

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS

**COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON Y SIN
DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO TADAS, UBICADAS EN LA
CIUDAD DE QUITO, POR EL MÉTODO DEL ESPECTRO DE
CAPACIDAD**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MASTER EN
ESTRUCTURAS**

EDGAR DAVID MORA MARTÍNEZ

edmoram13@gmail.com

DIRECTOR: DR. ROBERTO RODRIGO AGUIAR FALCONÍ

rraguiar@espe.edu.ec

Quito, diciembre 2015

DECLARACIÓN

Yo, Edgar David Mora Martínez declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

EDGAR DAVID MORA MARTÍNEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edgar David Mora Martínez, bajo mi supervisión.

DR. ROBERTO RODRIGO AGUIAR FALCONÍ

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Todos siempre tenemos gente que ha influido mucho en lo mejor que podemos llegar a ser, para mí están primero mi papá, mi mamá y mis hermanos, son personas con las que siempre puedo contar ante tantos problemas que a veces se presentan, mi novia Elizabeth, por su alegría, fuerza, paciencia y empuje hacia mí de no rendirme ante obstáculos que pensaba sin solución, al Dr. Aguiar quien me mostró que no hay límites solo hay que hacerlo, finalmente quiero agradecer a los profesores de la EPN, quienes su pasión por conocer más y más, siempre es una gran inspiración. Este trabajo es dedicado para todos ellos.

CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| DECLARACIÓN | ii |
| CERTIFICACIÓN | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| CONTENIDO | v |
| LISTADO DE TABLAS | xix |
| LISTADO DE FIGURAS | xx |
| RESUMEN | xxix |
| ABSTRACT | xxix |
| PRESENTACIÓN | xxxi |
| | |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| 1.1 IMPORTANCIA DE UTILIZAR DISIPADORES DE ENERGÍA Y ANÁLISIS NO LINEALES | 1 |
| 1.2 GENERALIDADES SOBRE ANÁLISIS PUSHOVER TRADICIONAL..... | 2 |
| 1.2.1 DEMANDA | 2 |
| 1.2.2 CAPACIDAD | 3 |
| 1.2.2.1 Proceso para determinar la curva de capacidad | 4 |
| 1.2.3 DESEMPEÑO | 8 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | 10 |
| DIAGRAMAS MOMENTO CURVATURA Y MOMENTO ROTACIÓN | 10 |
| | |
| 2.1 INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| 2.2 DEDUCCIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA | 11 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3 | UTILIZACIÓN E IMPORTANCIA DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA | 13 |
| 2.4 | COMPORTAMIENTO DEL ACERO ESTRUCTURAL - ESFUERZO VS DEFORMACIÓN..... | 14 |
| 2.5 | PROCESO DE CÁLCULO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA DE PERFILES DE ACERO PARA UN MODELO DE CURVA COMPLETA..... | 18 |
| 2.5.1 | PROCESO DE CÁLCULO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA DE PERFILES DE ACERO SIN CARGA AXIAL, PARA UN MODELO BILINEAL..... | 21 |
| 2.5.2 | PROGRAMA PARA MODELO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL | 23 |
| 2.5.3 | EJEMPLO DE MODELO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL..... | 23 |
| 2.5.4 | EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL SIN CONSIDERAR FUERZA AXIAL, EN CURVAS DE CAPACIDAD | 26 |
| 2.6 | MODELO MOMENTO CURVATURA COMPLETO INCLUYENDO FUERZA AXIAL | 27 |
| 2.6.1 | PROCESO DE CÁLCULO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA DE PERFILES DE ACERO PARA UN MODELO BILINEAL CON CARGA AXIAL | 30 |
| 2.6.2 | PROGRAMA PARA MODELO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL EN SECCIONES SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN..... | 30 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 2.6.3 | EJEMPLO DE MODELO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL INCLUYENDO FUERZA AXIAL..... | 31 |
| 2.6.4 | EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO CONSIDERANDO SOLO FLEXIÓN Y CONSIDERANDO FLEXOCOMPRESIÓN EN CURVAS DE CAPACIDAD | 33 |
| 2.7 | NORMATIVA PARA OBTENER RIGIDECES CON DIAGRAMAS MOMENTO ROTACIÓN | 33 |
| 2.7.1 | COMPARACIÓN θy CON EXPRESIÓN ASCE 41 Y EXPRESIÓN EXACTA..... | 39 |
| 2.7.2 | LONGITUD RÓTULA PLÁSTICA..... | 42 |
| 2.8 | RELACIÓN APROXIMADA ENTRE MOMENTO CURVATURA Y MOMENTO ROTACIÓN | 43 |
| 2.9 | MODELO DE CURVA HISTERÉTICA USADO EN PUSHOVER CÍCLICO | 45 |
| 2.9.1 | MODELO CONSTITUTIVO..... | 46 |
| 2.9.2 | PROGRAMA PARA MODELO DE HISTÉRESIS MOMENTO CURVATURA EN SECCIONES DE ACERO SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN..... | 51 |
| 2.10 | CONCLUSIONES SOBRE MODELOS MOMENTO CURVATURA Y MOMENTO ROTACIÓN..... | 52 |
| | CAPÍTULO 3..... | 53 |
| | MATRICES DE RIGIDEZ PARA ELEMENTOS CON DAÑO | 53 |
| 3.1 | INTRODUCCIÓN..... | 53 |
| 3.1.1 | MATRICES DE RIGIDEZ Y DE TRANSFORMACIÓN PARA ELEMENTOS NO PLASTIFICADOS SIMPLES | 53 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2 | MODELOS PARA ELEMENTOS EQUIVALENTES CON SECCIONES DE DIFERENTES RIGIDECES (SECCIONES CON DAÑO) | 56 |
| 3.2.1 | MÉTODO BILINEAL DE INTERACCIÓN CARGA AXIAL – MOMENTO | 56 |
| 3.2.2 | MODELO DE GIBERSON..... | 59 |
| 3.2.3 | MÉTODO LONGITUD DE LA RÓTULA PLÁSTICA..... | 60 |
| 3.2.4 | MODELO DE PLASTICIDAD EXTENDIDA CON RIGIDEZ CONSTANTE ESCALONADA..... | 62 |
| 3.2.5 | MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA EN COORDENADAS REDUCIDAS (MÉTODO DE DOVELAS) (NUEVA PROPUESTA) | 66 |
| 3.2.6 | MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA EN COORDENADAS REDUCIDAS (MÉTODO DE DOVELAS) INCLUYENDO DEFORMACIÓN POR CORTE..... | 70 |
| 3.2.7 | MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA EN COORDENADAS REDUCIDAS (MÉTODO DE DOVELAS) INCLUYENDO DEFORMACIÓN POR CORTE PARA ELEMENTOS CON CINCO RIGIDECES | 71 |
| 3.2.8 | COMPARACIÓN DE DIAGRAMA MOMENTO ROTACIÓN ASCE 41 CON MÉTODO DE GIBERSON, MÉTODO DE DOVELAS SIN Y CON DEFORMACIONES A CORTE Y MODELO DE PLASTICIDAD EXTENDIDA ESCALONADA | 71 |
| 3.3 | RESISTENCIA RESIDUAL DEL DIAGRAMA MOMENTO ROTACIÓN (NUEVA PROPUESTA) | 72 |
| 3.4 | MATRICES DE TRANSFORMACIÓN DE SISTEMAS DE COORDENADAS PARA ELEMENTOS CON RÓTULAS PLÁSTICAS..... | 77 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.4.1 | COORDENADAS REDUCIDAS | 77 |
| 3.4.2 | COORDENADAS LOCALES..... | 78 |
| 3.4.3 | COORDENADAS GLOBALES | 78 |
| 3.5 | CONCLUSIONES PARA MATRICES DE ELEMENTOS PLASTIFICADOS | 79 |
| CAPÍTULO 4..... | | 81 |
| ANÁLISIS DE ELEMENTOS DISIPADORES DE ENERGÍA TADAS | | 81 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN..... | 81 |
| 4.2 | DISIPADORES POR FLUENCIA DEL MATERIAL | 81 |
| 4.2.1 | INTRODUCCIÓN. DISIPADORES DE ENERGÍA METÁLICOS | 82 |
| 4.2.2 | FUNCIONAMIENTO DE DISIPADORES TADAS | 83 |
| 4.3 | PARÁMETROS ELÁSTICOS DEL DISIPADOR TADAS | 85 |
| 4.3.1 | CÁLCULO DE LA CURVATURA DEL DISIPADOR TADAS | 85 |
| 4.3.2 | FUERZA Y DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA DEL DISIPADOR TADAS..... | 86 |
| 4.3.3 | RIGIDEZ ELÁSTICA DEL DISIPADOR TADAS..... | 88 |
| 4.3.4 | PARÁMETROS ELÁSTICOS DE DISIPADOR TADAS..... | 88 |
| 4.4 | DIAGRAMA DE HISTÉRESIS BILINEAL..... | 89 |
| 4.5 | FUERZA DE CORTE F_u DE UN DISIPADOR TADAS..... | 90 |
| 4.6 | RESUMEN PARA MODELOS TADAS | 91 |
| 4.7 | PREDISEÑO DE DISIPADORES | 92 |
| 4.7.1 | PARÁMETROS DEL MODELO..... | 93 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 4.7.2 | SUSTENTO TEÓRICO | 95 |
| 4.7.3 | VALORES ÓPTIMOS DE α y β | 97 |
| 4.7.4 | PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO | 98 |
| 4.7.5 | NUEVA PROPUESTA PARA HALLAR CONTRAVIENTO- DISIPADOR | 99 |
| 4.8 | MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO DE UN DISIPADOR..... | 100 |
| 4.8.1 | ENERGÍA DISIPADA POR UN DISIPADOR..... | 100 |
| 4.8.2 | ENERGÍA DE DEFORMACIÓN POR UN DISIPADOR..... | 101 |
| 4.8.3 | FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE DEL DISIPADOR | 102 |
| 4.8.4 | AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE DEL DISIPADOR..... | 103 |
| 4.9 | COMPORTAMIENTO DE DISIPADOR-CONTRAVIENTO CHEVRON..... | 104 |
| 4.9.1 | MODELO DE DIAGONAL EQUIVALENTE | 105 |
| 4.9.2 | MODELO CON ELEMENTO DISIPADOR | 107 |
| 4.9.2.1 | Usando Solución analítica..... | 108 |
| 4.9.2.1.1 | <i>Sistema uno</i> | 109 |
| 4.9.2.1.1.1 | <i>Disipadores TADAS</i> | 111 |
| 4.9.2.1.1.2 | <i>Disipadores ADAS</i> | 112 |
| 4.9.2.1.2 | <i>Coordenadas locales</i> | 113 |
| 4.9.2.1.3 | <i>Coordenadas globales</i> | 114 |

| | |
|---|------------|
| 4.9.2.2 Usando el Método de las dovelas (Matriz de rigidez condensada en coordenadas reducidas) | 114 |
| 4.10 EJEMPLO DE COMPARACIÓN DE DIFERENTES MANERAS DE MODELAR DISIPADORES DE ENERGÍA..... | 116 |
| CAPÍTULO 5..... | 121 |
| MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD POR PUSHOVER MODAL MONOTÓNICO Y MODAL CÍCLICO | 121 |
| 5.1 INTRODUCCIÓN..... | 121 |
| 5.2 INTRODUCCIÓN DE DATOS PARA PROGRAMAS HECHOS EN FUNCIONES DE MATLAB | 121 |
| 5.2.1 VIGAS Y/O COLUMNAS DE ACERO | 122 |
| 5.2.2 VIGAS Y/O COLUMNAS DE HORMIGÓN..... | 123 |
| 5.2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA..... | 124 |
| 5.2.4 ASIGNACIÓN DE SECCIONES A LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA | 126 |
| 5.2.5 GENERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA..... | 126 |
| 5.2.6 ASIGNACIÓN DE CARGAS..... | 127 |
| 5.3 DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS QUE DETERMINARÁN LAS CURVAS DE CAPACIDAD | 127 |
| 5.4 PUSHOVER MONOTÓNICO NORMAL, Y COMPARACIÓN CON SAP2000 Y ETABS | 132 |
| 5.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE PUSHOVER MONOTÓNICO..... | 137 |
| 5.5 PUSHOVER MULTIMODAL | 138 |
| 5.5.1 PUSHOVER MULTIMODAL PSEUDO - DINÁMICO..... | 138 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.5.2 | TEORÍA DE PUSHOVER MULTIMODAL | 138 |
| 5.5.3 | CRITERIO DE COMBINACIÓN MODAL..... | 139 |
| 5.5.4 | FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO..... | 141 |
| 5.5.5 | DIAGRAMA DE FLUJO PARA PUSHOVER MULTIMODAL..... | 142 |
| 5.5.6 | EJEMPLO DE RESULTADOS DE PUSHOVER MULTIMODAL..... | 143 |
| 5.6 | PUSHOVER CÍCLICO MODAL PSEUDO DINÁMICO..... | 147 |
| 5.6.1 | DIAGRAMA DE FLUJO PARA CURVA DE CAPACIDAD CON PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL | 148 |
| 5.6.2 | EJEMPLO DE RESULTADOS DE PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL DE EDIFICIO IRREGULAR | 149 |
| 5.6.3 | EJEMPLO DE RESULTADOS DE PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL DE EDIFICIO REGULAR | 153 |
| 5.7 | MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD..... | 155 |
| 5.7.1 | MÉTODO “A” ATC40..... | 155 |
| 5.7.1.1 | Programa para hallar el punto de desempeño por el método “a” del atc40 | 158 |
| 5.7.2 | MÉTODO DE LOS COEFICIENTES FEMA 440 | 159 |
| 5.7.3 | EJEMPLO DE RESULTADOS DE PROGRAMAS PARA HALLAR EL PUNTO DE DESEMPEÑO..... | 159 |
| 5.7.3.1 | Resultados para el Método “A” de ATC40, programa <i>Spectrum_Capacity_Method3</i> | 160 |
| 5.7.3.2 | Resultados para el Método de Moeficientes de FEMA 440, programa <i>CoefMethod440_2</i> | 162 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.8 | EFEECTO P – DELTA EN UN ANÁLISIS PUSHOVER | 164 |
| 5.8.1 | DEFINICIÓN | 164 |
| 5.8.2 | CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN | 164 |
| 5.8.3 | CÁLCULO DEL EFECTO P – DELTA | 165 |
| 5.8.4 | IMPORTANCIA DE CALCULAR EFECTOS P – DELTA | 169 |
| 5.8.5 | CONCLUSIÓN Y RESULTADOS SOBRE EFECTO P-DELTA | 173 |
| | CAPÍTULO 6..... | 177 |
| | APLICACIÓN DE PUSHOVER CÍCLICO EN COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO SIN Y CON DISIPADORES DE ENERGÍA TADAS Y SHEAR LINK..... | 177 |
| 6.1 | INTRODUCCIÓN..... | 177 |
| 6.2 | PATRÓN DE CARGAS PARA PUSHOVER CÍCLICO | 178 |
| 6.3 | SISMO UTILIZADO..... | 181 |
| 6.4 | CÁLCULO DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO HISTERÉTICO EQUIVALENTE..... | 183 |
| 6.5 | DESCRIPCIÓN DE EDIFICIOS ESTUDIADOS..... | 184 |
| 6.6 | MEDICIÓN DE ÍNDICES DE DAÑO | 189 |
| 6.7 | RESULTADOS DE CURVAS CORTANTE BASAL VS DEFORMACIÓN DEL TOPE DEL EDIFICIO..... | 190 |
| 6.8 | PUNTO DE DESEMPEÑO DE EDIFICIOS ANALIZADOS..... | 193 |
| 6.9 | RESULTADOS | 195 |
| 6.10 | DIFERENTES DISPOSICIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA..... | 201 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 7 | 209 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 209 |
| 7.1 CONCLUSIONES..... | 209 |
| 7.2 RECOMENDACIONES..... | 210 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 211 |
| ANEXOS | 215 |
| ANEXO No1 | 216 |
| EJEMPLO DE COMO REALIZAR ANÁLISIS POR EL MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD CON LOS PROGRAMAS REALIZADOS EN MATLAB | 216 |
| ANEXO No2 | 222 |
| PROGRAMAS REALIZADOS EN MATLAB PARA EL MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD | 222 |
| A2.1 PROGRAMAS Y SUBPROGRAMAS EN Pushover_2..... | 223 |
| A2.1.1 Programa Pushover_2..... | 223 |
| A2.1.2 Programa masas..... | 225 |
| A2.1.3 Programa Initialization2..... | 225 |
| A2.1.4 Programa krigidez_ASCE41_2..... | 226 |
| A2.1.5 Programa Momento_Rotacion_ASCE41B..... | 230 |
| A2.1.6 Programa Momento_Rotacion_AceroASCE41B..... | 231 |
| A2.1.7 Programa Momento_Rotation_ConcrASCE41B..... | 231 |
| A2.1.8 Programa Momento_Rotacion_ASCE41C..... | 233 |
| A2.1.9 Programa Momento_Rotacion_AceroASCE41C..... | 234 |

| | | |
|---------|--|-----|
| A2.1.10 | Programa Momento_Rotation_ConcrASCE41C | 235 |
| A2.1.11 | Programa Geom..... | 238 |
| A2.1.12 | Programa PlasticHinge..... | 240 |
| A2.1.13 | Programa K1_eqcorte4 | 240 |
| A2.1.14 | Programa krigidez_brace_eq2 | 243 |
| A2.1.15 | Programa histeresis_adas..... | 245 |
| A2.1.16 | Programa histeresis_tadas..... | 246 |
| A2.1.17 | Programa histeresis_SL..... | 247 |
| A2.1.18 | Programa krigidez_tadas | 248 |
| A2.1.19 | Programa krigidez_damper3..... | 249 |
| A2.1.20 | Programa AxialADAS..... | 251 |
| A2.1.21 | Programa AxialTADAS..... | 251 |
| A2.1.22 | Programa espe_cap..... | 251 |
| A2.1.23 | Programa cargas_po..... | 252 |
| A2.1.24 | Programa deriva..... | 253 |
| A2.1.25 | Programa fuerzas_0..... | 254 |
| A2.1.26 | Programa Iteration_Vy2 | 255 |
| A2.1.27 | Programa Efecto_PD2 | 255 |
| A2.1.27 | Programa Dibujo_Din2..... | 255 |
| A2.2 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN Pushover_3..... | 257 |
| A2.2.1 | Programa Pushover_3 | 257 |

| | | |
|---------|---|-----|
| A2.2.2 | Programa Initialization3..... | 260 |
| A2.2.3 | Programa cg_data3..... | 261 |
| A2.2.4 | Programa espe_cap3..... | 262 |
| A2.2.5 | Programa CQC | 262 |
| A2.2.6 | Programa Iteration_Vy3 | 263 |
| A2.3 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN Pushover_4..... | 263 |
| A2.3.1 | Programa Pushover_4 | 263 |
| A2.3.2 | Programa Initialization4..... | 267 |
| A2.3.3 | Programa cg_data4..... | 268 |
| A2.3.4 | Programa polygeom..... | 269 |
| A2.3.5 | Programa krigidez_ASCE41_21 | 271 |
| A2.3.6 | Programa HisteresisMom_curv_BiS..... | 274 |
| A2.3.7 | Programa krigidez_brace_eq3 | 277 |
| A2.3.8 | Programa HisteresisF_Def_Bi3..... | 280 |
| A2.3.9 | Programa krigidez_damper31 | 282 |
| A2.3.10 | Programa CapCur | 285 |
| A2.3.11 | Programa iszero..... | 287 |
| A2.4 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN Structure_Geom_2D_v2 | 287 |
| A2.4.1 | Programa Structure_Geom_2D_v2..... | 287 |
| A2.4.2 | Programa gn_portico..... | 287 |
| A2.4.3 | Programa dibujo..... | 288 |

| | | |
|--------|--|------------|
| A2.4.4 | Programa cg_sismo3 | 289 |
| A2.4.5 | Programa longitud | 289 |
| A2.4.6 | Programa vc..... | 290 |
| A2.5 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN MEC_NEC14..... | 290 |
| A2.5.1 | Programa MEC_NEC14..... | 290 |
| A2.5.2 | Programa espectro_nec14_mec | 291 |
| A2.5.3 | Programa Spectrum_Capacity_Method3 | 292 |
| A2.5.4 | Programa ginputc..... | 295 |
| A2.5.5 | Programa despla_fuerza2..... | 301 |
| A2.5.6 | Programa deriva0..... | 302 |
| A2.6 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN MEC_NEC14_22..... | 303 |
| A2.6.1 | Programa MEC_NEC14_22 | 303 |
| A2.6.2 | Programa CoefMethod440_2 | 303 |
| A2.7 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN MEC_NEC14_5..... | 305 |
| A2.7.1 | Programa MEC_NEC14_5..... | 305 |
| A2.8 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN ResultsMEC_B..... | 306 |
| A2.8.1 | Programa ResultsMEC_B | 306 |
| A2.9 | PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN ResultsMEC_B22..... | 307 |
| A2.9.1 | Programa ResultsMEC_B22 | 307 |
| | ANEXO No3..... | 309 |
| | OTROS PROGRAMAS REALIZADOS EN MATLAB..... | 309 |
| A3.1 | PROGRAMA Diagr_Momento_Curvatura_AceroV | 310 |

| | |
|---|-----|
| Diagr_Momento_Curvatura_AceroV..... | 310 |
| A3.2 PROGRAMA Diagr_Momento_Curvatura_AceroC..... | 313 |
| Diagr_Momento_Curvatura_AceroC..... | 313 |
| A3.3 PROGRAMA K1_eqcorte2..... | 318 |
| K1_eqcorte2 | 318 |
| A3.4 PROGRAMA K1_escalonado | 319 |
| K1_escalonado | 319 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| TABLA 2.1 Tabla numero 3 de la norma ASTM A36. requerimientos de tensión..... | 16 |
| TABLA 2.2 Parámetros para procedimientos no lineales en estructuras de acero | 37 |
| TABLA 4.1 Parámetros para el intervalo elástico del dissipador TADAS..... | 89 |
| TABLA 4.2 Parámetros del diagrama bilineal para dissipadores TADAS | 91 |
| TABLA 4.3 Valores óptimos de α y β | 97 |
| TABLA 5.1 Definición de los elementos de la estructura..... | 122 |
| TABLA 5.2 Matriz <i>Table1</i> para crear elementos de acero..... | 122 |
| TABLA 5.3 Matriz para crear elementos de hormigón armado | 123 |
| TABLA 5.4 Matriz para crear dissipadores ADAS..... | 125 |
| TABLA 5.5 Matriz para crear dissipadores TADAS..... | 125 |
| TABLA 5.6 Matriz para crear dissipadores Shear Link Bozzo..... | 125 |
| TABLA 5.7 Descripción de programas para Pushover | 128 |
| TABLA 5.8 Programas dentro de Structure_Geom_2D_v2..... | 128 |
| TABLA.5.9 Programas que determinan la rigidez del dissipador sobre contravientos, de acuerdo a los dos modelos de cálculo | 129 |
| TABLA 5.10 Programas para hallar contribución a la matriz de rigidez de la estructura de los elementos: columnas, vigas, dissipadores y montantes de acero | 130 |
| TABLA 6.1 Dissipadores shear link..... | 179 |
| TABLA 6.2 Cuadro de secciones usadas..... | 188 |
| TABLA 6.3 Definición de daño de acuerdo a NHRC (1978) | 189 |
| TABLA 6.4 Definición de daño de acuerdo a EERI (1996)..... | 190 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1 Espectro de diseño dado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC15..... | 3 |
| FIGURA 1.2 Arriba: Modelo de edificios deformados por cargas laterales. Abajo: Curvas de Capacidad formadas correspondientes a edificios deformados. | 4 |
| FIGURA 1.3 Ejemplo de colocación de grados de libertad en pórtico..... | 7 |
| FIGURA 1.4 Obtención del punto de desempeño con el espectro de capacidad y espectro de diseño..... | 9 |
| FIGURA 2.1 Hipótesis de Navier-Bernoulli..... | 11 |
| FIGURA 2.2 Hipótesis de Navier-Bernoulli – Deformaciones en secciones | 11 |
| FIGURA 2.3 Hipótesis de Navier-Bernoulli – Esfuerzos en secciones | 12 |
| FIGURA 2.4 Relación Esfuerzo deformación | 13 |
| FIGURA 2.5 Modelos de comportamiento del acero | 14 |
| FIGURA 2.6 Zonas de curva Esfuerzo Deformación del acero | 15 |
| FIGURA 2.7 Curvas esfuerzo-deformación para acero A36 | 17 |
| FIGURA 2.8 Cálculo de Momento Curvatura | 18 |
| FIGURA 2.9 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f < f_y$ | 19 |
| FIGURA 2.10 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f = f_y$ | 19 |
| FIGURA 2.11 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f = f_{sh}$ | 20 |
| FIGURA 2.12 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f \geq f_{sh}$ | 20 |
| FIGURA 2.13 Modelo bilineal de diagrama momento curvatura | 21 |
| FIGURA 2.14 Sección de Acero W 30x173..... | 23 |
| FIGURA 2.15 Resultado de programa: Diagr_Momento_Curvatura_AceroV | 24 |
| FIGURA 2.16 Sección de Acero W 14x109..... | 24 |
| FIGURA 2.17 Resultado de programa: Diagr_Momento_Curvatura_AceroV | 25 |
| FIGURA 2.18 Ejemplo de estructura a ser analizada..... | 26 |
| FIGURA 2.19 Resultados de Curva de Capacidad con diferentes relaciones EI_p/EI_e | 27 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.20 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f < f_y$ | 28 |
| FIGURA 2.21 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f = f_y$ | 28 |
| FIGURA 2.22 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f = f_{sh}$ | 29 |
| FIGURA 2.23 Cálculo de Momento Curvatura para esfuerzo $f \geq f_{sh}$ | 29 |
| FIGURA 2.24 Resultado de programa: Diagr_Momento_Curvatura_AceroV y Diagr_Momento_Curvatura_AceroC..... | 31 |
| FIGURA 2.25 Resultado de programa: Diagr_Momento_Curvatura_AceroV y Diagr_Momento_Curvatura_AceroC..... | 32 |
| FIGURA 2.26 Resultados de Curva de Capacidad | 33 |
| FIGURA 2.27 Curva Generalizada Fuerza – Deformación de componentes o elementos | 34 |
| FIGURA 2.28 Secciones de acero consideradas en el sistema computacional..... | 35 |
| FIGURA 2.29 Momentos en Viga deformada por flexión | 40 |
| FIGURA 2.30 Comparación de Curvas de Capacidad de edificio del <i>subcapítulo 2.5.4</i> , utilizando el diagrama momento curvatura teórico y diagramas momento rotación de ASCE41 | 42 |
| FIGURA 2.31 Diagrama de Momentos de viga de longitud L..... | 43 |
| FIGURA 2.32 Calculo de $M-\theta$ basado en $m-\phi$ Y L_p | 44 |
| FIGURA 2.33 Curva de Capacidad con modelo $\theta_H = \phi_H L_p$ y con Modelo de Momento Rotación directo | 45 |
| FIGURA 2.34 Modelo constitutivo bilineal utilizado para pushover cíclico y análisis dinámico no lineal..... | 46 |
| FIGURA 2.35 Sección tipo I y sección rectangular hueca..... | 48 |
| FIGURA 2.36 Sección tipo H..... | 48 |
| FIGURA 2.37 Descripción del modelo constitutivo utilizado..... | 49 |
| FIGURA 2.38 Curva Histerética $\Gamma - R$ | 50 |
| FIGURA 2.39 Edificio analizado para ejemplo con pushover cíclico | 51 |
| FIGURA 2.40 Resultado de programa <i>HisteresisMom_curv_BiS</i> en disipador de energía | 51 |
| FIGURA 3.1 Elemento en Sistema de coordenadas reducidas de elemento | 54 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 3.2 (a) Modelo Momento Curvatura Bilineal; (b) Componente Lineal y Elastoplástico..... | 57 |
| FIGURA 3.3 Miembro No Lineal..... | 57 |
| FIGURA 3.4 Modelo de Plasticidad Concentrada de Giberson..... | 59 |
| FIGURA 3.5 Combinación de columna elástica y resortes rotacionales | 60 |
| FIGURA 3.6 Modelo de viga de plasticidad extendida | 62 |
| FIGURA 3.7 Diagrama de masas elásticas | 62 |
| FIGURA 3.8 Diagrama de masas elásticas para programa | 64 |
| FIGURA 3.9 Elemento en coordenadas de sistema reducido | 66 |
| FIGURA 3.10 Elemento en coordenadas de sistema reducido | 71 |
| FIGURA 3.11 Resultados de Curvas de Capacidad..... | 72 |
| FIGURA 3.12 Curva Generalizada Fuerza – Deformación de componentes o elementos mostrando la resistencia residual, nueva propuesta..... | 72 |
| FIGURA 3.13 Elemento en Sistema de coordenadas reducidas de elemento | 74 |
| FIGURA 3.14 Variación de rigidez real en rótula plástica | 80 |
| FIGURA 3.15 Variación de rigidez de modelo bilineal en rótula plástica..... | 80 |
| FIGURA 4.1 Disipadores de energía ADAS y TADAS sobre contraviento Chevron | 82 |
| FIGURA 4.2 Disipadores TADAS sobre contraviento Chevron | 84 |
| FIGURA 4.3 Diagrama de deformación, momento, geometría de placa y distribución de curvatura, para un disipador TADAS..... | 85 |
| FIGURA 4.4 Diagrama de deformaciones en una sección $b(x)$ | 87 |
| FIGURA 4.5 Modelo de histéresis bilineal de un disipador ADAS o TADAS | 89 |
| FIGURA 4.6 Diagrama de esfuerzos en sección transversal de disipador..... | 91 |
| FIGURA 4.7 Relación fuerza deformación de un disipador TADAS | 94 |
| FIGURA 4.8 Diagrama de histéresis de un disipador TADAS..... | 100 |
| FIGURA 4.9 Energía elástica en un ciclo de histéresis | 102 |
| FIGURA 4.10 Modelos para el Contraviento-Disipador y sistema de coordenadas globales de los elementos | 104 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4.11 Modelo Fuerza Horizontal – Deformación Horizontal de un disipador | 105 |
| FIGURA 4.12 Modelo Fuerza Axial – Deformación Axial del modelo diagonal equivalente | 106 |
| FIGURA 4.13 Modelo diagonal – disipador como resortes en serie | 106 |
| FIGURA 4.14 Modelos para el estudio de las deformaciones | 109 |
| FIGURA 4.15 Cargas unitarias y elementos de la matriz de flexibilidad en sistema de coordenadas uno | 110 |
| FIGURA 4.16 Modelo de disipadores mediante método de dovelas | 115 |
| FIGURA 4.17 Estructura con disipadores de energía a ser analizada | 117 |
| FIGURA 4.18 Geometría de los disipadores empleados para la estructura de acero | 117 |
| FIGURA 4.19 Numeración de nudos, elementos y grados de libertad para Modelo 1 | 119 |
| FIGURA 4.20 Numeración de nudos, elementos y grados de libertad para Modelo 2A y 2B..... | 119 |
| FIGURA 4.21 Resultados de Curva de Capacidad con disipadores TADAS | 120 |
| FIGURA 4.22 Resultados de Curva de Capacidad con disipadores ADAS..... | 120 |
| FIGURA 5.1 Secciones tipo para elementos de acero | 123 |
| FIGURA 5.2 Secciones tipo para elementos de hormigón armado | 124 |
| FIGURA 5.3 Información del armado en vigas y columnas | 124 |
| FIGURA 5.4 Estructura modelada con diagonales equivalentes con TADAS | 133 |
| FIGURA 5.5 Estructura modelada con disipador TADAS como elemento independiente..... | 133 |
| FIGURA 5.6 Curva Fuerza – Deformación Axial | 134 |
| FIGURA 5.7 Curva Fuerza – Deformación axial, Curva Corte – Deformación en dirección de cortante y Curva Momento – Rotación, para modelos de Sap2000 y Etabs | 136 |
| FIGURA 5.8 Curva de capacidad sísmica resistente encontrada en estructura de acero con disipadores TADAS | 136 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5.9 Diagrama de flujo para curva de capacidad con pushover monotónico..... | 137 |
| FIGURA 5.10 Diagrama de flujo para curva de capacidad con pushover multimodal..... | 142 |
| FIGURA 5.11 Estructura de acero con disipadores de energía colocados sobre diagonales en forma de “V” invertida | 143 |
| FIGURA 5.12 Geometría de los disipadores de energía ADAS, a la izquierda y TADAS a la derecha | 144 |
| FIGURA 5.13 Curvas de Capacidad con modos de vibración de Estructura de Acero de 6 pisos con disipadores ADAS, con elemento disipador | 145 |
| FIGURA 5.14 Curvas de Capacidad Modal y Monotónica de Estructuras de Acero con disipadores ADAS, con contribución de cada modo de vibración | 146 |
| FIGURA 5.15 Curvas de Capacidad Modal y Monotónica de Estructuras de Acero con disipadores TADAS, con contribución de cada modo de vibración | 147 |
| FIGURA 5.16 Diagrama de flujo para curva de capacidad con pushover cíclico multimodal..... | 148 |
| FIGURA 5.17 Edificio irregular de acero, secciones A36 | 149 |
| FIGURA 5.18 Variación de cargas monotónicas | 149 |
| FIGURA 5.19 Comparación de curvas de capacidad..... | 150 |
| FIGURA 5.20 Variación de cargas en una dirección | 150 |
| FIGURA 5.21 Resultados de curva de capacidad | 151 |
| FIGURA 5.22 Variación de cargas en dos direcciones | 151 |
| FIGURA 5.23 Resultados de curva de capacidad | 152 |
| FIGURA 5.24 Variación de cargas en dos direcciones | 152 |
| FIGURA 5.25 Resultados de curva de capacidad | 153 |
| FIGURA 5.26 Variación de cargas en dos direcciones | 153 |
| FIGURA 5.27 Edificio regular de acero, secciones A36 | 154 |
| FIGURA 5.28 Resultados de curva de capacidad | 154 |
| FIGURA 5.29 Obtención del punto de desempeño con el espectro de capacidad y espectro de diseño..... | 156 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 5.30 Derecha: Energía Disipada, Izquierda: Energía de deformación | 157 |
| FIGURA 5.31 1er cuadrante de área para energía disipada | 157 |
| FIGURA 5.32 Espectro de capacidad linealizado..... | 160 |
| FIGURA 5.33 Derivas de piso | 161 |
| FIGURA 5.34 Resultados finales en pantalla: curva de capacidad, espectros de diseño, de capacidad Y punto de desempeño, y estructura dañada en punto de desempeño | 161 |
| FIGURA 5.35 Curva de capacidad linealizada | 162 |
| FIGURA 5.36 Derivas de piso | 163 |
| FIGURA 5.37 Carga lateral debido al momento de segundo orden | 166 |
| FIGURA 5.38 Diagrama de flujo de programa Efecto_PD | 168 |
| FIGURA 5.39 Curva de capacidad de estructura de 1 piso y 3 vanos | 170 |
| FIGURA 5.40 Curva de capacidad de estructura de 5 pisos y 3 vanos..... | 170 |
| FIGURA 5.41 Curva de capacidad de estructura de 10 pisos y 3 vanos..... | 171 |
| FIGURA 5.42 Curva de capacidad de estructura de 15 pisos y 3 vanos..... | 171 |
| FIGURA 5.43 Curva de capacidad de estructura de 20 pisos y 3 vanos..... | 172 |
| FIGURA 5.44 Curva de capacidad de estructura de 30 pisos y 3 vanos..... | 172 |
| FIGURA 5.45 Desplazamiento máximo en terraza vs. número de pisos para pórticos de 1 vano..... | 173 |
| FIGURA 5.46 Cortante basal máximo vs. número de pisos para pórticos de 1 vano | 174 |
| FIGURA 5.47 Deriva de piso en colapso vs. número de pisos para pórticos de 1 vano..... | 174 |
| FIGURA 5.48 Desplazamiento máximo en terraza vs. Número de Pisos para pórticos de 4 Vanos | 175 |
| FIGURA 5.49 Cortante basal máximo vs. número de pisos para pórticos de 4 vanos..... | 175 |
| FIGURA 5.50 Deriva de piso en colapso vs. número de pisos para pórticos de 4 vanos | 176 |
| FIGURA 6.1 Disipadores tadas y shear link | 178 |
| FIGURA 6.2 Arriba: edificio de 10 pisos con disipadores de energía. abajo: edificio de 6 pisos con contravientos sin | |

| | |
|--|-----|
| disipadores. Desde izquierda: Estado de daño con análisis dinámico no lineal, pushover cíclico modal pseudo-dinámico, y pushover modal pseudo-dinámico normal | 180 |
| FIGURA 6.3 Izquierda: acelerograma sismo de TAIWÁN 1192 Este con línea base corregida y escalado con PGA de espectro NEC15. Derecha: comparación de espectro de respuesta con NEC15..... | 181 |
| FIGURA 6.4 Izquierda: sismo sintético de espectro NEC15 con función de intensidad constante. (Con programa Acelsin) Derecha: espectro de respuesta de acelerograma sintético comparado con espectro de NEC15 | 182 |
| FIGURA 6.5 Izquierda: sismo sintético de espectro NEC15 con función de intensidad trapezoidal. (Con programa Acelsin) derecha: espectro de respuesta de acelerograma sintético comparado con espectro de NEC15 | 182 |
| FIGURA 6.6 Derecha: energía disipada, izquierda: energía de deformación | 183 |
| FIGURA 6.7 Edificios tipo 1) sin disipadores de energía de luces de 5m de 1 y 2 pisos | 184 |
| FIGURA 6.8 Edificios tipo 1) sin disipadores de energía de luces de 5m de 4, 6, 8 y 10 pisos | 185 |
| FIGURA 6.9 Edificios tipo 1) sin disipadores de energía de luces de 7m y 3m de 1 y 4 pisos | 185 |
| FIGURA 6.10 Edificios tipo 1) sin disipadores de energía de luces de 7m y 3m de 6 y 10 pisos | 185 |
| FIGURA 6.11 Edificios tipo 1) sin disipadores de energía de luces de 9m y 3m de 4 y 8 pisos | 186 |
| FIGURA 6.12 Edificios tipo 2) y 3) con y sin disipadores de energía respectivamente, de luces de 5m de 1, 2, 4, 6, 8 y 10 pisos..... | 186 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 6.13 Edificios tipo 2) y 3) con y sin disipadores de energía respectivamente, de luces de 7m y 3m de 1, 4, 6 y 10 pisos..... | 186 |
| FIGURA 6.14 Edificios tipo 2) y 3) con y sin disipadores de energía respectivamente, de luces de 9m y 3m de 4 y 8 pisos..... | 187 |
| FIGURA 6.15 Parámetros usados en cuadro de secciones | 187 |
| FIGURA 6.16 Curvas histeréticas cortante basal vs deformación en tope de la estructura | 191 |
| FIGURA 6.17 Desde izquierda: estructura con disipadores con análisis dinámico no lineal con acelerograma sintético de nec15; siguiente, con acelerograma sintético duplicándolo luego de reposo de estructura, misma estructura analizada con pushover cíclico | 193 |
| FIGURA 6.18 Curvas histeréticas aceleración vs desplazamiento de la estructura en sistema de un grado de libertad con espectro de diseño original y reducido..... | 194 |
| FIGURA 6.19 Máximo desplazamiento de tope de edificio durante el punto de desempeño | 196 |
| FIGURA 6.20 Máximas derivas de pisos de edificio durante el punto de desempeño | 196 |
| FIGURA 6.21 Máximo amortiguamiento dado por los disipadores de energía, no necesariamente durante el punto de desempeño | 197 |
| FIGURA 6.22 Estado de daño de edificio durante el punto de desempeño | 197 |
| FIGURA 6.23 Tendencia de peso de disipadores con relación al peso de todo el pórtico analizado según el periodo del pórtico | 198 |
| FIGURA 6.24 Tendencia de peso de disipadores con relación al peso de todo el pórtico analizado según el número de pisos del pórtico | 199 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 6.25 | Peso total del pórtico con disipadores y sin disipadores con reducción de sismo $r=8$ | 200 |
| FIGURA 6.26 | Disposición de disipadores en SISSORS-JACK | 202 |
| FIGURA 6.27 | Modelos de alternativas, estructuras dañadas durante el momento del punto de desempeño | 203 |
| FIGURA 6.28 | Resultados de diferentes modelos..... | 205 |
| FIGURA 6.29 | Curvas histeréticas de edificios . alternativa 1=magenta, 2=azul, 3=amarillo, 4=café oscuro, 5=naranja, 6=cyan, 7= café claro, 8=dorado, 9=verde agua, 10=gris, 11=violeta, 12=verde oscuro, 13=rojo | 208 |

RESUMEN

En este trabajo se describe el proceso de cálculo para un análisis no lineal de pushover cíclico modal pseudo-dinámico, partiendo del análisis de curvas momento curvatura y momento rotación, matrices de rigidez de elementos con secciones dañadas, y del análisis de métodos pushover básicos. Todo esto se lo hace con programas en lenguaje M en la plataforma de Matlab.

Luego, para edificios con amortiguamiento suplementario se analizan los elementos disipadores de energía por métodos aproximados usuales y otros métodos más exactos.

Finalmente con estos programas se hace un estudio de varias configuraciones de edificios de 1 a 10 pisos para lograr obtener una idea clara del beneficio y desventajas que pueden presentar edificios con disipadores de energía.

ABSTRACT

In this work the calculation process for a nonlinear pseudo-dynamic modal cyclic pushover analysis is described, starting from the moment curvature and moment rotation curves analysis, stiffness matrices of elements with damaged sections, and basic pushover analysis methods. All this is done in M language programs in Matlab platform.

Later, for buildings with supplemental damping, the energy dissipation devices are analyzed by usual approximated methods and more accurate methods.

Finally with these programs a study of various configurations of buildings from 1 to 10 stories tall is made in order to obtain a clear picture of the advantages and disadvantages of buildings with energy dissipation devices.

PRESENTACIÓN

Muchas ciudades cercanas al cinturón de fuego del Pacífico como lo es Quito, están bajo un alto peligro sísmico (Khamis, 2013). Una manera de disminuir el riesgo ante este peligro es hacer análisis de edificios usando análisis no lineales, puesto que se puede conocer de una manera más exacta el daño y la capacidad que tendrán los edificios ante sismos esperados; y segundo, es mejorar el desempeño de edificios al usar amortiguamiento suplementario o aislación sísmica en las estructuras.

Una manera relativamente simple de aumentar el amortiguamiento de las estructuras es implementar disipadores de energía metálicos, los cuales idealmente concentrarán todo el daño de la estructura en estos pequeños dispositivos reemplazables; por la fluencia de estos reducirá la aceleración de respuesta del edificio y así disminuirá el riesgo sísmico de la estructura, Chistopoulous and Filiatrault (2006).

Los disipadores de energía mejorarán el desempeño de una estructura aunque no fallen todos antes que vigas o columnas; pero, si se necesita asegurar que estos dispositivos fluyan antes que otros elementos estructurales principales, se necesita analizarlos con métodos no lineales, en este trabajo se usó el Método del Espectro de Capacidad, obteniendo la curva de capacidad de pórticos considerando los modos de vibración superiores y la reversibilidad de las cargas laterales sísmicas a través de un pushover cíclico modal.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DE UTILIZAR DISIPADORES DE ENERGÍA Y ANÁLISIS NO LINEALES

Latinoamérica al encontrarse en una ubicación geográfica de confluencia de las placas tectónicas de América del Sur, de Nazca, y del Caribe, es una zona en la que se reporta el 80% de la actividad sísmica y volcánica de todo el mundo, Khamis (2013). Quito – Ecuador, al igual que muchos lugares en estas zonas, es una ciudad fundada sobre varias fallas ciegas producto de la subducción de las placas tectónicas. En Quito se esperan sismos de Magnitud de Momentos M_w mayores a 6 y por la cercanía del epicentro se puede esperar una gran afectación a las estructuras.

Se justifica entonces la necesidad de utilizar tecnologías diferentes para mejorar el desempeño de una estructura ante sismos, como lo son los disipadores de energía y en general de realizar tipos de análisis de edificios más reales, por esto la necesidad de usar análisis de estructuras no lineales. El análisis que tiende un poco más a la realidad es el análisis dinámico no lineal de historia en el tiempo, en este trabajo se utiliza un método simplificado de este, menos retardatorio y acorde para la utilización de espectros de diseño dados por los códigos locales, el Método del Espectro de Capacidad. En este trabajo se realizaron varios programas en lenguaje M en la plataforma de Matlab para realizar este tipo de análisis y se encontró maneras de modelar disipadores de energía.

Se usó el sismo esperado en la ciudad de Quito para obtener conclusiones sobre los disipadores de energía, pero los resultados obtenidos pueden ser utilizados de manera general.

1.2 GENERALIDADES SOBRE ANÁLISIS PUSHOVER TRADICIONAL

Existen varios procesos de análisis estructural para evaluación de construcciones como el estático o dinámico elástico y procesos usando análisis inelásticos.

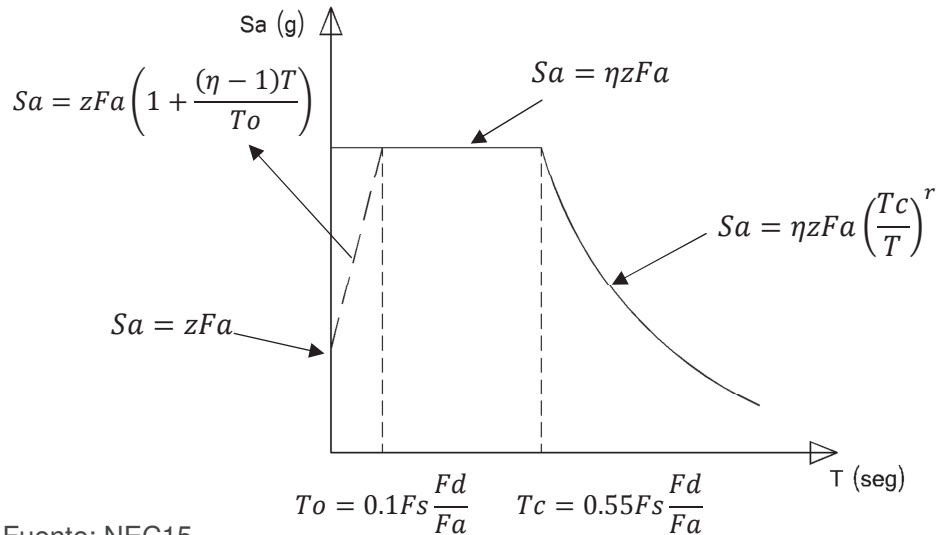
El más básico análisis inelástico es el análisis no lineal completo de historia en el tiempo, el cual es algunas veces considerado complejo e impráctico para uso general. Un análisis simplificado es el proceso de análisis estático no lineal, este incluye el método de espectro de capacidad (o Pushover) que usa la intersección de la curva de capacidad y un espectro reducido de respuesta para estimar el desempeño de la estructura (ATC-40, 1996).

