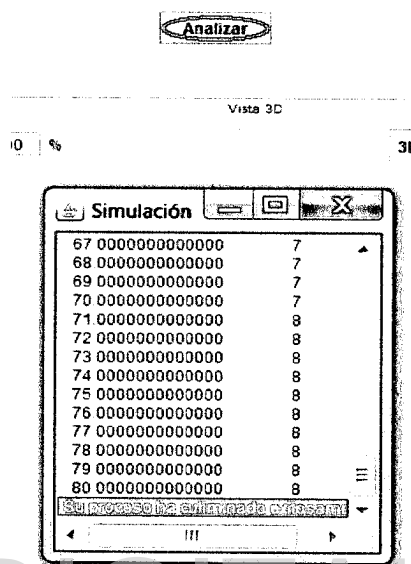


Figura C-22 Módulo análisis.

8. Finalmente en el módulo “resultados” se realiza la visualización de los resultados a través de 3 opciones: **Graficas**, **Mapa de Daño** y **Desplazamiento**. A continuación se muestra el procedimiento para la obtención de resultados:

8.1 La primera opción permite hacer graficas (x-y) de las variables correspondientes a nodos y elementos. Para el ejemplo se hará una grafica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo 5.

En **Graficas** aparece una pantalla emergente (figura C-23) en la que se indica:

Nodo/Elemento: Nodo 5,

Componente x: Despla. en Y – U2,

Componente y: Fuerza en Y – F2,

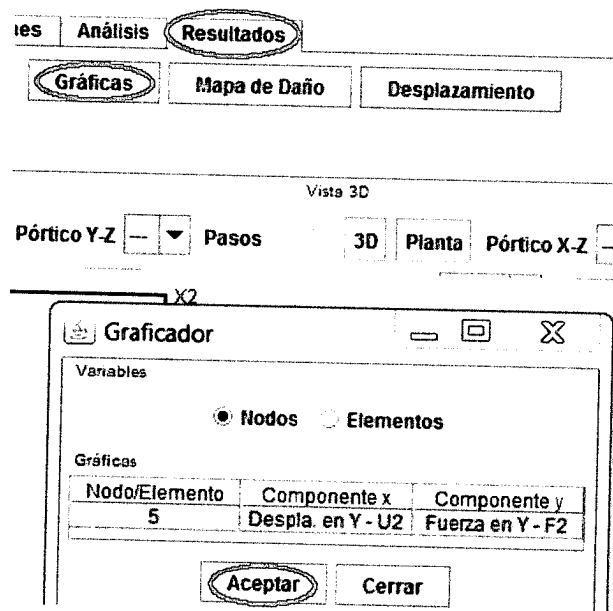


Figura C-23 Pantalla para la creación de graficas.

Luego de **Aceptar** aparece una nueva ventana con la grafica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo 5.

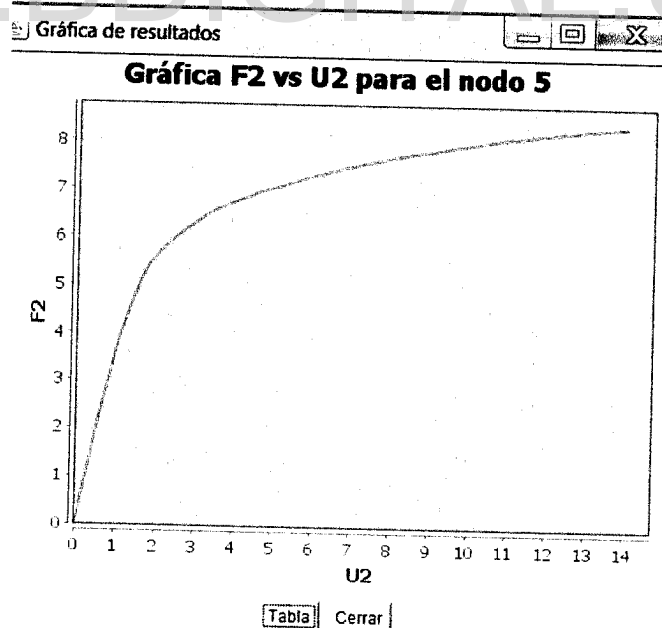


Figura C-24 Grafica Fuerza vs. Desplazamiento del nodo 5.

Tabla				
U2	F2			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.0	0.0			
0.2	0.79137			
0.4	1.5827			

8.2 Para obtener el mapa de daño de la estructura se hace click en **Mapa de Daño**. La visualización en el tiempo se puede hacer de forma manual desplazando la barra de la pantalla emergente, o haciendo click en **Play**, así el programa reproducirá el daño para cada incremento de tiempo. Además esta pantalla muestra en una tabla las variables de daño para cada elemento en el tiempo.