El método del espectro de capacidad requiere de tres elementos primarios: capacidad, demanda (desplazamiento) y desempeño.

1.2.1 DEMANDA

Es el movimiento del suelo durante un sismo. Para el método no lineal es fácil y más directo usar un set de desplazamientos laterales como una condición de diseño. Para una estructura dada y movimiento del suelo, la demanda de desplazamiento es un estimado de la respuesta máxima esperada de una estructura durante el movimiento del suelo. De los códigos se obtiene el espectro de diseño, el cual relaciona la aceleración de respuesta de la estructura, y el periodo fundamental de la estructura ver figura 1.1.

FIGURA 1.1 ESPECTRO DE DISEÑO DADO POR LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC15



Fuente: NEC15

En la figura 1.1 se muestra el espectro de diseño dado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC15, donde z es el factor de zona sísmica, η es la razón entre la aceleración espectral $Sa(T = 0.1 \text{ s})$ y el PGA para el período de retorno seleccionado, r es el factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto; y, F_a , F_d y F_s son coeficientes de amplificación de suelo.

1.2.2 CAPACIDAD

La capacidad completa de una estructura depende de la resistencia de esfuerzos y deformación de cada componente estructural.

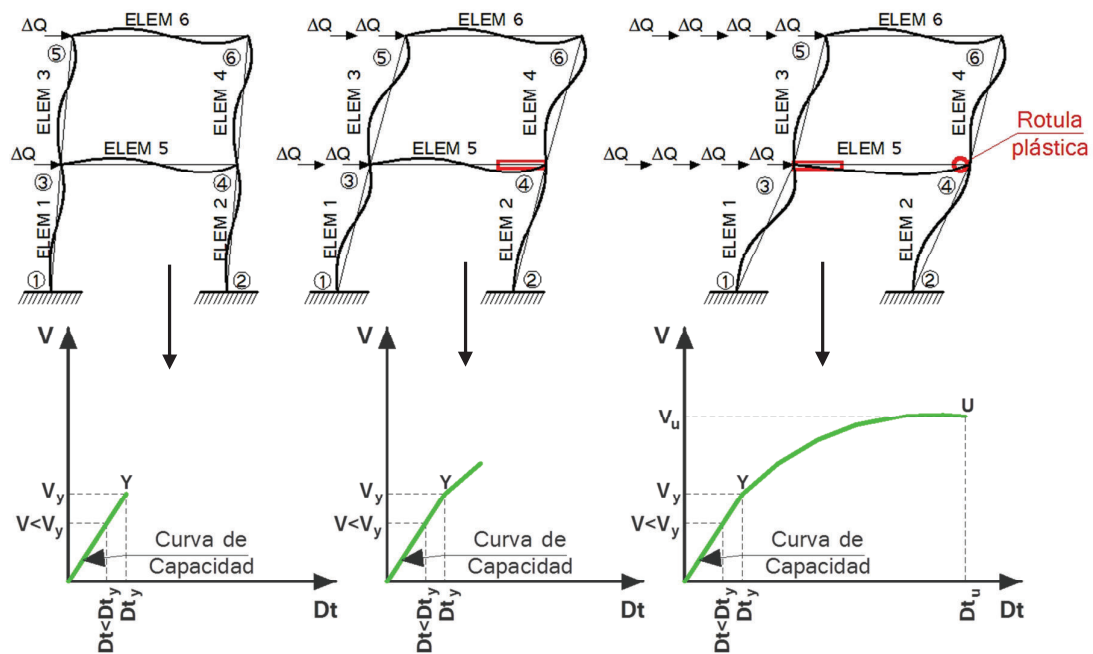
La curva de capacidad de una estructura es representada por una curva pushover. La manera más conveniente de graficar la curva pushover o fuerza – desplazamiento, es con el cortante basal y el desplazamiento de la terraza.

Este proceso usa una serie de análisis secuenciales elásticos. El modelo

matemático de la estructura es modificado para tomar en cuenta la reducción de resistencia en componentes que han fluido. Una distribución de cargas laterales es aplicada hasta que componentes adicionales fluyan.

El proceso es repetido hasta un límite predeterminado. La curva de capacidad pushover aproxima como las estructuras se comportan después de exceder su límite elástico.

FIGURA 1.2 ARRIBA: MODELO DE EDIFICIOS DEFORMADOS POR CARGAS LATERALES. ABAJO: CURVAS DE CAPACIDAD FORMADAS CORRESPONDIENTES A EDIFICIOS DEFORMADOS



Fuente: Realizado por E. David Mora

1.2.2.1 Proceso para determinar la curva de capacidad

Para lograr severas iteraciones de análisis estáticos y definir la curva de capacidad se debe usar un proceso computacional.

Proceso:

- i) Se define la geometría de la estructura, las secciones de cada elemento y los grados de libertad de cada nudo.
- ii) Se calculan las acciones actuantes resultado de cargas gravitacionales.

Luego estas se acumulan a las acciones resultantes de cargas laterales.

- iii) Se carga a la estructura con relativamente pequeñas fuerzas laterales, se hará un análisis estático en cada iteración acumulando las acciones resultantes para la siguiente iteración. Las secciones eventualmente fluirán cambiando la rigidez de estas ($E * I$, (Módulo de Young por la Inercia de la sección)) en el análisis. La magnitud de la rigidez se la obtiene de la relación Momento Curvatura que se hablará en el siguiente capítulo.

$$E * I = \frac{M}{\phi} \quad (1.1)$$

Dónde:

E =Modulo de Young

ϕ =Curvatura

I =Inercia de sección analizada

M =Momento resistente

La manera aquí utilizada para calcular las acciones es mediante el método de análisis estructural de rigideces usando matrices de rigidez y de transformación para sistemas reducidos, locales y generalizados de cada sección, usando ensambles de acuerdo a los grados de libertad de cada elemento para obtener la matriz de rigidez de toda la estructura, posteriormente se encuentran las deformaciones de cada grado de libertad y las acciones resultantes.

iv) Luego de varios ciclos de cargas laterales pequeñas, acumulando fuerzas resultantes, eventualmente varias secciones perderán capacidad de resistir momentos, a esto se lo conoce como rótula plástica. Como se señaló anteriormente el análisis estructural se lo realiza usando matrices de rigideces y de transformación, el problema que surge en la formación de una rótula plástica es que la matriz de rigidez de la estructura se vuelve singular, y al calcular los desplazamientos y giros de cada grado de libertad se necesita conocer la inversa de la matriz de rigidez lo cual no es posible.

$$q = K \setminus Q \quad (1.2)$$

Dónde:

K =Matriz de rigidez de la estructura

Q =Vector de cargas en grados de libertad

q = Desplazamiento o giros de grados de libertad

Se puede solucionar este problema creando nuevas matrices de rigidez de elementos y de transformación para diferentes sistemas de casos de formación de rótulas plásticas, tema que se verá en el capítulo 3 de este trabajo.

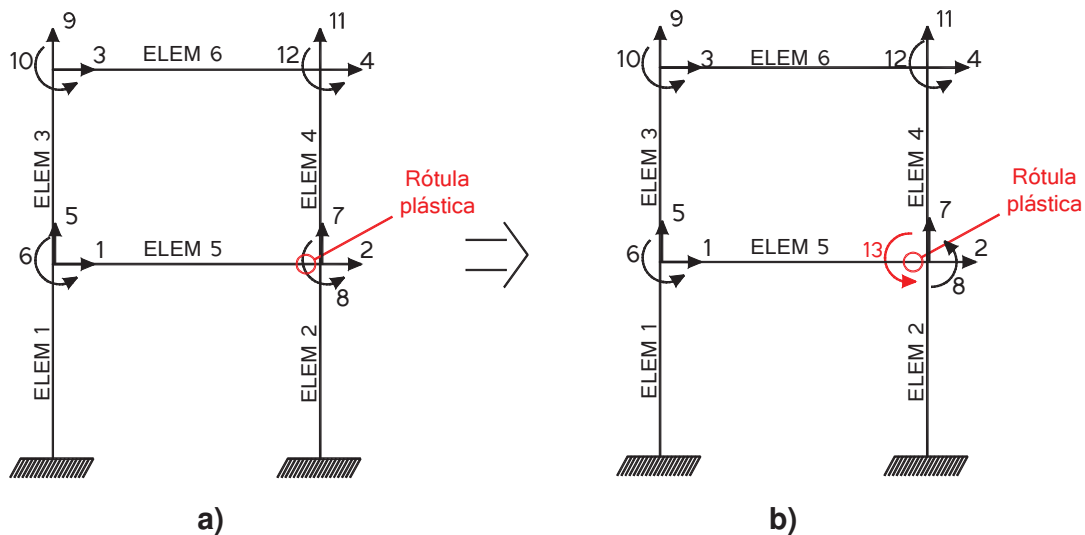
Otra alternativa que no se usó en este trabajo pero se usó para comprobación es la siguiente, al formarse una rótula plástica se aumenta un grado de libertad en ese giro. Se da un ejemplo en un pórtico muy simple, en la figura 1.3a se observa una estructura de dos pisos con sus grados de libertad enumerados, su matriz de colocación VC es:

$$VC = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 7 & 8 \\ 1 & 5 & 6 & 3 & 9 & 10 \\ 2 & 7 & 8 & 4 & 11 & 12 \\ 1 & 5 & 6 & 2 & 7 & 8 \\ 3 & 9 & 10 & 4 & 11 & 12 \end{bmatrix}$$

Dónde:

VC = Matriz de colocación que contiene grados de libertad de cada elemento, cada fila representa un elemento, cero indica restricción. Las tres primeras columnas son los grados de libertad en el nudo inicial y las tres columnas finales son los grados de libertad en el nudo final de cada elemento.

FIGURA 1.3 EJEMPLO DE COLOCACIÓN DE GRADOS DE LIBERTAD EN PÓRTICO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

En la figura 1.3b se tiene la misma estructura pero con una rótula plástica en el elemento 5 en su nudo derecho, en el programa computacional se coloca una condición para que cuando esto ocurra se sume un grado de libertad extra y se sobreponga en donde corresponda, en este caso en $VC_{(5,6)}$, resultando:

$$VC = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 7 & 8 \\ 1 & 5 & 6 & 3 & 9 & 10 \\ 2 & 7 & 8 & 4 & 11 & 12 \\ 1 & 5 & 6 & 2 & 7 & \mathbf{13} \\ 3 & 9 & 10 & 4 & 11 & 12 \end{bmatrix}$$

- v) Las iteraciones se detendrán solo cuando la estructura colapse. El criterio de colapso puede ser de derivas de piso mayor o igual al 2% (ASCE 7 (2010), NEC (2015)), o teniendo una deriva global suficiente para poder obtener

resultados en el punto de desempeño generalmente colocando un límite del 4%, la deriva global está en función de la altura total del edificio.

También el programa se detendrá si la matriz de rigidez de la estructura es singular, ya que esto indica que la estructura es inestable, esta situación ocurre con la aparición de varias rótulas plásticas.

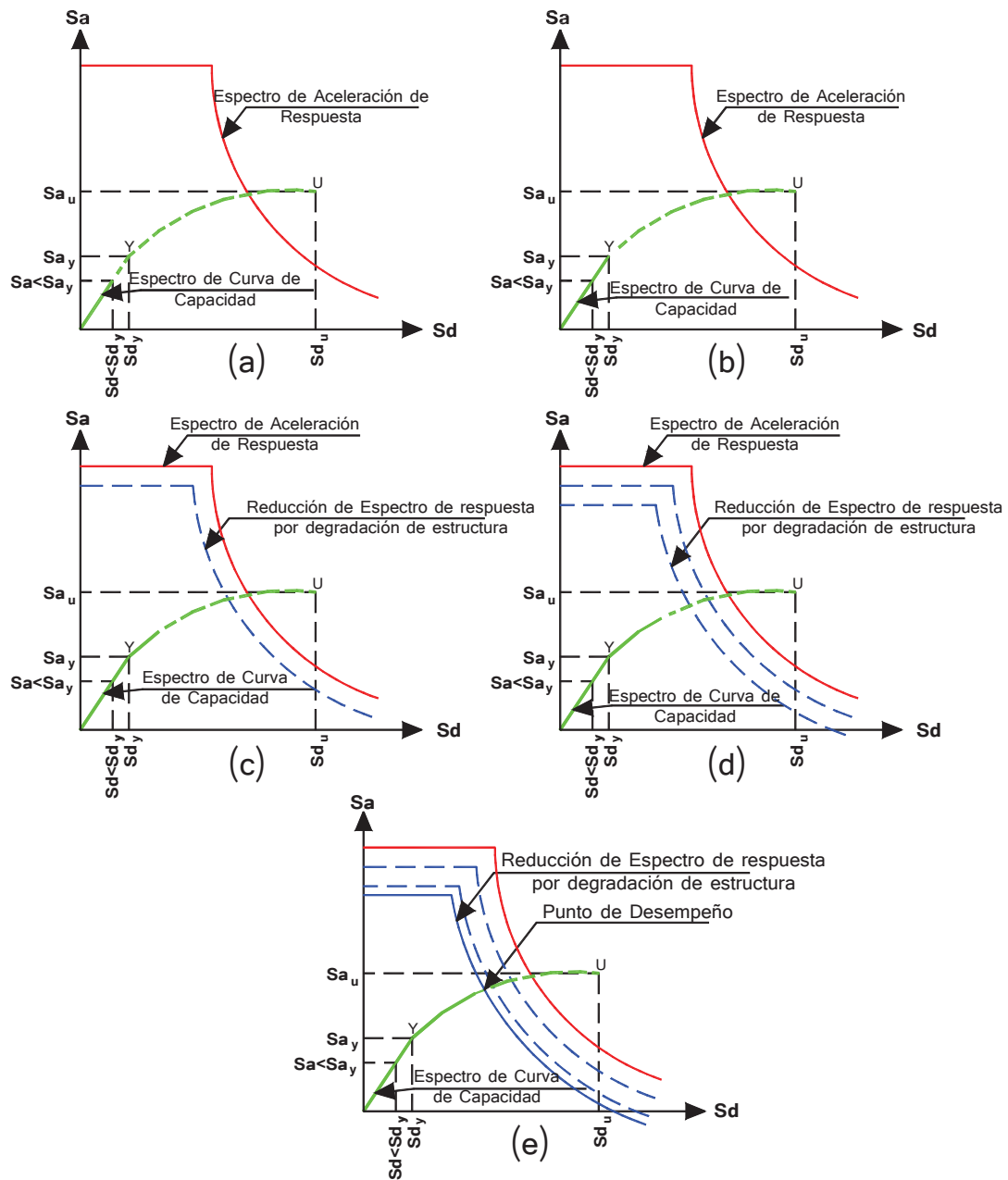
1.2.3 DESEMPEÑO

Una vez que se ha definido la curva de capacidad y de demanda se debe chequear el desempeño, ASCE 41 (2013). Un chequeo de desempeño verifica que los componentes estructurales y no estructurales no sean dañados más allá de los límites aceptables.

El punto de desempeño representa el máximo desplazamiento probable que se experimenta en el sismo de diseño. Dado que el modelo matemático toma en cuenta directamente efectos inelásticos de la respuesta del material. Las fuerzas internas calculadas son aproximaciones razonables esperadas durante el sismo de diseño.

A continuación se presenta un gráfico donde se puede observar el proceso de obtención del punto de desempeño. Se debe colocar la curva de capacidad en el mismo sistema que el espectro de diseño, es decir en un sistema de un grado de libertad, que se hablará en el quinto capítulo. Al fluir o dañarse secciones de una estructura, la curva verde (Curva de espectro de capacidad) luego del punto Y, aumenta el amortiguamiento de esta, lo que hará que disminuya la aceleración de respuesta ante un sismo, por esto se ve disminuir la curva roja en la azul, hasta que la curva verde y azul se encuentran en un punto, y a este se lo llama punto de desempeño. Se detalla más sobre este tema en el capítulo 5.

FIGURA 1.4 OBTENCIÓN DEL PUNTO DE DESEMPEÑO CON EL ESPECTRO DE CAPACIDAD Y ESPECTRO DE DISEÑO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

CAPÍTULO 2

DIAGRAMAS MOMENTO CURVATURA Y MOMENTO ROTACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

Es necesario conocer el diagrama momento curvatura de cada sección, para conocer el comportamiento de éstas secciones ante esfuerzos resultantes de solicitaciones a las que será sometida la estructura durante su vida. Esto se logrará por conocer el producto $E \cdot I$ (Módulo de Young por la Inercia de la sección) desde la curva momento-curvatura, y posteriormente la matriz de rigidez de la sección que estará en función de este producto.

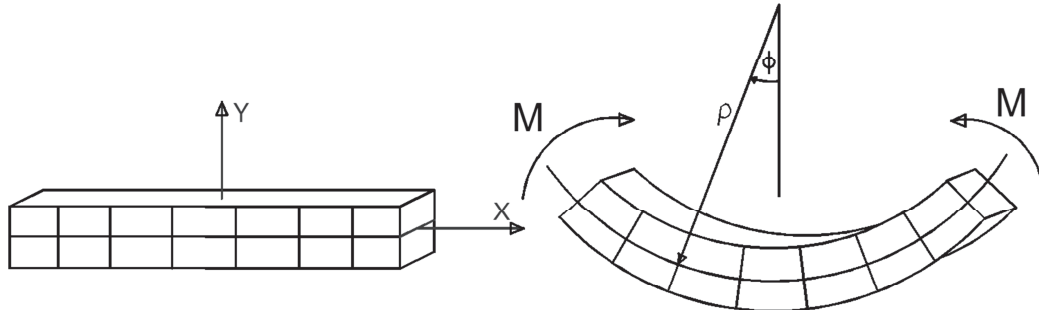
Con este diagrama podemos conocer la ductilidad de una sección, es decir su potencial de incursionar en un rango no lineal antes de llegar a su colapso, suponiendo que el fallo sea causado por flexión y no por otro tipo de esfuerzo como por cortante. Los códigos sismorresistentes guían a un tipo de fallo por flexión.

Si se conoce el comportamiento de una sección en los sitios de mayores esfuerzos de un elemento, como en los extremos de este, se podrá conocer la secuencia de fallo de toda la estructura.

Finalmente debemos conocer cómo se relacionan los diagramas momento-curvatura y momento-rotación, pues experimentalmente es más fácil obtener este último diagrama, y los códigos presentan una relación momento-rotación.

2.2 DEDUCCIÓN DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA

FIGURA 2.1 HIPÓTESIS DE NAVIER-BERNOULLI



Fuente: Web.MIT.edu, Moment – Curvature, Beam Review.

Para relacionar los esfuerzos y las deformaciones se parte de la hipótesis de Navier-Bernoulli, el principio supone que dos secciones planas y paralelas siguen siendo planas aunque no paralelas a lo largo del proceso de deformación, incluso en la región plástica.

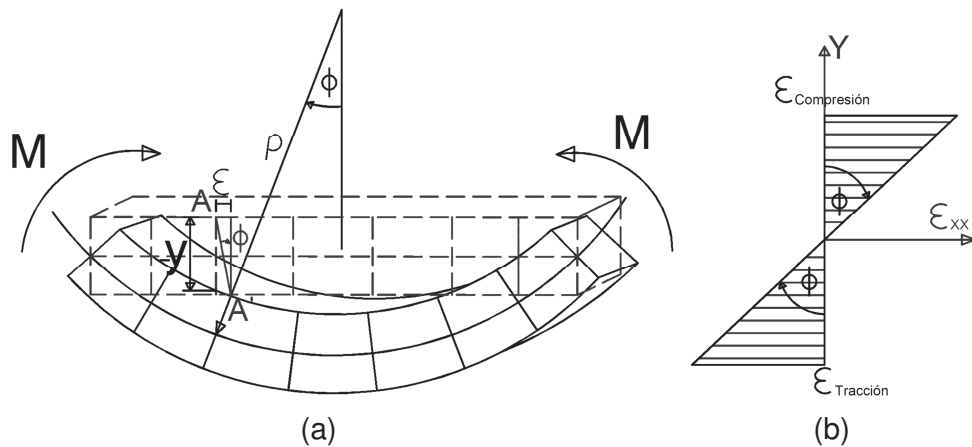
En la figura 2.1 se aprecia la deformación de una viga por flexión con sus secciones cumpliendo la hipótesis de Navier-Bernoulli. Como resultante de esta deformación se tendrán momentos M que actuarán en cada sección y un radio de curvatura ρ con su respectiva curvatura Φ . Suponiendo deformaciones muy pequeñas se puede relacionar:

$$\Phi = 1/\rho \quad (2.1)$$

En la figura 2.2 se puede observar cómo se desplaza el punto A hacia A' una distancia y en una viga deformada por flexión, la deformación de la fibra extrema será ϵ y el ángulo que se forma será la curvatura Φ , entonces se puede obtener:

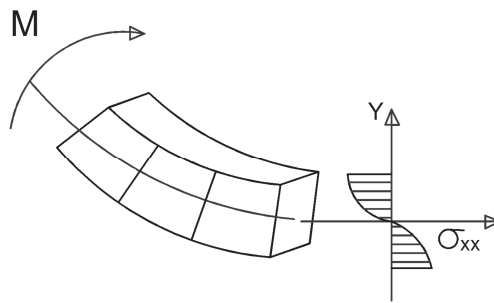
$$\epsilon_{xx} = -y * \Phi \quad (2.2)$$

FIGURA 2.2 HIPÓTESIS DE NAVIER-BERNOULLI – DEFORMACIONES EN SECCIONES



Fuente: Realizado por E. David Mora

FIGURA 2.3 HIPÓTESIS DE NAVIER-BERNOULLI – ESFUERZOS EN SECCIONES

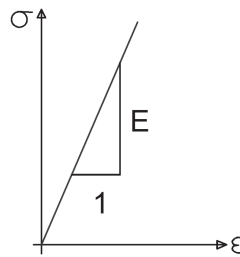


Fuente: Web.MIT.edu, Moment – Curvature, Beam Review

Como cada fibra transversal está comprimiéndose o traccionándose, de acuerdo a su capacidad elástica se relacionaran con esfuerzos como se indica en la figura 2.3. Esta relación entre esfuerzo y deformación la nombramos Módulo de Elasticidad con la letra E, ver figura 2.4.

$$\sigma_{xx} = E * \epsilon_{xx} \quad (2.3)$$

FIGURA 2.4 RELACIÓN ESFUERZO DEFORMACIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora

Sabiendo que debe existir un equilibrio podemos obtener momentos multiplicando la fuerza en cada fibra $\sigma_{xx} * dA$ por un brazo de palanca y , dando como resultado:

$$M = \int_A -\sigma_{xx} * y * dA \quad (2.4)$$

Reemplazando la Ec. (2.2) en Ec. (2.3):

$$\sigma_{xx} = -E * y * \Phi \quad (2.5)$$

Reemplazando la Ec. (2.5) en Ec. (2.4):

$$M = E * \Phi * \int_A y^2 * dA \quad (2.6)$$

Si el momento de inercia es $I = \int_A y^2 * dA$, entonces:

$$M = E * \Phi * I \rightarrow \Phi = M/EI \quad (2.7)$$

2.3 UTILIZACIÓN E IMPORTANCIA DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA

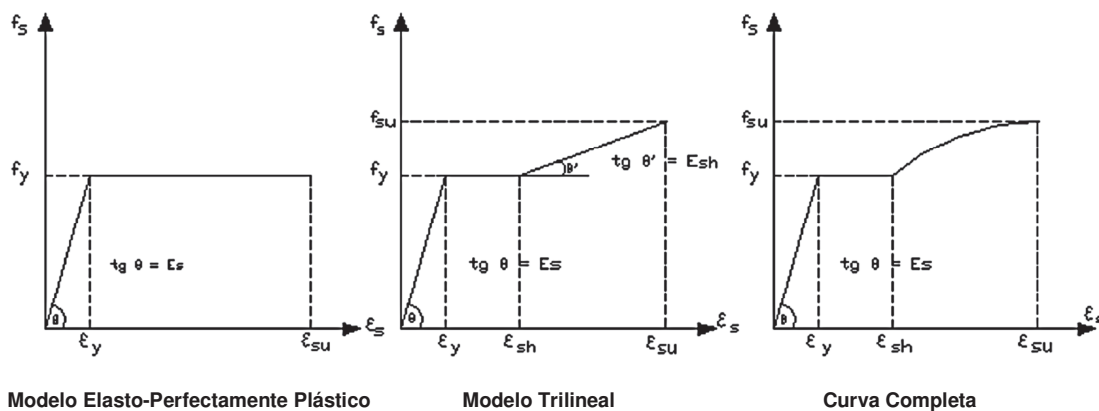
En un análisis de comportamiento más real de una estructura, no se tiene una relación de esfuerzo deformación ($\sigma_{xx} = E * \epsilon_{xx}$) lineal durante toda esta interacción hasta el fallo del material, además dependiendo de la fisuración del material y cambio del eje neutro debido a la fuerza axial aplicada combinada con momentos cambiará el momento de inercia I . Es por esto que en un análisis no lineal como el Método del espectro de capacidad o un análisis no lineal de Historia en el tiempo se necesita conocer en cada pequeño intervalo de análisis el valor de $E * I$.

Una vez conocido $E * I$ se afectará la matriz de rigidez o de flexibilidad de la estructura dependiendo del tipo de análisis realizado, redistribuyendo esfuerzos a otros elementos, cambiando así en cada ciclo de análisis la rigidez del elemento $E * I$.

2.4 COMPORTAMIENTO DEL ACERO ESTRUCTURAL - ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

En el diseño y construcción de estructuras como edificios y puentes se trabaja con materiales de comportamiento químico y mecánico predecibles, limitado por normas locales, tanto en composición como en resultado. El acero estructural tendrá límites de: fluencia, máximo esfuerzo y rotura dependiendo de cada composición, se puede trabajar con distintos tipos de modelos simples y complejos.

FIGURA 2.5 MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL ACERO

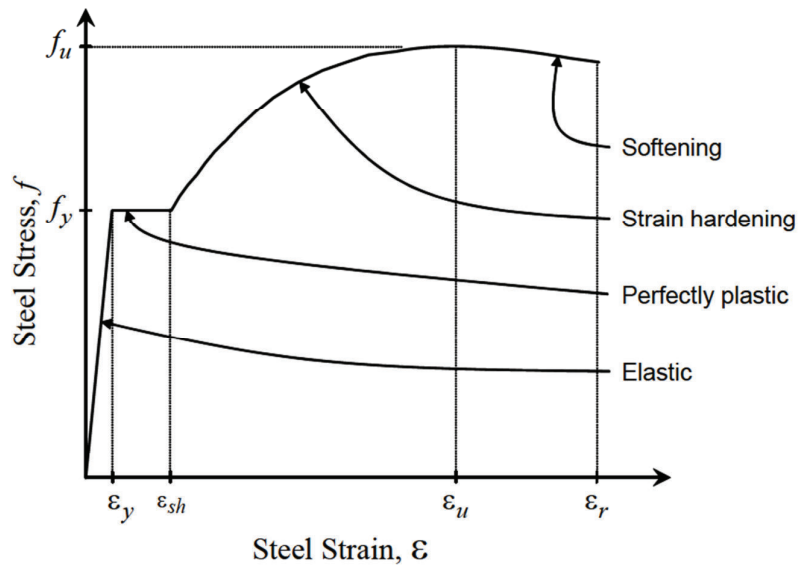


Fuente: Aguiar Roberto, (2003).

El modelo más utilizado por su simplicidad y poco esfuerzo de cálculo es el modelo Elasto-Perfectamente Plástico.

Un modelo muy completo y utilizado por programas de CSI Berkeley para gráficas del diagrama momento curvatura, es el de Holzer de 1975.

FIGURA 2.6 ZONAS DE CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL ACERO



Fuente: Holzer et al. (1975).

Los siguientes parámetros definen el modelo de Esfuerzo Deformación del acero:

- ϵ = Deformación unitaria del acero.
- f = Esfuerzo del acero.
- E = Módulo de elasticidad.
- f_y = Esfuerzo de fluencia del acero.
- f_u = Máximo esfuerzo del acero.
- ϵ_{sh} = Deformación unitaria en comienzo de zona de endurecimiento.
- ϵ_u = Deformación unitaria correspondiente al máximo esfuerzo del acero.
- ϵ_r = Deformación unitaria en la rotura del acero.
- $\epsilon_y = f_y/E$.

Para la zona elástica ($\epsilon \leq \epsilon_y$).

$$f = E * \epsilon \quad (2.8)$$

Para la zona perfectamente plástica ($\epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon_{sh}$).

$$f = f_y \quad (2.9)$$

Para la zona de endurecimiento y decaimiento ($\epsilon_{sh} < \epsilon \leq \epsilon_r$).

$$f = fy \left(1 + r \left(\frac{fu}{fy} - 1 \right) e^{(1-r)} \right) \quad (2.10)$$

Donde,

$$r = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \quad (2.11)$$

Todos estos parámetros se los puede conocer a través normas locales que delimitan a estos, por ejemplo, la mayoría de edificios son diseñados con acero ASTM A36, entonces de la norma **ASTM A36** (Tabla 2.1) podemos conseguir:

$f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$; $f_u = 4080 \text{ kg/cm}^2$; $\varepsilon_r = 20\%$

TABLA 2.1 TABLA NUMERO 3 DE LA NORMA ASTM A36. REQUERIMIENTOS DE TENSION

TABLE 3 Tensile Requirements^A

| | |
|--|-----------------------|
| Plates, Shapes, ^B and Bars: | |
| Tensile strength, ksi [MPa] | 58–80 [400–550] |
| Yield point, min, ksi [MPa] | 36 [250] ^C |
| Plates and Bars ^{D,E} : | |
| Elongation in 8 in. [200 mm], min, % | 20 |
| Elongation in 2 in. [50 mm], min, % | 23 |
| Shapes: | |
| Elongation in 8 in. [200 mm], min, % | 20 |
| Elongation in 2 in. [50 mm], min, % | 21 ^B |

^ASee the Orientation subsection in the Tension Tests section of Specification A 6/A 6M.

^BFor wide flange shapes with flange thickness over 3 in. [75 mm], the 80 ksi [550 MPa] maximum tensile strength does not apply and a minimum elongation in 2 in. [50 mm] of 19 % applies.

^CYield point 32 ksi [220 MPa] for plates over 8 in. [200 mm] in thickness.

^DElongation not required to be determined for floor plate.

^EFor plates wider than 24 in. [600 mm], the elongation requirement is reduced two percentage points. See the Elongation Requirement Adjustments subsection under the Tension Tests section of Specification A 6/A 6M.

Fuente: Norma ASTM A36

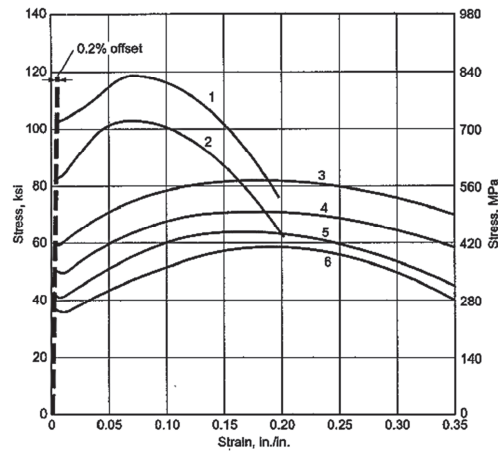
Del código AISC 360-10 se puede obtener el módulo de elasticidad:

$E = 2043000 \text{ kg/cm}^2$

Entonces, $\varepsilon_y = f_y/E = 0.0012 = 0.12\%$

ε_{sh} y ε_u se los puede obtener de ensayos en acero A 36, datos que se los pueden comparar con bibliografías como del ASM (International – The Materials Information Society el libro Atlas of Stress – Strain Curves). De aquí se tiene:

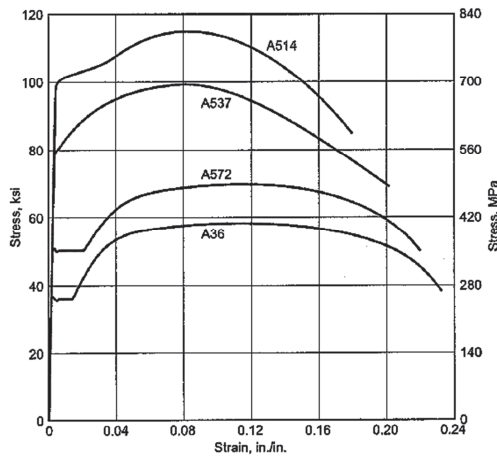
FIGURA 2.7 CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA ACERO A36



HS.001 Various HSLA and A36 steel high-strength low-alloy (HSLA) steel, stress-strain curves

Comparison of stress strain curves for alloys with specified minimum values. Curve 1: T-1, T-1 type A, T-1 type B; minimum yield strength (MYS) = 689 MPa (100 ksi). Curve 2: CON-PAC; MYS = 551 MPa (80 ksi). Curve 3: EX-TEN 60; MYS = 413 MPa (60 ksi). Curve 4: COR-TEN, TRI-TEN, EX-TEN 50; MYS = 345 MPa (50 ksi). Curve 5: EX-TEN 42; MYS = 289 MPa (42 ksi). Curve 6: ASTM A36; MYS = 248 MPa (36 ksi). Modulus of elasticity = 200 GPa (29×10^6 psi)

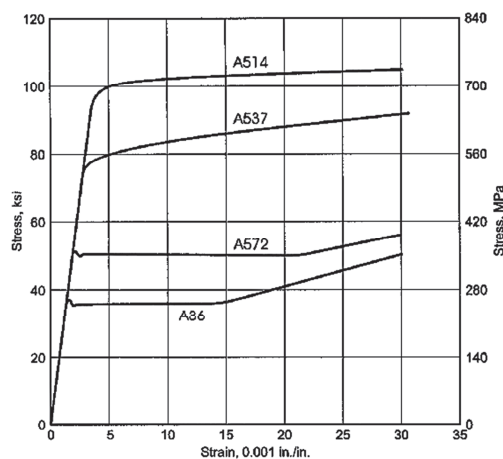
Source: "High-Strength Low-Alloy Steels," U.S. Steel, Oct 1971. As published in *Structural Alloys Handbook*, Vol 1, Battelle Columbus Laboratories, 1980, p 3



HS.007 Various high-strength structural steels, typical stress-strain curves (full range)

Comparison of structural steels with specified minimum tensile properties. Typical yield strengths: A36 carbon steel, 248 MPa (36 ksi); A572 HSLA (grade 50), 345 MPa (50 ksi); A537, 276–414 MPa (40–60 ksi) (depends on class and thickness); A514, 620 or 689 MPa (90 or 100 ksi) (depends on thickness)

Source: R.L. Brockenbrough and B.G. Johnston, *USS Steel Design Manual*, Jan 1981. As published in *Structural Alloys Handbook*, Vol 3, CINDAS/Purdue University, 1994, p 5



HS.008 Various high-strength structural steels, typical initial stress-strain curves

Comparison of structural steels with specified minimum tensile properties. Typical yield strengths: A36 carbon steel, 248 MPa (36 ksi); A572 HSLA (grade 50), 345 MPa (50 ksi); A537, 276–414 MPa (40–60 ksi) (depends on class and thickness); A514, 620 or 689 MPa (90 or 100 ksi) (depends on thickness)

Source: R.L. Brockenbrough and B.G. Johnston, *USS Steel Design Manual*, Jan 1981. As published in *Structural Alloys Handbook*, Vol 3, CINDAS/Purdue University, 1994, p 5

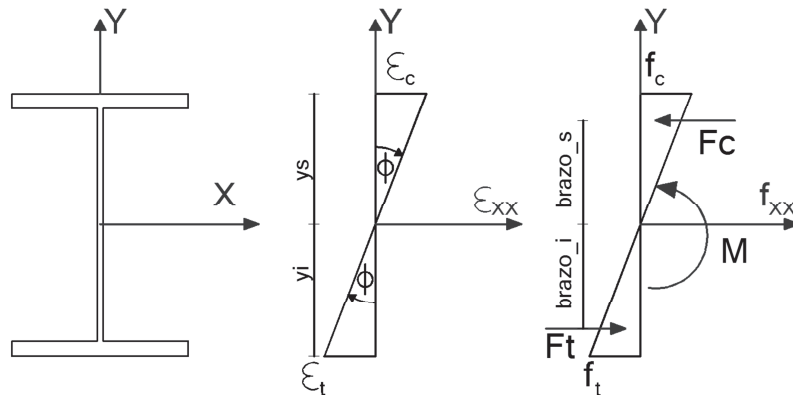
Fuente: Atlas of Stress – Strain Curves, 2002, pág, 129, 132 y 133.

De la figura 2.7 se tomó: $\epsilon_{sh} = 2\%$; $\epsilon_u = 14\%$

2.5 PROCESO DE CÁLCULO DEL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA DE PERFILES DE ACERO PARA UN MODELO DE CURVA COMPLETA

Se muestra el proceso programado en *Diagr_Momento_Curvatura_AceroV*:

FIGURA 2.8 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA



Fuente: Realizado por E. David Mora

$$M = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i \quad (2.12)$$

$$\therefore M = \int_A f * y * dA = \int_A f * y^2 / y * dA \quad (2.13)$$

Si el momento de inercia es $I_x = \int_A y^2 * dA$, entonces: $M = \frac{f_c * I_x}{y_s} = \frac{f_t * I_x}{y_i}$

Si f es el mayor esfuerzo entre f_c y f_t , "y" es el mayor entre y_i y y_s , y el Momento Estático es $S_x = I_x / y$, entonces:

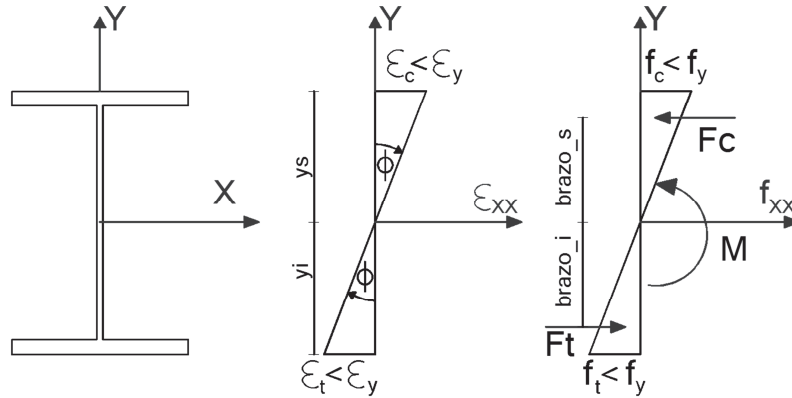
$$M = S_x * f \quad (2.14)$$

La curvatura será:

$$\Phi = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_c}{y_s/2} \quad (2.15)$$

Ejemplo para esfuerzo $f_c < f_y$:

FIGURA 2.9 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f < f_y$



Fuente: Realizado por E. David Mora

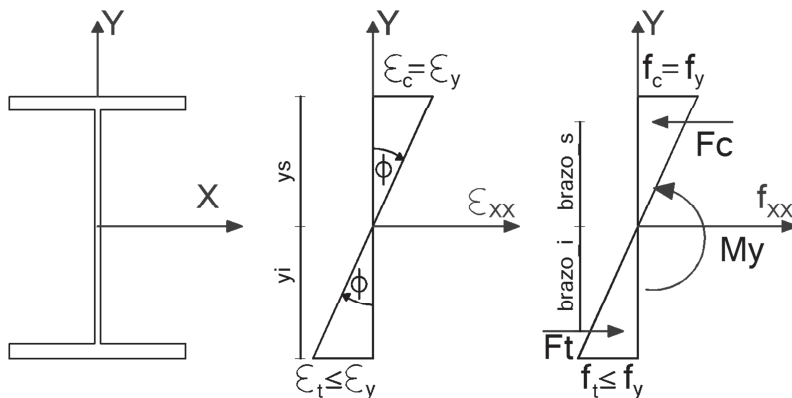
$$M = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i \quad (2.16)$$

$$M = S_x * f \quad (2.17)$$

$$\Phi = \frac{\varepsilon_t}{y_i/2} = \frac{\varepsilon_c}{y_s/2} \quad (2.18)$$

Ejemplo para esfuerzo $f_c = f_y$:

FIGURA 2.10 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f = f_y$



Fuente: Realizado por E. David Mora

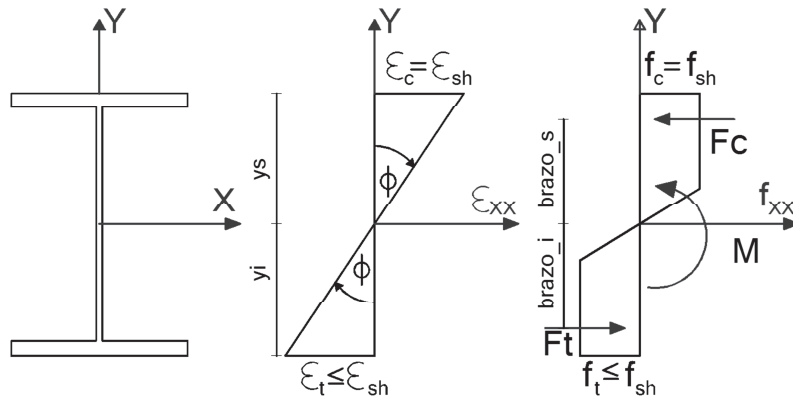
$$M_y = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i \quad (2.19)$$

$$My = S_x * f_y \quad (2.20)$$

$$\Phi_y = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_y}{y_s/2} \quad (2.21)$$

Ejemplo para esfuerzo $f_c=f_{sh}$:

FIGURA 2.11 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f = f_{sh}$



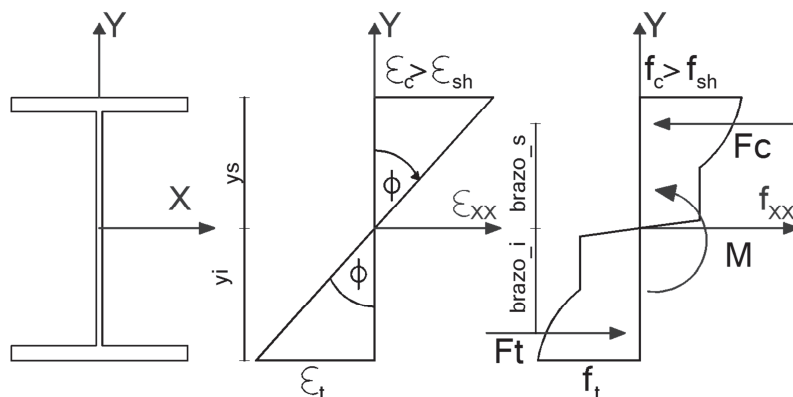
Fuente: Realizado por E. David Mora

$$M_{sh} = F_c * brazo_s + F_t * brazo_i \quad (2.22)$$

$$\Phi_{sh} = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_{sh}}{y_s/2} \quad (2.23)$$

Ejemplo para esfuerzo $f_c > f_{sh}$:

FIGURA 2.12 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f \geq f_{sh}$



Fuente: Realizado por E. David Mora.

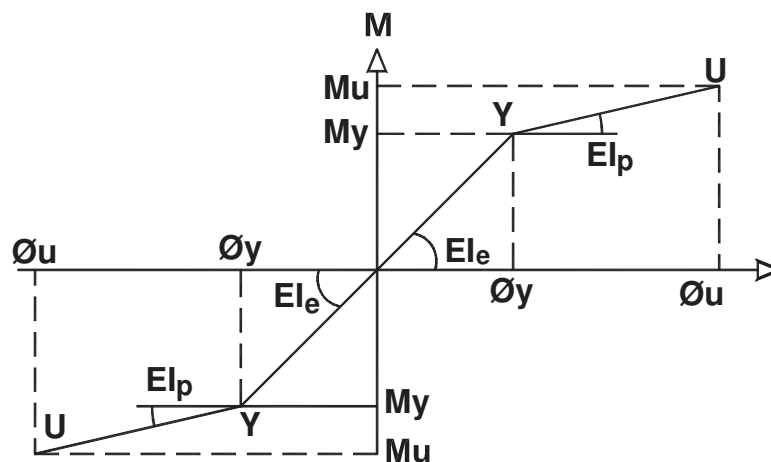
$$M = Fc * brazo_s + Ft * brazo_i \quad (2.24)$$

$$\Phi = \frac{\varepsilon_t}{y_i/2} = \frac{\varepsilon_c}{y_s/2} \quad (2.25)$$

2.5.1 PROCESO DE CÁLCULO DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA DE PERFILES DE ACERO SIN CARGA AXIAL, PARA UN MODELO BILINEAL

En los puntos anteriores se dedujo como obtener un modelo momento curvatura completo. Para un modelo bilineal se utilizarán recomendaciones obtenidas de varias bibliografías como Chandrasekaran, Srinicasan (2010).

FIGURA 2.13 MODELO BILINEAL DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA



Fuente: Realizado por E. David Mora

- i) En el cálculo de la rigidez elástica Ei_e se consideró como E (módulo de Young) e I (Momento de inercia) de acuerdo a la geometría de cada sección, teniendo: $Ei_e = E * I$
- ii) Para My (Momento en el punto Y) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$M_y = M_p = Z_x * f_y \quad (2.26)$$

Siendo,

Z_x = Módulo plástico, esta es una característica geométrica de la sección igual al momento estático de las áreas de tensión y a compresión respecto a su eje neutro: $Z_x = \int y dA = A_c * brazo_s + A_t * brazo_i$

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero.

- iii) Φ_y (Curvatura en el punto Y), observando en el gráfico superior vemos que desde el origen hasta el punto Y tenemos un triángulo de pendiente EI_e y altura M_y por lo tanto:

$$\Phi_y = M_y/EI_e \quad (2.27)$$

- iv) De bibliografía de acero avanzado y códigos como FEMA 273 y ASCE 41 se ha aproximado:

$$EI_p = (0.010 \text{ a } 0.030) * EI_e \quad (2.28)$$

- v) Se puede obtener una relación $\Phi_u = 120 * \Phi_y$, pero si se considera el posible fallo por distintos pandeos de las secciones, de manera aceptada en la práctica usual, y del ASCE 41 se toma:

$$\Phi_u = 10 * \Phi_y. \quad (2.29)$$

- vi) M_u (Momento en el punto U), geoméricamente, observando el gráfico superior, podemos obtener:

$$M_u = (\Phi_u - \Phi_y) * EI_p + M_y \quad (2.30)$$

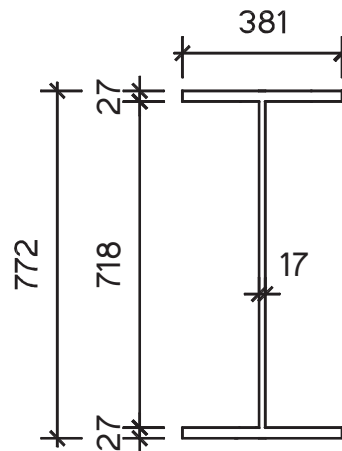
2.5.2 PROGRAMA PARA MODELO DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL

El programa que se hizo en Matlab para calcular el diagrama momento curvatura completo y además un modelo bilineal para secciones sometidas a flexión tiene el nombre de *Diagr_Momento_Curvatura_AceroV*, basado en todo lo visto en el subcapítulo 2.5, ver Anexo No3, A3.1.

2.5.3 EJEMPLO DE MODELO DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL

EJEMPLO PARA SECCIÓN W 30X173

FIGURA 2.14 SECCIÓN DE ACERO W 30X173



Fuente: Realizado por E. David Mora

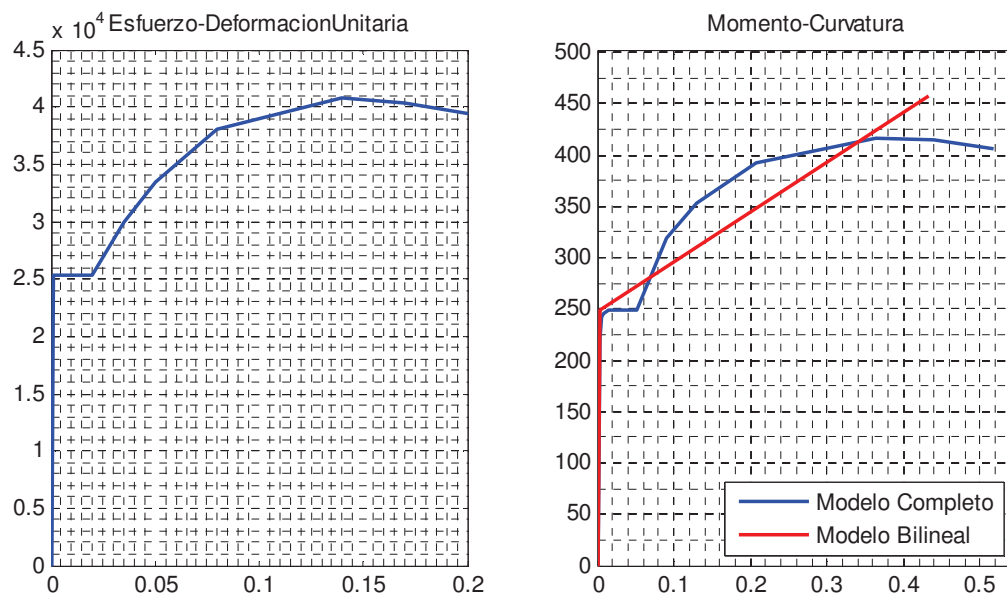
Se utilizó para el modelo bilineal una relación $EI_p/EI_e = 0.007$ para lograr un balance energético. Para utilizar el programa *Diagr_Momento_Curvatura_AceroV* se escribe en Command Window en Matlab:

```
>>Seccion=[25300,40800,20430000,1,.77216,.027178,.381,.016637];Ma=300;%ejemplo
W30x173
>> [EI,EA,R,EIbi]=Diagr_Momento_Curvatura_AceroV(Seccion,Ma)
EI =
```

| |
|------------|
| 1.7996e+03 |
| EA = |
| 4.6476e+05 |
| R = |
| 0.0260 |
| Elbi = |
| 484.4441 |

FIGURA 2.15 RESULTADO DE PROGRAMA:

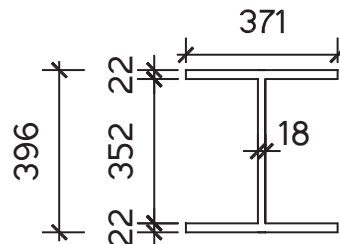
Diagr_Momento_Curvatura_AceroV



Fuente: Realizado por E. David Mora

EJEMPLO PARA SECCIÓN W 14X109

FIGURA 2.16 SECCIÓN DE ACERO W 14X109



Fuente: Realizado por E. David Mora

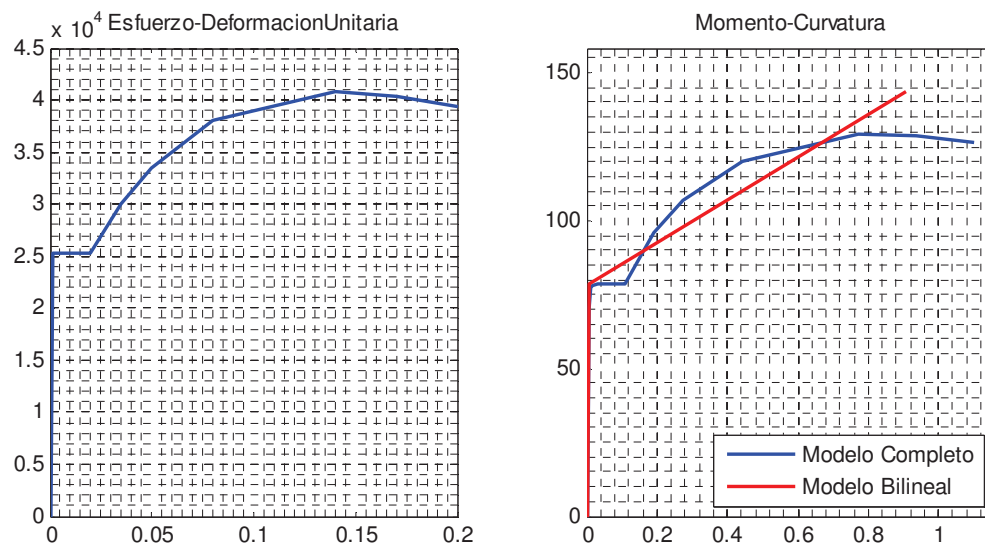
Se utilizó para el modelo bilineal una relación $Elp/Elc = 0.007$ para lograr un

balance energético. En Command Window en Matlab:

```
>> Seccion=[25300,40800,20430000,1,.36322,.021844,.37084,.013335];Ma=100; %ejemplo
W14x109
>> [EI,EA,R,Elbi]=Diagr_Momento_Curvatura_AceroV(Seccion,Ma)
EI =
    129.8961
EA =
    2.5850e+05
R =
    0.0125
Elbi =
    72.7795
```

FIGURA 2.17 RESULTADO DE PROGRAMA:

Diagr_Momento_Curvatura_AceroV



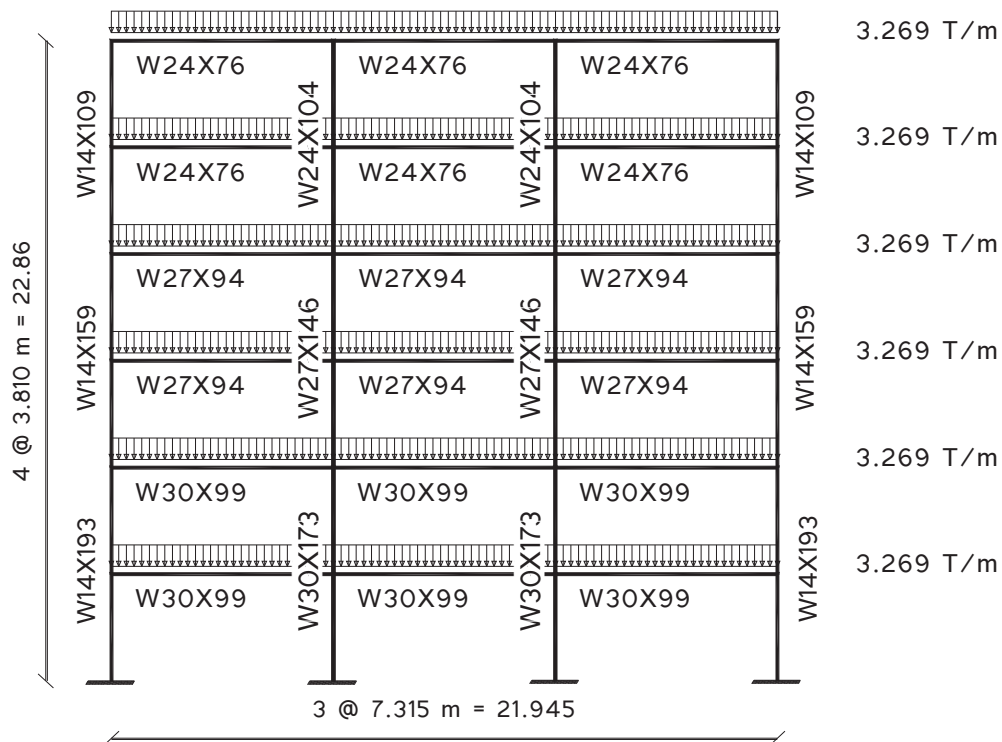
Fuente: Realizado por E. David Mora

2.5.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL SIN CONSIDERAR FUERZA AXIAL, EN CURVAS DE CAPACIDAD

Aunque en los siguientes capítulos se describirán los programas para obtener las curvas de capacidad, con el objetivo de comenzar a observar los resultados con los distintos modelos de momento curvatura se presenta el siguiente ejemplo:

Se obtuvo la Curva de Capacidad de un edificio de 6 pisos utilizando para cada sección una curva de modelo completo y comparando resultados con una curva de modelo bilineal, sin considerar cargas axiales, con el propósito de comparar la influencia de las cargas axiales en el siguiente subcapítulo de este trabajo. A continuación se presenta el edificio en 2 dimensiones analizado:

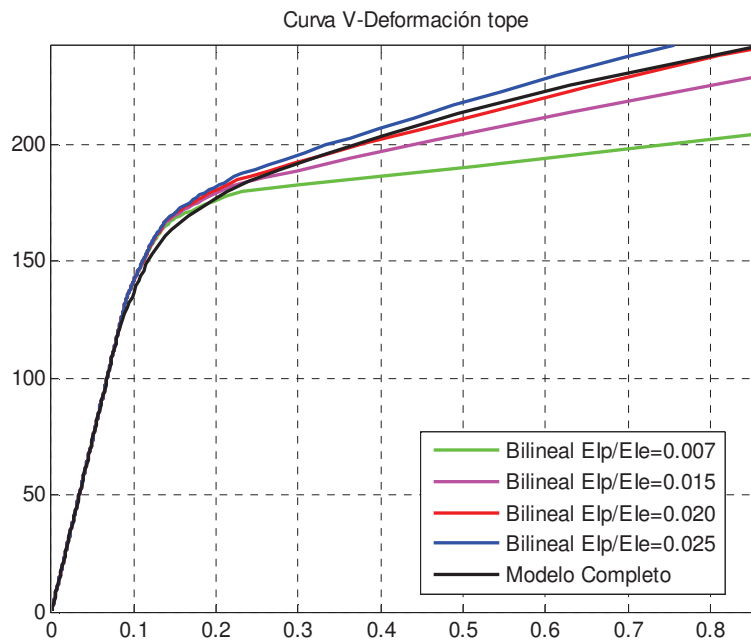
FIGURA 2.18 EJEMPLO DE ESTRUCTURA A SER ANALIZADA



Fuente: Realizado por E. David Mora

Resultados de Curva de Capacidad:

FIGURA 2.19 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD CON DIFERENTES RELACIONES EIp/EIe



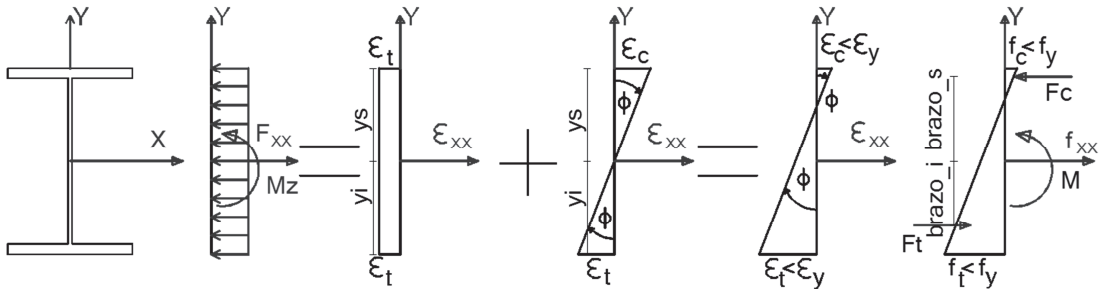
Fuente: Realizado por E. David Mora

2.6 MODELO MOMENTO CURVATURA COMPLETO INCLUYENDO FUERZA AXIAL

Para una sección sometida a flexocompresión se deben superponer las deformaciones debido a carga axial y a momentos. Teniendo estas deformaciones resultantes, se procede a determinar en qué rango lineal o no lineal esta cada fibra y así se obtendrán esfuerzos correspondientes, según la relación esfuerzo deformación del material, este proceso se puede observar abajo para varios casos, y será el programado en Matlab en *Diagr_Momento_Curvatura_AceroC*:

Ejemplo para esfuerzo $f_t < f_y$:

FIGURA 2.20 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f < f_y$



Fuente: Realizado por E. David Mora

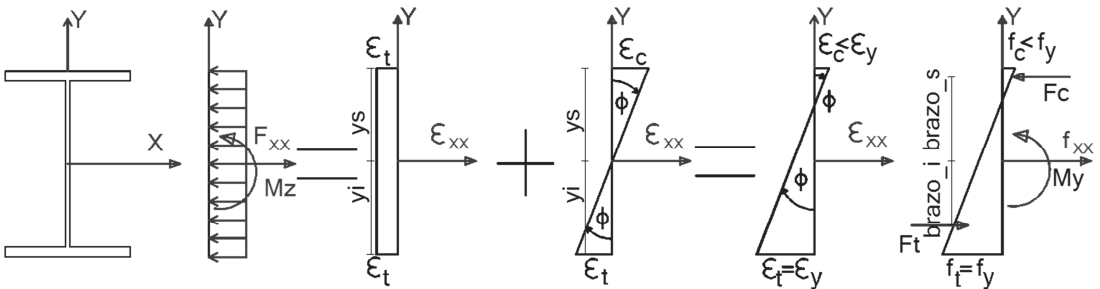
$$M = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i$$

$$M = S_x * f \quad (2.31)$$

$$\Phi = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_c}{y_s/2} \quad (2.32)$$

Para esfuerzo $f_t = f_y$:

FIGURA 2.21 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f = f_y$



Fuente: Realizado por E. David Mora

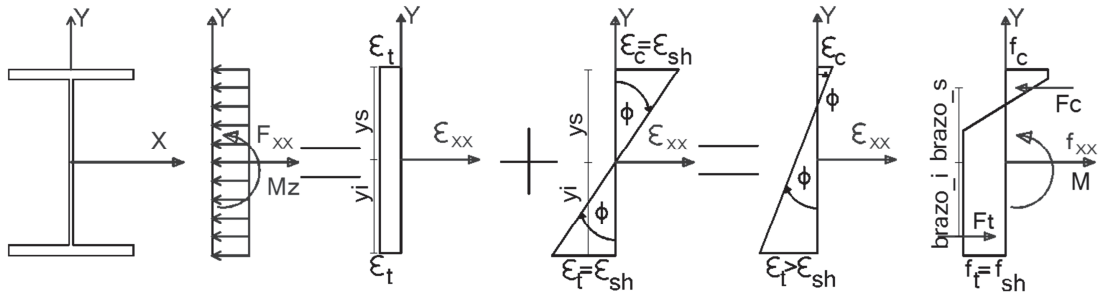
$$M_y = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i$$

$$M_y = S_x * f_y \quad (2.33)$$

$$\Phi_y = \frac{\epsilon_y}{y_i/2} = \frac{\epsilon_c}{y_s/2} \quad (2.34)$$

Para esfuerzo $f_t = f_{sh}$:

FIGURA 2.22 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f = f_{sh}$



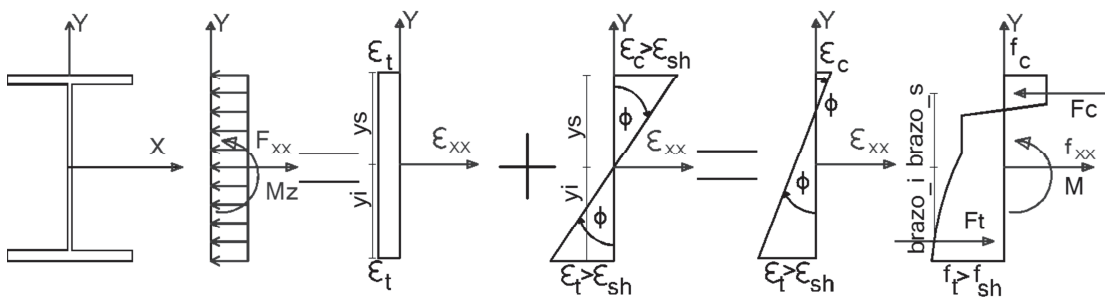
Fuente: Realizado por E. David Mora

$$M_{sh} = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i \quad (2.35)$$

$$\Phi_{sh} = \frac{\epsilon_{sh}}{y_i/2} = \frac{\epsilon_c}{y_s/2} \quad (2.36)$$

Para esfuerzo $f_t > f_{sh}$:

FIGURA 2.23 CÁLCULO DE MOMENTO CURVATURA PARA ESFUERZO $f > f_{sh}$



Fuente: Realizado por E. David Mora

$$M = F_c * \text{brazo}_s + F_t * \text{brazo}_i \quad (2.37)$$

$$\Phi = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_c}{y_s/2} \quad (2.38)$$

2.6.1 PROCESO DE CÁLCULO DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA DE PERFILES DE ACERO PARA UN MODELO BILINEAL CON CARGA AXIAL

Se procede igual que el subcapítulo 2.5.1 cambiando el paso ii), como se muestra a continuación (ASCE 41):

ii) Para M_y (Momento en el punto Y) se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$M_y = M_p = Z_x * f_y * \left(1 - \frac{P_a}{P_y}\right) \quad (2.39)$$

Siendo,

Z_x = Módulo plástico, esta es una característica geométrica de la sección igual al momento estático de las áreas de tensión y a compresión respecto a su eje neutro: $Z_x = \int y dA = A_c * brazo_s + A_t * brazo_i$

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero.

P_a = Fuerza axial actuante.

P_y = Fuerza límite de fluencia. $P_y = A * f_y$

A = Área de la sección.

2.6.2 PROGRAMA PARA MODELO DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL EN SECCIONES SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN

Programa en Matlab para calcular el diagrama momento curvatura completo y bilineal en secciones sometidas a flexocompresión ***Diagr_Momento_Curvatura_AceroC***, basado en todo lo visto en el subcapítulo 2.6, en Anexo No3, A3.2.

2.6.3 EJEMPLO DE MODELO DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO Y BILINEAL INCLUYENDO FUERZA AXIAL

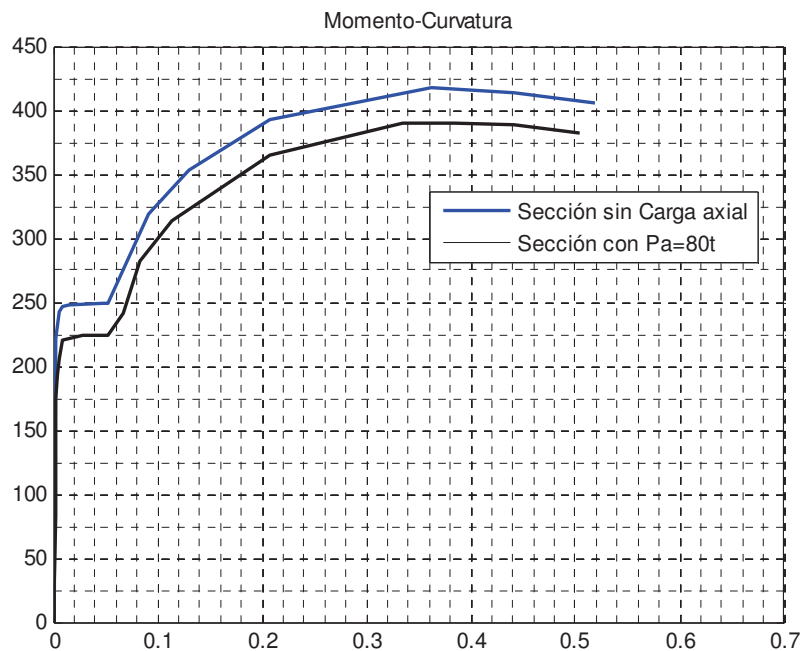
EJEMPLO PARA SECCIÓN W 30X173

Para utilizar el programa *Diagr_Momento_Curvatura_AceroC* se escribe en Command Window en Matlab:

```
>> Seccion=[25300,40800,20430000,1,.77216,.027178,.381,.016637];Ma=300;
Pa=80;%ejemplo W30x173
>> [EI,EA,R]=Diagr_Momento_Curvatura_AceroC(Seccion,Ma,Pa)
EI =
    997.8643
EA =
    4.6476e+06
R =
    0.0144
```

FIGURA 2.24 RESULTADO DE PROGRAMA:

Diagr_Momento_Curvatura_AceroV y
Diagr_Momento_Curvatura_AceroC



Fuente: Realizado por E. David Mora

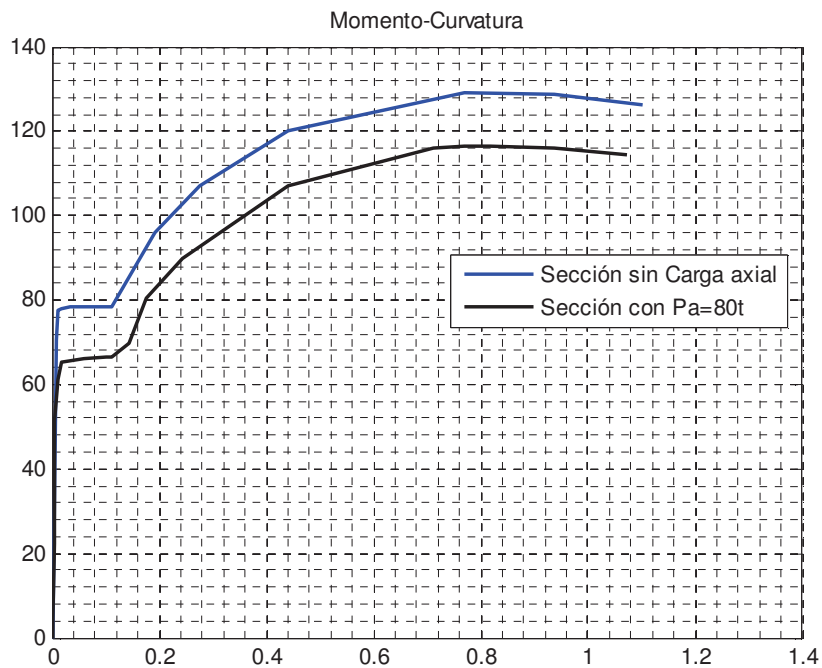
EJEMPLO PARA SECCIÓN W 14X109

En Command Window en Matlab:

```
>> Seccion=[25300,40800,20430000,1,.36322,.021844,.37084,.013335];Ma=100;Pa=80;
%ejemplo W14x109
>> [EI,EA,R]=Diagr_Momento_Curvatura_AceroC(Seccion,Ma,Pa)
EI =
    87.4111
EA =
    2.5850e+06
R =
    0.0084
```

FIGURA 2.25 RESULTADO DE PROGRAMA:

**Diagr_Momento_Curvatura_AceroV y
Diagr_Momento_Curvatura_AceroC**

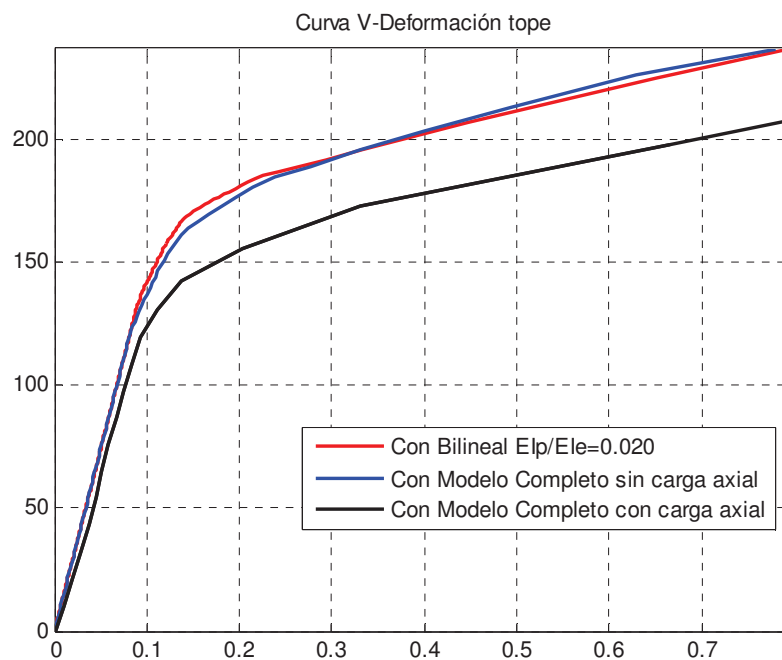


Fuente: Realizado por E. David Mora

2.6.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA COMPLETO CONSIDERANDO SOLO FLEXIÓN Y CONSIDERANDO FLEXOCOMPRESIÓN EN CURVAS DE CAPACIDAD

Tomando el mismo edificio del subcapítulo 2.5.4 de este trabajo se obtuvo la Curva de Capacidad utilizando para cada sección una curva de modelo completo a flexocompresión para columnas y solo a flexión para vigas. A continuación se presenta el edificio analizado en 2 dimensiones, comparando los resultados con los obtenidos en el subcapítulo 2.5.4:

FIGURA 2.26 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD



Fuente: Realizado por E. David Mora

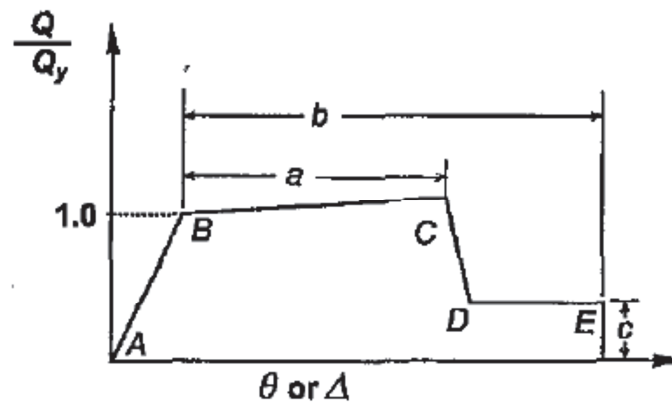
2.7 NORMATIVA PARA OBTENER RIGIDECES CON DIAGRAMAS MOMENTO ROTACIÓN

Para el cálculo de análisis no lineales se puede utilizar los parámetros del código ASCE 41-2013- Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, este no da parámetros para definir diagramas Momento – Curvatura sino diagramas

Momento – Rotación basados en características, comportamiento y utilización de las secciones. Se puede ver una comparación de curvas de capacidad del edificio del subcapítulo 2.5.4, resultantes de usar la forma teórica exacta de la curva Momento-Curvatura, versus la utilización del código ASCE 41, en la figura 2.30.

Es importante conocer que el código ASCE 41-13 es sucesor de los códigos ASCE 31 y 41 2006, FEMA 440 2005, FEMA 356 y 357 2000, FEMA 273 1997 y ATC40 1996, códigos ampliamente usados en análisis no lineales.

FIGURA 2.27 CURVA GENERALIZADA FUERZA – DEFORMACIÓN DE COMPONENTES O ELEMENTOS



Fuente: ASCE 41-13

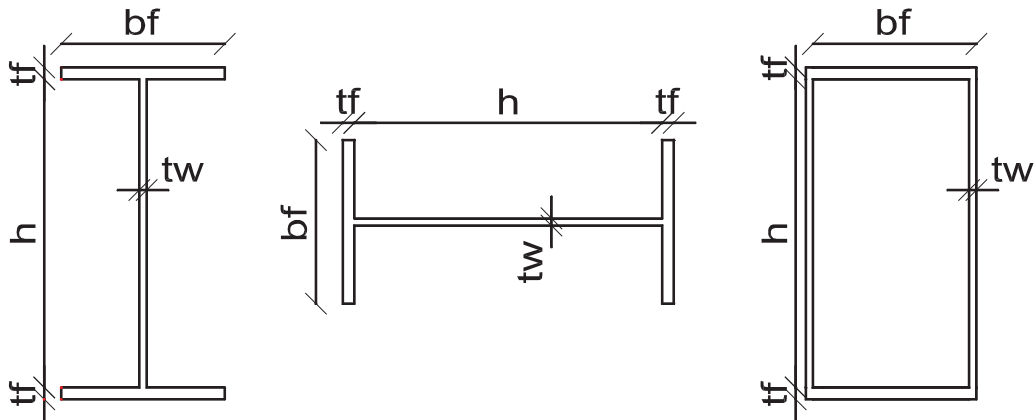
En la figura 2.27, se distinguen tres zonas, AB que corresponde al comportamiento elástico; BC al comportamiento plástico o de post fluencia y DE que corresponde al comportamiento residual.

En la tabla 2.2 se presenta la propuesta del ASCE 41 para hallar la rotación en el punto C y en el punto E, así como el momento residual. En la figura 2.28, se presentan tres tipos de secciones que han sido programadas y son: la tipo 1 que corresponde a un perfil tipo "I", la tipo 2 un perfil tipo "H" y la tipo 3 un perfil tubular.

La parte superior de la tabla 2.2, es para **vigas** y se debe trabajar con los datos de la sección para obtener los parámetros: a, b, o c. En ésta tabla las relaciones

geométricas como $\frac{b_f}{2t_f}$ son acerca de la parte de la sección que está a compresión, f_{ye} la fluencia del acero se debe colocar en ksi. Por ejemplo cuando se trabaja con un acero A 36, el valor de $f_{ye} = 36 \text{ ksi}$.

FIGURA 2.28 SECCIONES DE ACERO CONSIDERADAS EN EL SISTEMA COMPUTACIONAL



Fuente: Realizado por E. David Mora

Lo más probable es que la viga que se está analizando no sea ni clase “a” ni clase “b” y se deba interpolar los valores para encontrar los parámetros que se hallan en la segunda, tercera y cuarta columna de la tabla 2.2.

La segunda parte de la tabla 2.2, corresponde a **columnas** (flexo compresión) y dependen primero de la relación $\frac{P}{P_{CL}}$, donde P es la carga axial que gravita en la columna y P_{CL} es la carga crítica de pandeo. Cuando la relación $\frac{P}{P_{CL}} > 0.5$ debe calcularse como elementos sujetos solo a fuerza axial.

Para calcular la fuerza admisible de elementos sometidos a pandeo por flexión P_{CL} , se puede seguir el procedimiento descrito en la norma AISC 360-10, el cual se presenta a continuación.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (2.40)$$

Cuando la expresión

$$\frac{K L}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.41)$$

$$F_{cr} = \left[0,658 \frac{f_y}{F_e} \right] f_y \quad (2.42)$$

Cuando la expresión

$$\frac{K L}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.43)$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (2.44)$$

$$P_{CL} = F_{cr} A_s \quad (2.45)$$

Donde F_e es el esfuerzo elástico por pandeo; F_{cr} es el esfuerzo crítico de pandeo; f_y es el esfuerzo de fluencia del acero; L es la longitud del elemento; K es el factor de longitud efectiva y r es el radio de giro del perfil. El procedimiento se aplica siempre y cuando la sección de acero sea no esbelta, para lo cual se debe primero revisar la razón ancho-espesor con la razón límite que da el código AISC-360-10, para verificar la esbeltez del perfil.

Una vez que se ha clasificado de acuerdo al valor de $\frac{P}{P_{CL}}$, se pasa a controlar los parámetros relacionados con la geometría de la sección, en forma similar a lo que se hizo con las vigas.

Posteriormente, se tiene en la tabla 2.3, el caso de las **diagonales**, las mismas que deben evaluarse para dos condiciones, la primera cuando trabajen a compresión y la segunda cuando trabajen a tracción (tensión); en diagonales en V o V invertida uno de los montantes del contraviento trabajará a tracción y el otro a compresión.

TABLA 2.2 PARÁMETROS PARA PROCEDIMIENTOS NO LINEALES EN ESTRUCTURAS DE ACERO

| Vigas - Flexión | a | b | c |
|--|---|---|----------|
| $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ y } \frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{f_{ye}}}$ | $9\theta_y$ | $11\theta_y$ | 0.6 |
| $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{f_{ye}}}$ | $4\theta_y$ | $6\theta_y$ | 0.2 |
| Otros | Interpolación lineal, se usará el resultado menor. | | |
| Columnas - Flexión | a | b | c |
| Para $P/P_{CL} < 0.2$ | | | |
| $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ y } \frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{f_{ye}}}$ | $9\theta_y$ | $11\theta_y$ | 0.6 |
| $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{f_{ye}}}$ | $4\theta_y$ | $6\theta_y$ | 0.2 |
| Otros | Interpolación lineal, se usará el resultado menor. | | |
| Para $0.2 \leq P/P_{CL} \leq 0.5$ | | | |
| $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ y } \frac{h}{t_w} \leq \frac{260}{\sqrt{f_{ye}}}$ | $11\left(1 - \frac{5}{3} \frac{P}{P_{CL}}\right)\theta_y$ | $17\left(1 - \frac{5}{3} \frac{P}{P_{CL}}\right)\theta_y$ | 0.6 |
| $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{400}{\sqrt{f_{ye}}}$ | $1\theta_y$ | $1.5\theta_y$ | 0.2 |
| Otros | Interpolación lineal, se usará el resultado menor. | | |

* Columnas con $P/P_{CL} > 0.5$ deberán ser controladas por fuerza axial.

Fuente: ASCE 41 – 13

TABLA 2.3 PARÁMETROS PARA PROCEDIMIENTOS NO LINEALES EN ESTRUCTURAS DE ACERO

| Diagonal Rigidizadora en Compresión | a | b | c |
|--|---------------|--------------|----------|
| Para Secciones Esbeltas $Kl/r \geq 4.2\sqrt{E/fy}$ | | | |
| Secciones W,I,2L,2C en plano | $0.5\Delta_c$ | $10\Delta_c$ | 0.3 |
| <i>2L, 2C fuera de plano</i> | $0.5\Delta_c$ | $9\Delta_c$ | 0.3 |
| HSS, Tubos redondos y rectangulares | 10.5 | 79 | 0.3 |
| Para Secciones compactas $Kl/r \leq 2.1\sqrt{E/fy}$ | | | |
| Secciones W,I,2L,2C en plano | $1\Delta_c$ | $8\Delta_c$ | 0.5 |
| <i>2L, 2C fuera de plano</i> | $1\Delta_c$ | $7\Delta_c$ | 0.5 |
| HSS, Tubos redondos y rectangulares | $1\Delta_c$ | $7\Delta_c$ | 0.5 |
| Diagonal Rigidizadora en Tensión | $11\Delta_T$ | $14\Delta_T$ | 0.8 |
| Vigas, Columnas en tensión | $5\Delta_T$ | $7\Delta_T$ | 1.0 |

Fuente: ASCE 41 – 13

Para el caso de compresión se debe primero comprobar si la sección es esbelta o compacta, por medio de la relación $\frac{Kl}{r}$. Donde kl es la longitud efectiva de pandeo y r es el radio de giro.

Una vez que se tiene definido si la sección es esbelta o compacta la

determinación de los parámetros es directa, de acuerdo a las secciones de los perfiles. Se destaca que Δ_c es el desplazamiento de fluencia de la relación fuerza desplazamiento. La fuerza de fluencia será el menor valor de P_Y o P_{CL} .

$$P_Y = A f_y \quad (2.46)$$

Donde A es el área de la sección transversal; f_y es la fluencia del acero; P_{CL} es la carga axial de pandeo. El valor de Δ_c se calcula de la siguiente manera.

$$\Delta_c = \frac{\text{menor}(P_Y, P_{CL})}{EA} \quad (2.47)$$

Siendo E el módulo de elasticidad del material; las restantes variables ya se han indicado.

Para el caso de elementos que trabajan a tracción, el cálculo es directo. Y Δ_T es el desplazamiento a nivel de fluencia, que se halla con la siguiente expresión.

$$\Delta_T = \frac{P_Y}{EA} \quad (2.48)$$

Para poder obtener EI con el diagrama Momento Rotación se puede trabajar de forma directa, evaluando con los momentos o rotaciones si la sección se encuentra en una zona elástica o plástica del diagrama, y se halla la matriz de rigidez con métodos como el Bilineal de Interacción Carga axial – Momento, Modelo de Giberson, Longitud de Rótula Plástica, Plasticidad extendida, Matriz de rigidez Condensada en coordenadas reducidas, relación de momento constante, segmento finito – resorte finito, o momento curvatura – segmento finito, etc. En el siguiente capítulo se expondrán varios de estos métodos.

2.7.1 COMPARACIÓN θ_y CON EXPRESIÓN ASCE41 Y EXPRESIÓN EXACTA

Para utilizar los diagramas momento rotación del código ASCE 41 en secciones de acero, se necesita conocer la rotación de fluencia en cada sección, el código

da la opción de usar la expresión general para la rotación de fluencia:

$$\theta_y = \frac{Z * f_y * L}{6 * E * I} \quad (2.49)$$

Donde,

E = Módulo de Young.

I = Momento de inercia.

L = Largo de elemento

Z = Módulo plástico, $Z = \int y dA = A_c * brazo_s + A_t * brazo_i$

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero.

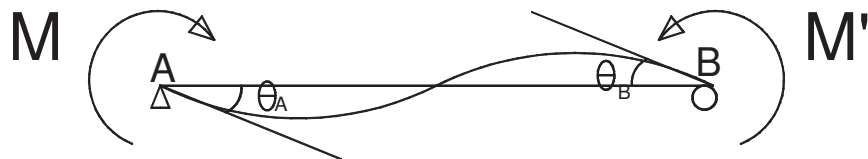
P = Fuerza Axial aplicada.

$P_y = A * f_y$.

A = Área de la sección.

Esta expresión se obtiene considerando que los dos extremos de un elemento están fluyendo:

FIGURA 2.29 MOMENTOS EN VIGA DEFORMADA POR FLEXIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora

Demostración de fórmula de ASCE 41:

Partiendo de la deformación de la figura 2.29 tenemos:

$$\theta_{Ay} = \frac{M_p L}{3EI} - \frac{M' L}{6EI} \quad (2.50)$$

Si $M' = M_p$:

$$\theta_{Ay} = \frac{M_p L}{6EI} = \theta_{By} \quad (2.51)$$

Donde, M_p es el momento plástico.

Si se toma esta consideración se obtienen resultados conservadores que pueden ser no precisos como se muestra en la figura 2.30.

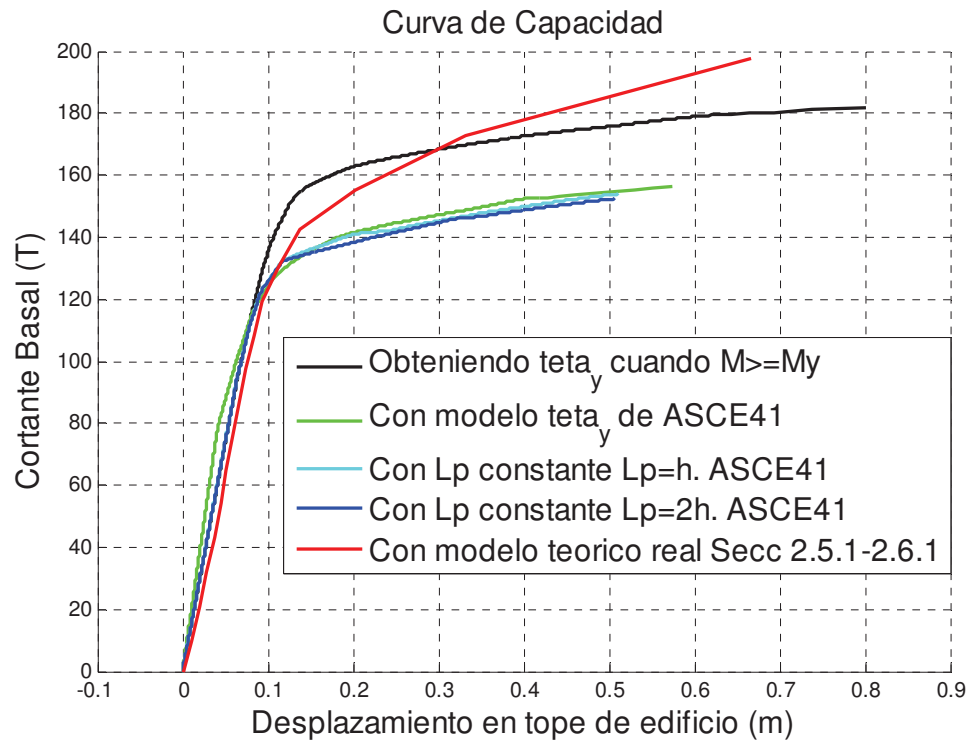
Otra manera de obtener θ_y es desde las fórmulas de Navier – Bernulli (ver figura 2.32):

$$\begin{aligned} \theta_y &= \int_0^{Lp} \phi dy = \int_0^{Lp} \frac{M}{EI_e} dy = \int_0^{Lp} \frac{M_p}{EI_e} \left(\frac{L-y}{L} \right) dy = \frac{M_p}{EI_e} \left[\int_0^{Lp} dy - \frac{1}{L} \int_0^{Lp} dy \right] \\ &= \frac{M_p}{EI_e} \left[Lp - \frac{1}{L} * \frac{Lp^2}{2} \right] = \phi_y \left[Lp - \frac{1}{L} * \frac{Lp^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.52)$$

La rotación total en el tope de la rótula plástica del elemento puede ser expresada como $\theta = \theta_y + \theta_p$, donde θ_y es la rotación de fluencia en el tope de la rótula y θ_p es la rotación plástica en el tope de la rótula, Ger and Cheng. (2012). Y suponiendo un valor de Longitud Plástica L_p que puede estar entre h y $2h$ siendo h la altura de la sección del elemento.

Finalmente en la figura 2.30 en la curva en negro se plantea también tomar el valor de θ_y en el instante en que $M \geq M_p$, donde M es el momento actuante y M_p es el Momento plástico.

FIGURA 2.30 COMPARACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD DE EDIFICIO DEL SUBCAPÍTULO 2.5.4, UTILIZANDO EL DIAGRAMA MOMENTO CURVATURA TEÓRICO Y DIAGRAMAS MOMENTO ROTACIÓN DE ASCE41

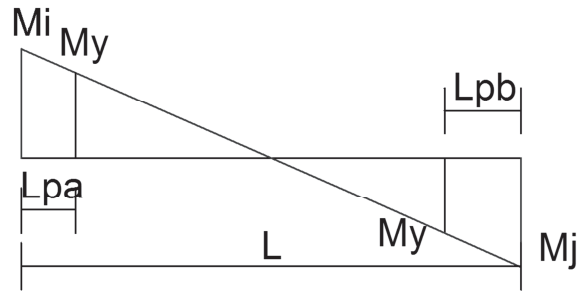


Fuente: Realizado por E. David Mora

En conclusión es mejor usar θ_y del obtenido en el instante en que $M \geq M_p$, ya que este es más real y como vemos da resultados similares a usar el modelo teórico real.

2.7.2 LONGITUD RÓTULA PLÁSTICA

A continuación se explica cómo obtener la longitud plástica necesaria para el cálculo de θ_y , y para las matrices de rigidez de elementos con secciones plastificadas vistas en el capítulo 3.

FIGURA 2.31 DIAGRAMA DE MOMENTOS DE VIGA DE LONGITUD L

Fuente: Realizado por E. David Mora

Como se muestra en la figura 2.31 el momento máximo será M_i y M_j , el límite donde fluye la sección es M_y , el cual, en modelos bilineales, se toma como el límite donde la sección alcanza el momento plástico, además se supone que el diagrama de momento es lineal, lo cual puede no ser real si la carga gravitacional es muy grande.

Por triángulos rectángulos podemos determinar L_p :

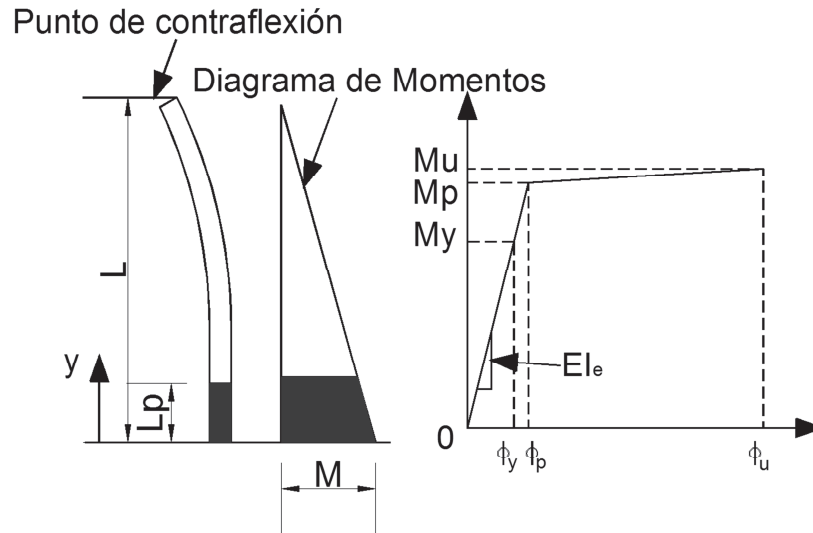
$$L_{pa} = \left| \frac{|M_i| - |M_y|}{M_i - M_j} \right| * L ; L_{pb} = \left| \frac{|M_j| - |M_y|}{M_i - M_j} \right| * L \quad (2.53)$$

Es necesario conocer L_p para el cálculo de los métodos de matrices de rigidez por el método de las dovelas.