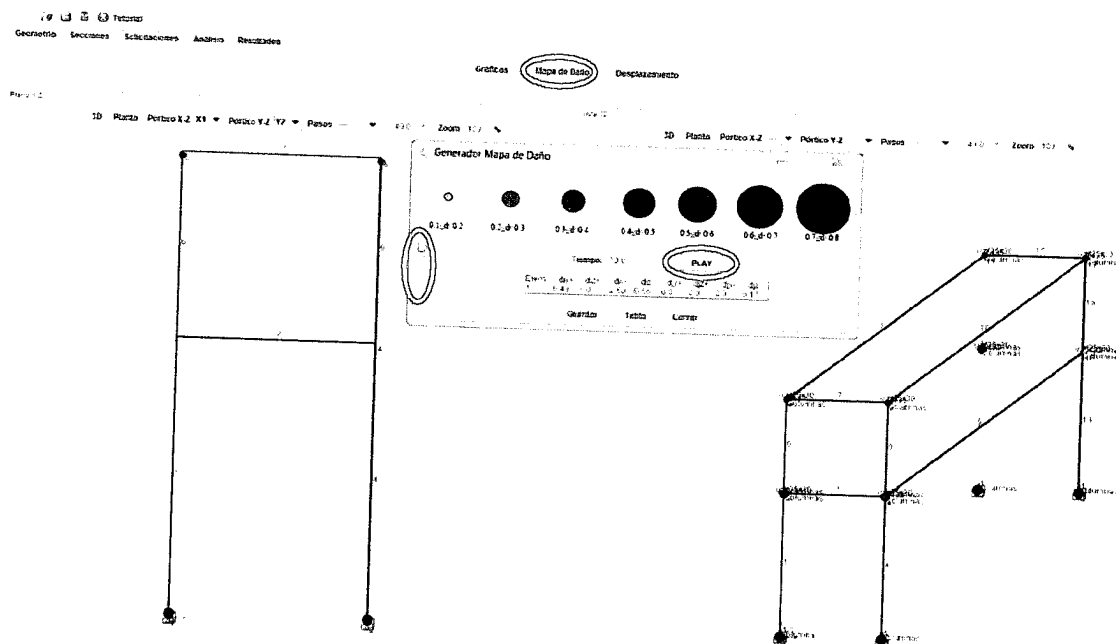


Figura C-26 Mapa de daño de la estructura.

Para visualizar el mapa de daño de cada pórtico, en la ventana del lado izquierdo se hace click en **Planta**, luego en la opción llamada **Pórtico X-Z** o **Pórtico Y-Z** se selecciona el pórtico que se desea observar.

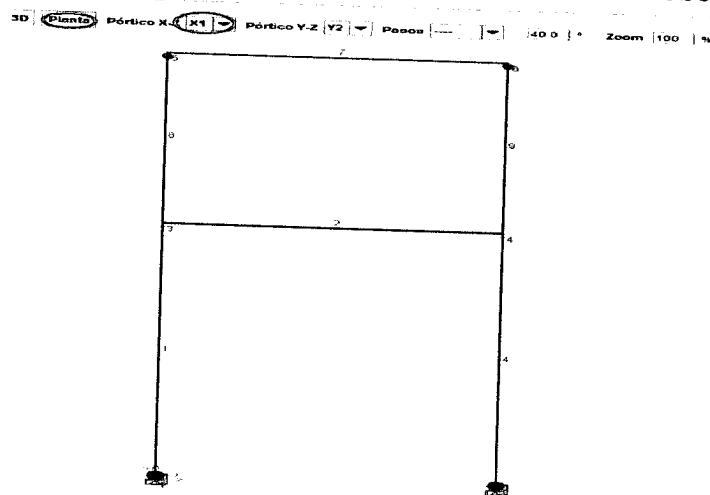


Figura C-27 Mapa de daño del pórtico X1.

9. Para visualizar la estructura deformada se hace click en la opción **Desplazamientos**. Al igual que para el mapa de daño, se tiene una pantalla emergente a través de la cual es posible visualizar la estructura deformada en cada instante de tiempo.

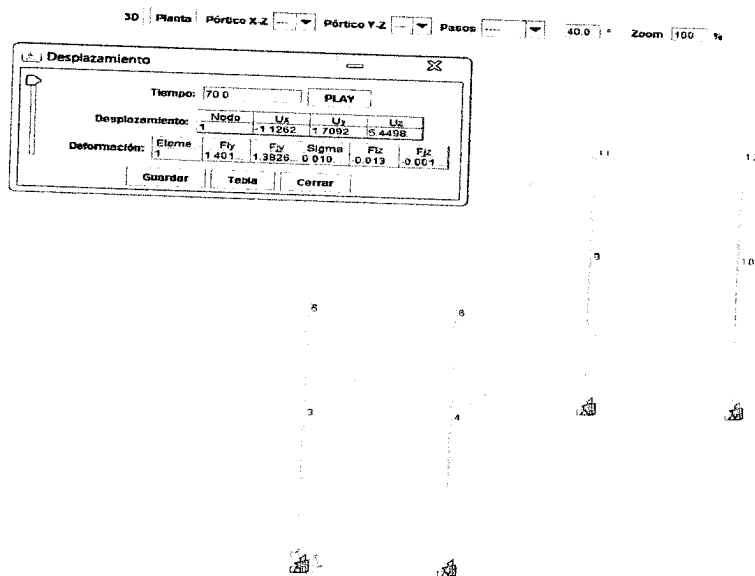


Figura C-28 Visualización de la estructura deformada.