2.8 RELACIÓN APROXIMADA ENTRE MOMENTO CURVATURA Y MOMENTO ROTACIÓN

Se puede utilizar directamente los resultados de la rotación resultante usando el diagrama y tablas del código ASCE 41 para conocer si se debe usar la rigidez elástica o plástica. Si se necesita conocer la curvatura se puede utilizar las siguientes expresiones:

FIGURA 2.32 CALCULO DE M- θ BASADO EN M- ϕ Y L_p



Fuente: Realizado por E. David Mora

Expresión para relacionar la rotación con curvatura:

$$\theta_p = \phi_p L_p \quad (2.54)$$

$$\theta_p = (\phi - \phi_p) L_p$$

$$\phi = \frac{(\theta - \theta_p)}{L_p} + \phi_p \quad (2.55)$$

Donde ϕ es la curvatura total correspondiente al momento, M , en el fondo de la columna, asumiendo que la curvatura plástica, $(\phi - \phi_p)$, es uniformemente distribuida a lo largo de la longitud plástica, L_p .

$$\phi = \frac{(\theta - \theta_p)}{L_p} + \frac{M_p}{EI_e} \quad (2.56)$$

Para el diagrama de Momento – Rotación generalizado del código ASCE 41, figura 2.27, la curvatura en el punto C será:

$$\phi_C = \phi_u = \frac{((\theta_p + a) - \theta_p)}{L_p} + \frac{M_p}{EI_e}$$

$$\phi_c = \phi_u = \frac{a}{Lp} + \frac{Mp}{EIe} \quad (2.57)$$

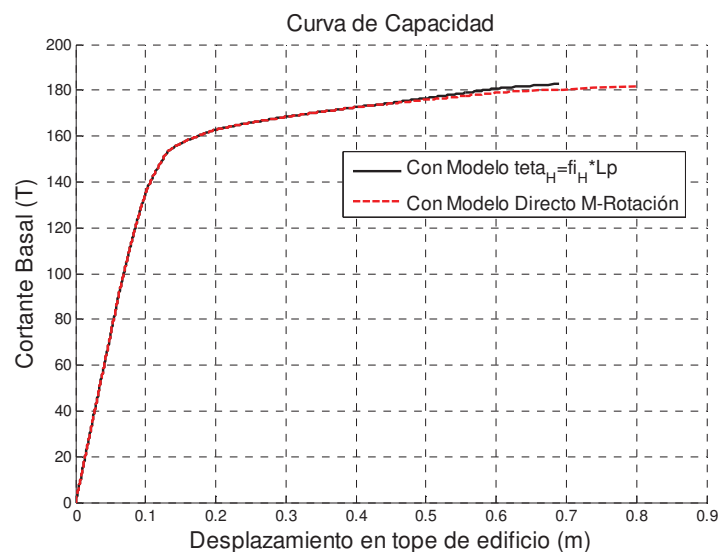
Donde “a” es la longitud correspondiente al diagrama de la figura 2.27.

Partiendo del paso (vi) del subcapítulo 2.5.1 y 2.6.1, $Mu = (\Phi_u - \Phi_p) * EI_p + Mp$, y reemplazando con la Ec. (2.57) tendremos:

$$Mu = \left(\left(\frac{a}{Lp} + \Phi_p \right) - \Phi_p \right) * EI_p + Mp$$

$$Mu = \frac{a}{Lp} * EI_p + Mp \quad (2.58)$$

FIGURA 2.33 CURVA DE CAPACIDAD CON MODELO $\theta_H = \phi_H Lp$ Y CON MODELO DE MOMENTO ROTACIÓN DIRECTO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

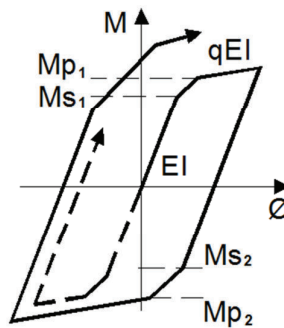
2.9 MODELO DE CURVA HISTERÉTICA USADO EN PUSHOVER CÍCLICO

Para los posteriores procedimientos del Pushover Cíclico, que se verán en el capítulo 5, se usará curvas histeréticas con reglas de endurecimiento y

Bauschinger para secciones de acero. A continuación se muestra este modelo, Li, Guo-Qiang (2007).

2.9.1 MODELO CONSTITUTIVO

FIGURA 2.34 MODELO CONSTITUTIVO BILINEAL UTILIZADO PARA PUSHOVER CÍCLICO Y ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL



Fuente: Realizado por E. David Mora.

En la figura 2.34 se indica el modelo constitutivo que se utilizó para el pushover cíclico y análisis dinámico no lineal el mismo que contempla el efecto Bauschinger y el efecto de endurecimiento por deformación. En seguida se indica con detalle la forma como se trabajó en la curva de histéresis bilineal indicada, para ello en la figura 2.37 se definen las funciones Γ y Φ , de la siguiente manera:

$$\Gamma = \left| \frac{M}{M_p} \right| \quad (2.59)$$

$$\Phi = \left| \frac{\phi}{\phi_p} \right| \quad (2.60)$$

Donde M y ϕ son el momento y curvatura, M_p y ϕ_p son el momento y curvatura plásticos, cuya forma de cálculo se indicará posteriormente, con relación a la nomenclatura indicada en la figura 2.37 y 2.38, se tiene que n es el ciclo de carga. Para el primer ciclo de carga se tiene:

$$\Gamma_s = \frac{M_y}{M_p}; \Gamma_p = 1 \quad (2.61)$$

$$M_y = S_x f_y \left(1 - \frac{P_a}{P_y} \right) \quad (2.62)$$

$$M_p = Z_x f_y \left(1 - f(P_y) \right) \quad (2.63)$$

Donde S_x es el momento estático; Z_x es el momento plástico; f_y es la fluencia del material; P_a es la carga actuante; $P_y = A f_y$; siendo A el área de la sección transversal; $f(P_y)$ una función que depende del tipo de sección, en seguida se dan fórmulas para M_p para varias secciones típicas:

- Para una sección Rectangular:

$$M_p = Z_x f_y \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_y} \right)^2 \right) \quad (2.64)$$

- Para una sección tipo I y rectangular hueca:

Si $0 \leq P_a/P_y \leq \alpha/(2+\alpha)$

$$M_p = Z_x f_y \left(1 - \frac{(2+\alpha)^2}{(4+\alpha)} \alpha \left(\frac{P_a}{P_y} \right)^2 \right) \quad (2.65)$$

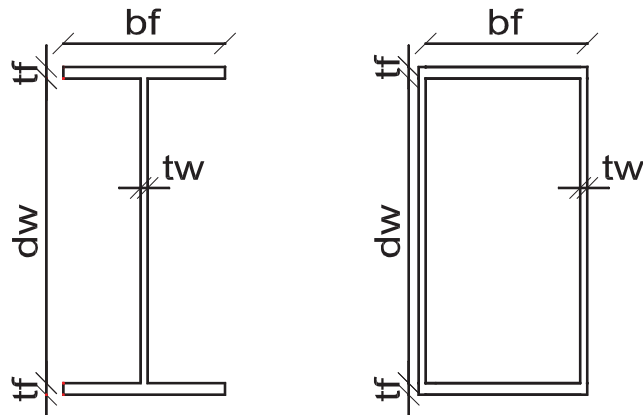
Si $\alpha/(2+\alpha) < P_a/P_y \leq 1$

$$M_p = Z_x f_y \left(1 - \frac{P_a}{P_y} \right) \frac{2(2+\alpha)}{(4+\alpha)} \quad (2.66)$$

$\alpha = d_w t_w / b_f t_f$; para secciones tipo I.

$\alpha = 2d_w t_w / b_f t_f$; para secciones rectangulares huecas.

FIGURA 2.35 SECCIÓN TIPO I Y SECCIÓN RECTANGULAR HUECA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

- Para una sección tipo H:

$$\text{Si } 0 \leq P_a/P_y \leq \alpha/(2+\alpha)$$

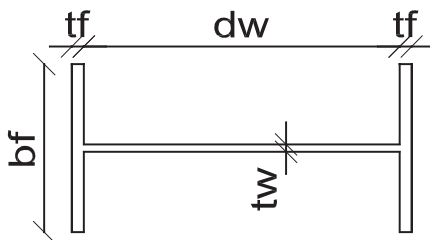
$$M_p = Z_x f_y \quad (2.67)$$

$$\text{Si } \alpha/(2+\alpha) < P_a/P_y \leq 1$$

$$M_p = Z_x f_y \frac{4 - \alpha^2}{4} \left(1 - \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{P_a}{P_y} \right) - \frac{2+\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{P_a}{P_y} \right)^2 \right) \quad (2.68)$$

$$\alpha = d_w t_w / b_f t_f;$$

FIGURA 2.36 SECCIÓN TIPO H

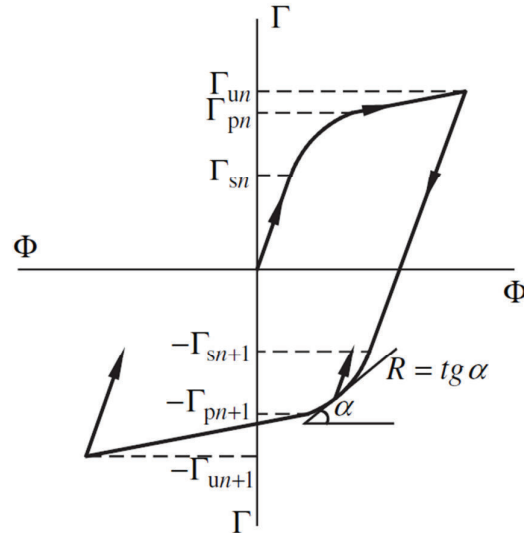


Fuente: Realizado por E. David Mora.

En la figura 2.37, se aprecia que Γ_{sn}, Γ_{pn} son las funciones de fluencia en el ciclo de carga n , asociadas al momento de fluencia y plástico; lo propio se tiene con $\Gamma_{sn+1}, \Gamma_{pn+1}$ pero en el ciclo de carga en el otro sentido. Γ_{un} es el valor de Γ en el momento máximo de carga en un sentido y Γ_{un+1} el valor en el otro extremo

cuando la carga actúa en sentido contrario.

FIGURA 2.37 DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO UTILIZADO



Fuente: Li, Guo-Qiang (2007).

En base a lo anotado se entiende que $\Gamma_{sn}, \Gamma_{sn+1}$ son las funciones de fluencia al inicio y al final de un ciclo de carga en un sentido. Ahora, se define:

$$\Gamma_{sn+1} = \Gamma_s - (\Gamma_{bn+1} - 1) \quad (2.69)$$

$$\Gamma_{pn+1} = \Gamma_{bn+1} \quad (2.70)$$

Dónde:

$$\Gamma_{bn+1} = \begin{cases} \Gamma_{un} , & \Gamma_{un} > \Gamma_{bn} \\ \Gamma_{bn} , & \Gamma_{un} \leq \Gamma_{bn} \end{cases} \quad (2.71)$$

Para la primera carga $\Gamma_{b1} = 1$. Donde Γ_{bn} y Γ_{bn+1} son los valores característicos de la función de fluencia por efectos de Baushinger y de Endurecimiento en el ciclo de carga n y $n + 1$ que cuantifican el valor de la incursión en el rango no lineal, de la sección.

Se define el parámetro de recuperación de fuerzas de la sección R , ver figura 2.38, con la siguiente expresión.

$$R = \frac{d\Gamma}{d\Phi} \frac{\Phi_{sn}}{\Gamma_{sn}} = \frac{dM}{d\Phi} * \frac{1}{EI_y} \quad (2.72)$$

Para el ciclo de carga n , se tiene:

$$R = 1, \quad \Gamma \leq \Gamma_{sn} \quad (2.73)$$

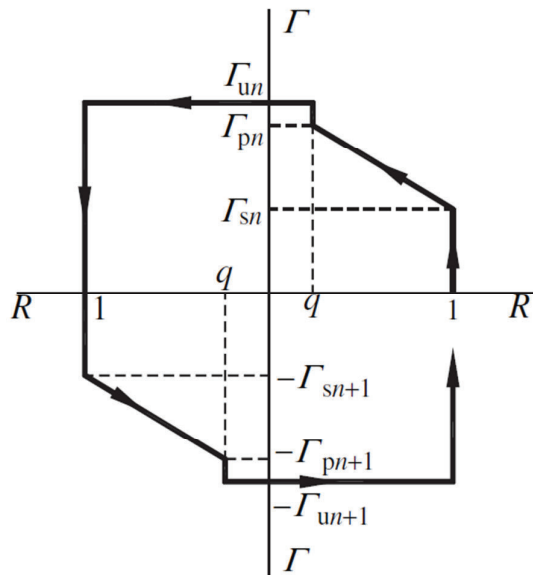
$$R = q, \quad \Gamma \geq \Gamma_{pn} \quad (2.74)$$

$$R = \frac{\Gamma - \Gamma_{sn}}{1 - \Phi_{sn}}, \quad \Gamma_{sn} < \Gamma < \Gamma_{pn} \quad (2.75)$$

En donde q es EI_y/EI_p , EI_y es la rigidez a flexión elástica y EI_p es la rigidez a flexión luego de plastificarse la sección. El parámetro q es sacado de recomendaciones del código ASCE41.

Por lo tanto $R * EI_y$ será la pendiente de la recta del diagrama Momento Curvatura.

FIGURA 2.38 CURVA HISTERÉTICA $\Gamma - R$



Fuente: Li, Guo-Qiang (2007).

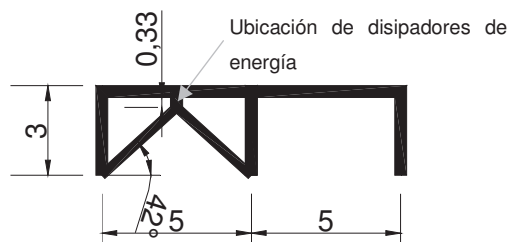
Y para toda descarga es:

$$R = 1 \quad (2.76)$$

2.9.2 PROGRAMA PARA MODELO DE HISTÉRESIS MOMENTO CURVATURA EN SECCIONES DE ACERO SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN

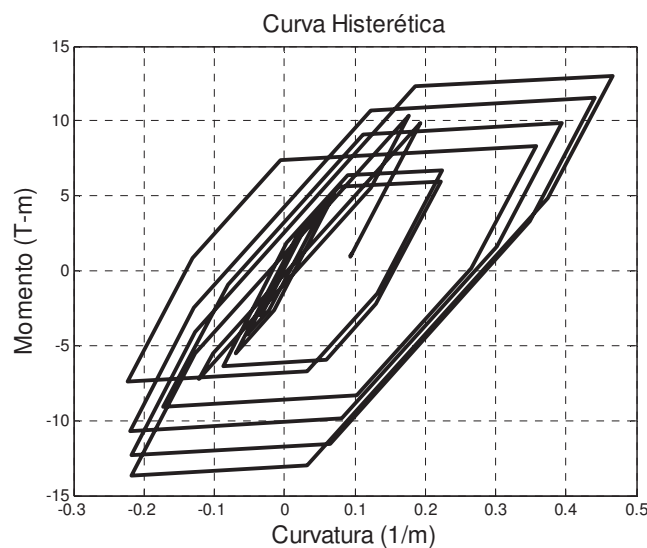
El programa hecho en Matlab para calcular diagramas de histéresis momento curvatura en secciones sometidas a flexocompresión se llama *HisteresisMom_curv_BiS*, se puede ver el código de programación en el Anexo No2, A2.3. El programa anterior usa un subprograma llamado *Geom* (Anexo No2, A2.1), para obtener propiedades geométricas de diferentes secciones de acero y hormigón que se verán en el capítulo 5.

FIGURA 2.39 EDIFICIO ANALIZADO PARA EJEMPLO CON PUSHOVER CÍCLICO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 2.40 RESULTADO DE PROGRAMA *HisteresisMom_curv_BiS* EN DISIPADOR DE ENERGÍA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

2.10 CONCLUSIONES SOBRE MODELOS MOMENTO CURVATURA Y MOMENTO ROTACIÓN

Existen diversos modelos, simples y complejos, lo que deriva en tiempo de cálculo computacional. Teóricamente el modelo visto en el subcapítulo 2.6 es el de resultados más reales, pero, aunque los resultados serán similares (ver figura 2.30), se recomienda utilizar el modelo de Momento rotación del código ASCE 41, por la razón que este código da parámetros obtenidos no solo de teoría de materiales sino también de experimentación, además se tiene el respaldo de un código tan importante como lo es el ASCE 41, se recomienda usar estas curvas con una pendiente de plastificación del 3% de la pendiente elástica como especifica este código, este es un modelo muy simple que no conlleva mucho tiempo de análisis computacional, como si lo hace el modelo más complejo visto en el subcapítulo 2.6.

Es importante conocer todos estos procesos para la obtención de curvas de capacidad, y usar con seguridad un modelo para los análisis, sabiendo los defectos, virtudes y ventajas que se tendrá en el resultado final.

CAPÍTULO 3

MATRICES DE RIGIDEZ PARA ELEMENTOS CON DAÑO

3.1 INTRODUCCIÓN

En estructuras de acero que son generalmente elementos de una sola sección constante, cuando se plastifican secciones se puede tener dos o tres diferentes rigideces en un elemento, si se trabaja con elementos de hormigón armado con secciones de diferentes armaduras, cuando se plastifican secciones se puede tener cinco diferentes rigideces en un elemento. A continuación se presentan varios modelos para obtener la matriz de rigidez de estos elementos y se da la propuesta para obtener estas matrices con la **Matriz de rigidez condensada en coordenadas reducidas** (o llamado método de dovelas en otros artículos del autor) hasta para 5 diferentes rigideces en un elemento, dado que no hay otras propuestas para este tipo de elementos.

También se da una propuesta para trabajar con la zona de resistencia de momentos residuales en el modelo momento rotación ASCE 41, partiendo del análisis estructural.

3.1.1 MATRICES DE RIGIDEZ Y DE TRANSFORMACIÓN PARA ELEMENTOS NO PLASTIFICADOS SIMPLES

A continuación se muestra la manera para pasar matrices de rigidez de un elemento entre diferentes sistemas de coordenadas, Cervera y Blanco (2002).

La Matriz de rigidez en coordenadas reducidas del elemento de la figura 3.1, es:

$$k_1 = \begin{bmatrix} 4EI/L & 2EI/L & 0 \\ 2EI/L & 4EI/L & 0 \\ 0 & 0 & EA/L \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dónde:

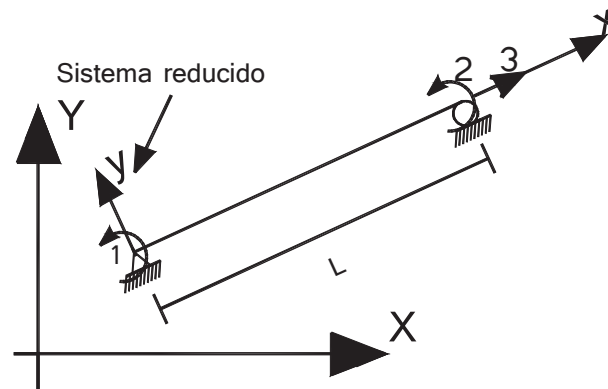
E = (módulo de Young.

I = Momento de inercia.

L = Largo de elemento

A = Área de la sección.

FIGURA 3.1 ELEMENTO EN SISTEMA DE COORDENADAS REDUCIDAS DE ELEMENTO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Para llevar este elemento a uno con seis grados de libertad con coordenadas locales se debe utilizar la siguiente expresión:

$$k_2 = T_{1-2}^T * k_1 * T_{1-2} \quad (3.2)$$

Dónde:

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & 1 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Finalmente para obtener las matrices de los elementos en coordenadas globales \$k_3\$, usamos la siguiente expresión:

$$k_3 = T_{2-3}^T * k_2 * T_{2-3} \quad (3.4)$$

Dónde:

$$T_{2-3} = \begin{bmatrix} \text{cosen} & \text{sen} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen} & \text{cosen} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{cosen} & \text{sen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen} & \text{cosen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

sen y *cosen* = son el seno y coseno del ángulo de inclinación en coordenadas globales del elemento.

Luego se ensambla la matriz de rigidez de toda la estructura, sumando aportaciones para cada grado de libertad desde la matriz k_3 .

Se utiliza bucles usando la orden *for*, en lenguaje m de Matlab se utilizó el siguiente lazo para obtener la matriz de la toda la estructura K :

```
for i = 1: Cantidad_de_Miembros
    lon = L(i);

    for j = 1:6
        J = VC(i,j);
        if J == 0
            continue
        end
        for m = 1:6
            mm = VC(i,m);
            if mm == 0
                continue
            end
            if J == 1 && mm == 1
                K(J,mm) = k3(j,m);
                K(ngl,ngl) = 0;
            else
```

```

                                K(J, mm) = K(J, mm) + k3(j, m);
                                end
                        end
                end
end

```

Dónde:

ngl = Es el número del grado de libertad

VC = Es la matriz de colocación que contiene los grados de libertad por elemento, ver Capítulo 1.

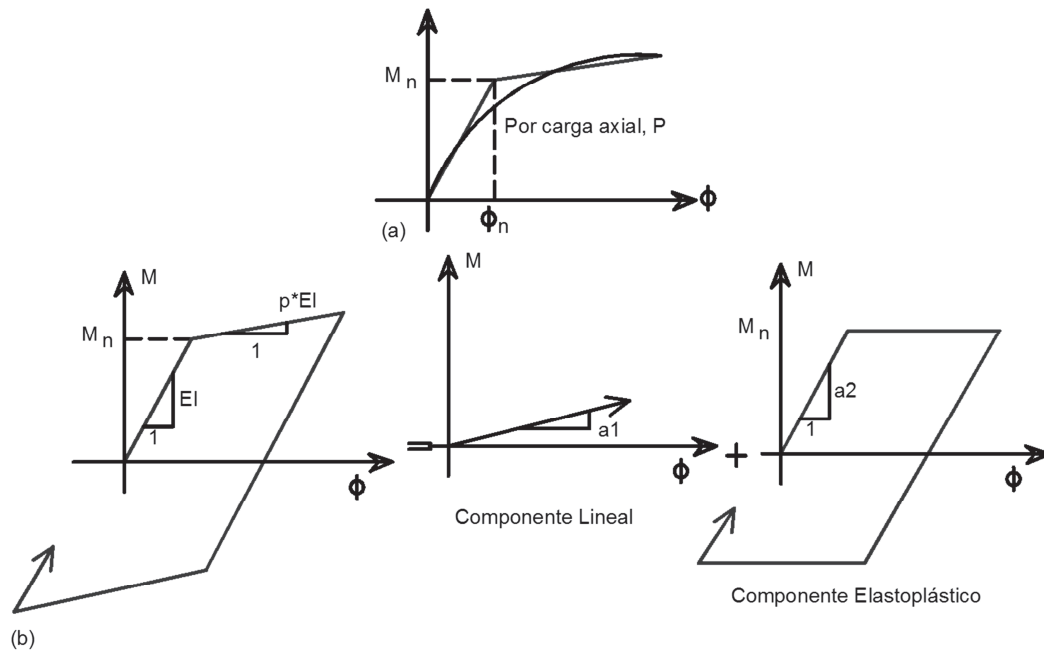
3.2 MODELOS PARA ELEMENTOS EQUIVALENTES CON SECCIONES DE DIFERENTES RIGIDECES (SECCIONES CON DAÑO)

3.2.1 MÉTODO BILINEAL DE INTERACCIÓN CARGA AXIAL – MOMENTO

En este método el diagrama momento curvatura es formado de dos componentes imaginarios, Ger y Cheng (2012), como se muestra en la figura 3.2.

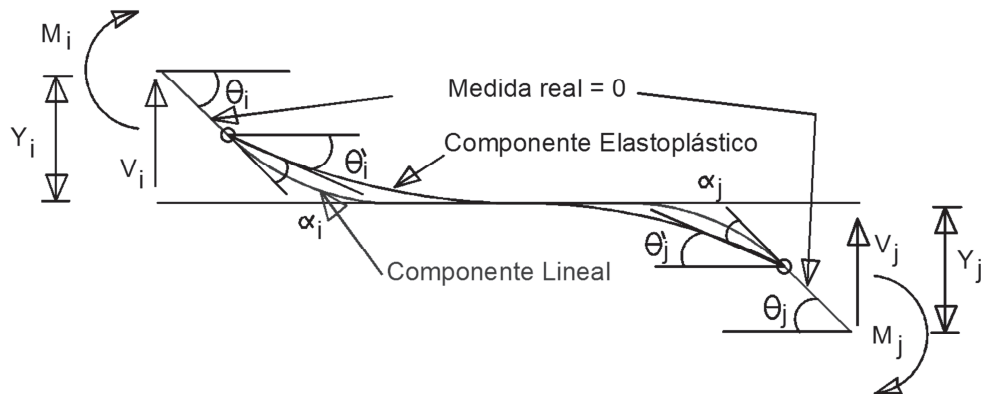
En esta figura, las pendientes de los componentes lineales y elastoplástico son $a_1 = p * EI$, $a_2 = q * EI$, y $p + q = 1$, donde p es la fracción de la rigidez flexural de la componente lineal y q es la fracción de la rigidez flexural de la componente elastoplástica. La pendiente de post – fluencia de la componente elastoplástica es igual a cero.

FIGURA 3.2 (a) MODELO MOMENTO CURVATURA BILINEAL; (b) COMPONENTE LINEAL Y ELASTOPLÁSTICO



Fuente: Ger y Cheng (2012).

FIGURA 3.3 MIEMBRO NO LINEAL



Fuente: Ger y Cheng (2012).

Un miembro no lineal tiene dos componentes, el lineal y el elastoplástico. θ_i y θ_j son las rotaciones totales en los extremos del miembro; α_i y α_j son la rotación plástica en cada extremo del componente elastoplástico. La matriz de rigidez en cualquier ciclo incremental puede ser formulada de acuerdo al estado de fluencia. El estado de fluencia puede ser una de las siguientes cuatro condiciones: (a)

ambos extremos lineales, (b) extremo i no lineal y extremo j lineal, (c) extremo i lineal y extremo j no lineal, y (d) ambos extremos no lineales.

La matriz de rigidez para la condición (a) es:

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4EI/L & 2EI/L \\ 2EI/L & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

La matriz de rigidez para la condición (b) es:

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} pa & pb \\ pb & pa + qe \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

La matriz de rigidez para la condición (c) es:

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} pa + qe & pb \\ pb & pa \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

La matriz de rigidez para la condición (d) es:

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{Bmatrix} = p \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

Dónde:

$$a = 4EI/L$$

$$b = 2EI/L$$

$$e = 3EI/L$$

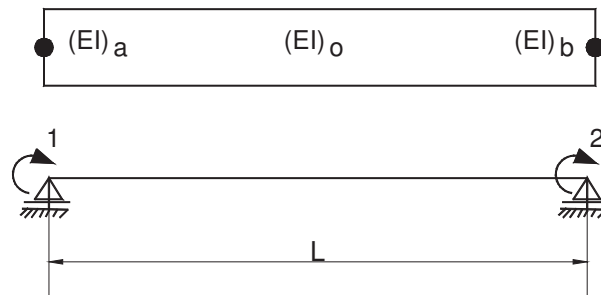
Como se muestra en la figura 3.3, la capacidad del momento nominal, M_n , es usado para conocer la condición de fluencia en el extremo del miembro. Durante el análisis pushover monotónico, la capacidad del momento nominal es influenciada por la magnitud de la carga axial.

Este método nos da la limitante de que todas las secciones iniciales a lo largo del elemento deben ser iguales.

3.2.2 MODELO DE GIBERSON

En el modelo de Giberson de 1969 se tiene un elemento con tres diferentes rigideces a flexión EI_a, EI_o y EI_b y una rigidez axial igual a EA concentradas puntualmente como se muestra a continuación:

FIGURA 3.4 MODELO DE PLASTICIDAD CONCENTRADA DE GIBERSON



Fuente: Aguiar (2012)

La matriz de flexibilidad para este modelo es:

$$F = \frac{L}{6EI_o} \begin{bmatrix} (1 + S_a) & -1 & 0 \\ -1 & (1 + S_b) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_o}{EA} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$S_a = \frac{EI_o}{EI_a}; S_b = \frac{EI_o}{EI_b}$$

Se obtiene la matriz de rigidez como la inversa de la de Flexibilidad:

$$k_1 = F^{-1} \quad (3.11)$$

$$k_1 = \begin{bmatrix} \frac{(6 * EI_a * (EI_b + EI_o)) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}{(6 * EI_a * EI_b) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}, & \frac{(6 * EI_a * EI_b) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}{(6 * EI_b * (EI_a + EI_o)) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}, & 0 \\ \frac{(6 * EI_a * EI_b) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}{(6 * EI_b * (EI_a + EI_o)) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}, & \frac{(6 * EI_b * (EI_a + EI_o)) / (lon * (EI_a + EI_b + EI_o))}{EA / lon}, & 0 \\ 0, & 0, & EA / lon \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Además de la simplicidad de este método se tiene la ventaja que las rigideces no están acopladas a un nivel tal, que si una rigidez es cero, como cuando se

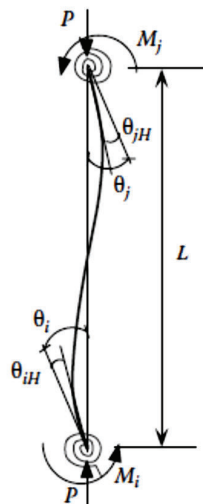
produce una rótula plástica, la matriz entera se convierte en matriz de ceros. Por esta razón este modelo es usado en el proceso de pushover para la obtención de matrices de rigidez cuando ocurren rótulas, como se indica en el subcapítulo 3.4.

En el subcapítulo 3.2.8 se muestra una comparación de resultados usando este método.

3.2.3 MÉTODO LONGITUD DE LA RÓTULA PLÁSTICA

En este método la matriz de rigidez de una columna es formulada por la combinación de un elemento de columna elástica y un elemento de resorte rotacional conectado en cada extremo, como se ve en la figura.

FIGURA 3.5 COMBINACIÓN DE COLUMNA ELÁSTICA Y RESORTES ROTACIONALES



Fuente: Ger y Cheng (2012)

Los resortes rotacionales y la rigidez elástica a flexión de la columna se comportan como dos resortes en paralelo. La rigidez del resorte rotacional es gobernado por la curva momento – rotación de una rótula con longitud L_p .

La matriz de rigidez del miembro puede ser derivada usando la teoría modificada

de la pendiente – deflexión:

$$\Delta M_i = \frac{EI}{L} [4(\Delta\theta_i - \Delta\theta_{i_H}) + 2(\Delta\theta_j - \Delta\theta_{j_H})] \quad (3.13)$$

$$\Delta M_j = \frac{EI}{L} [4(\Delta\theta_i - \Delta\theta_{i_H}) + 4(\Delta\theta_j - \Delta\theta_{j_H})] \quad (3.14)$$

Dónde:

$$\Delta\theta_{i_H} = \frac{\Delta M_i}{R_i}, \quad \text{y} \quad \Delta\theta_{j_H} = \frac{\Delta M_j}{R_j} \quad (3.15)$$

$\Delta\theta_{i_H}$ y $\Delta\theta_{j_H}$ son las rotaciones plásticas en los extremos del elemento de la figura 3.5. R_i y R_j son la rigidez inelástica de la articulación plástica en los extremos del elemento de la figura 3.5, y pueden ser obtenidos desde las pendientes de la curva $M - \theta_H$ correspondientes a los extremos del elemento de la figura 3.5. Resolviendo la Ec. (3.13) y Ec.(3.14) para M_i y M_j se obtiene:

$$\Delta M_i = \frac{EI}{L} [S_{ii} * \Delta\theta_i + S_{ij} * \Delta\theta_j] \quad (3.16)$$

$$\Delta M_j = \frac{EI}{L} [S_{ij} * \Delta\theta_i + S_{jj} * \Delta\theta_j] \quad (3.17)$$

O,

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} \\ S_{ij} & S_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta\theta_j \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

Donde,

$$S_{ii} = \left[4 + \frac{12EI}{LR_j} \right] / R^* \quad (3.19)$$

$$S_{jj} = \left[4 + \frac{12EI}{LR_i} \right] / R^* \quad (3.20)$$

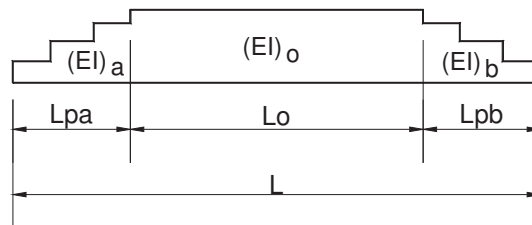
$$S_{ij} = \frac{2}{R^*} \quad (3.21)$$

$$R^* = \left(1 + \frac{4EI}{LR_i} \right) \left(1 + \frac{4EI}{LR_j} \right) - \left(\frac{EI}{L} \right)^2 \left(\frac{4}{R_i R_j} \right) \quad (3.22)$$

Este método nos da la limitante de que todas las secciones iniciales a lo largo del elemento deben ser iguales.

3.2.4 MODELO DE PLASTICIDAD EXTENDIDA CON RIGIDEZ CONSTANTE ESCALONADA

FIGURA 3.6 MODELO DE VIGA DE PLASTICIDAD EXTENDIDA



Fuente: Aguiar (2003).

A través de un diagrama de masas se puede obtener la matriz de flexibilidad para el caso de vigas como la figura 3.7, con rigideces constantes escalonadas, como se propone en Aguiar 2003.

El diagrama de masas es el resultado de unir los puntos $1/(EI)_x$. Si tomamos un diferencial $\frac{dx}{(EI)_x}$, tendremos el área:

$$W = \int_0^L \frac{dx}{(EI)_x} \quad (3.23)$$

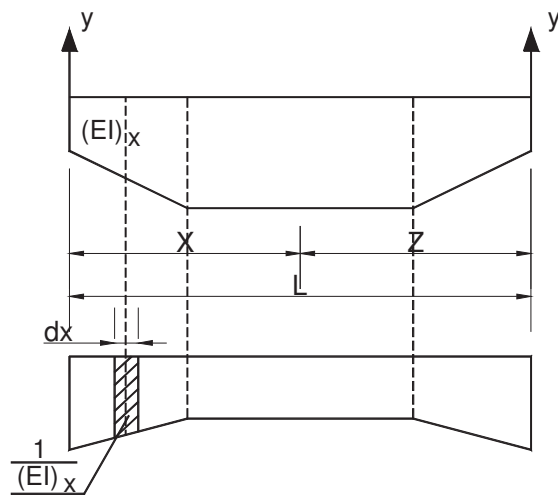
Y las inercias del diagrama de masas con respecto al eje Y, Y' y YY' de la figura 3.7 serán:

$$I_y = \int_0^L X^2 \frac{dx}{(EI)_x} \quad (3.24)$$

$$I_{y'} = \int_0^L Z^2 \frac{dx}{(EI)_x} \quad (3.25)$$

$$I_{yy'} = \int_0^L XZ \frac{dx}{(EI)_x} \quad (3.26)$$

FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE MASAS ELÁSTICAS



Fuente: Aguiar (2003).

Si la matriz de flexibilidad es:

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Y,

$$f_{ij} = \int_0^L \frac{M_i M_j}{(EI)_x} dx + \int_0^L \frac{\beta V_i V_j}{(GI)_x} dx + \int_0^L \frac{N_i N_j}{(EA)_x} dx \quad (3.28)$$

Siendo \$M\$ los momentos a flexión, \$V\$ los cortantes, \$N\$ las cargas axiales, \$(EI)\$ la rigidez a flexión, \$(GA)\$ rigidez a corte, \$(EA)\$ rigidez axial y \$\beta\$ el coeficiente de forma.

Si se utiliza el teorema de trabajo virtual y utilizando los parámetros del diagrama de masas se tiene:

$$M_1 = \frac{L - X}{L} \quad (3.29)$$

$$M_2 = \frac{X}{L} \quad (3.30)$$

$$V_1 = \frac{1}{L} \quad (3.31)$$

$$V_2 = \frac{1}{L} \quad (3.32)$$

$$N_1 = N_2 = 0 \quad (3.33)$$

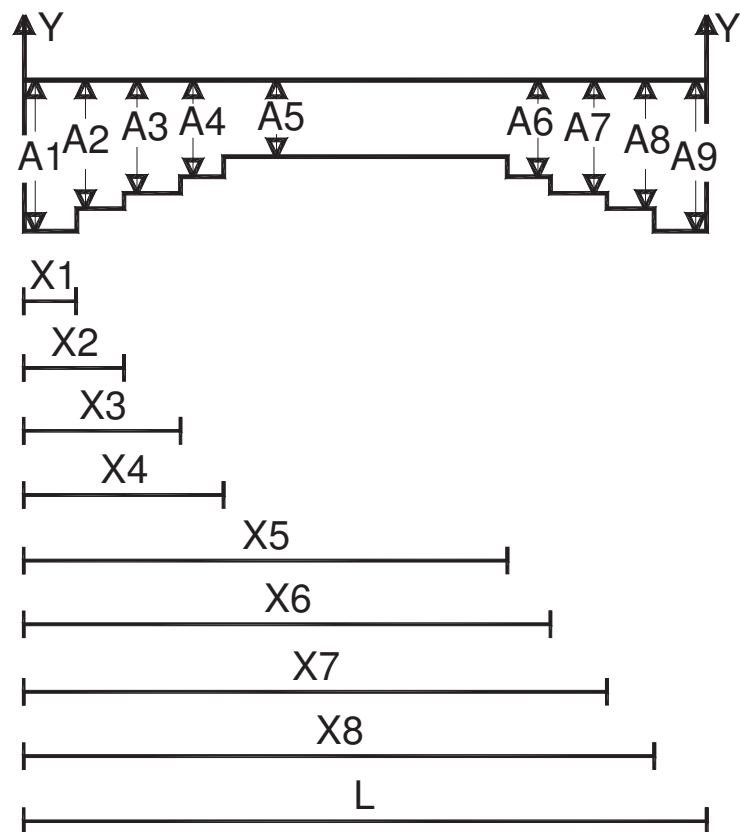
Reemplazando estas ecuaciones en (3.29), luego en (3.27) y sustituyendo términos con las ecuaciones (3.24), (3.25) y (3.26), despreciando las deformaciones por corte, tendremos:

$$f = \begin{bmatrix} \frac{I_{y'}}{L^2} & \frac{I_{yy'}}{L^2} \\ \frac{I_{yy'}}{L^2} & \frac{I_y}{L^2} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Una demostración más detallada de la obtención de la matriz de flexibilidad se ve en la referencia Aguiar 2003.

Para el algoritmo de cálculo se detallan los siguientes términos de un diagrama de masas elásticas:

FIGURA 3.8 DIAGRAMA DE MASAS ELÁSTICAS PARA PROGRAMA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

$n = 4$; Número de Escalones

$$A1 = \frac{1}{EIa} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIa} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X1 = i \frac{Lpa}{n}; i = 1 \quad (3.35)$$

$$A2 = \frac{1}{EIa} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIa} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X2 = i \frac{Lpa}{n}; i = 2 \quad (3.36)$$

$$A3 = \frac{1}{EIa} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIa} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X3 = i \frac{Lpa}{n}; i = 3 \quad (3.37)$$

$$A4 = \frac{1}{EIa} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIa} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X4 = i \frac{Lpa}{n}; i = 4 \quad (3.38)$$

$$A5 = \frac{1}{EIo}; X5 = Lpa + Lo \quad (3.39)$$

$$A6 = \frac{1}{EIb} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIb} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X6 = Lpa + Lo - i \frac{Lpb}{n}; i = 1 \quad (3.40)$$

$$A7 = \frac{1}{EIb} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIb} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X7 = Lpa + Lo - i \frac{Lpb}{n}; i = 2 \quad (3.41)$$

$$A8 = \frac{1}{EIb} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIb} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X8 = Lpa + Lo - i \frac{Lpb}{n}; i = 3 \quad (3.42)$$

$$A9 = \frac{1}{EIb} - (i-1) * \frac{\left(\frac{1}{EIb} - \frac{1}{EIo}\right)}{n}; X9 = Lpa + Lo - i \frac{Lpb}{n}; i = 4 \quad (3.43)$$

$$W = A1 * X1 + \sum_{j=2}^{2*n+1} A_i * (X_j - X_{j-1}) \quad (3.44)$$

$$Iy = \frac{A1 * X1^3}{3} + \sum_{j=2}^{2*n+1} \frac{A_i * (X_j^3 - X_{j-1}^3)}{3} \quad (3.45)$$

$$I'y = \frac{A1 * (L - X1)^3}{3} + \sum_{j=2}^{2*n+1} \frac{A_i * ((L - X_{j-1})^3 - (L - X_j)^3)}{3} \quad (3.46)$$

De estos términos se puede obtener la matriz de flexibilidad:

$$F = \begin{bmatrix} I'y/L^2 & \frac{Iy + I'y - W}{2} \\ \frac{Iy + I'y - W}{2} & Iy/L^2 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$k1 = F^{-1} \quad (3.48)$$

El programa en Matlab para este modelo es el indicado en el Anexo No3, A3.4.

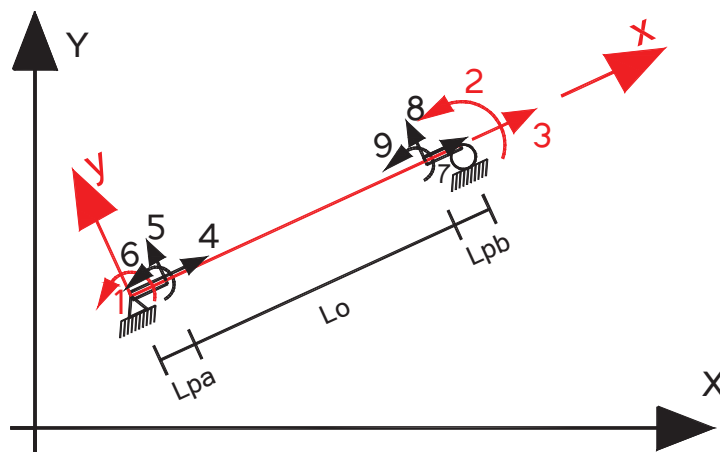
En el subcapítulo 3.2.8 se muestra una comparación de resultados usando este método.

3.2.5 MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA EN COORDENADAS REDUCIDAS (MÉTODO DE DOVELAS) (NUEVA PROPUESTA)

Se da el siguiente modelo de matriz para elementos con tres rigideces, figura 3.9, partiendo de esta posteriormente en los dos siguientes subcapítulos se obtienen matrices sin despreciar deformaciones por corte y para elementos con cinco diferentes rigideces, lo cual es útil especialmente para elementos de hormigón armado.

Si no suponemos que la plasticidad estará concentrada en puntos específicos del elemento si no en longitudes L_p (Longitud de la rótula plástica) se puede determinar la matriz de rigidez básica de un elemento k_1 en un sistema de coordenadas reducido, de la siguiente manera:

FIGURA 3.9 ELEMENTO EN COORDENADAS DE SISTEMA REDUCIDO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

- i) Trabajamos solo en coordenadas reducidas $x - y$, con tres elementos L_{pa} , L_o y L_{pb} de diferentes rigideces a flexión E_{Ia} , E_{Io} y E_{Ib} , y diferentes

rigideces axiales EAa, EAo y EAb. En la matriz VC (Ver Capítulo 1) se tiene los grados de libertad por elemento.

$$L = [Lpa \ Lo \ Lpb]; \quad (3.49)$$

$$EI = [EIa \ EIo \ EIb]; \quad (3.50)$$

$$EA = [EAa \ EAo \ EAb]; \quad (3.51)$$

$$VC = [0 \ 0 \ 1 \ 4 \ 5 \ 6 \\ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \\ 7 \ 8 \ 9 \ 3 \ 0 \ 2];$$

$$ngl = \max(\max(VC));$$

$$\text{sen} = 0; \text{cosen} = 1;$$

$$mbr = \text{length}(L);$$

- ii) Se obtiene la matriz de rigidez en sistema de coordenadas reducidas \mathbf{k}_1 de cada elemento, se le multiplica por matrices de transformación \mathbf{T}_{1-2} para llevar al elemento a coordenadas locales $\mathbf{k}_2 = \mathbf{T}_{1-2}^T * \mathbf{k}_1 * \mathbf{T}_{1-2}$ y a esta por las matrices \mathbf{T}_{2-3} para llevar al elemento a coordenadas generalizadas $\mathbf{k}_3 = \mathbf{T}_{2-3}^T * \mathbf{k}_2 * \mathbf{T}_{2-3}$, ver Sección 3.1.1.
- iii) Se ensambla la matriz de rigidez de la estructura con la matriz de colocación VC.

Se representa ii) y iii) a través de bucles de programación *for* en lenguaje M, mostrado en el subcapítulo 3.1.1 en el proceso para obtener la matriz de rigidez de la estructura SS o llamada K en el subcapítulo mencionado:

- iv.i) Si trabajamos con la matriz total de la estructura:

$$Q = SS * q \quad (3.52)$$

$$q = SS^{-1} * Q \quad (3.53)$$

$$\begin{Bmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \\ q4 \\ q5 \\ q6 \\ q7 \\ q8 \\ q9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Sinv11 & \dots & Sinv19 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Sinv91 & \dots & Sinv99 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q1 \\ Q2 \\ Q3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.54)$$

Creamos la matriz $Sinv=SS^{-1}$ y escogemos las tres primeras filas y columnas puesto que el resto de cargas del vector Q son cero, además estas filas y columnas escogidas son las que corresponden a los grados de libertad que necesitamos. Luego volvemos a sacar su inversa teniendo:

$$k_1 = \begin{bmatrix} Sinv11 & Sinv12 & Sinv13 \\ Sinv21 & Sinv22 & Sinv23 \\ Sinv31 & Sinv32 & Sinv33 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.55)$$

- iv.ii) Se puede obtener el mismo resultado dividiendo a la matriz SS separando en una submatriz Kn los resultados de los grados de libertad que necesitamos y procediendo de la siguiente manera:

$$SS = \begin{bmatrix} Kn & Bn \\ Bnt & Ke \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$\begin{Bmatrix} Qn \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Kn & Bn \\ Bnt & Ke \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} qn \\ qe \end{Bmatrix} \quad (3.57)$$

Despejando y simplificando Qn:

$$Qn = [Kn - Bn * Ke^{-1} * Bnt] * qn \quad (3.58)$$

Por lo tanto la matriz en coordenadas simplificadas es:

$$k_1 = Kn - Bn * Ke^{-1} * Bn \quad (3.59)$$

v) El resultado que se puede programar será:

$$\begin{aligned}
 EC1 &= \frac{2 E I a E I b E I o (EC5 + EC11 + EC10 + EC8 + 6 E I a E I b L o L p a L p b + EC9 + EC3 + EC6 + EC7 + EC4)}{EC2} \\
 EC12 &= \frac{4 E I a E I b E I o (EC5 + EC11 + 3 E I a E I o L o^2 L p b + 3 E I a E I b L o L p a^2 + 6 E I a E I o L o L p a L p b + EC9 + EC3 + 3 E I a E I o L p a^2 L p b + EC7 + EC4)}{EC2} \\
 EC13 &= \frac{4 E I a E I b E I o (EC5 + EC10 + 3 E I b E I o L o^2 L p a + 3 E I a E I b L o L p b^2 + 6 E I b E I o L o L p a L p b + EC9 + EC3 + 3 E I b E I o L p b^2 L p a + EC8 + EC3 + EC6 + EC4)}{EC2} \\
 EC14 &= \frac{E A a E A b E A o}{E A a E A b L o + E A a E A o L p b + E A b E A o L p a}
 \end{aligned}$$

$$k_1 = \begin{bmatrix} EC12 & EC1 & 0 \\ EC1 & EC13 & 0 \\ 0 & 0 & EC14 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Dónde:

$$\begin{aligned}
 EC2 &= E I a^2 E I b^2 L o^4 + 4 E I a^2 E I b E I o L o^3 L p b + 6 E I a^2 E I b E I o L o^2 L p b^2 + 4 E I a^2 E I b E I o L o L p b^3 + E I a^2 E I o^2 L p b^4 + 4 E I a E I b^2 E I o L o^3 L p a \\
 &+ 6 E I a E I b^2 E I o L o^3 L p a^2 + 4 E I a E I b^2 E I o L o L p a^2 + 12 E I a E I b E I o^2 L o^2 L p a L p b + 12 E I a E I b E I o^2 L o L p a^2 L p b \\
 &+ 12 E I a E I b E I o^2 L o L p a L p b^2 + 4 E I a E I b E I o^2 L p a^3 L p b + 6 E I a E I b E I o^2 L p a^2 L p b^2 + 4 E I a E I b E I o^2 L p a L p b^3 + E I b^2 E I o^2 L p a^4 \\
 EC3 &= E I b E I o L p a^3 \\
 EC4 &= E I a E I o L p b^3 \\
 EC5 &= E I a E I b L o^3 \\
 EC6 &= 3 E I b E I o L p a^2 L p b \\
 EC7 &= 3 E I a E I o L p a L p b^2 \\
 EC8 &= 3 E I b E I o L o L p a^2 \\
 EC9 &= 3 E I a E I o L o L p b^2 \\
 EC10 &= 3 E I a E I b L o^2 L p b \\
 EC11 &= 3 E I a E I b L o^2 L p a
 \end{aligned}$$

3.2.6 MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA EN COORDENADAS REDUCIDAS (MÉTODO DE DOVELAS) INCLUYENDO DEFORMACIÓN POR CORTE

De igual manera como se vio en el subcapítulo 3.2.5 podemos trabajar incluyendo la deformación por corte, y con un proceso parecido a ese se puede obtener una matriz k_1 .

Los coeficientes por deformación por corte son como se los muestra en la matriz siguiente, la misma que deberá ser usada en el paso (ii) del subcapítulo 3.2.5:

$$k_1 = \begin{bmatrix} 2 * EI(i)/L(i) * kv(i) & 2 * EI(i)/L(i) * av(i) & 0 \\ 2 * EI(i)/L(i) * av(i) & 2 * EI(i)/L(i) * kv(i) & 0 \\ 0 & 0 & EA(i)/L(i) \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$beta = 6 * \frac{EI}{\frac{A}{f} * G * L^2},$$

$$G = \frac{Ey}{2 * (1 + miu)},$$

$$miu = 0.2,$$

f = Factor de forma de la sección,

A = Área de la sección, y

L = Es la longitud de la división del elemento,

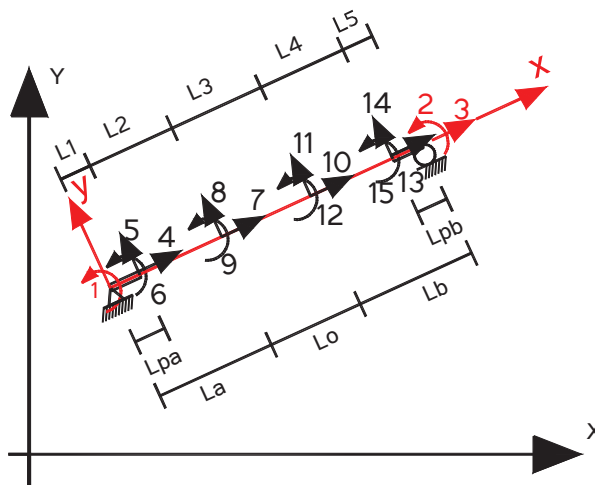
i = Es número del sub-elemento dividido,

Debido al gran tamaño de la matriz k_1 de aproximadamente 200 términos se expondrá el proceso como algoritmo de Matlab en el Anexo No2, A3.3 programa ***K1_eqcorte2***, pero se debe programar solo el resultado paramétrico de la matriz debido a que en este proceso existe una división y cuando las longitudes plásticas son cero puede existir en ciertos casos singularidad. Este proceso indicado en el Anexo No2, A3.3 sirvió como base para obtener la matriz paramétrica definitiva del subcapítulo 3.2.7.

3.2.7 MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA EN COORDENADAS REDUCIDAS (MÉTODO DE DOVELAS) INCLUYENDO DEFORMACIÓN POR CORTE PARA ELEMENTOS CON CINCO RIGIDECES

Se procede de la misma manera que en el subcapítulo 3.2.5 y 3.2.6 para el elemento de la figura 3.10 con cinco rigideces. El programa para utilizar este método es una gran matriz con muchos términos acoplados, se la colocó en el Anexo No2, A2.1, programa *K1_eqcorte4*.

FIGURA 3.10 ELEMENTO EN COORDENADAS DE SISTEMA REDUCIDO

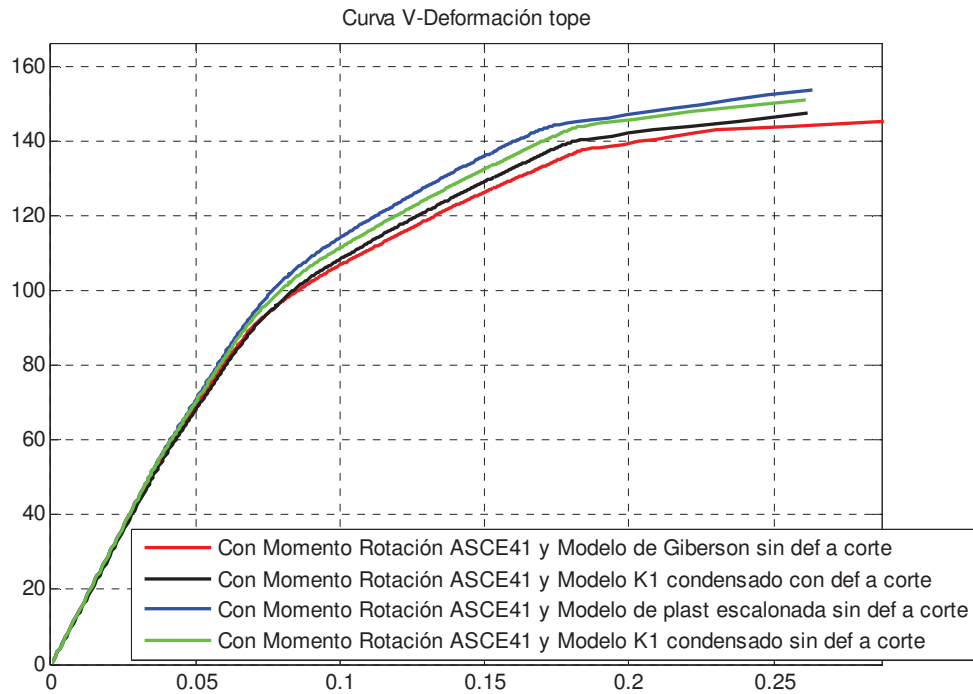


Fuente: Realizado por E. David Mora.

3.2.8 COMPARACIÓN DE DIAGRAMA MOMENTO ROTACIÓN ASCE 41 CON MÉTODO DE GIBERSON, MÉTODO DE DOVELAS SIN Y CON DEFORMACIONES A CORTE Y MODELO DE PLASTICIDAD EXTENDIDA ESCALONADA

Tomando el mismo edificio del subcapítulo 2.5.4 de este trabajo se obtuvo la Curva de Capacidad con el método de Giberson, matriz k_1 condensada sin y con deformaciones a corte y el modelo de plasticidad extendida escalonada, utilizando para cada sección una curva obtenida por el código ASCE 41 y usando θ_y de este mismo código. A continuación se presentan los resultados del edificio analizado en 2 dimensiones, comparando los resultados:

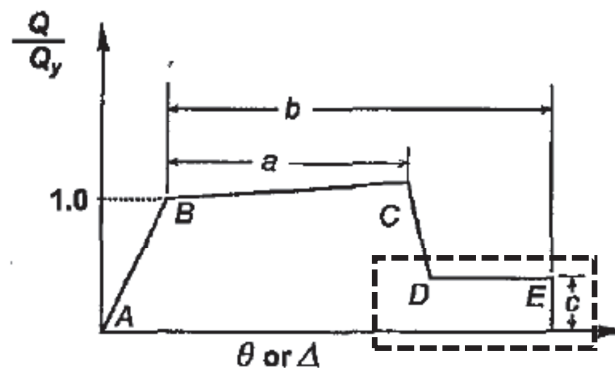
FIGURA 3.11 RESULTADOS DE CURVAS DE CAPACIDAD



Fuente: Realizado por E. David Mora.

3.3 RESISTENCIA RESIDUAL DEL DIAGRAMA MOMENTO ROTACIÓN (NUEVA PROPUESTA)

FIGURA 3.12 CURVA GENERALIZADA FUERZA – DEFORMACIÓN DE COMPONENTES O ELEMENTOS MOSTRANDO LA RESISTENCIA RESIDUAL



Fuente: Realizado por E. David Mora.

La resistencia residual de una sección es la correspondiente al tramo entre el punto D y E del diagrama Momento – Rotación del código ASCE 41 – 13, marcada en el cuadro de la figura 3.12, ésta se da cuando una sección luego de perder su resistencia a cargas laterales en la estructura, aún tiene una reserva de resistencia para cargas gravitacionales, la cual valdrá $c \cdot My$.

Para el cálculo de una sección que esté en éste tramo de la curva, se parte del sistema de coordenadas reducidas k_1 de cada elemento, ver figura 3.13, se le multiplica por matrices de transformación T_{1-2} para llevar al elemento a coordenadas locales $k_2 = T_{1-2}^T * k_1 * T_{1-2}$ y a esta por las matrices T_{2-3} para llevar al elemento a coordenadas generalizadas $k_3 = T_{2-3}^T * k_2 * T_{2-3}$. Después de ensamblar la matriz de rigidez K de la estructura con las matrices k_3 de los elementos, obtenemos todos los desplazamientos de los grados de libertad $q = Q \backslash K$; luego, las fuerzas en cada grado de libertad son la suma de las fuerzas de empotramiento perfecto (vector Q2) por cargas en el elemento y la fuerza $PL = T_{2-3} * PG$ donde, $PG = k_3 * pq$, y pq son los desplazamientos de cada grado de libertad correspondiente a este elemento, entonces las fuerzas totales serán $F = Q2 + PL$.

Para conocer la matriz k_1 que se necesita para obtener Fuerzas resultantes $Fr = c * My$, invertimos el proceso, y así tenemos:

$$F = Q2 + T_{2-3} * PG \quad (3.62)$$

Si:

$$T_{2-3} = \begin{bmatrix} \text{cosen} & \text{sen} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen} & \text{cosen} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{cosen} & \text{sen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen} & \text{cosen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

T_{2-3} : corresponde a una matriz de transformación con grados de libertad del nudo de extremo numerados: primero el grado horizontal, segundo el grado vertical y tercero el giro, y los siguientes tres grados de libertad corresponden al extremo en el otro nudo. “sen” y “cosen” son el seno y coseno del ángulo de orientación del

elemento con respecto a la coordenada global horizontal.

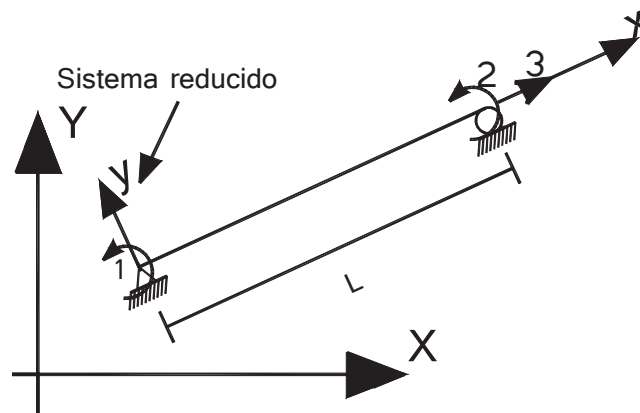
Si queremos tomar en cuenta solo los momentos, tomaremos solo la columna 3 o 6 de la matriz k_3 , propio a giros en el extremo inicial o final correspondientemente, y sabiendo que F es $c * My$ tenemos:

$$c * My = Q2(\text{fila } 3 \text{ o } 6) + k_3(\text{columna } 3 \text{ o } 6) * pq(\text{fila } 3 \text{ o } 6) \quad (3.64)$$

Si la matriz de elemento en coordenadas reducidas es:

$$k_1 = \begin{bmatrix} K1_{11} & K1_{12} & 0 \\ K1_{12} & K1_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K1_{33} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

FIGURA 3.13 ELEMENTO EN SISTEMA DE COORDENADAS REDUCIDAS DE ELEMENTO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Conociendo ya la matriz k_3 que va a estar en función de k_1 , ($k_2 = T_{1-2}^T * k_1 * T_{1-2}$, $k_3 = T_{2-3}^T * k_2 * T_{2-3}$), dependiendo del nudo con que se trabaje podemos despejar de la Ec. (3.64):

Para nudo i.-Para, cuando el nudo inicial de la sección está entre el punto D y E del diagrama Momento – Rotación:

$$\begin{aligned}
K1_{11} = & -(Q2(fila\ 3) * lon - c * My * lon + K1_{12} * cosen * pq(fila\ 2) \\
& - K1_{12} * cosen * pq(fila\ 5) + K1_{12} * lon * pq(fila\ 6) \\
& - K1_{12} * pq(fila\ 1) * sen + K1_{12} * pq(fila\ 4) \\
& * sen)/(cosen * pq(fila\ 2) - cosen * pq(fila\ 5) + lon \\
& * pq(fila\ 3) - pq(fila\ 1) * sen + pq(fila\ 4) * sen)
\end{aligned} \tag{3.66}$$

Para nudo j.-Para, cuando el nudo final de la sección esta entre el punto D y E del diagrama Momento – Rotación:

$$\begin{aligned}
K1_{22} = & -(Q2(fila\ 6) * lon - c * My * lon + K1_{12} * cosen * pq(fila\ 2) \\
& - K1_{12} * cosen * pq(fila\ 5) + K1_{12} * lon * pq(fila\ 3) \\
& - K1_{12} * pq(fila\ 1) * sen + K1_{12} * pq(fila\ 4) \\
& * sen)/(cosen * pq(fila\ 2) - cosen * pq(fila\ 5) + lon \\
& * pq(fila\ 6) - pq(fila\ 1) * sen + pq(fila\ 4) * sen)
\end{aligned} \tag{3.67}$$

Para nudo i.- Si se utiliza el modelo de Giberson se puede despejar Ela en función de Elb y Elo desde la Ec.(3.66) (Ela , Eib son rigideces en extremos de miembros, ver figura 3.4):

$$\begin{aligned}
Ela = & -(Elb * Lpb^2 * Q23 + Elo * Lpb^2 * Q23 - Elb * Lpb^2 * cMy \\
& - Elo * Lpb^2 * cMy)/(12 * Elb * p2 - 12 * Elb * p5 \\
& + 6 * Elo * p2 - 6 * Elo * p5 + Lpb^2 * Q23 - Lpb^2 \\
& * cMy + 6 * Elb * Lpb * p3 + 6 * Elb * Lpb * p6 + 6 \\
& * Elo * Lpb * p3)
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Para nudo j.- O se puede despejar Elb en función de Ela y Elo desde la Ec.(3.67):

$$\begin{aligned}
Elb = & -(Ela * Lpb^2 * Q26 + Elo * Lpb^2 * Q26 - Ela * Lpb^2 * cMy \\
& - Elo * Lpb^2 * cMy)/(12 * Ela * p2 - 12 * Ela * p5 \\
& + 6 * Elo * p2 - 6 * Elo * p5 + Lpb^2 * Q26 - Lpb^2 \\
& * cMy + 6 * Ela * Lpb * p3 + 6 * Ela * Lpb * p6 + 6 \\
& * Elo * Lpb * p6)
\end{aligned} \tag{3.69}$$

Para otros modelos más complejos que el de Giberson despejando Ela o Elb resulta en ecuaciones demasiado complejas de cientos de términos, entonces podemos trabajar la matriz k_1 con Giberson, de la siguiente manera:

Para nudo i.- Para, cuando el nudo inicial de la sección esta entre el punto D y E del diagrama Momento – Rotación:

Como se vio en secciones anteriores, el método del modelo de Giberson es

un método muy aceptable, se parte de este modelo para obtener los términos de la matriz k_1 :

$$k_1 = \begin{bmatrix} K1_{11} & K1_{12} & 0 \\ K1_{21} & K1_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K1_{33} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Del Modelo de Giberson (Sección 3.2.2):

$$K1_{12} = (6 * Ela * Eib) / (lon * (Ela + Eib + Elo)) \quad (3.71)$$

$$K1_{22} = (6 * Eib * (Ela + Elo)) / (lon * (Ela + Eib + Elo)) \quad (3.72)$$

Si $Ela=q*Ei_i$, $Eib=p*Ei_j$ y $Elo=Ei_c$

Por conveniencia de la demostración se toma $Ei_i \approx Ei_j \approx Ei_c \approx EI$

$$K1_{12} = \frac{6 * p * q * EI}{L * (p + q + 1)} \quad (3.73)$$

$$K1_{22} = \frac{6 * p * EI * (q + 1)}{L * (p + q + 1)} = \frac{6 * p * q * EI}{L * (p + q + 1)} * \frac{(q + 1)}{q} \quad (3.74)$$

Por lo tanto:

$$K1_{12} = \frac{q}{(q + 1)} K1_{22} \quad (3.75)$$

Tomando esta matriz k_1 como válida para todo modelo, no solo el de Giberson, y aumentando la deformación a corte en la ecuación (3.72)

$K1_{22} = \frac{6 * Eib * Elo}{L * (Eib + Elo)} * \left(\frac{1}{2} * \frac{2 + beta}{1 + 2 * beta} \right)$, se tiene:

$$k_1 = \begin{bmatrix} (\text{Ver Ec. (3.66)}) & \frac{q}{(q+1)} K1_{22} & 0 \\ \frac{q}{(q+1)} K1_{22} & \frac{6 * Eib * Elo}{L * (Eib + Elo)} * \left(\frac{1}{2} * \frac{2 + beta}{1 + 2 * beta} \right) & 0 \\ 0 & 0 & \text{Rigidez Axial} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

En la resistencia residual que se tendrá en la sección, se contará con el término $K_{1_{12}}$ muy pequeño tendiendo a ser cero, $\frac{q}{(q+1)}K_{1_{22}} \approx 0$.

$$k_1 = \begin{bmatrix} (\text{VerEc. (3.66)}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6*EIb*EIo}{L*(EIb+EIo)} * \left(\frac{1}{2} * \frac{2+beta}{1+2*beta}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \text{Rigidez Axial} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

$beta$ es el coeficiente que considera deformación por corte ver el subcapítulo 3.2.6, $beta = 6 * EI / (A/f * G * L^2)$.

Para nudo j.- Para, cuando el nudo final de la sección esta entre el punto D y E del diagrama Momento – Rotación:

$$k_1 = \begin{bmatrix} \frac{6*EIa*EIo}{L*(EIa+EIo)} * \left(\frac{1}{2} * \frac{2+beta}{1+2*beta}\right) & 0 & 0 \\ 0 & (\text{VerEc. (3.67)}) & 0 \\ 0 & 0 & \text{Rigidez Axial} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

3.4 MATRICES DE TRANSFORMACIÓN DE SISTEMAS DE COORDENADAS PARA ELEMENTOS CON RÓTULAS PLÁSTICAS

3.4.1 COORDENADAS REDUCIDAS

En la figura 3.13 se ve un elemento a flexocompresión en coordenadas reducidas, la matriz de rigidez k_1 , será cualquiera de las obtenidas en este capítulo.

Quando se produce una rótula plástica no se transmitirán momentos, para esto se puede usar matrices de transformación de sistemas de coordenadas y evitar singularidad en las matrices. Los resultados serán los mismos que crear un grado de libertad rotacional como lo indicado en el capítulo 1.

3.4.2 COORDENADAS LOCALES

Sea k_1 la matriz de rigidez en el sistema 1 (sin considerar desplazamientos como cuerpo rígido); k_2 la matriz de rigidez en el sistema 2 (coordenadas locales). La matriz de rigidez k_2 se halla efectuando el siguiente triple producto matricial.

$$k_2 = T_{1-2}^t k_1 T_{1-2} \quad (3.79)$$

La matriz T_{1-2} se halla dibujando las deformadas elementales en el sistema de coordenadas locales y se mide en el sistema uno.

Si se produce una rótula plástica en el nudo i :

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

Si se produce una rótula plástica en el nudo j :

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & 1 & 0 & -1/L & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Si se producen rótulas plásticas en el nudo i y j :

$$T_{1-2} = [-1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad (3.82)$$

3.4.3 COORDENADAS GLOBALES

La matriz de rigidez k_3 en coordenadas globales se encuentra por medio de la matriz de transformación T_{2-3} mediante el siguiente producto matricial.

$$k_3 = T_{2-3}^t k_2 T_{2-3} \quad (3.83)$$

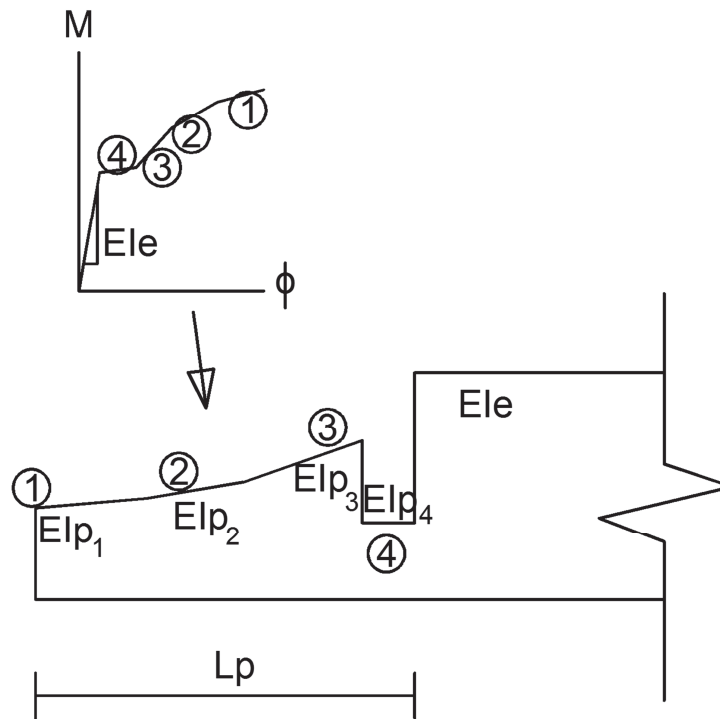
$$T_{2-3} = \begin{bmatrix} \text{cosen} & \text{sen} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen} & \text{cosen} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{cosen} & \text{sen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen} & \text{cosen} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Esta matriz de transformación será la misma que se vio en secciones anteriores,

3.5 CONCLUSIONES PARA MATRICES DE ELEMENTOS PLASTIFICADOS

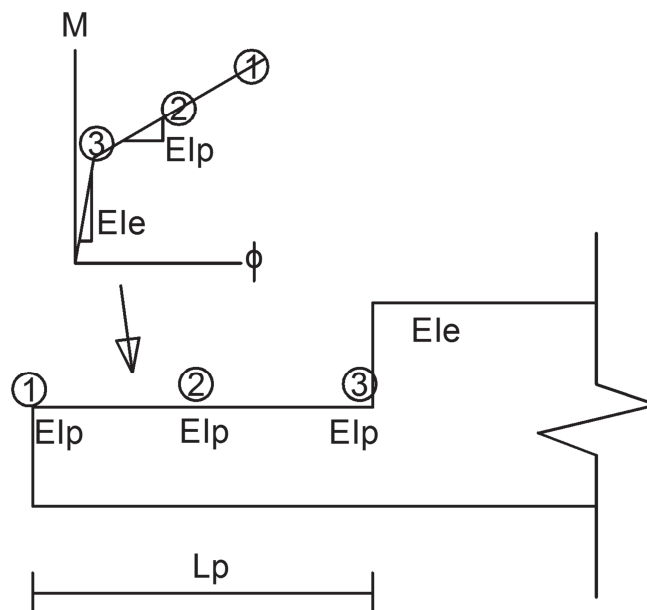
Enfocándonos en el tipo de análisis para la matriz de rigidez en coordenadas locales de un elemento, todos los estudiados aquí son muy aproximados en sus resultados. Aunque sea cierto un cambio no lineal de rigidez a flexión EI en las diferentes secciones de un elemento, desde una sección en rango inelástico hasta una sección en rango elástico (ver figura 2.15 y figura 2.17), usar un modelo real de cambios de rigideces en la rótula plástica como la mostrada en la figura 3.14, será equivalente a usar un modelo como el de la figura 3.15 que es el usado en el modelo de la matriz de elemento k_1 condensada (Método de Dovelas). Este modelo mencionado (Método de Dovelas) además tiene la ventaja de poder usar hasta cinco rigideces variables a lo largo de un elemento, facilidad de modelación de estructuras ya que no se debe modelar elementos divididos, tomar en cuenta deformación por corte, y también tiene la facilidad para trabajar con elementos de secciones de diferentes rigideces axiales.

FIGURA 3.14 VARIACIÓN DE RIGIDEZ REAL EN RÓTULA PLÁSTICA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 3.15 VARIACIÓN DE RIGIDEZ DE MODELO BILINEAL EN RÓTULA PLÁSTICA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE ELEMENTOS DISIPADORES DE ENERGÍA TADAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Cuando una estructura no colapsa luego de un sismo fuerte, y los ocupantes pueden evacuar con seguridad, se considera que ha cumplido satisfactoriamente su función, este es el objetivo de un diseño sismorresistentes, pero esta estructura puede quedar inhabilitada.

Existen sistemas de amortiguamiento suplementarios, que se activarán durante movimientos fuertes, e idealmente absorberán toda la energía de un sismo, dejando a la estructura principal intacta. Entre los diferentes tipos de dispositivos de amortiguamiento suplementario que existen tenemos los disipadores de energía metálicos, estos son los más económicos pero al funcionar por la fluencia de estos, se los deberá reemplazar luego de un sismo fuerte.

4.2 DISIPADORES POR FLUENCIA DEL MATERIAL

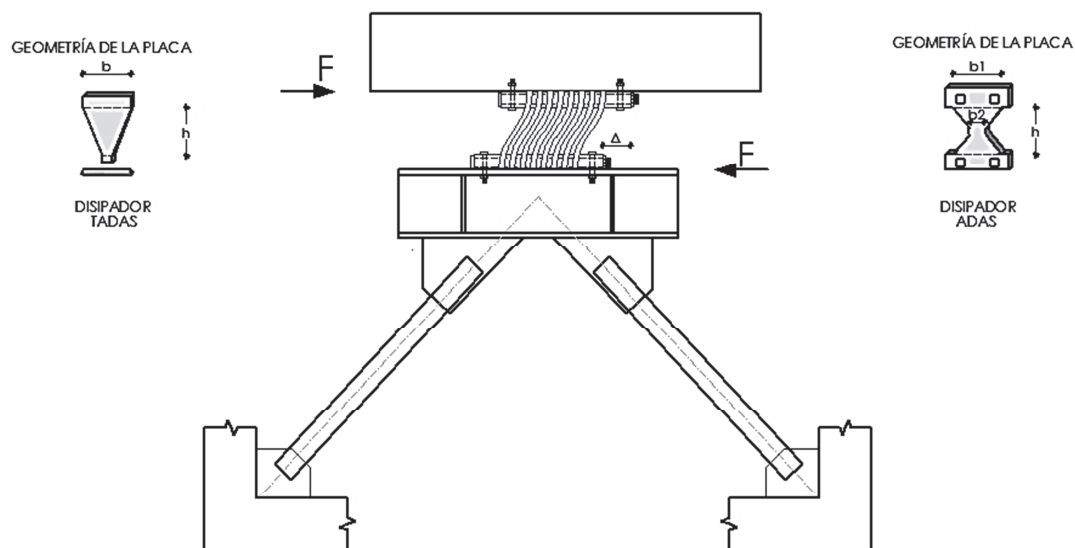
Se presenta un tipo de disipadores de energía por fluencia del material y es el conocido con el nombre de TADAS (Triangular plate added damping and stiffness); su funcionamiento es debido a su curvatura simple.

Estos disipadores pueden ser modelados con comportamiento bilineal. Para este modelo se deducen las ecuaciones que definen los puntos notables del diagrama de histéresis que relaciona el desplazamiento con la fuerza lateral; la deducción ayuda a entender el funcionamiento de los mismos.

4.2.1 INTRODUCCIÓN. DISIPADORES DE ENERGÍA METÁLICOS

En la última década de los años ochenta y noventa, fueron desarrollados dos disipadores de energía por fluencia del material, que tienen un comportamiento histerético bastante similar y son los denominados ADAS (Added damping and stiffness) y TADAS (Triangular plate added damping and stiffness).

FIGURA 4.1 DISIPADORES DE ENERGÍA ADAS Y TADAS SOBRE CONTRAVIENTO CHEVRON



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

Los disipadores ADAS fueron desarrollados en Nueva Zelanda por Tyler en 1978; Boardman, 1983 para soportar tuberías. Posteriormente Roger Scholl con el aporte experimental y analítico de las universidades de Berkeley y de la universidad de Michigan (Bergman y Goel 1987), dieron un soporte más riguroso a estos disipadores.

En la figura 4.1 se presenta una forma clásica de colocar los disipadores, sobre diagonales de acero en forma de "V" invertida (contraviento Chevron) a la izquierda de esta figura se presenta un disipador TADAS, desarrollados por Tsai *et al.* 1993, que tiene la forma de un triángulo cuya base es b , altura h , y espesor de la placa t . A la derecha se indica un disipador ADAS que tiene forma de un

reloj de arena, cuyas dimensiones son b_1 el mayor ancho; b_2 el ancho en la sección más angosta; h la altura. Los primeros disipadores fueron de acero con ductilidades que superan un valor 10. En la parte central de la figura 4.1, se aprecia que existe un corrimiento relativo Δ entre los bordes del disipador, lo que da origen a la disipación de energía, se observa además que las placas están trabajando a flexión y que está conformado por n placas.

Investigaciones recientes sobre disipadores ADAS están centradas en la obtención de otros materiales para su construcción, que tengan mayor ductilidad; uno de esos trabajos es el desarrollado por Heresi (2012) en que trabajan con una aleación de Cobre, Zinc y Aluminio llegando a obtener ductilidades que están entre 25 y 30; valores del límite de fluencia del material f_y entre 1900 y 2650 kg/cm^2 ; módulo de elasticidad $E = 500000 \frac{kg}{cm^2}$. En este trabajo se estudiara disipadores de acero los cuales son hechos generalmente con tipo de acero ASTM A36.

4.2.2 FUNCIONAMIENTO DE DISIPADORES TADAS

En la figura 4.2 se presenta un disipador TADAS, en este caso el lado superior que está en contacto con la viga se encuentra con un empotramiento móvil y el otro lado se encuentra articulado, permitiendo un desplazamiento vertical a lo largo de los agujeros ovalados de la placa que da origen a la disipación de energía. A la derecha de la figura 4.2 se aprecia la geometría de una placa del disipador TADAS.

Las diagonales del contraviento deben ser suficientemente rígidas para asegurar en primer lugar que trabajen en el rango elástico ante un sismo severo y segundo para que el desplazamiento lateral en la parte inferior del disipador sea similar al desplazamiento del entrepiso inferior.

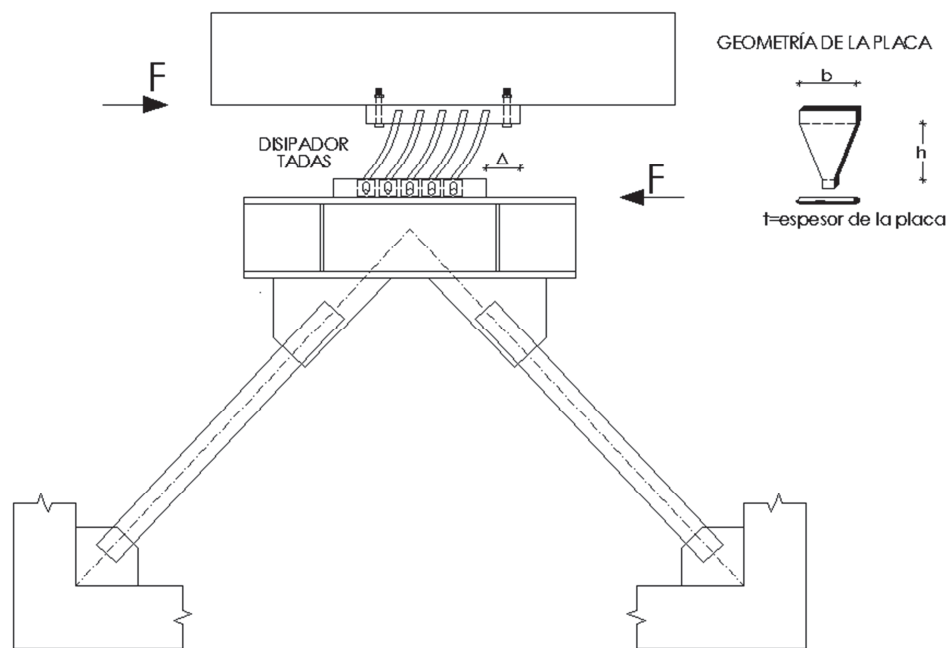
Si se considera una placa del disipador TADAS sometida a una fuerza lateral que genera el desplazamiento relativo Δ , y que la geometría de la placa es en forma

de triángulo, como se observa en la figura 4.3; el diagrama de momentos que generan esas fuerzas en los extremos a lo largo de las placas tiene una forma triangular desde un valor cero en la parte baja hasta un valor máximo M_{max} en sus extremos.

$$M_{max} = F h \quad (4.1)$$

Donde F es la fuerza lateral, h es la altura del dissipador TADAS. Se conoce que la segunda derivada de la deformación transversal es la curvatura y esta a su vez es igual al momento dividido para la rigidez a flexión EI . Siendo E el módulo de elasticidad del material e I el momento de inercia de la sección; con la forma triangular, de la placa se consigue que la curvatura sea igual en toda la placa como se observa a la derecha de la figura 4.3.

FIGURA 4.2 DISIPADORES TADAS SOBRE CONTRAVIENTO CHEVRON

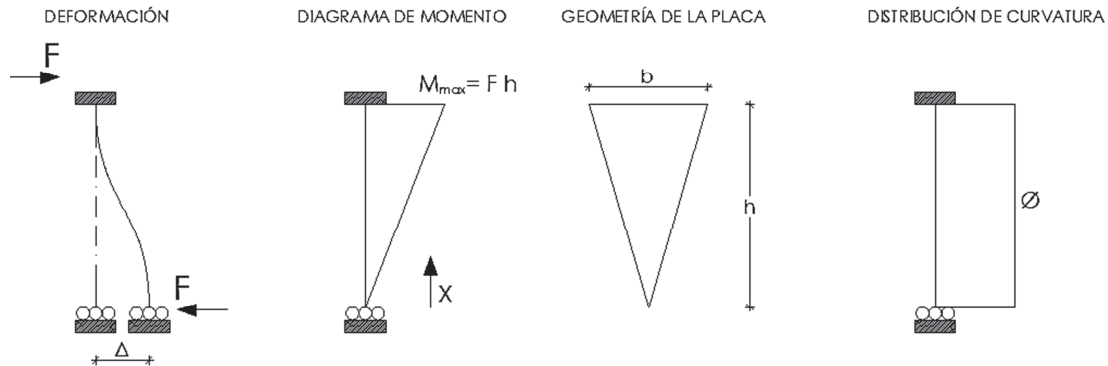


Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

Se destaca que la parte superior e inferior del dissipador TADAS se desplazan lateralmente pero existe un desplazamiento relativo entre las dos partes y para no

tener restricciones en los desplazamientos laterales el borde articulado se levanta.

FIGURA 4.3 DIAGRAMA DE DEFORMACIÓN, MOMENTO, GEOMETRÍA DE PLACA Y DISTRIBUCIÓN DE CURVATURA, PARA UN DISIPADOR TADAS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015)

La diferencia entre el disipador ADAS y el TADAS es que en el primero se tiene doble curvatura, existiendo punto de inflexión y en el TADAS la curvatura es simple.

4.3 PARÁMETROS ELÁSTICOS DEL DISIPADOR TADAS

En el presente subcapítulo se deducen las ecuaciones para el cálculo de la fuerza y desplazamiento de fluencia y la rigidez elástica a partir de una placa de forma triangular del disipador TADAS.

4.3.1 CÁLCULO DE LA CURVATURA DEL DISIPADOR TADAS

Las ecuaciones que definen la variación de momentos $M(x)$ y del ancho de la placa $b(x)$, considerando que x se mide a partir del extremo inferior de la placa, son:

$$M_{(x)} = \frac{M_{max} x}{h} \quad (4.2)$$

$$b_{(x)} = \frac{b x}{h} \quad (4.3)$$

El significado de las variables indicadas en las ecuaciones, se presenta en la figura 4.3. Sin embargo se recuerda que b es el ancho mayor de la placa; h es la altura de la placa.

Por otra parte, como se estudio en el capítulo 2, se conoce que la curvatura $\phi_{(x)}$ es igual al momento para la rigidez a flexión, de tal manera que:

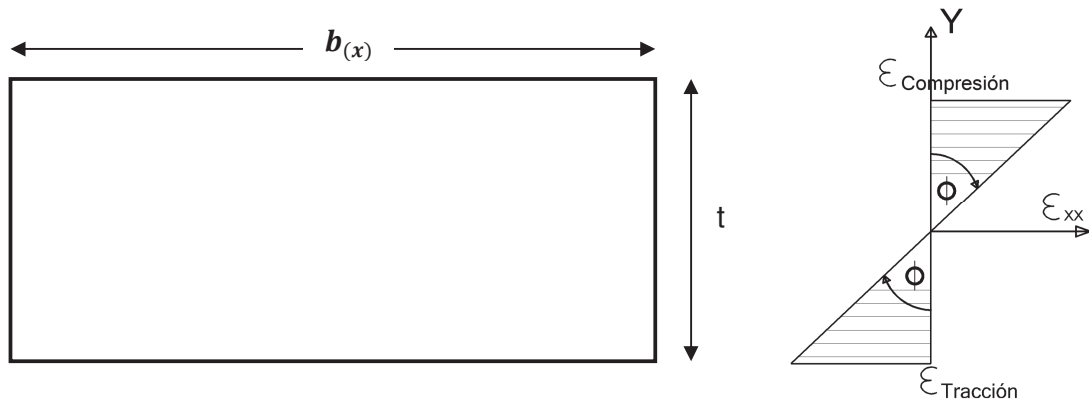
$$\begin{aligned} \phi_{(x)} &= \frac{M_{(x)}}{E I_{(x)}} \\ \phi_{(x)} &= \frac{\frac{M_{max} x}{h}}{E \frac{b x t^3}{h 12}} \\ \phi_{(x)} &= \frac{M_{max}}{E b \frac{t^3}{12}} = cte \end{aligned} \quad (4.4)$$

Nuevamente se ha visto que la curvatura no depende de la variable x .

4.3.2 FUERZA Y DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA DEL DISIPADOR TADAS

Para calcular el momento de fluencia M_y y curvatura de fluencia ϕ_y se presenta en la figura 4.4, una sección rectangular de la placa a la distancia x y el diagrama de deformaciones. Se destaca que el ancho $b(x)$ es mucho mayor que el espesor de la placa t , que viene a ser la altura de la sección transversal, se lo ha dibujado de esa manera para poder visualizar la curvatura.

FIGURA 4.4 DIAGRAMA DE DEFORMACIONES EN UNA SECCIÓN $b_{(x)}$



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Por definición, el punto de fluencia Y se alcanza cuando el acero llega a la fluencia f_y que está asociada a una deformación ϵ_y ; de la figura derecha de 4.4, se tiene:

$$\phi_{y(x)} = \frac{\epsilon_y}{t/2} \quad (4.5)$$

El momento de fluencia vale:

$$M_{y(x)} = \frac{f_y b_{(x)} t^2}{6} \quad (4.6)$$

El punto donde el momento es máximo es en $b_{(x)} = b$

$$M_{y_{max}} = \frac{f_y b t^2}{6} \quad (4.7)$$

Del diagrama de momentos

$$F_y = \frac{M_{y_{max}}}{h} \quad (4.8)$$

Reemplazando

$$F_y = \frac{f_y b t^2}{6 h} \quad (4.9)$$

El desplazamiento de fluencia se halla integrando dos veces la curvatura:

$$\Delta_y = \int \int \phi_{y(x)} dx \quad (4.10)$$

$$\Delta_y = \int \phi_{y(x)} x dx$$

$$\Delta_y = \int_0^h \phi_{y(x)} x dx \quad (4.11)$$

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_y}{t/2} \frac{h^2}{2} = \frac{\varepsilon_y h^2}{t}$$

$$f_y = E \varepsilon_y$$

$$\Delta_y = \frac{f_y h^2}{E t} \quad (4.12)$$

4.3.3 RIGIDEZ ELÁSTICA DEL DISIPADOR TADAS

Finalmente la rigidez elástica K_{DDE} se encuentra dividiendo la fuerza de fluencia para el desplazamiento de fluencia.

$$K_{DDE} = \frac{F_y}{\Delta_y} \quad (4.13)$$

$$K_{DDE} = \frac{E b t^3}{6 h^3} \quad (4.14)$$

4.3.4 PARÁMETROS ELÁSTICOS DE DISIPADOR TADAS

Las ecuaciones deducidas en el presente subcapítulo son para una placa triangular sin considerar el ancho b_i que tienen las placas en la parte inferior, por lo que son aproximadas, pero no influye mayormente esta dimensión por lo que se trabaja con estas ecuaciones, las mismas que fueron presentadas por Tsai *et al.* 1993. En la tabla 4.1 se presenta un resumen de las mismas para el rango elástico.

TABLA 4.1 PARÁMETROS PARA EL INTERVALO ELÁSTICO DEL DISIPADOR TADAS

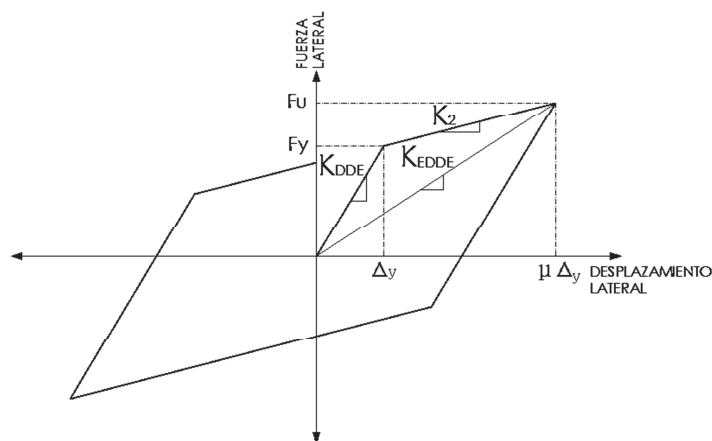
| Parámetro | Ecuación |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Fuerza de fluencia | $F_y = \frac{n f_y b t^2}{6 h}$ |
| Desplazamiento de fluencia | $\Delta_y = \frac{f_y h^2}{E t}$ |
| Rigidez elástica | $K_{DDE} = \frac{n E b t^3}{6 h^3}$ |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

4.4 DIAGRAMA DE HISTÉRESIS BILINEAL

En los subcapítulos anteriores se han deducido ecuaciones para el cálculo de la fuerza de fluencia F_y , del desplazamiento de fluencia Δ_y , y de la rigidez elástica K_{DDE} . Interesa definir la fuerza última F_u que se verá adelante.

FIGURA 4.5 MODELO DE HISTÉRESIS BILINEAL DE UN DISIPADOR ADAS O TADAS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015)

4.5 FUERZA DE CORTE F_u DE UN DISIPADOR TADAS

Se considera un modelo elasto-completamente plástico, en el comportamiento del acero, de tal manera que no hay incremento de resistencia cuando se supera el desplazamiento de fluencia. (Hipótesis conservadora).

Por otra parte, toda la placa del disipador TADAS se plastifica y en cada uno de sus puntos el esfuerzo del material es f_y como se indica en la figura 4.6. En estas condiciones la resultante de las fuerzas a compresión y tracción, valen $f_y b_{(x)} t/2$, y son las que generan el momento plástico M_p .

$$M_p = P \frac{t}{4} + P \frac{t}{4} = \frac{P t}{2} \quad (4.15)$$

Al reemplazar $P = f_y b_{(x)} \frac{t}{2}$, se tiene:

$$M_p = \frac{f_y b_{(x)} t^2}{4} \quad (4.16)$$

El momento plástico es máximo en $b_{(x)} = b$. Luego:

$$M_{pmax} = \frac{f_y b t^2}{4} \quad (4.17)$$

Pero este momento máximo para el caso del TADAS es igual a:

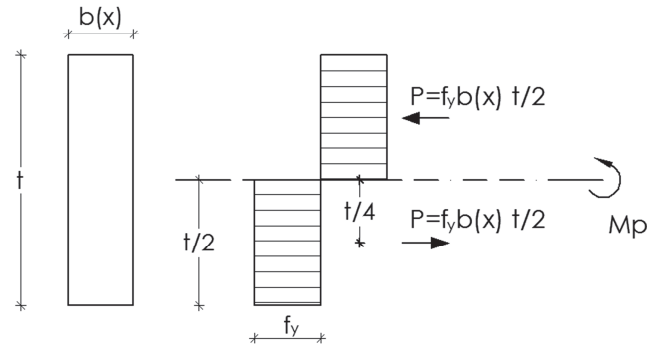
$$M_{pmax} = F_u h \quad (4.18)$$

Al igualar estas dos expresiones se tiene:

$$F_u = \frac{f_y b t^2}{4 h} \quad (4.19)$$

FIGURA 4.6 DIAGRAMA DE ESFUERZOS EN SECCIÓN TRANSVERSAL DE DISIPADOR

DIAGRAMA DE ESFUERZOS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015)

4.6 RESUMEN PARA MODELOS TADAS

TABLA 4.2 PARÁMETROS DEL DIAGRAMA BILINEAL PARA DISIPADORES TADAS

| Parámetro | TADAS |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Fuerza de fluencia | $F_y = \frac{n f_y b t^2}{6 h}$ |
| Desplazamiento de fluencia | $\Delta_y = \frac{f_y h^2}{E t}$ |
| Rigidez elástica | $K_{DDE} = \frac{n E b t^3}{6 h^3}$ |
| Fuerza última | $F_u = n \frac{f_y b t^2}{4 h}$ |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

A partir de los parámetros indicados en la tabla 4.2 se encuentran los restantes puntos notables del diagrama bilineal. Para ello se debe tener en cuenta que el desplazamiento último que alcanzan los **disipadores de acero**, está alrededor de

diez veces el desplazamiento de fluencia.

$$\Delta_u = \mu \Delta_y \quad (4.20)$$

Donde μ es la ductilidad de los disipadores. La rigidez post fluencia K_2 se encuentra con la siguiente ecuación.

$$K_2 = \frac{F_u - F_y}{\Delta_u - \Delta_y} \quad (4.21)$$

Finalmente la rigidez efectiva K_{EDDE} , también conocida como rigidez secante se halla de la siguiente manera.

$$K_{EDDE} = \frac{F_u}{\Delta_u} \quad (4.22)$$

Un parámetro utilizado para encontrar el amortiguamiento del disipador o para el pre diseño de los disipadores es α^* que relaciona la rigidez post fluencia con respecto a la rigidez elástica.

$$\alpha^* = \frac{K_2}{K_{DDE}} \quad (4.23)$$

4.7 PREDISEÑO DE DISIPADORES

Tena y Nangullasmú (2013 y 2015), en su estudio, determinaron en forma paramétrica ciertos factores que están relacionados con el disipador, las diagonales del contraviento Chevron y el pórtico. A continuación se presentan las definiciones de estos parámetros, y posteriormente se indica la metodología de cálculo con la que se obtiene las dimensiones del disipador y del contraviento.

4.7.1 PARÁMETROS DEL MODELO

El primer parámetro que se debe imponer es α que relaciona la rigidez de piso (sin disipadores), que se va a denominar K_{MARCO} con respecto a la rigidez total del piso K_{TOTAL} , que es igual a la rigidez del marco más las rigideces de las diagonales y disipadores, en el caso más general que corresponde a tener más de un disipador en un piso.

$$\alpha = \frac{K_{MARCO}}{K_{TOTAL}} \quad (4.24)$$

El parámetro α puede tomar los siguientes valores

- $\alpha < 0.50$ Cuando se espera que el marco sea menos rígido que el sistema contraviento-disipador.
- $\alpha = 0.50$ Cuando se espera que el marco sea igual de rígido que el sistema contraviento-disipador.
- $\alpha > 0.5$ Cuando se espera que el marco sea más rígido que el sistema contraviento-disipador.

Valores frecuentes de α , son: 0.25; 0.50; 0.75. (Tena y Nangullasmú 2013 y 2015).

Otro factor a definir es β que determina la relación entre la rigidez elástica del disipador K_{DDE} , con respecto a la rigidez de una diagonal de soporte, K_{DIAG} .

$$\beta = \frac{K_{DDE}}{K_{DIAG}} \quad (4.25)$$

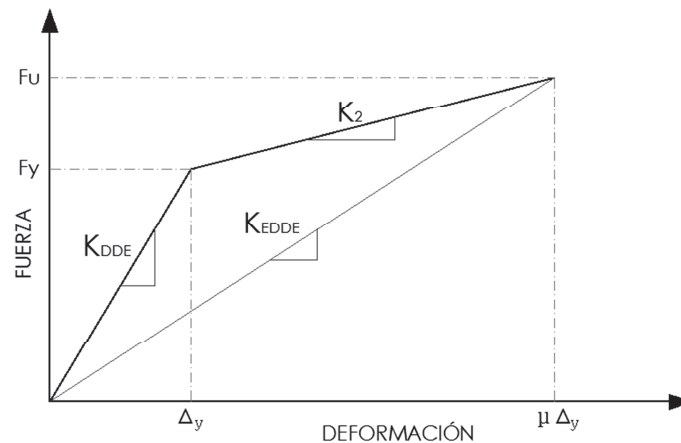
La variable β puede tomar los siguientes valores.

- $\beta = 1.00$ Cuando se espera que la rigidez elástica del contraviento sea igual a la rigidez del disipador.

- $\beta < 1.00$ Cuando se espera que la rigidez del contravientos sea menor que la del disipador.
- $\beta > 1.00$ Cuando se espera que la rigidez del contravientos sea mayor que la del disipador.

Valores frecuentes de β , son: 1.0; 0.75; 0.5; 0.25 (Tena y Nangullasmú, 2013). En la figura 4.7 se presenta el modelo bilineal considerado para el comportamiento no lineal del disipador. En este diagrama, se define la rigidez elástica K_{DDE} que interviene en la ecuación (4.22); también se indica la rigidez post fluencia K_2 y la rigidez efectiva o rigidez secante K_{EDDE} con la que se trabaja en análisis lineales; para una mejor visualización se presentan estas rigideces a continuación.

FIGURA 4.7 RELACIÓN FUERZA DEFORMACIÓN DE UN DISIPADOR TADAS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015)

Se denomina α^* a la relación entre la rigidez post fluencia con respecto a la rigidez elástica del disipador. Valores frecuentes de α^* , son: 0; 0.03; 0.05.

$$\alpha^* = \frac{K_2}{K_{DDE}} \quad (4.26)$$

El último parámetro que se debe imponer es μ la ductilidad del disipador que

relaciona la deformación última Δ_u con respecto a la de fluencia Δ_y . Para los disipadores TADAS de acero la ductilidad es mayor a 10.

Una vez que se ha impuesto: $\alpha, \beta, \alpha^*, \mu$ por la metodología propuesta por Tena y Nangullasmú (2013), como determinar las dimensiones de las placas del disipador TADAS es indicado más adelante en el subcapítulo: procedimiento de cálculo.

4.7.2 SUSTENTO TEÓRICO

La rigidez total de un piso, K_{TOTAL} es igual a la rigidez de piso K_{MARCO} más la rigidez del contraviento-disipador, K_{C-D}

$$K_{TOTAL} = K_{MARCO} + K_{C-D} \quad (4.27)$$

Ahora se determina la rigidez total del piso.

$$K_{TOTAL} = \frac{K_{MARCO}}{\alpha} \quad (4.28)$$

$$K_{C-D} = (1 - \alpha) K_{TOTAL} \quad (4.29)$$

Por otra parte, la rigidez del conjunto contraviento-disipador es igual al número de contravientos tipo Chevron por la rigidez equivalente de uno de ellos, K_{eq} .

$$K_{C-D} = n K_{eq} \quad (4.30)$$

Pero la rigidez contraviento-disipador es igual a la rigidez total menos la rigidez de marco de tal manera que a partir de la ecuación (4.25) se obtiene:

$$K_{eq} = \frac{(1 - \alpha) K_{TOTAL}}{n} \quad (4.31)$$

En la figura 4.7, se tiene que la rigidez secante K_{EDDE} es igual a la fuerza F_u con respecto a la deformación $\mu \Delta_y$.

$$\begin{aligned}
K_{EDDE} &= \frac{F_u}{\mu \Delta_y} = \frac{F_y + K_2(\mu \Delta_y - \Delta_y)}{\mu \Delta_y} \\
K_{EDDE} &= \frac{K_{DDE}\Delta_y + K_2 \Delta_y(\mu - 1)}{\mu \Delta_y} \\
K_{EDDE} &= \frac{K_{DDE} + K_2(\mu - 1)}{\mu} \tag{4.32}
\end{aligned}$$

La diagonal del contraviento trabaja en serie con el disipador por lo que se tiene:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{DIAG}} + \frac{2 \cos^2 \theta}{K_{EDDE}} \tag{4.33}$$

En el subcapítulo 4.9.1 se explica con más detalle esta ecuación. Al despejar K_{eq} se tiene:

$$K_{eq} = \frac{K_{DIAG} K_{EDDE}}{K_{EDDE} + 2 \cos^2 \theta K_{DIAG}} \tag{4.34}$$

Al sustituir K_{EDDE}

$$\begin{aligned}
K_{eq} &= \frac{K_{DIAG} \frac{K_{DDE} + K_2(\mu - 1)}{\mu}}{\frac{K_{DDE} + K_2(\mu - 1)}{\mu} + 2 \cos^2 \theta K_{DIAG}} \\
K_{eq} &= \frac{K_{DIAG} [\beta K_{DIAG} + \alpha^* K_{DDE}(\mu - 1)]}{\beta K_{DIAG} + \alpha^* K_{DDE}(\mu - 1) + 2 \mu \cos^2 \theta K_{DIAG}} \\
K_{eq} &= \frac{\beta K_{DIAG} + \alpha^* \beta K_{DIAG}(\mu - 1)}{\beta + \alpha^* \beta(\mu - 1) + 2 \mu \cos^2 \theta} \\
K_{eq} &= \frac{K_{DIAG} [\beta + \alpha^* \beta(\mu - 1)]}{\beta + 2 \mu \cos^2 \theta + \alpha^* \beta(\mu - 1)} \\
K_{DIAG} &= \frac{K_{eq} [\beta + 2 \mu \cos^2 \theta + \alpha^* \beta(\mu - 1)]}{\beta [1 + \alpha^*(\mu - 1)]} \tag{4.35}
\end{aligned}$$

Con la rigidez K_{DIAG} se halla la sección transversal de las diagonales del

contraviento a partir de la siguiente ecuación.

$$K_{DIAG} = \frac{E A_{DIAG}}{L_{DIAG}} \quad (4.36)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del acero; A_{DIAG} es el área de la sección transversal de la diagonal; L_{DIAG} es la longitud de la diagonal. Una vez conocido K_{DIAG} , se halla la rigidez elástica $K_{DDE} = \beta K_{DIAG}$; la rigidez $K_2 = \alpha * K_{DDE}$. También se conoce la K_{eq} . Por otra parte, con la ecuación (4.32) se encuentra la rigidez efectiva del disipador K_{EDDE} .

4.7.3 VALORES ÓPTIMOS DE α y β

Un estudio realizado por Tena y Nangullasmú (2013 y 2015), mediante un análisis no lineal “pushover” a 360 pórticos no dúctiles de 5 a 25 pisos de altura, con contravientos Chevron con una inclinación de 40° y 45°, en las cuales se consideró diferentes valores de α y β , se llegó a determinar los valores óptimos para α y β en función de su elevación, y los ángulos de inclinación de diagonales. Los resultados óptimos encontrados se presentan en la tabla 4.3.

TABLA 4.3 VALORES ÓPTIMOS DE α y β

| NIVELES | H/L | Θ | α | β |
|---------|------|----------|----------|---------|
| 5 | 0.53 | 40° | 0.25 | 0.50 |
| | 0.63 | 45° | 0.25 | 0.50 |
| 10 | 1.05 | 40° | 0.25 | 0.75 |
| | 1.25 | 45° | 0.25 | 0.50 |
| 15 | 1.58 | 40° | 0.25 | 0.75 |
| | 1.88 | 45° | 0.25 | 0.50 |
| 20 | 2.10 | 40° | 0.50 | 0.50 |
| | 2.50 | 45° | 0.50 | 0.75 |
| 25 | 2.63 | 40° | 0.50 | 0.50 |
| | 3.13 | 45° | 0.50 | 0.75 |

Fuente: Tena 2015.

Se puede observar que el parámetro α aumenta mientras sube el número de pisos; sin embargo, para estructuras de hasta 15 pisos es óptimo suponer un $\alpha=0.25$, tomando en cuenta que la relación H/L (esbeltez de todo el edificio) sea menor que 2, mientras que para el parámetro β se puede optar por tomar un valor entre 0.50 y 0.75.

4.7.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Se debe imponer los parámetros $\alpha, \beta, \mu, \alpha^*, \theta$. Por otra parte se debe calcular la rigidez del marco K_{MARCO} y el cortante V_u que debe ser capaz de soportar el disipador, cuyas dimensiones se van a determinar. Con esta información, el procedimiento a seguir para encontrar las dimensiones del disipador es el siguiente:

- i) Se determina la rigidez total del piso K_{TOTAL}

$$K_{TOTAL} = \frac{K_{MARCO}}{\alpha} \quad (4.37)$$

- ii) Se encuentra la rigidez de los contravientos y disipadores K_{C-D}

$$K_{C-D} = K_{TOTAL} - K_{MARCO} \quad (4.38)$$

- iii) Se halla la rigidez equivalente de un contraviento y disipador, K_{eq}

$$K_{eq} = \frac{K_{C-D}}{N_d} \quad (4.39)$$

Donde N_d es el número de contravientos Chevron.

- iv) Se halla la rigidez de la diagonal del contraviento K_{DIAG}

$$K_{DIAG} = \frac{K_{eq}[\beta + 2\mu \cos^2\theta + \alpha^*\beta(\mu - 1)]}{\beta [1 + \alpha^*(\mu - 1)]} \quad (4.40)$$

v) Se encuentra la rigidez elástica del disipador, K_{DDE}

$$K_{DDE} = \beta K_{DIAG} \quad (4.41)$$

vi) Se halla la rigidez post fluencia del disipador K_2

$$K_2 = \alpha^* K_{DDE} \quad (4.42)$$

vii) Se determina la rigidez efectiva K_{EDDE}

$$K_{EDDE} = \frac{K_{DDE} + K_2 (\mu - 1)}{\mu} \quad (4.43)$$

viii) Se halla el desplazamiento de fluencia Δ_y

$$\Delta_y = \frac{V_u}{\mu K_{EDDE}} \quad (4.44)$$

Una vez que se conoce la rigidez elástica K_{DDE} , el desplazamiento de fluencia Δ_y , el cortante V_u y la rigidez post fluencia K_2 ; se determinan las dimensiones y el número de placas, del disipador TADAS aplicando las ecuaciones indicadas en la tabla 4.2.

4.7.5 NUEVA PROPUESTA PARA HALLAR CONTRAVIENTO-DISIPADOR

Con base en la tabla 4.3, determinar el parámetro β con el que se va a trabajar y se obtiene la rigidez de la diagonal de un contraviento K_{DIAG}

$$K_{DIAG} = \frac{K_{DDE}}{\beta} \quad (4.45)$$

Con la rigidez K_{DIAG} se halla la sección transversal A_{DIAG} de una de las diagonales del contraviento Chevrón y con ello las dimensiones de la diagonal.

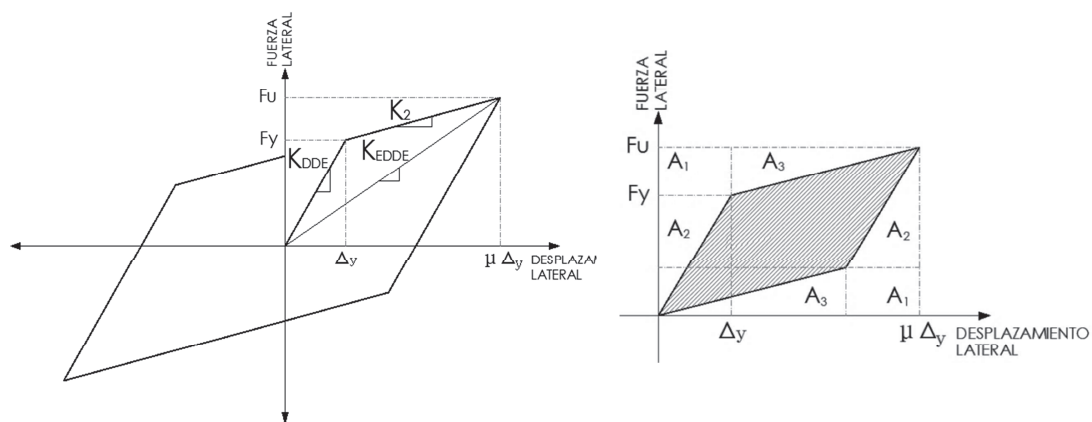
$$A_{DIAG} = \frac{K_{DIAG} L_{DIAG}}{E} \quad (4.46)$$

Se recomienda evaluar el parámetro α , y verificar que esté dentro de los valores presentados en la tabla 4.3.

4.8 MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO DE UN DISIPADOR

A la izquierda de la figura 4.8 se presenta el modelo numérico bilineal que representa el comportamiento de un disipador TADAS. Para calcular el factor de amortiguamiento equivalente ξ_{eq} se debe evaluar la energía disipada y la energía elástica en un ciclo de histéresis.

FIGURA 4.8 DIAGRAMA DE HISTÉRESIS DE UN DISIPADOR TADAS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015)

4.8.1 ENERGÍA DISIPADA POR UN DISIPADOR

Sea E_D la energía disipada, en un ciclo de histéresis, la misma que se obtiene evaluando el área sombreada que se presenta a la derecha de la figura 4.8, multiplicada por 4, debido a que ésta área representa la cuarta parte del área de un ciclo de histéresis.

$$E_D = 4 A_{RAY} \quad (4.47)$$

$$A_{RAY} = F_u \mu \Delta_y - 2 A_1 - 2 A_2 - 2 A_3$$

$$A_1 = (F_u - F_y) \Delta_y$$

$$A_2 = \frac{1}{2} F_y \Delta_y$$

$$A_3 = \frac{(F_u - F_y)(\mu \Delta_y - \Delta_y)}{2}$$

$$E_D = 4 [F_u \mu \Delta_y - 2 \Delta_y (F_u - F_y) - F_y \Delta_y - (F_u - F_y)(\mu \Delta_y - \Delta_y)] \quad (4.48)$$

Al desarrollar términos y luego de las simplificaciones correspondientes se halla la energía disipada en función del desplazamiento de fluencia Δ_y , de la fuerza de fluencia F_y , de la fuerza última F_u y de la ductilidad del disipador μ .

$$E_D = 4 \Delta_y (\mu F_y - F_u) \quad (4.49)$$

En la figura izquierda de 4.8, se observa que:

$$F_u = F_y + K_2 (\mu \Delta_y - \Delta_y) \quad (4.50)$$

$$F_y = K_{DDE} \Delta_y \quad (4.51)$$

Al reemplazar estos valores en la ecuación que define la energía disipada, se tiene.

$$E_D = 4 \Delta_y [K_{DDE} \mu \Delta_y - K_{DDE} \Delta_y - K_2 (\mu \Delta_y - \Delta_y)]$$

$$E_D = 4 \Delta_y (K_{DDE} - K_2) (\mu \Delta_y - \Delta_y) \quad (4.52)$$

4.8.2 ENERGÍA DE DEFORMACIÓN POR UN DISIPADOR

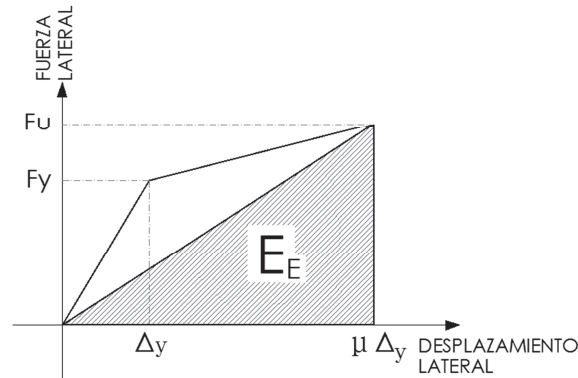
El área achurada de la figura 4.9, representa la energía de deformación en un ciclo de histéresis del disipador, que se denomina E_E

$$E_E = \frac{1}{2} F_u \mu \Delta_y \quad (4.53)$$

$$K_{EDDE} = \frac{F_u}{\mu \Delta_y}$$

$$E_E = \frac{1}{2} K_{EDDE} (\mu \Delta_y)^2 \quad (4.54)$$

FIGURA 4.9 ENERGÍA ELÁSTICA EN UN CICLO DE HISTÉRESIS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015)

4.8.3 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE DEL DISIPADOR

Se considera que el amortiguamiento es de tipo viscoso, en consecuencia se tiene (Chopra, 2014):

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4 \pi E_E} \quad (4.55)$$

$$\xi_{eq} = \frac{2 \Delta_y (K_{DDE} - K_2) (\mu \Delta_y - \Delta_y)}{\pi K_{EDDE} (\mu \Delta_y)^2} \quad (4.56)$$

Por otra parte la frecuencia natural W_n del disipador en función de la rigidez efectiva, K_{EDDE} y de la masa que gravita sobre el disipador, m , viene dada por la siguiente ecuación.

$$W_n^2 = \frac{K_{EDDE}}{m}$$

$$K_{EDDE} = W_n^2 m \quad (4.57)$$

Al reemplazar K_{EDDE} en la ecuación (4.56) que define el factor de amortiguamiento equivalente, se halla.

$$\xi_{eq} = \frac{2 \Delta_y (K_{DDE} - K_2) (\mu \Delta_y - \Delta_y)}{\pi W_n^2 m (\mu \Delta_y)^2} \quad (4.58)$$

4.8.4 AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE DEL DISIPADOR

Sea C_d el amortiguamiento equivalente de un disipador, el mismo que puede expresarse en función del factor de amortiguamiento equivalente, para ello se recuerda.

$$\xi_{eq} = \frac{C_d}{2 \sqrt{m K_{EDDE}}} \quad (4.59)$$

$$\xi_{eq} = \frac{C_d}{2 m W_n} \quad (4.60)$$

Al igualar ecuación (4.57) con (4.60), se halla.

$$\begin{aligned} \frac{C_d}{2 m W_n} &= \frac{2 \Delta_y (K_{DDE} - K_2) (\mu \Delta_y - \Delta_y)}{\pi W_n^2 m (\mu \Delta_y)^2} \\ C_d &= \frac{4 \Delta_y (K_{DDE} - K_2) (\mu \Delta_y - \Delta_y)}{\pi W_n (\mu \Delta_y)^2} \end{aligned} \quad (4.61)$$

En función del período de vibración T , se tiene.

$$T = \frac{2\pi}{W_n} \quad (4.62)$$

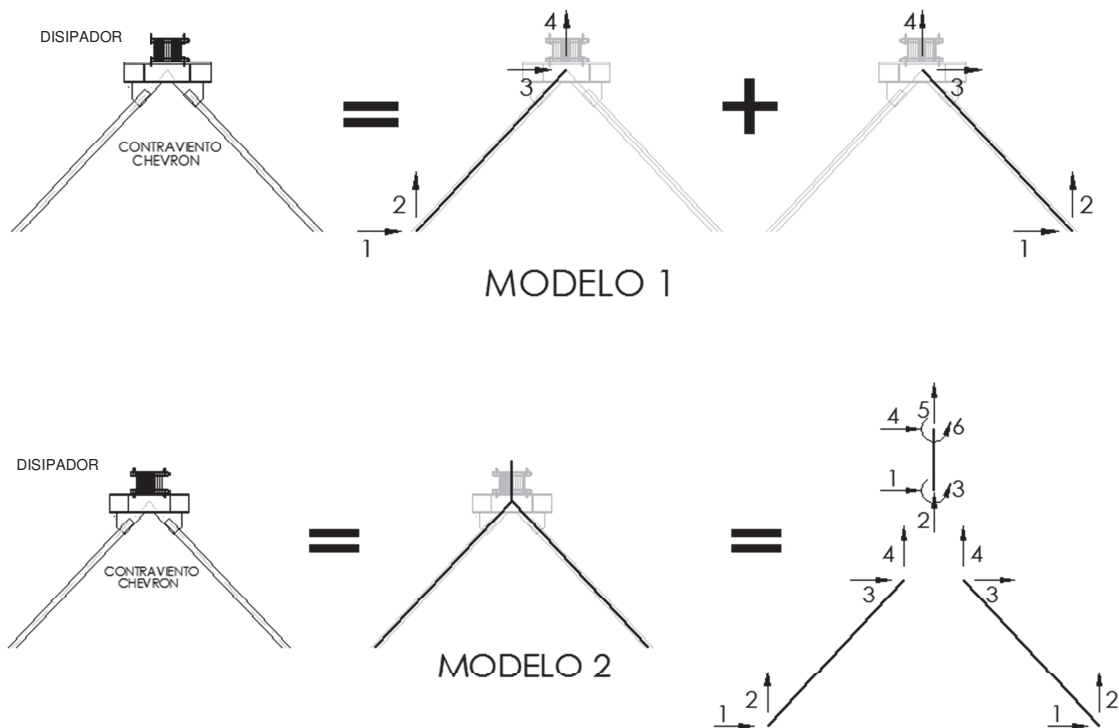
$$C_d = \frac{2 \Delta_y (K_{DDE} - K_2) (\mu \Delta_y - \Delta_y) T}{\pi^2 (\mu \Delta_y)^2} \quad (4.63)$$

De esta forma se determina el amortiguamiento equivalente de un disipador, modelado como viscoso.

4.9 COMPORTAMIENTO DE DISIPADOR-CONTRAVIENTO CHEVRON

Se trabaja con dos modelos el comportamiento no lineal del conjunto: contraviento Chevron-Disipador, el primero es mediante la diagonal equivalente, gráfica superior de figura 4.10 y la segunda forma es considerar al conjunto compuesto por tres elementos: dos diagonales y un elemento disipador, como se muestra en la gráfica inferior de la figura 4.10.

FIGURA 4.10 MODELOS PARA EL CONTRAVIENTO-DISIPADOR Y SISTEMA DE COORDENADAS GLOBALES DE LOS ELEMENTOS

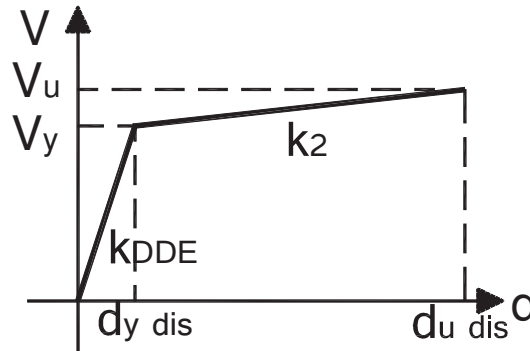


Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

4.9.1 MODELO DE DIAGONAL EQUIVALENTE

Se plantea el diagrama de un disipador de energía trabajando con fuerzas cortantes:

FIGURA 4.11 MODELO FUERZA HORIZONTAL – DEFORMACIÓN HORIZONTAL DE UN DISIPADOR



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Si se relaciona la diagonal con el disipador como resortes en serie (ver figura 4.13), llamada diagonal equivalente, en su tramo elástico tenemos:

$$\frac{1}{K_{eq_e}} = \frac{1}{K_{DIAG}} + \frac{nn \cos^2 \theta}{K_{DDE}} \quad (4.64)$$

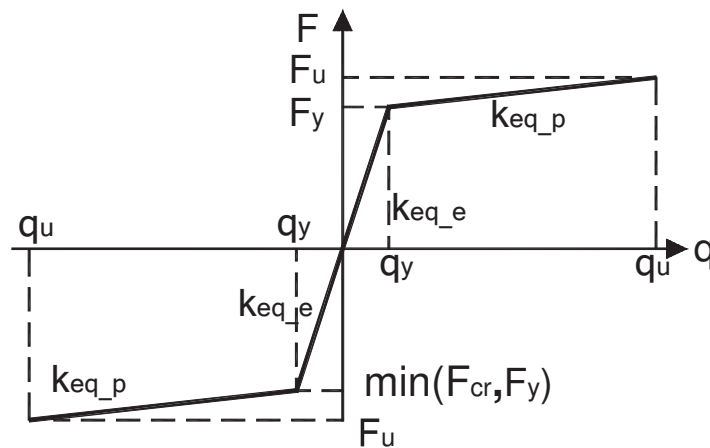
Y para el tramo plástico:

$$\frac{1}{K_{eq_p}} = \frac{1}{K_{DIAG}} + \frac{nn \cos^2 \theta}{K_2} \quad (4.65)$$

nn =Número de diagonales ($nn = 2$ para diagonales chevron)

El diagrama que representa el funcionamiento de una diagonal equivalente se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 4.12 MODELO FUERZA AXIAL – DEFORMACIÓN AXIAL DEL MODELO DIAGONAL EQUIVALENTE



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Siempre suponiendo que la diagonal tendrá una sección suficiente para no fluir ni pandear antes que cambie de rigidez el disipador.

Para los límites de deformaciones de una diagonal equivalente tendremos:

$$q_y = d_{diag} + \frac{d_{y\ dis}}{\cos\theta} \quad (4.66)$$

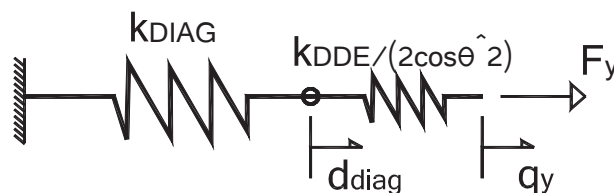
$d_{y\ dis}$ = Se obtiene de Δ_y de la tabla 4.2 (figura 4.11).

$\cos\theta$ = Coseno del ángulo de inclinación de la diagonal.

d_{diag} = Descrita a continuación.

Si se trabaja el sistema como resortes en serie podemos tener igualdades en la fuerza axial F_y , así:

FIGURA 4.13 MODELO DIAGONAL – DISIPADOR COMO RESORTES EN SERIE



Fuente: Realizado por E. David Mora.

$$F_y = K_{DIAG} d_{diag} \quad (4.67)$$

$$F_y = \frac{K_{DDE}}{2 \cos^2 \theta} (q_y - d_{diag}) = \frac{K_{DDE}}{2 \cos^2 \theta} \frac{d_{y \text{ dis}}}{\cos \theta} \quad (4.68)$$

Igualando (4.67) con (4.68):

$$d_{diag} = \frac{d_{y \text{ dis}}}{2 \cos^3 \theta} \frac{K_{DDE}}{K_{DIAG}} \quad (4.69)$$

Obteniendo finalmente para la diagonal equivalente, figura 4.12:

$$q_y = \frac{d_{y \text{ dis}}}{\cos \theta} \left(\frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{K_{DDE}}{K_{DIAG}} + 1 \right) \quad (4.70)$$

Y, sabiendo que $d_{udis} = \mu d_{ydis}$, entonces tenemos:

$$q_u = \frac{d_{y \text{ dis}}}{\cos \theta} \left(\frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{K_{DDE}}{K_{DIAG}} + \mu \right) \quad (4.71)$$

Donde μ es la ductilidad del disipador.

En la parte superior derecha de la figura 4.10 se aprecia que cada montante con la diagonal se transforma en una diagonal equivalente que trabaja en forma similar a un elemento de una armadura plana, con cuatro grados de libertad, dos en el nudo inicial y dos en el nudo final, como se aprecia en la figura 4.10.

Con este modelo no se sabe si el montante ingresó al rango no lineal o el disipador lo hizo primero, esta es la falencia del modelo.

4.9.2 MODELO CON ELEMENTO DISIPADOR

En la parte inferior de la figura 4.10 se observa en la parte central que el conjunto: contraviento-disipador, está compuesto por tres elementos, dos diagonales y el

elemento disipador; el sistema de coordenadas globales de las diagonales tiene cuatro grados de libertad y el elemento disipador tiene 6 grados de libertad. Con este modelo si se puede conocer cual ingresó primero al rango no lineal, el montante o el disipador.

En el subcapítulo anterior se encontró una diagonal equivalente para el conjunto Contraviento-Chevron. Al trabajar de esta forma se considera que el disipador va a ingresar al rango no lineal, y las diagonales deben tener dimensiones apropiadas para que trabajen en el rango elástico y no tengan problemas de pandeo.

Ahora cuando se quiere saber exactamente si el disipador ingresa al rango no lineal y las diagonales del contraviento permanecen en rango elástico, no se puede trabajar con la diagonal equivalente. En este caso, se debe considerar al disipador como un elemento corto, tema que es abordado en el presente subcapítulo de dos maneras: i) con una solución analítica; ii) y con el método de las dovelas (Matriz de rigidez condensada en coordenadas reducidas propuesta en este trabajo).

Para los dos casos se deduce la matriz de rigidez, en coordenadas globales, del elemento disipador considerando tres grados de libertad en el nudo inicial y tres en el nudo final, con el propósito de tener el caso más general y no solo sobre contravientos Chevron.

4.9.2.1 Usando Solución analítica

Para la deducción de la matriz de rigidez del elemento disipador, se consideran tres sistemas de coordenadas del elemento, en el primero se restringen los desplazamientos como cuerpo rígido; el segundo corresponde a las coordenadas locales del elemento y finalmente el tercero a las coordenadas globales. Para el primer sistema se determina la matriz de flexibilidad, f_1 , luego se halla la matriz de rigidez en el sistema uno k_1 (Sistema de coordenadas locales reducidas).

Para hallar la matriz de rigidez en coordenadas locales se encuentra la matriz de paso del sistema uno al dos, T_{1-2} y se encuentra $k_2 = T_{1-2}^t k_1 T_{1-2}$. Por último por medio de la matriz de rotación T_{2-3} se halla la matriz $k_3 = T_{2-3}^t k_2 T_{2-3}$, que es la matriz de rigidez del elemento disipador en coordenadas globales.

La teoría de este subcapítulo sirve para el análisis no lineal estático que se aborda en el siguiente capítulo.

4.9.2.1.1 Sistema uno

Existen varios modelos, para el estudio de las deformaciones en un elemento lineal; en la figura 4.14 se presentan dos modelos en los cuales no se consideran las deformaciones como cuerpo rígido. Con el modelo de la izquierda se va a obtener la matriz de rigidez para los elementos TADAS y con el modelo de la derecha se ha encontrado la matriz de rigidez de los elementos columnas y vigas. Aguiar (2014).

FIGURA 4.14 MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

Sea f_1 , k_1 las matrices de flexibilidad y rigidez para el sistema de coordenadas indicado a la izquierda de la figura 4.14. El vector de deformaciones p , es el siguiente:

$$p = \begin{bmatrix} p_1 = u_1 - u_2 \\ p_2 = v_1 - v_2 + L\theta_2 \\ p_3 = \theta_1 - \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

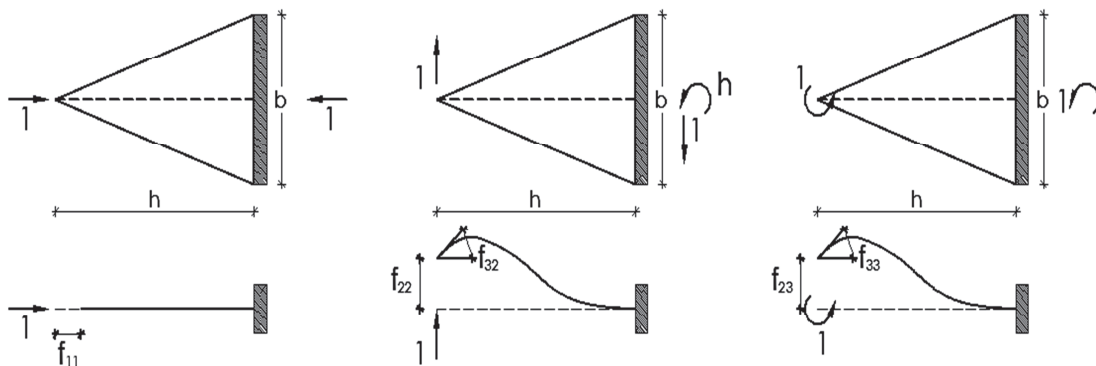
Donde u_1, u_2 , son las componentes de desplazamiento axial del nudo inicial y final; v_1, v_2 , son las componentes de desplazamiento transversal del nudo inicial y final; θ_1, θ_2 , son los giros del nudo inicial y final; L es la longitud del elemento. El vector de cargas \mathbf{P} está compuesto por P_1 que es la fuerza axial del nudo inicial; P_2 es la fuerza de corte del nudo inicial y P_3 el momento en el nudo inicial.

Por otra parte, la forma de la matriz de flexibilidad es la siguiente:

$$\mathbf{f}_1 = \begin{bmatrix} f_{11} & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & f_{23} \\ 0 & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

Para hallar los elementos de la primera columna de la matriz de flexibilidad se aplica una fuerza axial unitaria en el nudo inicial; para la segunda columna una fuerza de corte y para la tercera un momento unitario; los desplazamientos y giros que se producen debido a éstas cargas unitarias son los elementos de la matriz de flexibilidad y se muestran en la figura 4.15, donde también se han colocado las acciones de empotramiento perfecto.

FIGURA 4.15 CARGAS UNITARIAS Y ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE FLEXIBILIDAD EN SISTEMA DE COORDENADAS UNO



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

Nótese en la figura 4.15, la longitud del elemento es la altura h del disipador. Los elementos de la matriz de flexibilidad se encuentran con las siguientes

ecuaciones. Tena (2009), Aguiar (2014).

$$f_{11} = \int_0^h \frac{dx}{E A(x)} \quad (4.74)$$

$$f_{22} = \int_0^h \frac{x^2}{E I(x)} dx + \int_0^h \frac{\beta}{G A(x)} dx \quad (4.75)$$

$$f_{23} = f_{32} = \int_0^h \frac{x}{E I(x)} dx \quad (4.76)$$

$$f_{33} = \int_0^h \frac{dx}{EI(x)} \quad (4.77)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material; G es el módulo de corte; β factor de forma por corte; $A(x)$ variación del área de la sección transversal; $I(x)$ variación del momento de inercia de la sección transversal. El formulario indicado sirve para disipadores TADAS o ADAS.

4.9.2.1.1.1 Disipadores TADAS

La sección transversal del disipador TADAS tiene un ancho variable $b(x)$ y un espesor constante nt ; donde n es el número de placas y t el espesor de la placa del disipador. La variación de $b(x)$, para el modelo triangular indicado en la figura 7.2, viene definido por la siguiente ecuación.

$$b(x) = \frac{b}{h} X \quad (4.78)$$

Donde X se mide a partir del nudo inicial, de tal manera que para $X = 0$, el ancho es cero y para $X = h$, el ancho es igual a b . Con esta ecuación, las expresiones que definen el área e inercia son:

$$A(x) = t b(x) = \frac{ntbX}{h} \quad (4.79)$$

$$I(x) = \frac{b(x)t^3}{12} = \frac{bX(nt)^3}{12h}$$

Al reemplazar $A(x), I(x)$ en las ecuaciones de los términos de la matriz de flexibilidad se halla, para una sola placa.

$$f_{11} = \frac{h}{E n t b} \int_0^h \frac{dx}{X} \quad (4.80)$$

$$f_{22} = \int_0^h \frac{X^2}{E \frac{b X (n t)^3}{h \frac{12}{12}}} + \int_0^h \frac{\beta}{G n t b \frac{X}{h}} dx = \frac{12 h}{E b (n t)^3} \int_0^h X dx + \frac{\beta h}{G n t b} \int_0^h \frac{dx}{X} \quad (4.81)$$

$$f_{22} = \frac{6 h^3}{E b (n t)^3} + \frac{\beta h}{G n t b} \int_0^h \frac{dx}{X} \quad (4.82)$$

$$f_{23} = f_{32} = \int_0^h \frac{X}{E \frac{b X (n t)^3}{h \frac{12}{12}}} = \frac{12 h}{E b (n t)^3} \int_0^h dx = \frac{12 h^2}{E b (n t)^3} \quad (4.83)$$

$$f_{33} = \int_0^h \frac{dx}{E \frac{b X (n t)^3}{h \frac{12}{12}}} = \frac{12 h}{E b (n t)^3} \int_0^h \frac{dx}{X} \quad (4.84)$$

La integral de $\int \frac{dx}{X}$ es $\ln X$. Al reemplazar el límite inferior ($X = 0$) el valor que se halla es $-\infty$. Pero los disipadores no comenzarán con un vértice de ancho igual a cero, o si no que tendrán un pequeño valor real.

4.9.2.1.1.2 Disipadores ADAS

Para complementar las ecuaciones que se usan en los programas hechos en Matlab se da el procedimiento para los disipadores ADAS, las fórmulas y procesos más detallados para estos disipadores se hallan en Aguiar, Rodríguez y Mora 2015. Se plantea una ecuación exponencial, Tena (1997), para definir la variación del ancho $b(x)$:

$$b(x) = b_1 e^{-\alpha x} \quad 0 \leq X \leq \frac{h}{2} \quad (4.85)$$

$$b(x) = b_2 e^{\alpha \left(x - \frac{h}{2}\right)} \quad \frac{h}{2} \leq X \leq h \quad (4.86)$$

$$\alpha = \frac{2}{h} \ln \left(\frac{b_1}{b_2} \right) \quad (4.87)$$

Donde b_1 es el ancho mayor de la placa; b_2 es el ancho en la zona más delgada; h es la altura de la placa. Los elementos de la matriz de flexibilidad asociados al sistema de coordenadas indicado a la izquierda de la figura 4.14 son los siguientes, Tena (1997).

$$f_{11} = \frac{1}{E b_1 t \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1\right) \quad (4.88)$$

$$f_{22} = \frac{12}{E t^3} \left\{ \frac{h^3}{2 b_1 \ln(b_1/b_2)} \left[\frac{b_1}{b_2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{[\ln(b_1/b_2)]^2} \right) - 1 - \frac{1}{\ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} - \frac{1}{[\ln(b_1/b_2)]^2} \right] \right\} \quad (4.89)$$

$$+ \frac{78 h}{25 E t b_1 \ln(b_1/b_2)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1\right) \quad (4.90)$$

$$f_{23} = f_{32} = \frac{12}{E t^3} \left\{ \frac{h^2}{2 b_1 \ln(b_1/b_2)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1\right) \right\}$$

$$f_{33} = \frac{12}{E t^3} \left\{ \frac{h}{b_1 \ln(b_1/b_2)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1\right) \right\} \quad (4.91)$$

Al considerar que el disipador tiene n placas, las ecuaciones se multiplican por n .

4.9.2.1.2 Coordenadas locales

\mathbf{k}_1 la matriz de rigidez en el sistema 1 (sin considerar desplazamientos como cuerpo rígido); \mathbf{k}_2 la matriz de rigidez en el sistema 2 (coordenadas locales). La matriz \mathbf{k}_1 se encuentra invirtiendo la matriz \mathbf{f}_1 .

$$\mathbf{k}_1 = \mathbf{f}_1^{-1} \quad (4.92)$$

La matriz de rigidez \mathbf{k}_2 se halla efectuando el siguiente triple producto matricial.

$$\mathbf{k}_2 = \mathbf{T}_{1-2}^t \mathbf{k}_1 \mathbf{T}_{1-2} \quad (4.93)$$

Donde T_{1-2} es la matriz de paso del sistema de coordenadas uno al sistema de coordenadas dos (coordenadas locales).

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & h \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.94)$$

La matriz T_{1-2} se halla dibujando las deformadas elementales en el sistema de coordenadas locales y se mide en el sistema uno.

4.9.2.1.3 *Coordenadas globales*

Se repite lo estudiado en el capítulo 3. La matriz de rigidez k_3 en coordenadas globales se encuentra por medio de la matriz de rotación T_{2-3} , mediante el siguiente producto matricial.

$$k_3 = T_{2-3}^t k_2 T_{2-3} \quad (4.95)$$

$$T_{2-3} = \begin{bmatrix} C & S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.96)$$

Donde $C = \cos\alpha$; $S = \sin\alpha$; α es el ángulo que forma el eje del dissipador ADAS o TADAS con el eje horizontal. Para los casos en que el ángulo es 90 grados: $C = 0$; $S = 1$.

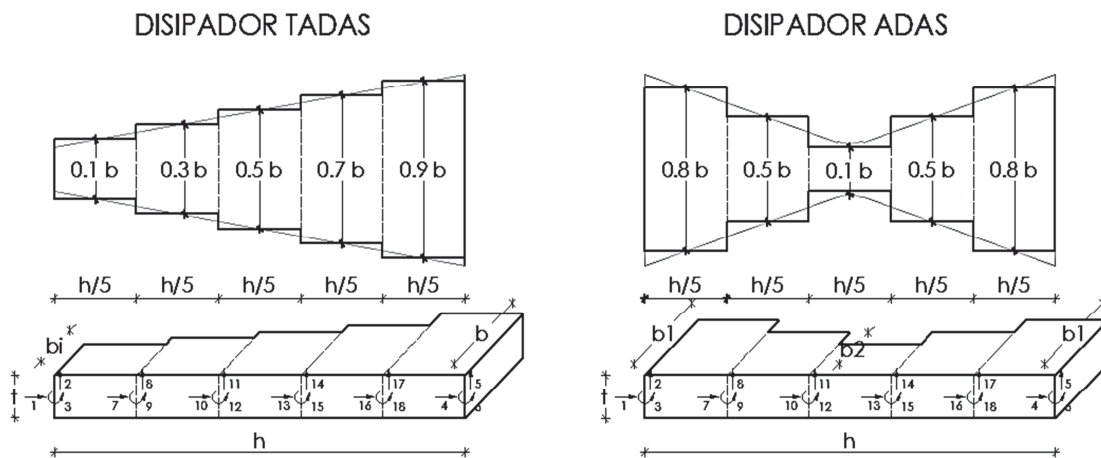
4.9.2.2 Usando el Método de las dovelas (Matriz de rigidez condensada en coordenadas reducidas)

Para hallar la matriz de rigidez del dissipador mediante el método de las dovelas, se trabaja con este como elementos de sección constante para cada dovela, cambia la relación b en cada una de ellas; posteriormente se obtiene la rigidez por

ensamblaje directo, para condensar a los primeros 6 grados de libertad, como lo visto en el capítulo anterior.

En la figura 4.16 se encuentran los disipadores divididos en 5 dovelas con sus respectivas variaciones de base, para lo cual se tiene 18 grados de libertad, donde los primeros 6 se enumeran en los extremos, al finalizar el ensamblaje se tiene una matriz de dimensiones 18x18 . Al realizar la condensación a las coordenadas principales se tiene la matriz de rigidez del elemento.

FIGURA 4.16 MODELO DE DISIPADORES MEDIANTE MÉTODO DE DOVELAS



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

Se ha calculado la matriz de rigidez de los elementos disipadores en función de sus dimensiones, dividiendo al disipador en 5 dovelas como muestra la figura 4.16.

$$a = \frac{E b n(t)^3}{h^3} \quad b = \frac{E b n(t)^3}{h^2} \quad c = \frac{E b n(t)^3}{h}$$

$$K_{TADAS} = \begin{bmatrix} 0.3589 a & 0 & -0.1004 b & -0.3589 a & 0 & -0.2585 b \\ 0 & 0.2798 c & 0 & 0 & -0.2798 c & 0 \\ -0.1004 b & 0 & 0.0514 c & 0.1004 b & 0 & 0.049 c \\ -0.3589 a & 0 & 0.1004 b & 0.3589 a & 0 & 0.2585 b \\ 0 & -0.2798 c & 0 & 0 & 0.2798 c & 0 \\ -0.2585 b & 0 & 0.049 c & 0.2585 b & 0 & 0.021 c \end{bmatrix} T/m \quad (4.97)$$

$$K_{ADAS} = \begin{bmatrix} 0.6775 a & 0 & -0.3388 b & -0.6775 a & 0 & -0.2585 a \\ 0 & 0.3030 c & 0 & 0 & -0.3030 c & 0 \\ -0.3388 b & 0 & 0.1946 c & 0.3388 b & 0 & 0.1441 c \\ -0.6775 a & 0 & 0.3388 b & 0.6775 a & 0 & 0.3388 b \\ 0 & -0.3030 c & 0 & 0 & 0.3030 c & 0 \\ -0.3388 b & 0 & 0.1441 c & 0.3388 b & 0 & 0.1946 c \end{bmatrix} T/m \quad (4.98)$$

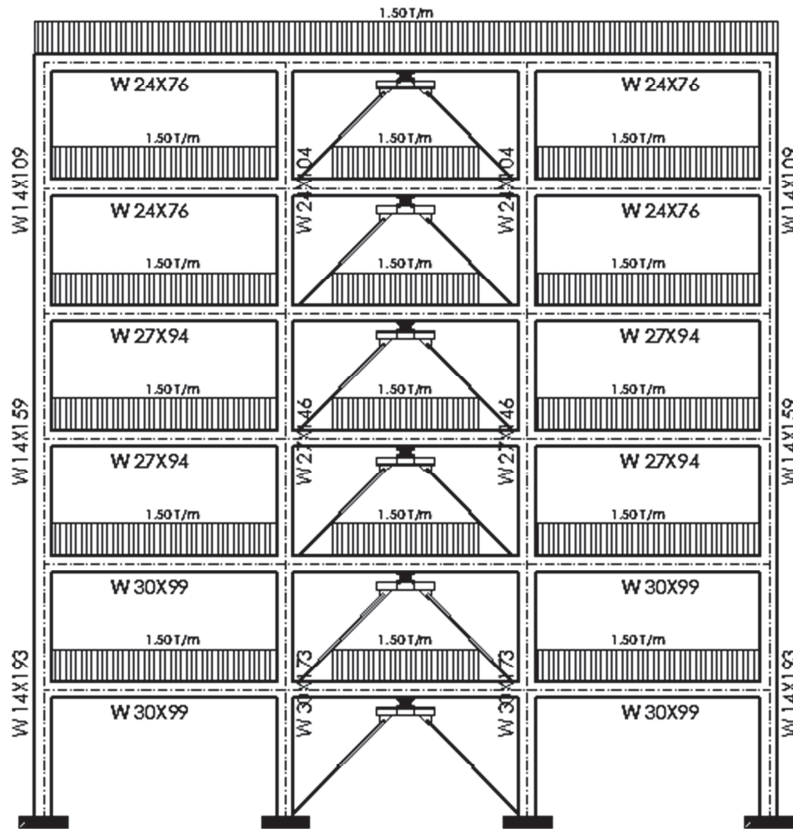
4.10 EJEMPLO DE COMPARACIÓN DE DIFERENTES MANERAS DE MODELAR DISIPADORES DE ENERGÍA

Aunque en el siguiente capítulo se describirán los programas para obtener las curvas de capacidad, con el objetivo de observar los resultados con los distintos modelos se presenta el siguiente ejemplo:

Se obtuvo la Curva de Capacidad del edificio de 6 pisos utilizado en los capítulos anteriores y reforzado con disipadores de energía. En la figura 4.17 se presenta el edificio analizado en 2 dimensiones:

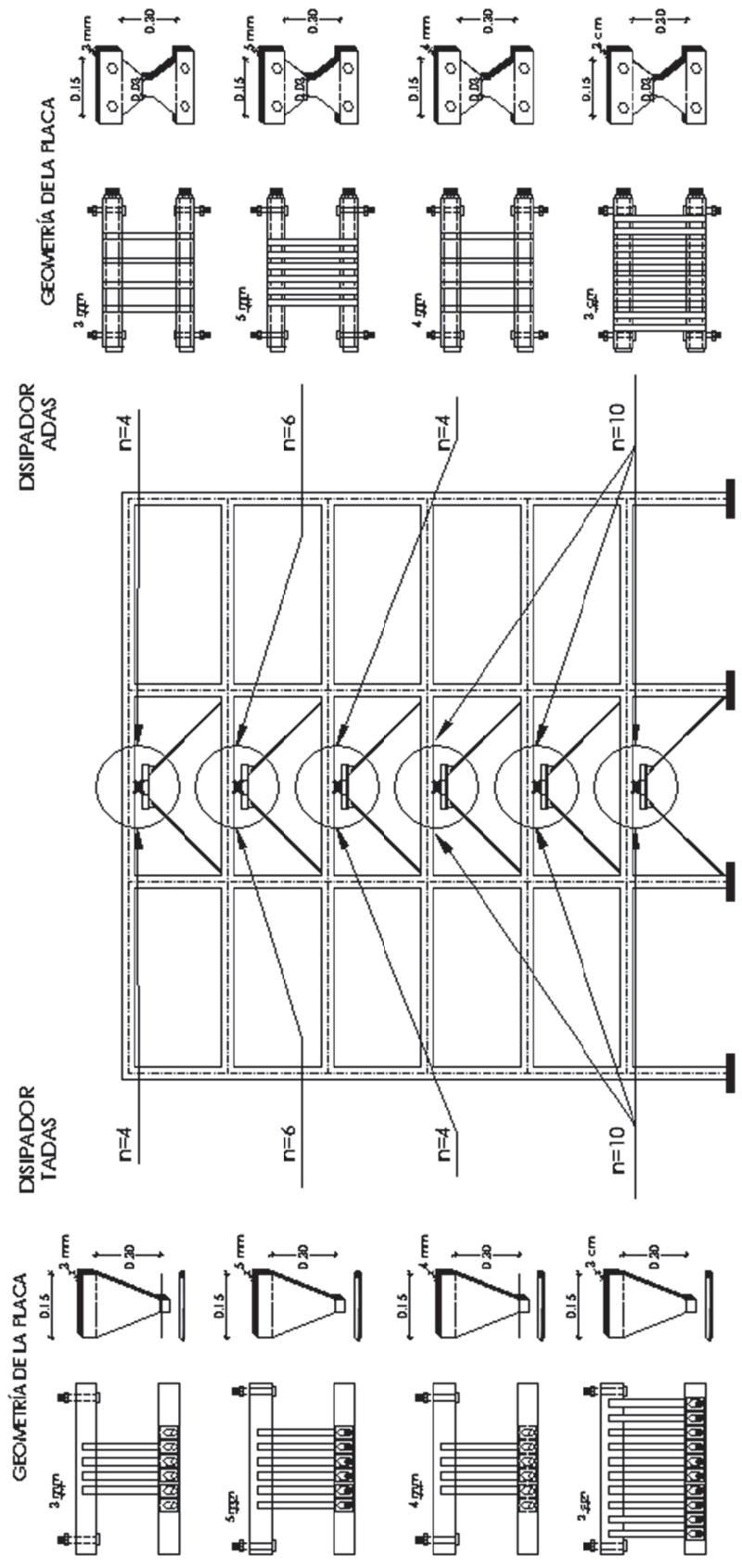
Los disipadores de energía de los tres primeros pisos, son iguales y tienen 10 placas; los restantes son diferentes: En la figura 4.18 se indica la geometría de los mismos tanto para los ADAS como para los TADAS, la numeración de los nudos y elementos utilizados. Se presenta en la figura 4.19 el Modelo 1, con la diagonal equivalente y en la figura 4.20 el Modelo 2, en el cual se considera al disipador como un elemento más de la estructura, el Modelo 2A será utilizando los resultados de la solución analítica y el Modelo 2B será utilizando los resultados del método de las dovelas. En las figuras 4.19 y 4.20 se presentan además los grados de libertad de la estructura.

FIGURA 4.17 ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGÍA A SER ANALIZADA



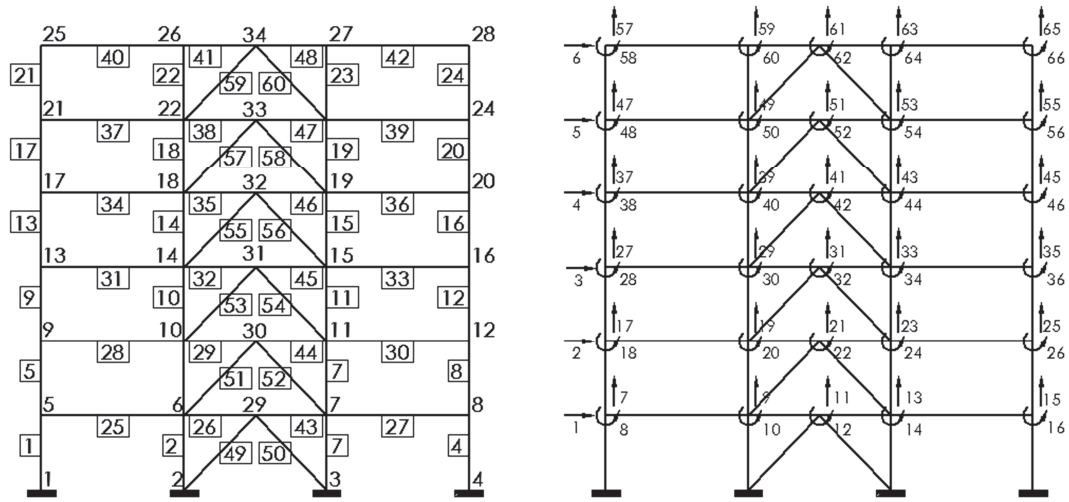
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 4.18 GEOMETRÍA DE LOS DISIPADORES EMPLEADOS PARA LA ESTRUCTURA DE ACERO



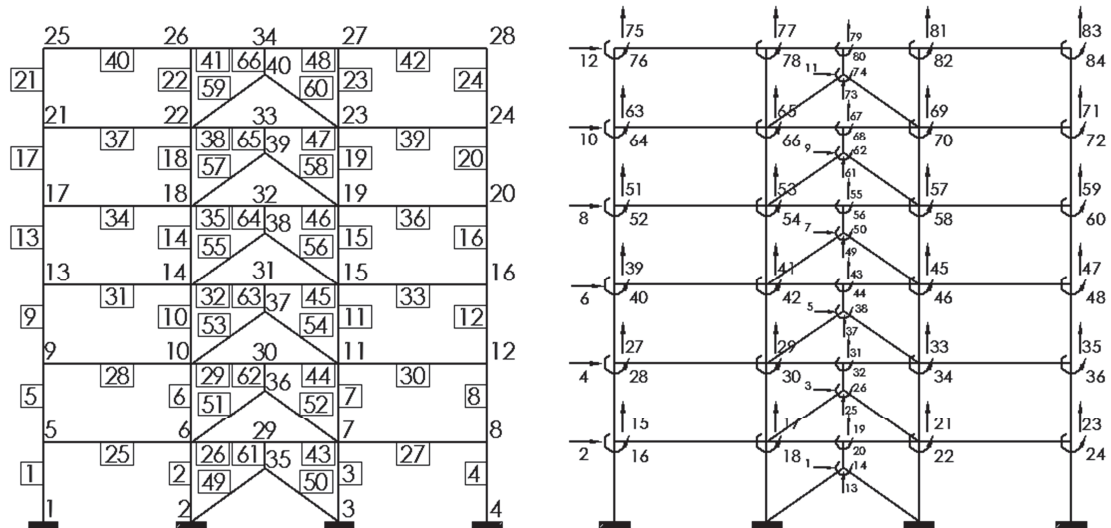
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 4.19 NUMERACIÓN DE NUDOS, ELEMENTOS Y GRADOS DE LIBERTAD PARA MODELO 1



Fuente: Realizado por E. David Mora.

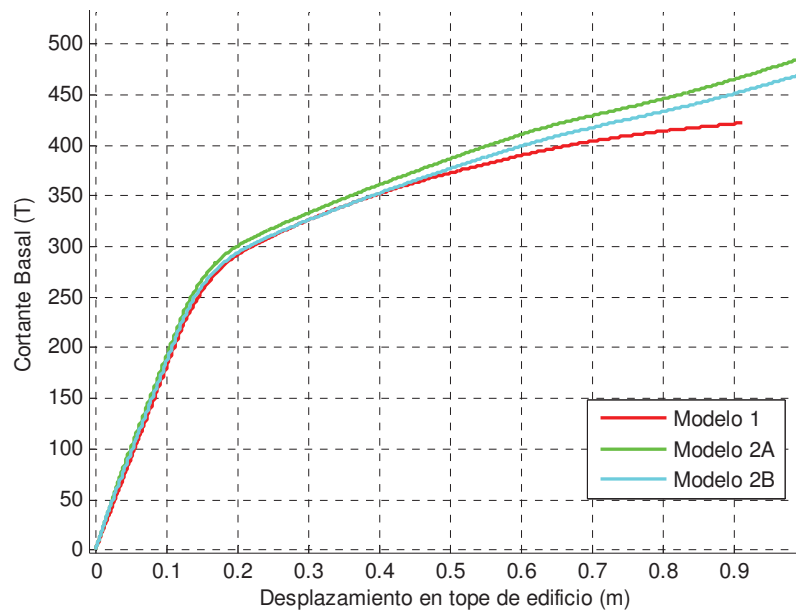
FIGURA 4.20 NUMERACIÓN DE NUDOS, ELEMENTOS Y GRADOS DE LIBERTAD PARA MODELO 2A Y 2B



Fuente: Realizado por E. David Mora.

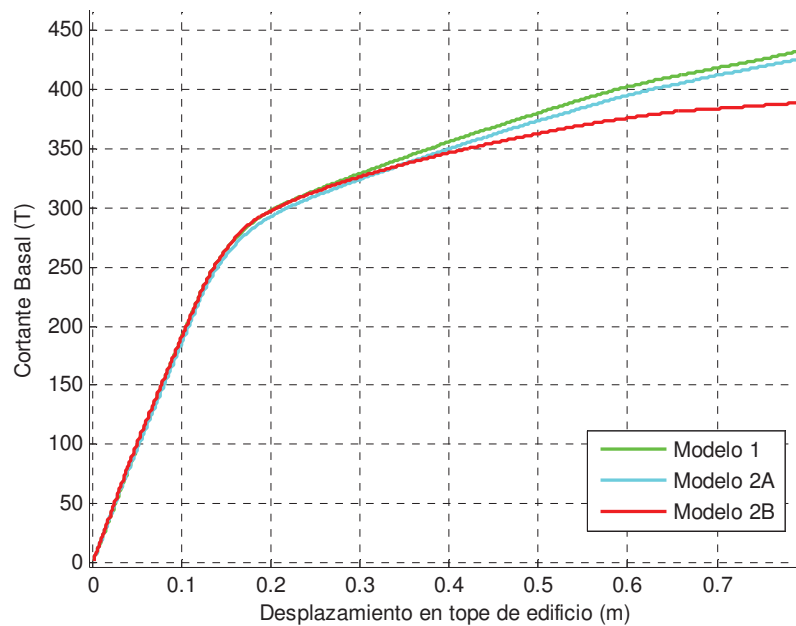
Resultados de Curva de Capacidad:

FIGURA 4.21 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD CON DISIPADORES TADAS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 4.22 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD CON DISIPADORES ADAS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

CAPÍTULO 5

MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD POR PUSHOVER MODAL MONOTÓNICO Y MODAL CÍCLICO

5.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 1 de este trabajo se indicó el procedimiento de cálculo del Pushover tradicional, este es la base para los tipos de análisis Pushover que se verán en este capítulo.

En los diferentes capítulos se analizó varios métodos para modelar diagramas momento curvatura, matrices de rigidez de elementos plastificados, y disipadores de energía. En estos programas se utilizará el modelo de matrices de rigideces por el método de las dovelas, igual que para la modelación del elemento disipador de energía TADAS, y se utilizará el modelo de diagrama momento rotación del ASCE 41, y el modelo de histéresis para secciones de acero visto en el capítulo 2.

Todos estos tipos de análisis necesitarán los mismos tipos de datos descritos en los siguientes subcapítulos, y se puede observar un ejemplo en el Anexo No1.

5.2 INTRODUCCIÓN DE DATOS PARA PROGRAMAS HECHOS EN FUNCIONES DE MATLAB

Los archivos de entrada que se requieren para usar los programas estarán en las siguientes matrices: la matriz **Table1** contendrá los datos de los elementos en cada fila, donde irán sus dimensiones, materiales y propiedades, luego se modela la estructura con ayuda de las variables **np** (número de pisos), **nr** (número de restricciones) y las matrices **GEN** y **NODES**, también se debe colocar las cargas

gravitacionales sobre los elementos correspondientes en la matriz ***Fm***, finalmente solo se escribe el nombre de los programas principales como ***Structure_Geom_2D_v2*** y ***Pushover_2***.

Como primer paso se deben definir las secciones de los elementos estructurales: vigas, columnas y disipadores de energía en el caso de existir. Para la definición de las secciones se deberá indicar un código numérico para el tipo de material y forma de la sección transversal, dichos códigos se indican en la tabla siguiente:

TABLA 5.1 DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA

| Tipo de elemento | Tipo de material | Sección transversal | | | | | | | | |
|------------------------------|------------------|---------------------|---------------|----------------------------|--------------------|---------------|---------------|------|-------|------------|
| | | Perfil tipo I | Perfil tipo H | Perfil Tubular Rectangular | Maciza rectangular | Maciza tipo L | Maciza tipo T | ADAS | TADAS | Shear Link |
| HORMIGÓN | 2 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | | | |
| ACERO | 1 | 1 | 2 | 3 | - | - | - | | | |
| DIAGONAL con o sin DISIPADOR | 1.1 | 1 | 2 | 3 | | | | | | |
| DISIPADOR | 1.2 | | | | | | | 4 | 5 | 6 |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

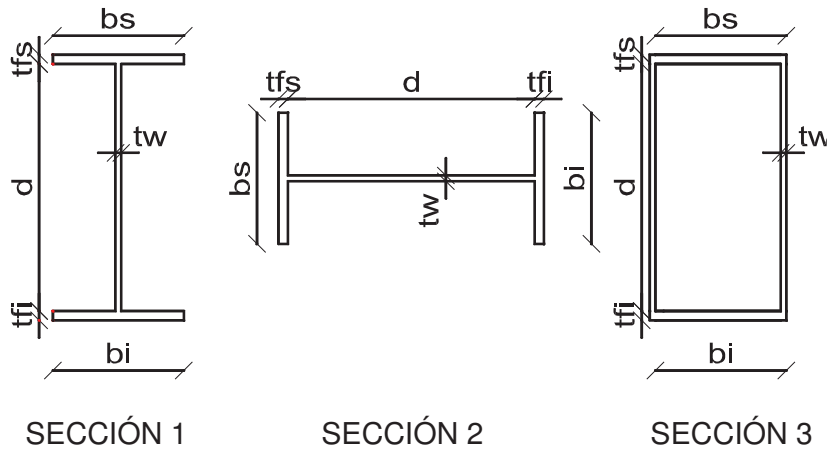
5.2.1 VIGAS Y/O COLUMNAS DE ACERO

Para definir una sección de acero se usarán los campos que se indican a continuación:

TABLA 5.2 MATRIZ *TABLE1* PARA CREAR ELEMENTOS DE ACERO

| Nombre de la sección | = | Tipo de material | fy | fu | Ey | Tipo de sección | d | tw | bs | bi | tfs | tfi |
|--------------------------|---|------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| A definir por el usuario | = | 1 | Límite elástico del acero | Límite de fluencia del acero | Módulo de Young | Según tabla 5.1 | Alto de la sección | Espesor del alma | Ancho superior de las alas | Ancho inferior de las alas | Espesor superior de las alas | Espesor inferior de las alas |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.1 SECCIONES TIPO PARA ELEMENTOS DE ACERO

Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.2.2 VIGAS Y/O COLUMNAS DE HORMIGÓN

A pesar de que esta tesis es de estructuras de acero, solo para completar la información de los datos con los que puede trabajar los programas, se da la definición de los elementos de hormigón, y el detallamiento de estos se halla en Aguiar y Mora (2015). Para definir una sección de hormigón se usarán los campos que se indican a continuación:

TABLA 5.3 MATRIZ PARA CREAR ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO

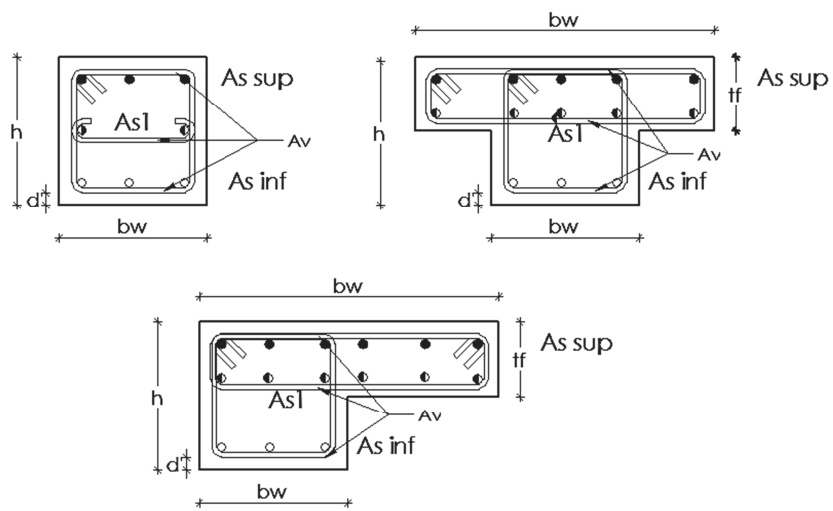
| Nombre de la sección | = | Tipo de material | $f'c$ | E | f_y | Tipo de sección | h | b | bw | tf |
|--------------------------|---|------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| A definir por el usuario | = | 2 | Resistencia del hormigón | Módulo de Young del hormigón | Resistencia del acero de refuerzo | Según tabla 5.1 | Alto de la sección | Ancho de la sección | Espesor del alma | Espesor de la alas |

TABLA 5.3 CONTINUACIÓN HORIZONTAL

| d' | As_{sup} | As_{inf} | Separación de Estribos | Av | $As1, As2...$ (si existen) |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|--|
| Recubrimiento o alto efectivo a compresión | Area de acero superior | Area de acero inferior | Separación de estribos | Area de las ramas de estribos | Area de acero en el medio de la sección en el caso de columnas |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.2 SECCIONES TIPO PARA ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO

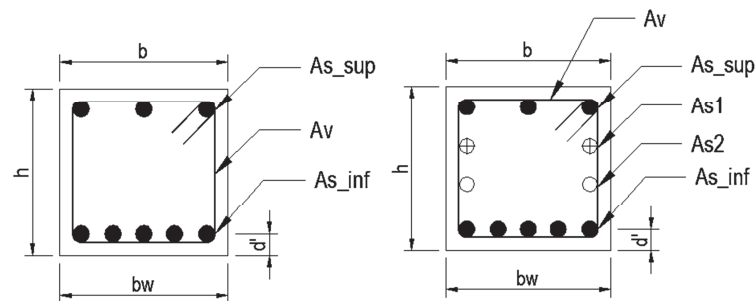


SECCIÓN TIPO 1

Fuente: Realizado por Michael Rodríguez.

Para el armado de vigas y columnas rectangulares se tiene:

FIGURA 5.3 INFORMACIÓN DEL ARMADO EN VIGAS Y COLUMNAS



Fuente: Realizado por Michael Rodríguez.

5.2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA

De igual manera, aunque en este trabajo solo se centra en los disipadores TADAS, solo para completar la información que se puede introducir para utilizar los programas se incluye los datos necesarios para utilizar disipadores ADAS (Aguiar y Mora, 2015) y Shear Link (Hurtado y Bozzo, 2008).

TABLA 5.4 MATRIZ PARA CREAR DISIPADORES ADAS

| Nombre de la sección | = | Tipo de material | fy | fu | Es | Tipo |
|--------------------------|---|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------|
| A definir por el usuario | = | 1.2 | Límite elástico | Límite plástico | Módulo de Elasticidad del acero | Tipo 4 ADAS |

TABLA 5.4 CONTINUACIÓN HORIZONTAL

| h | tw | bs | bi | n | miu |
|--------------------|---------------------|---------------|---------------|------------------|---------------------------|
| altura de la placa | espesor de la placa | base superior | base superior | número de placas | ductilidad del disipador. |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 5.5 MATRIZ PARA CREAR DISIPADORES TADAS

| Nombre de la sección | = | Tipo de material | fy | fu | Es | Tipo |
|--------------------------|---|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|--------------|
| A definir por el usuario | = | 1.2 | Límite elástico | Límite plástico | Módulo de Elasticidad del acero | Tipo 5 TADAS |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 5.5 CONTINUACIÓN HORIZONTAL

| h | tw | bs | b | n | miu |
|--------------------|---------------------|---------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| altura de la placa | espesor de la placa | base superior | base sección media | número de placas | ductilidad del disipador. |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 5.6 MATRIZ PARA CREAR DISIPADORES SHEAR LINK BOZZO

| Nombre de la sección | = | Tipo de material | fy | fu | Es | Tipo | b | h | ht | n |
|--------------------------|---|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|
| A definir por el usuario | = | 1.2 | Límite elástico | Límite plástico | Módulo de Elasticidad del acero | Tipo 6 SL | Ancho de una ventana | Altura de una ventana | Altura total de un parante | Número de ventanas |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 5.6 CONTINUACIÓN HORIZONTAL

| np | e | t | z | miu |
|---|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Número de elementos verticales de altura ht | Espesor de la ventana | Espesor del marco del disipador | Base del marco de altura h | Ductilidad esperada de disipador |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.2.4 ASIGNACIÓN DE SECCIONES A LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA

Una vez asignada la numeración a vigas, columnas, diagonales y disipadores de la estructura se procede a asignar las secciones antes definidas a cada uno de los elementos. Esta asignación se realiza en “**Table1**” de la siguiente manera:

Table1 =

| | | | |
|--|--|--|------------|
| Sección en el nudo inicial de elemento 1 | Sección en el centro luz de elemento 1 | Sección en el nudo final de elemento 1 | Elemento 1 |
| | | | |
| Sección en el nudo inicial de elemento n | Sección en el centro luz de elemento n | Sección en el nudo final de elemento n | Elemento n |

5.2.5 GENERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA

Para la obtención de datos como coordenadas, inclinación, vectores de colocación VC, de los elementos de la estructura se usarán los programas dentro del programa ejecutable principal **Structure_Geom_2D_v2** basados en programas hechos por el Dr. Aguiar con el nombre de CEINCI-LAB, la forma de ingresar los datos se indica a continuación:

Número de pisos (np)

Número de nudos restringidos (nr)

Generación de los elementos

$$\text{GEN} = \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{N}^\circ \text{ del} \\ \text{elemento} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Nudo} \\ \text{inicial} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Nudo} \\ \text{final} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{N}^\circ \text{ de} \\ \text{elementos a} \\ \text{generar} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento en} \\ \text{la numeración} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento de la} \\ \text{numeración en el} \\ \text{nudo inicial} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento de} \\ \text{la numeración} \\ \text{en el nudo final} \\ \hline \end{array} \right|$$

Generación de los nudos

$$\text{NODE} = \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{N}^\circ \text{ del} \\ \text{nudo} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Coord. X} \\ \text{del nudo} \\ \text{inicial} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Coord. X} \\ \text{del nudo} \\ \text{final} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{N}^\circ \text{ de} \\ \text{nudos a} \\ \text{generar} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento en} \\ \text{la numeración} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento de} \\ \text{la longitud en} \\ \text{X} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento} \\ \text{de la longitud} \\ \text{en Y} \\ \hline \end{array} \right|$$

5.2.6 ASIGNACIÓN DE CARGAS

Se colocará la carga gravitacional distribuida a los elementos que correspondan, de la siguiente manera:

$$\text{Fm} = \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{N}^\circ \text{ del elemento cargado} \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{|c|} \hline \text{Carga distribuida existente actuando sobre el elemento} \\ \hline \end{array} \right|$$

5.3 DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS QUE DETERMINARÁN LAS CURVAS DE CAPACIDAD

La siguiente es una descripción de muchos de los programas necesarios para crear las curvas de capacidad hechos por el autor. Y que estarán dentro de los programas ejecutables que se deben escribir luego de las variables descritas y de lo expuesto anteriormente, los programas ejecutables son ***Pushover_2***, ***Pushover_3*** o ***Pushover_4***, ***MEC_NEC14*** o ***MEC_NEC14_22*** y ***ResultsMEC_B*** o ***ResultsMEC_B22***.

Los códigos de los programas se los colocó en el anexo No2.

TABLA 5.7 DESCRIPCIÓN DE PROGRAMAS PARA PUSHOVER

| PROGRAMA | DESCRIPCIÓN |
|----------------------|---|
| Structure_Geom_2D_v2 | Programa que determina la geometría de la estructura, los grados de libertad, la matriz que contiene los vectores de colocación, la longitud, seno y coseno de los elementos. |
| Pushover_2 | Programa que obtiene la curva de capacidad sísmica resistente de pórticos con o sin disipadores ADAS, TADAS o Shear Link. Con pushover monotónico normal. |
| Pushover_3 | Programa que obtiene la curva de capacidad sísmica resistente de pórticos con o sin disipadores ADAS, TADAS o Shear Link. Con pushover modal. |
| Pushover_4 | Programa que obtiene la curva de capacidad sísmica resistente de pórticos con o sin disipadores ADAS, TADAS o Shear Link. Con pushover modal cíclico. |
| MEC_NEC14 | Programa que encuentra el punto de desempeño. Para pushover normal. |
| MEC_NEC14_22 | Programa que encuentra el punto de desempeño. Para pushover modal y cíclico modal. |
| ResultsMEC_B | Imprime las tablas y gráficos finales en la pantalla. Para pushover normal. |
| ResultsMEC_B22 | Imprime las tablas y gráficos finales en la pantalla. Para pushover modal y cíclico modal. |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 5.8 PROGRAMAS DENTRO DE STRUCTURE_GEOM_2D_V2

| PROGRAMA | DESCRIPCIÓN |
|-----------------|--|
| cg_sismo2 | Programa para encontrar las coordenadas generalizadas en un Pórtico Plano considerando un grado de libertad por piso, donde las vigas tengan cargas de la matriz F_m , sirve para pórticos irregulares en elevación. |
| dibujo | Programa para dibujar una estructura plana. |
| glinea_portico | Programa para generar las coordenadas de los nudos en forma lineal. |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

CONTINUACIÓN TABLA 5.8

| | |
|------------|---|
| gn_portico | Programa para generar el Nudo inicial y final de los elementos. |
| longitud | Programa que calcula longitud, seno, coseno de los elementos. |
| vc | Programa que calcula el vector de colocación de un pórtico plano. |

TABLA 5.9 PROGRAMAS QUE DETERMINAN LA RIGIDEZ DEL DISIPADOR SOBRE CONTRAVIENTOS, DE ACUERDO A LOS DOS MODELOS DE CÁLCULO

| PROGRAMA | DESCRIPCIÓN |
|------------------|---|
| histeresis_adas | Determina rigidez, factor de amortiguamiento y puntos notables del modelo bilineal del disipador ADAS. |
| histeresis_tadas | Determina rigidez, factor de amortiguamiento y puntos notables del modelo bilineal del disipador TADAS. |
| k_adas123 | Encuentra la matriz de rigidez del elemento disipador ADAS, en coordenadas globales. |
| k_tadas123 | Encuentra la matriz de rigidez del elemento disipador TADAS, en coordenadas globales. |
| K1_eqcorte4 | Halla la matriz de rigidez de los disipadores por el método de las dovelas, dividiendo los disipadores en 5 elementos. |
| kdiagonal_tadas | Sirve para encontrar la matriz de rigidez de la diagonal de acero del contraviento, reporta una matriz de 6 por 6 en la cual la tercera y sexta fila (lo propio con las columnas) son cero. |
| krigidez_tadas | Halla la contribución a la matriz de rigidez de la estructura de los disipadores modelados como una diagonal equivalente. |

Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 5.10 PROGRAMAS PARA HALLAR LA CONTRIBUCIÓN A LA MATRIZ DE RIGIDEZ DE LA ESTRUCTURA DE LOS ELEMENTOS: COLUMNAS, VIGAS, DISIPADORES Y MONTANTES DE ACERO

| TIPO DE PUSHOVER | PROGRAMA | DESCRIPCIÓN |
|-------------------------|-------------------------------|--|
| todos | Momento_Rotacion_ASCE41B | Si el momento es positivo en vigas, Assup se encuentra en la parte superior y Asinf en la parte inferior; caso contrario se invierte la armadura. Además llama a programas que determinan los parámetros del ASCE 41 |
| todos | Momento_Rotacion_ASCE41C | Similar al programa anterior pero ahora para las columnas, donde interviene la carga axial. |
| todos | Momento_Rotacion_ConcrASCE41B | Determina los parámetros de ASCE 41 para el caso de vigas de hormigón armado. |
| todos | Momento_Rotacion_ConcrASCE41C | Determina los parámetros de ASCE 41 para el caso de columnas de hormigón armado. |
| todos | Momento_Rotacion_AceroASCE41B | Determina los parámetros de ASCE 41 para el caso de vigas de acero. |
| todos | Momento_Rotacion_AceroASCE41C | Determina los parámetros de ASCE 41 para el caso de columnas de acero. |
| normal y modal | krigdez_ASCE41_2 | Encuentra las rigideces a flexión en nudo inicial, centro de luz y nudo final con las cuales halla matriz de rigidez de elementos vigas y columnas con el método de las dovelas y ensambla la matriz de rigidez total de la estructura. |
| normal y modal | krigdez_ASCE41_2Mfi | Pasa de la relación momento-rotación a momento-curvatura y encuentra rigideces a flexión en nudo inicial, centro de luz y nudo final con las cuales halla matriz de rigidez de elementos vigas y columnas por el método de las dovelas y ensambla la matriz de rigidez total de la estructura. Transforma los diagramas Momento-Rotación en Momento-Curvatura. |

TABLA 5.10 CONTINUACIÓN

| | | |
|----------------|------------------------|--|
| cíclico | krigidez_ASCE41_21 | Encuentra rigideces a flexión en nudo inicial, centro de luz y nudo final con las cuales halla matriz de rigidez de elementos vigas y columnas con el método de las dovelas y ensambla en la matriz de rigidez total de la estructura. Interviene el programa de histéresis. |
| normal y modal | krigidez_braces_eq2 | Determina la rigidez axial equivalente de contraviento-disipador. Además puede calcular sin disipador solo con diagonales. Asigna articulaciones a los elementos. |
| cíclico | krigidez_braces_eq3 | Determina la rigidez axial equivalente de contraviento-disipador. Además puede calcular sin disipador solo con diagonales. Asigna articulaciones a los elementos. Interviene el programa de histéresis. |
| normal y modal | krigidez_damper2 | Obtiene la rigidez del disipador con el modelo 2 A y ensambla la matriz de rigidez de la estructura. |
| normal y modal | krigidez_damper3 | Similar al programa anterior pero con el modelo 2 B. |
| cíclico | krigidez_damper31 | Similar al programa anterior pero intervienen programas de histéresis. |
| todos | PlasticHinge | Determina la longitud plástica. |
| todos | AxialTADAS | Para el modelo bilineal fuerza-desplazamiento del elemento disipador TADAS identifica la rama en que se encuentra para la rigidez axial. |
| todos | AxialADAS | Similar al anterior pero con disipador ADAS. |
| todos | PlasticHinge | Determina la longitud plástica. |
| cíclico | HisteresisMom_curv_BiS | Obtiene el diagrama de histéresis Momento Curvatura con efectos de Baushinger y Endurecimiento |
| cíclico | HisteresisF_Def_Bi3 | Obtiene el diagrama de histéresis Fuerza axial Deformación para diagonales |
| todos | Geom | Determina las propiedades de los elementos, como el área, el momento de inercia, el momento estático, la rigidez axial y la rigidez de flexión. |

TABLA 5.10 CONTINUACIÓN

| | | |
|-------|--------------|--|
| todos | Iteration_Vy | Sirve para determinar en forma exacta el punto de fluencia en una sección, cuando pasa de la zona elástica a la plástica, regresa un ciclo de carga y disminuye el incremento de carga. |
| todos | Dibujo_Din2 | Con éste programa se tiene la opción de indicar cada cuantos ciclos de carga dibuje la estructura y coloque colores en los elementos con daño. El color verde es para la zona post fluencia y el color rojo para la zona residual, y se forma un cuadro cuando ocurre una rótula plástica. |
| todos | masas | Determina la matriz de masas para el modelo en que se trabaja, con o sin diagonales. |
| todos | fuerzas_0 | Encuentra las fuerzas en coordenadas locales, en cada ciclo de carga. Luego son almacenadas en la variable Table2. |

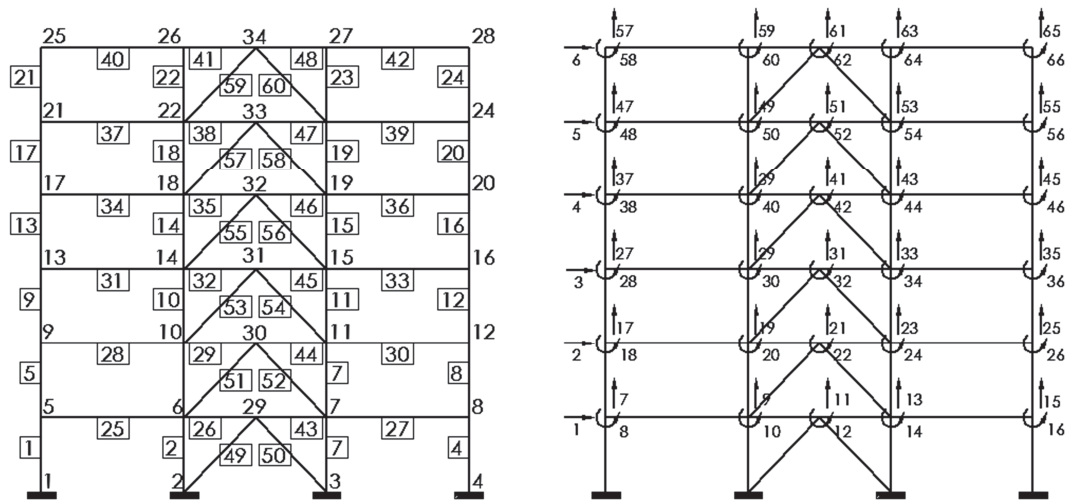
Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.4 PUSHOVER MONOTÓNICO NORMAL, Y COMPARACIÓN CON SAP2000 Y ETABS

En la figura 5.9 se presenta el diagrama de flujo resumido del procedimiento visto en el capítulo 1 para la obtención de la curva de capacidad con pushover de cargas monotónicas, y solo considerando el primer modo de vibración.

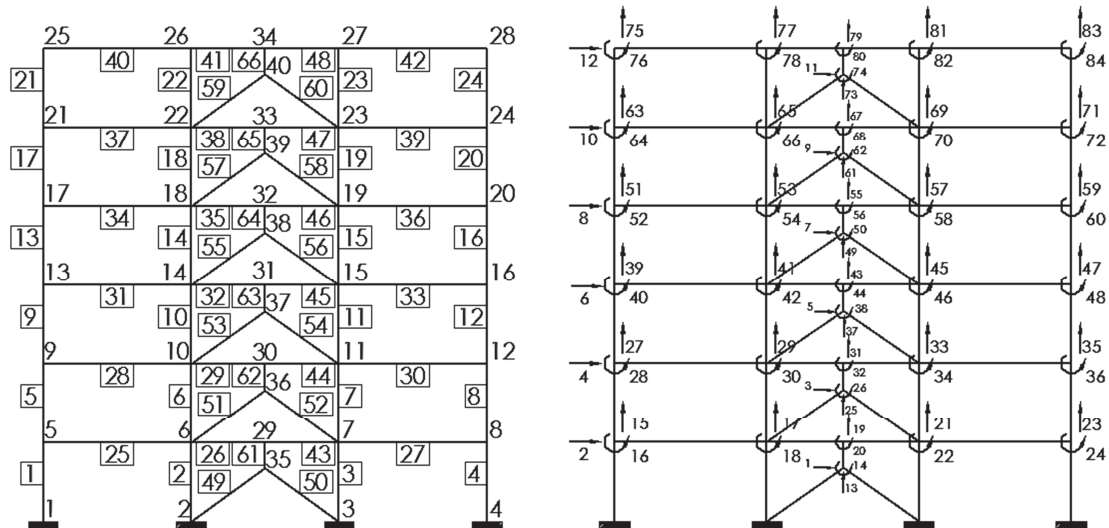
A continuación se presentan resultados de curvas de capacidad usando los programas presentados en este trabajo con programas comerciales como SAP2000 y ETABS V15, se compara los resultados del edificio de acero de 6 pisos visto en la figura 4.17, se vuelve a colocar la numeración de elementos y grados de libertad:

FIGURA 5.4 ESTRUCTURA MODELADA CON DIAGONALES EQUIVALENTES CON TADAS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.5 ESTRUCTURA MODELADA CON DISIPADOR TADAS COMO ELEMENTO INDEPENDIENTE



Fuente: Realizado por E. David Mora.

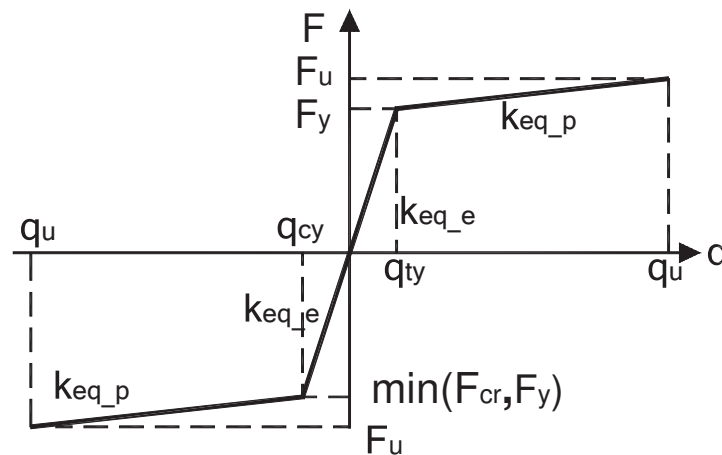
En los resultados de curvas de capacidad, la curva llamada Modelo 1 es el modelo hecho en Matlab con el método de la diagonal equivalente visto en el subcapítulo 4.9.2. El Modelo 2 es el modelo hecho en Matlab modelando al disipador como un elemento independiente, la letra A hace relación al modelo de

solución analítica del disipador TADAS visto en el subcapítulo 4.9.2 y la letra B al modelo por Dovelas del disipador TADAS visto en el mismo subcapítulo 4.9.2.

Para los demás modelos: en SAP2000 A y ETABS V15 A: se modeló al disipador como elementos tipo frame dándoles la forma del disipador, espesor equivalente para el momento de fluencia y asignando el comportamiento de formación de rótulas plásticas como flexocompresión con tablas automáticas del código ASCE 41.

Para los modelos SAP2000 B y ETABS V15 B: se modeló la diagonal equivalente como un elemento tipo link multilíneal controlando su comportamiento a través de modelar la curva Fuerza – Deformación axial de la forma indicada en a figura 5.6 Curva Fuerza – Deformación Axial. Y las ecuaciones que se ven a continuación.

FIGURA 5.6 CURVA FUERZA – DEFORMACIÓN AXIAL, PARA MODELOS DE SAP2000 Y ETABS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

$$q_{ty,cy} = q_y \text{ diagonal} + \frac{q_y \text{ disipador}}{\cos\theta} \quad (5.1)$$

$$q_{tu,cu} = q_y \text{ diagonal} + \frac{q_u \text{ disipador}}{\cos\theta} \quad (5.2)$$

$$F_{ty} = Keq_e * q_{ty} \quad (5.3)$$

$$F_{tu,cu} = F_{ty,cy} + Keq_p * (q_u \text{ disipador} - q_y \text{ disipador}) \quad (5.4)$$

Para el modelo ETABS V15 C: se modeló el disipador de energía como un elemento tipo link multilíneal controlando su comportamiento a través de modelar su curva Fuerza – Deformación axial, Corte - Deformación y su curva Momento – Rotación como lo indicado en la figura 5.7, usando las siguientes ecuaciones:

$$k_{Ae} = E * \bar{A}_{disipador} / h_{disipador} \quad (5.5)$$

$\bar{A}_{disipador}$ = Área media del disipador

$h_{disipador}$ = Altura de disipador

$$k_{Ap} = 0.03k_{Ae} \quad (5.6)$$

$$q_{dy} = \frac{fy}{E * h} \quad (5.7)$$

$$q_{du} = \mu * q_{dy} \quad (5.8)$$

$$F_{dy} = K_{Ae} * q_{dy} \quad (5.9)$$

$$F_{du} = F_{dy} + Keq_p * (q_{du} - q_{dy}) \quad (5.10)$$

$V_{dy, du}$ = Fuerzas de Cortantes límites

$d_{dy, du}$ = Desplazamientos límites en dirección de fuerzas cortantes

$$M_{dy} = V_{dy} * h_{disipador} / 2 \quad (5.11)$$

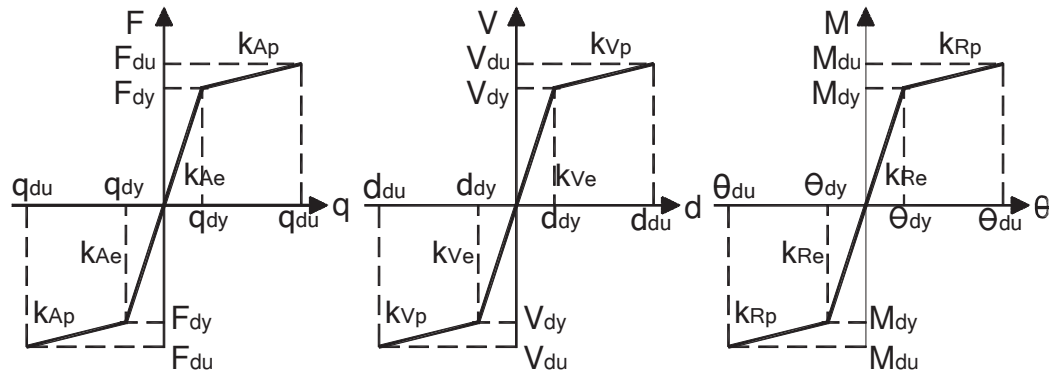
$$M_{du} = V_{du} * h_{disipador} / 2 \quad (5.12)$$

$$\theta_{dy} = d_{dy} / h_{disipador} \quad (5.13)$$

$$\theta_{du} = d_{du} / h_{disipador} \quad (5.14)$$

Para el modelo **ETABS V15 D**: se modeló la diagonal equivalente como un elemento tipo frame articulado con un área $Aeq_e = k_{Ae} / E$ controlando su comportamiento a través de asignación de rótulas plásticas con modelos de curva Fuerza – Deformación axial de igual manera a la indicada en el modelo **SAP2000 B y ETABS V15 B**.

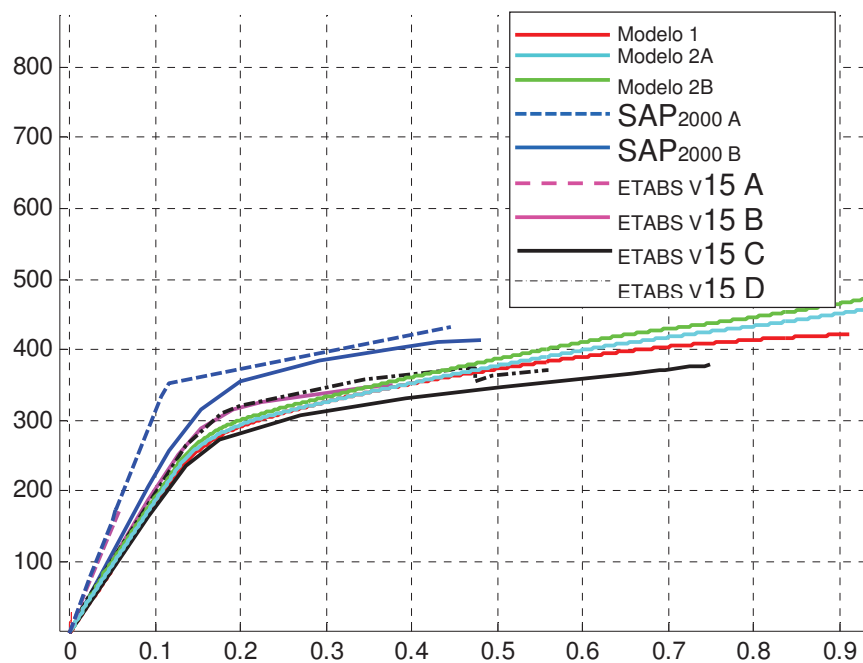
FIGURA 5.7 CURVA FUERZA – DEFORMACIÓN AXIAL, CURVA CORTE – DEFORMACIÓN EN DIRECCIÓN DE CORTANTE Y CURVA MOMENTO – ROTACIÓN, PARA MODELOS DE SAP2000 Y ETABS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Resultados de Curvas de Capacidad:

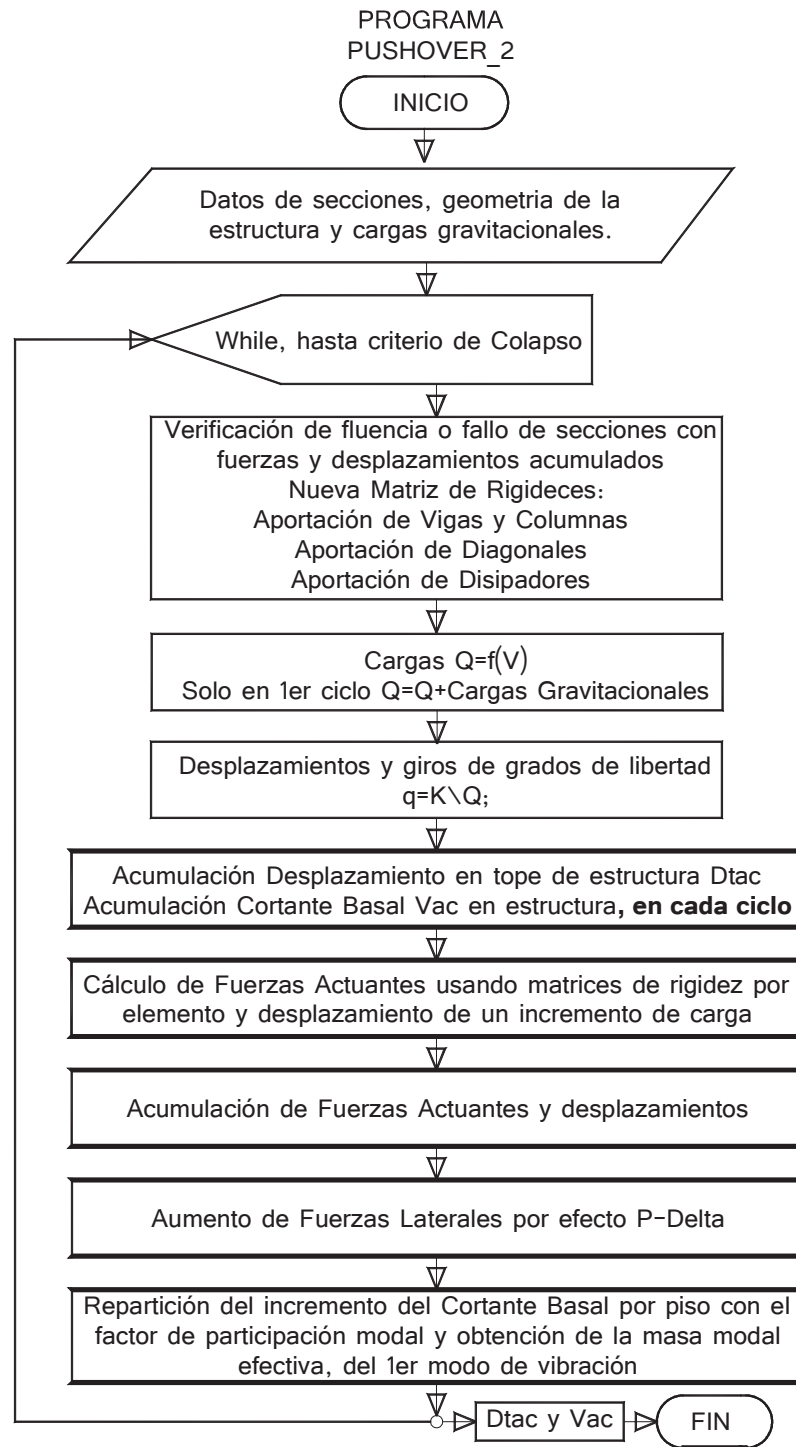
FIGURA 5.8 CURVA DE CAPACIDAD SÍSMICA RESISTENTE ENCONTRADA EN ESTRUCTURA DE ACERO CON DISIPADORES TADAS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE PUSHOVER MONOTÓNICO

FIGURA 5.9 DIAGRAMA DE FLUJO PARA CURVA DE CAPACIDAD CON PUSHOVER MONOTÓNICO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.5 PUSHOVER MULTIMODAL

Con el gran desarrollo informático que se tuvo en la última década del siglo XX, los investigadores empiezan a estudiar lo publicado y empiezan a cuestionar el Pushover, se dan cuenta que en estructuras irregulares el aplicar cargas laterales en función del primer modo de vibración no se obtienen resultados adecuados y recomiendan que se lo haga en base a todos los modos de vibración. Chopra y Goel (1999, 2001, 2002).

5.5.1 PUSHOVER MULTIMODAL PSEUDO - DINÁMICO

Chopra y Goel (1999, 2001, 2002) proponen hacer análisis separados con cargas distribuidas aplicando los diferentes modos de vibración, escalándolos según su influencia y combinando los resultados con diferentes criterios que están en función de la frecuencia y amortiguamiento de cada modo.

En este tipo de análisis no se puede conocer con certeza la secuencia de daño de los elementos debido a que en los procesos con los diferentes modos de vibración variarán la secuencia de daño de los elementos, además de tener otros problemas como no poder repartir las cargas de acuerdo al cambio de los modos de vibración cuando fluyen o fallan secciones, FEMA 440, 2005. Entonces se propone, hacer esta combinación de resultados con criterios, como el CQC, dentro de cada ciclo de carga, también será muy fácil cambiar las cargas según los variantes modos de vibración, debido a la degradación de las secciones, estos procesos darán resultados lógicos llegando a un pushover pseudodinámico, pero llevará también un poco más de trabajo computacional.

5.5.2 TEORÍA DE PUSHOVER MULTIMODAL

En un análisis pushover monotónico el proceso se da al cargar lateralmente una estructura hasta su colapso. En este análisis modal se usa incrementos del

cortante basal en cada ciclo de carga y este se lo reparte para cada modo de vibración usando una distribución de fuerzas laterales $s_n^* = m\phi_n$, como se indica en Chopra (2014), siendo m la masa de cada piso, ϕ_n los autovalores en el modo de vibración n .

Luego la repartición de la carga lateral por piso se la hace de acuerdo a la participación modal $\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}$, siendo $L_n = \phi_n^T m J$, $M_n = \phi_n^T m \phi_n$ y J un vector unitario para el caso de tener una matriz de masas que sea diagonal ortogonal.

Entonces podremos obtener un vector de cargas laterales para cada ciclo y para cada modo de vibración igual a:

$$Qa_n = \frac{\text{diag}(M) \cdot \phi_n}{\sum_{i=1}^n \text{pisos} (M_T \cdot \phi_n)} * \Gamma_n * \Delta V \quad (5.15)$$

Donde,

$\text{diag}(M)$ =Es la diagonal de la matriz de masas de la estructura, si la matriz es diagonal.

ϕ_n = Son los autovalores en el modo de vibración n .

Γ_n =Factor de participación modal.

ΔV =Incremento de Cortante Basal.

5.5.3 CRITERIO DE COMBINACIÓN MODAL

Si se realiza un análisis paso a paso de historia en el tiempo y separamos los resultados obtenidos para cada modo de vibración de la estructura se podrá observar que en el transcurso de la respuesta de las estructuras ante un acelerograma habrá picos absolutos máximos en diferentes sitios como resultado para cada modo, esto hace algo difícil combinar exactamente los resultados,

puesto que un análisis pushover representa el pico absoluto máximo de respuesta de un análisis dinámico en historia en el tiempo.

El criterio más cercano a esta realidad y el más utilizado actualmente es el CQC (Complete Quadratic Combination) (Chopra (2014)), en resumen realiza una combinación de suma de cuadrados más un término que combina las respuestas con un factor que dependerá de la frecuencia y factor de amortiguamiento de cada modo de vibración, este término puede ser positivo o negativo. Se presenta a continuación las fórmulas utilizadas para combinar las respuestas r con el criterio CQC:

$$r^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} r_i r_j \quad (5.16)$$

Lo que es igual a escribirla de la siguiente forma, la cual resume lo descrito en el párrafo anterior:

$$r = \left(\sum_{j=1}^N r_j^2 + \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} r_i r_j}_{i \neq j} \right)^{1/2} \quad (5.17)$$

Dónde,

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_j} (\xi_i + a \xi_j) a^{1.5}}{(1 - a^2)^2 + 4\xi_i \xi_j a(1 + a^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_j^2) a^2} \quad (5.18)$$

$$a = \frac{W_{nj}}{W_{ni}} \quad (5.19)$$

i y j corresponden al i – esimo y j – esimo modo de vibración.

W_{ni} , W_{nj} son las frecuencias naturales de la estructura en los modos de vibración i y j .

ξ_i , ξ_j son los factores de amortiguamiento en los modos de vibración i y j .

5.5.4 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

Para esta combinación modal vista se necesita el factor de amortiguamiento de la estructura en cada modo de vibración. Los factores utilizados para los diferentes modos de vibración se los tomó de Naoki (2003) (Aguiar (2012)).

Se tomó el criterio de factores de amortiguamiento de Naoki debido a su sustento práctico, y este se resume en las siguientes fórmulas:

Para estructuras de Hormigón Armado:

$$\xi_i = 1.4 * \xi_{i-1} \quad (5.20)$$

Para estructuras de acero:

$$\xi_i = (1.3 - 1.4) * \xi_{i-1} \quad (5.21)$$

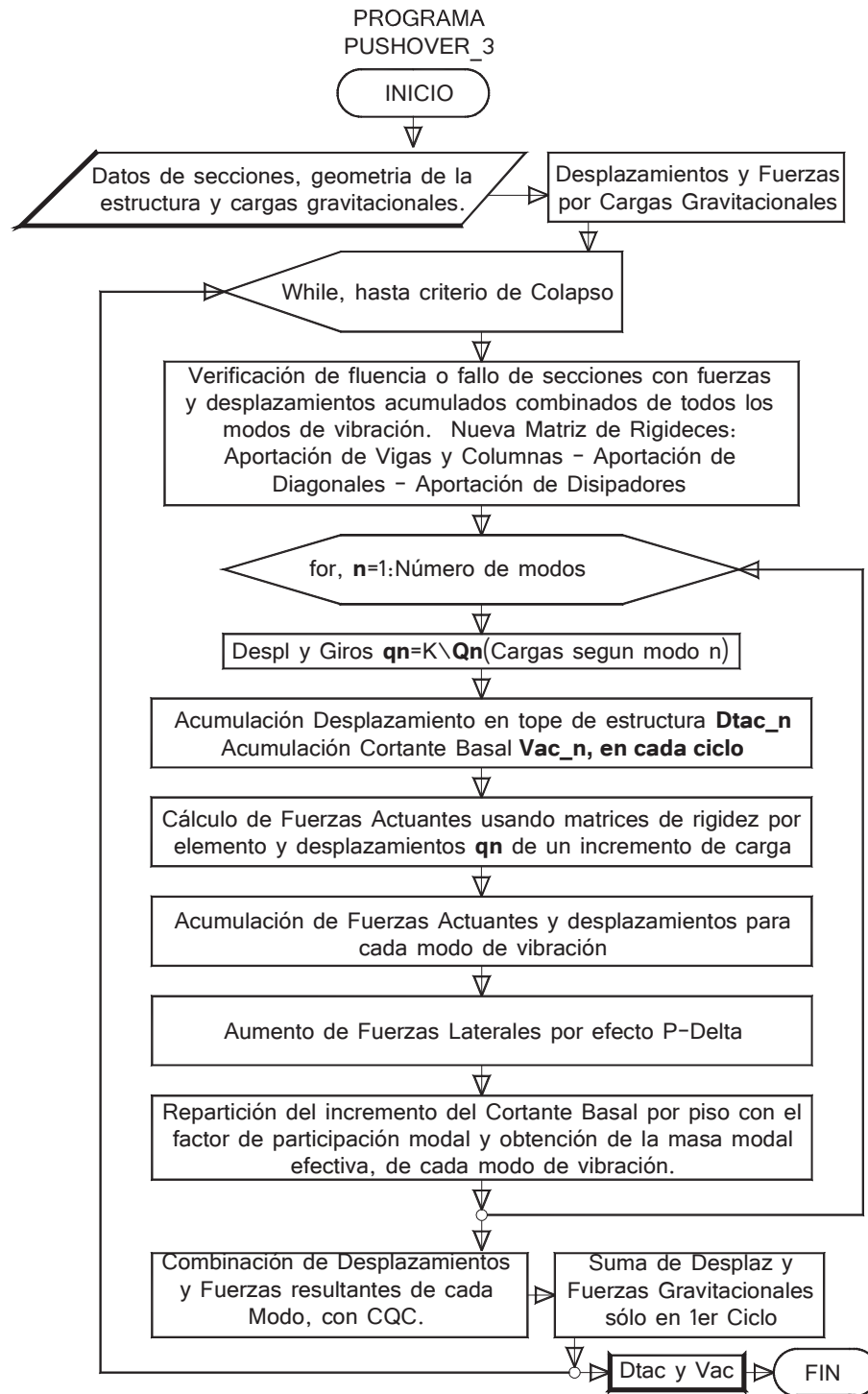
Para estructuras de Mixtas:

$$\xi_i = (1.7 - 1.8) * \xi_{i-1} \quad (5.22)$$

Dónde ξ_i es el factor de amortiguamiento en el modo i ; ξ_{i-1} es el modo de vibración en el modo $i - 1$.

5.5.5 DIAGRAMA DE FLUJO PARA PUSHOVER MULTIMODAL

FIGURA 5.10 DIAGRAMA DE FLUJO PARA CURVA DE CAPACIDAD CON PUSHOVER MULTIMODAL

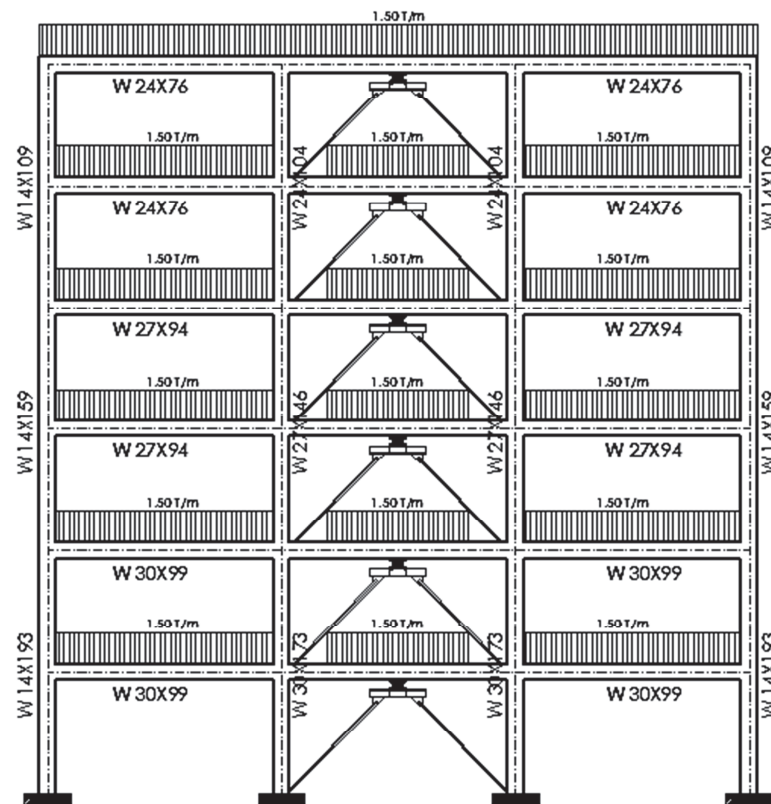


Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.5.6 EJEMPLO DE RESULTADOS DE PUSHOVER MULTIMODAL

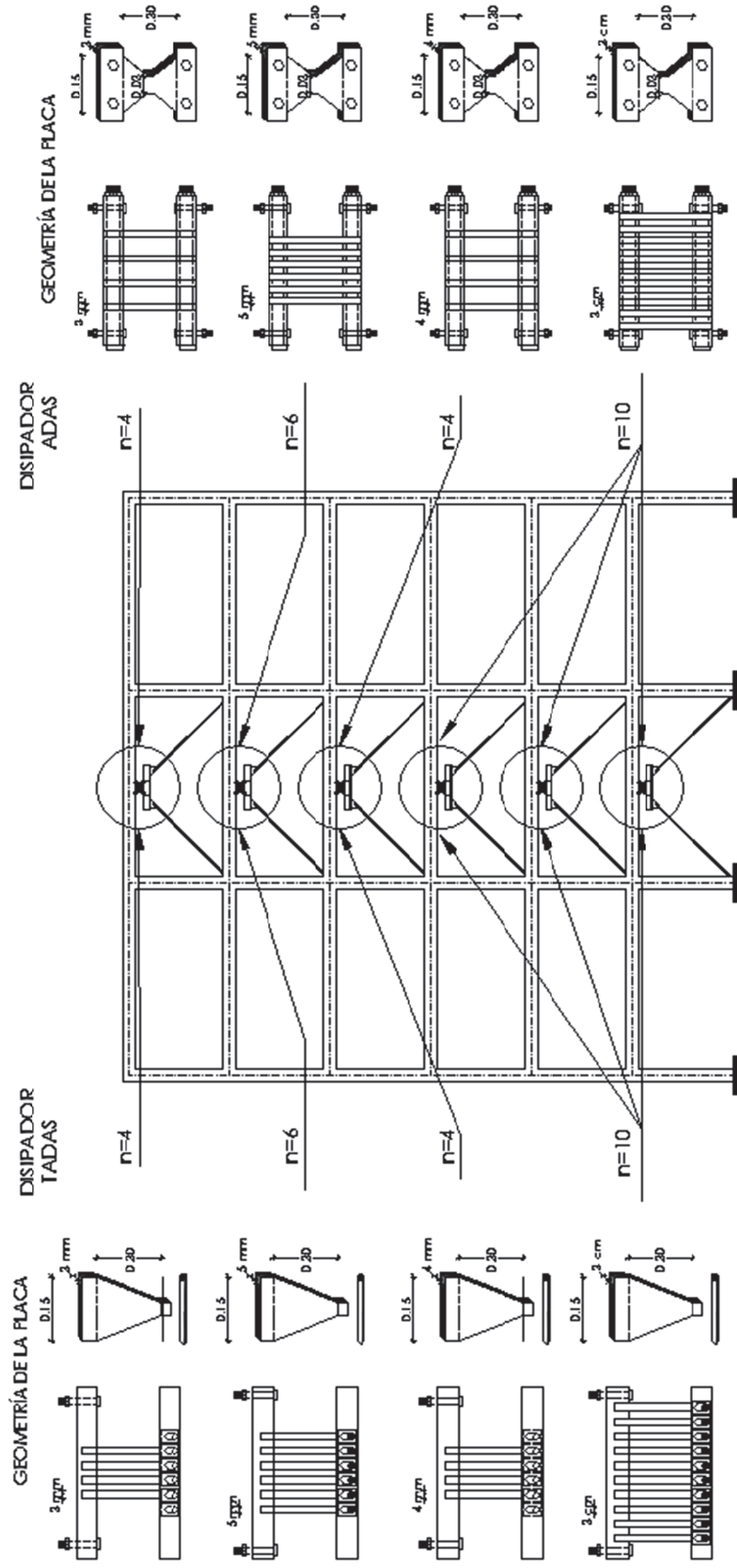
Se toma la misma estructura analizada en capítulos anteriores, y se muestra los resultados de las curvas de capacidad:

FIGURA 5.11 ESTRUCTURA DE ACERO CON DISIPADORES DE ENERGÍA COLOCADOS SOBRE DIAGONALES EN FORMA DE “V” INVERTIDA



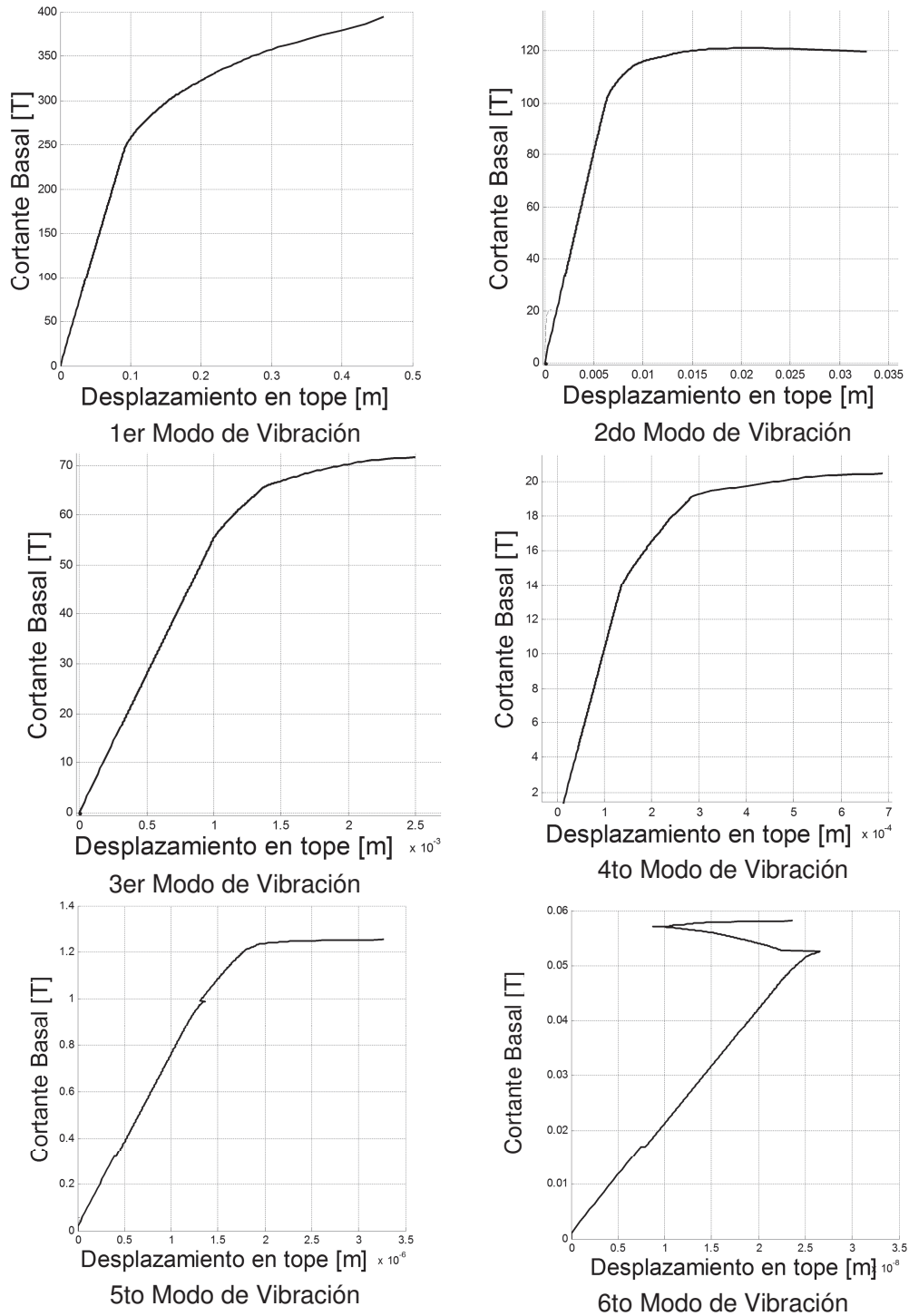
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.12 GEOMETRÍA DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA ADAS, A LA IZQUIERDA Y TADAS A LA DERECHA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

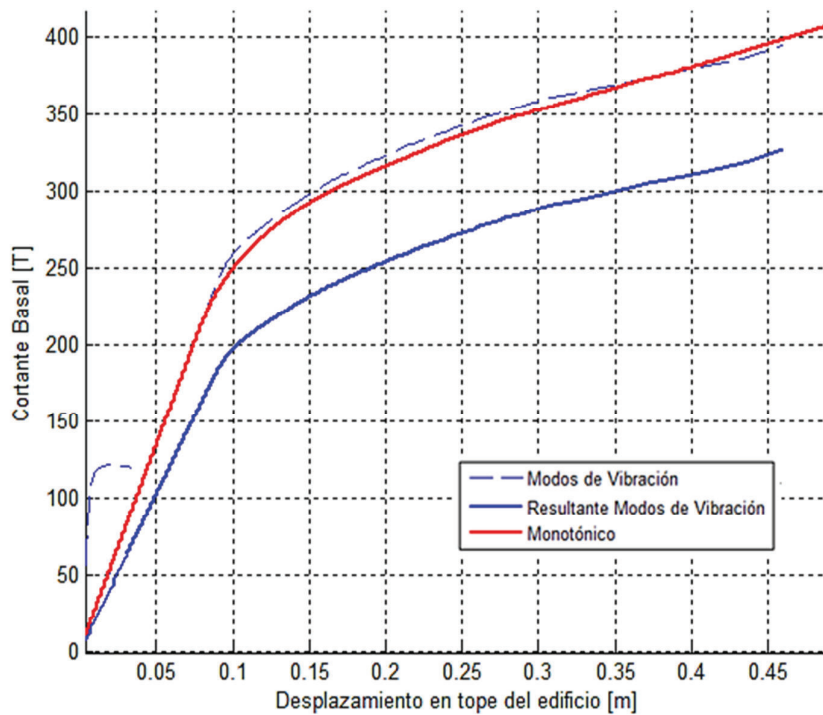
FIGURA 5.13 CURVAS DE CAPACIDAD CON MODOS DE VIBRACIÓN DE ESTRUCTURA DE ACERO DE 6 PISOS CON DISIPADORES ADAS, COMO ELEMENTO DISIPADOR



Fuente: Realizado por E. David Mora.

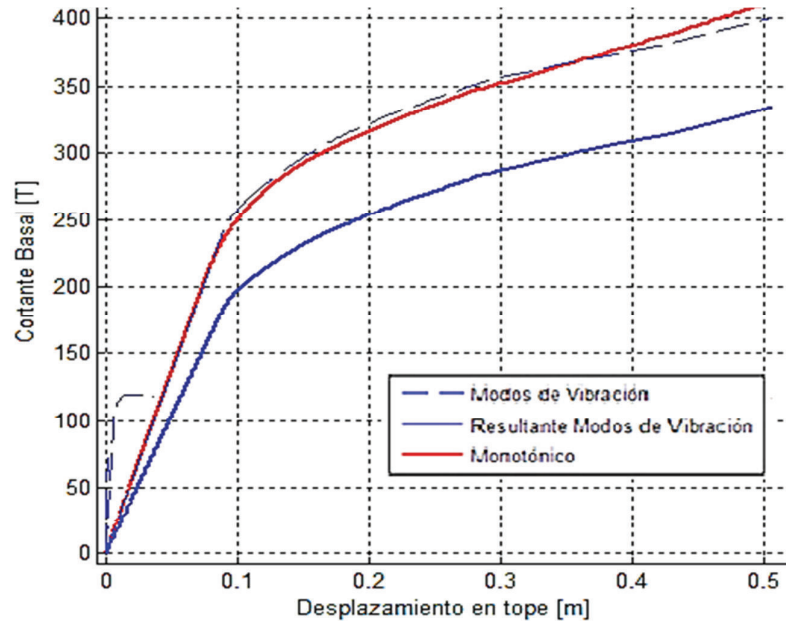
En la figura 5.14 y figura 5.15 se presentan con línea entrecortada, la contribución de cada uno de los modos, con línea continua la resultante que se obtiene al aplicar el criterio de combinación modal CQC, y con línea roja el resultado de los programas de pushover monotónico. En este caso se observa que la resultante se aleja de la curva del primer modo y que tiene valores muy inferiores para desplazamientos altos.

FIGURA 5.14 CURVAS DE CAPACIDAD MODAL Y MONOTÓNICA DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON DISIPADORES ADAS, CON CONTRIBUCIÓN DE CADA MODO DE VIBRACIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.15 CURVAS DE CAPACIDAD MODAL Y MONOTÓNICA DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON DISIPADORES TADAS, CON CONTRIBUCIÓN DE CADA MODO DE VIBRACIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.6 PUSHOVER CÍCLICO MODAL PSEUDO DINÁMICO

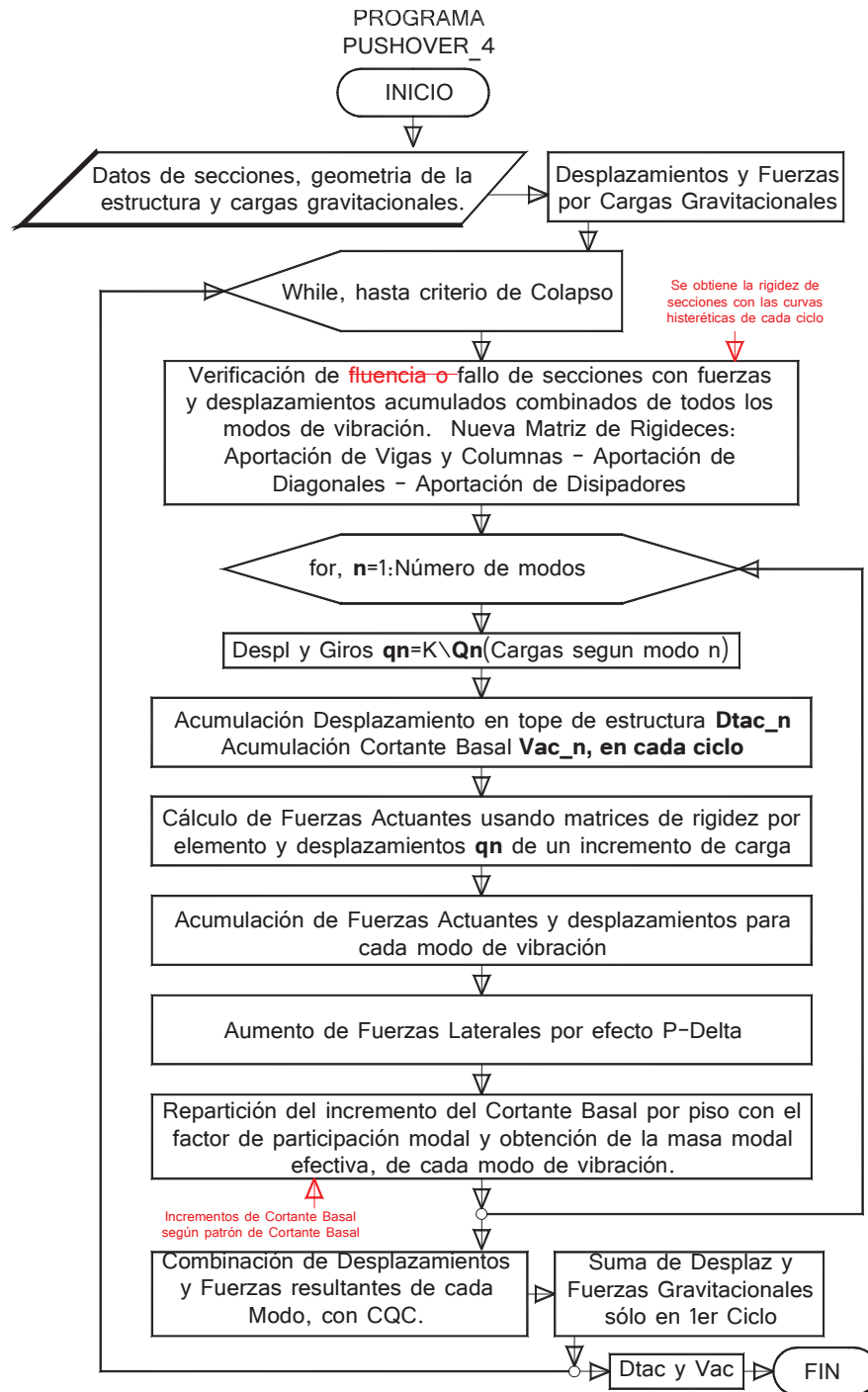
Al realizar una aplicación del incremento de Cortante Basal de manera reversible incremental con patrones de distintas formas, como por ejemplo sinusoidal, se llega a este tipo de análisis.

La diferencia de un pushover normal y cíclico además de la manera de aplicar las cargas, es el uso de curvas con reglas histeréticas. Para acero se ha usado reglas de endurecimiento y del efecto Baushinger del capítulo 2. En este tipo de análisis también se utilizó la aportación de modos de vibración superiores con el mismo procedimiento descrito en el subcapítulo 5.5.

Los edificios como se verá son sensibles al patrón de cargas aplicado, en el sexto capítulo por esta razón se usó un criterio diferente, se aplicó incremento reversible según el cortante basal acumulado y el cortante obtenido del espectro de diseño. En la figura 5.16 en rojo se señalan las diferencias con un pushover multimodal.

5.6.1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA CURVA DE CAPACIDAD CON PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL

FIGURA 5.16 DIAGRAMA DE FLUJO PARA CURVA DE CAPACIDAD CON PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL

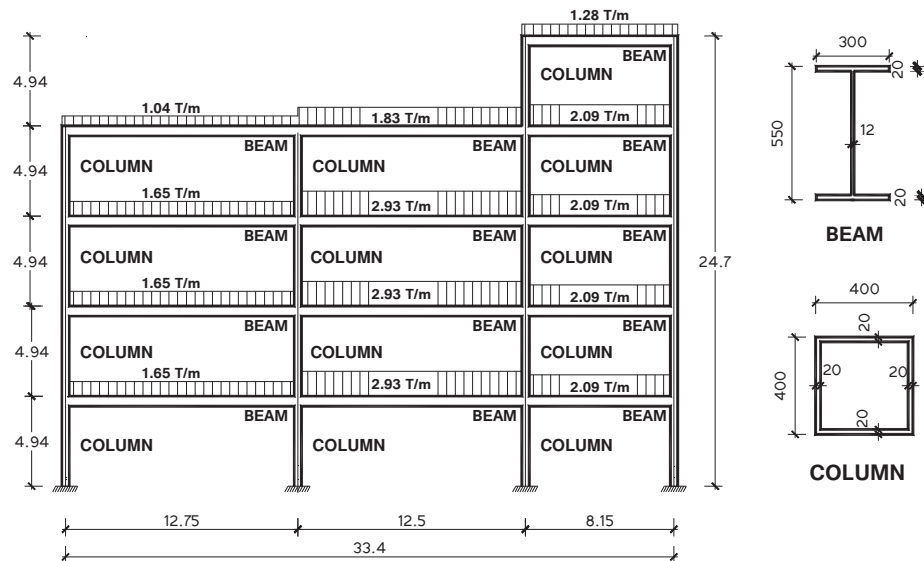


Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.6.2 EJEMPLO DE RESULTADOS DE PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL DE EDIFICIO IRREGULAR

A continuación se presenta el edificio irregular con el que se probaron diferentes patrones de cortante basal:

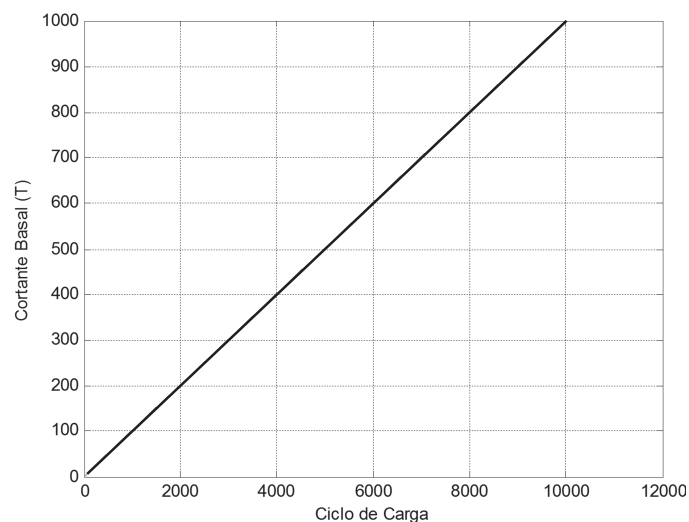
FIGURA 5.17 EDIFICIO IRREGULAR DE ACERO, SECCIONES A36



Fuente: Realizado por E. David Mora.

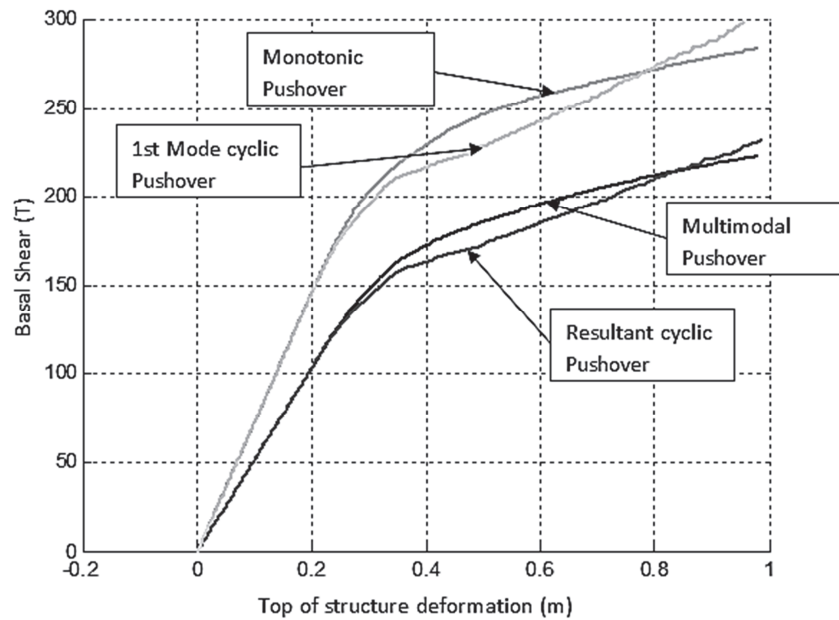
1er Patrón de Cortante Basal:

FIGURA 5.18 VARIACIÓN DE CARGAS MONOTÓNICAS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.19 COMPARACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD



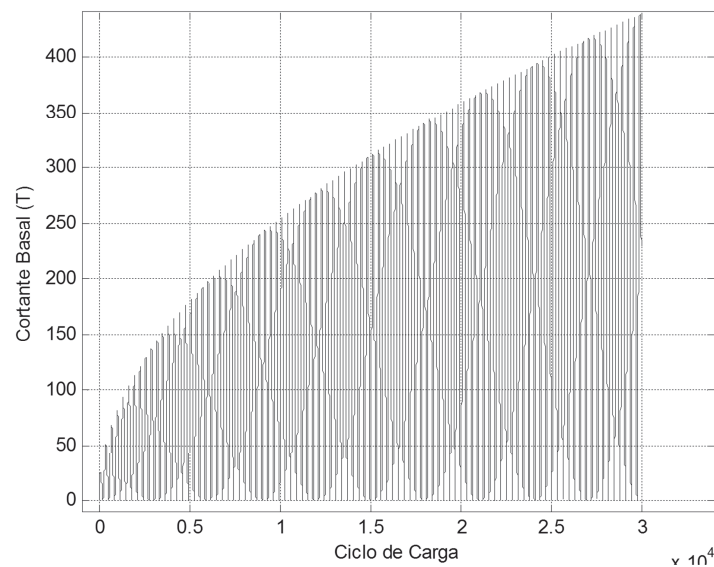
Fuente: Realizado por E. David Mora.

2do Patrón de Cortante Basal:

Carga aplicada en una dirección según la siguiente ecuación:

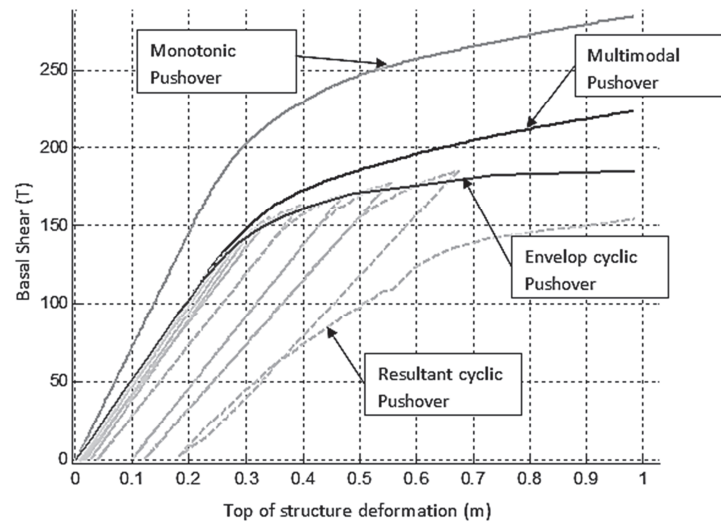
$$V_0 = 4 N^{0.5} \left(1 + \text{sen} \left(\frac{N}{5} \right) \right) \quad (5.23)$$

FIGURA 5.20 VARIACIÓN DE CARGAS EN UNA DIRECCIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.21 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD



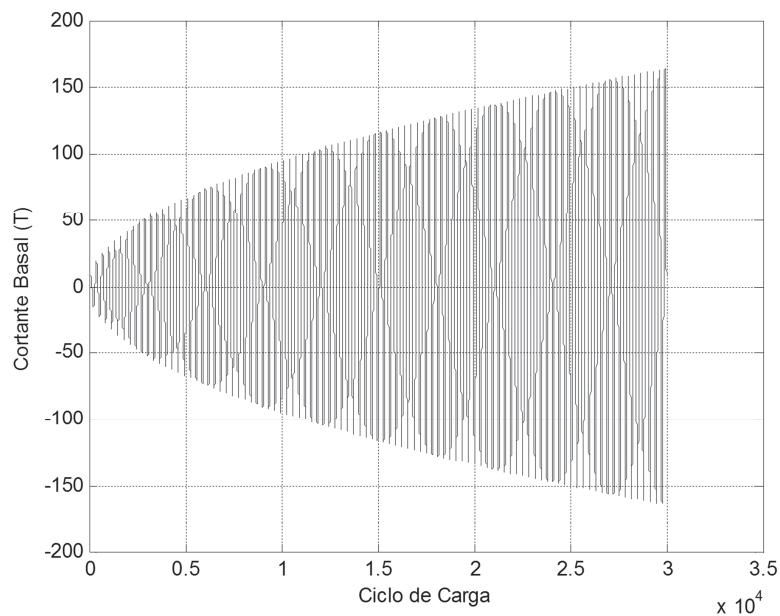
Fuente: Realizado por E. David Mora.

3er Patrón de Cortante Basal:

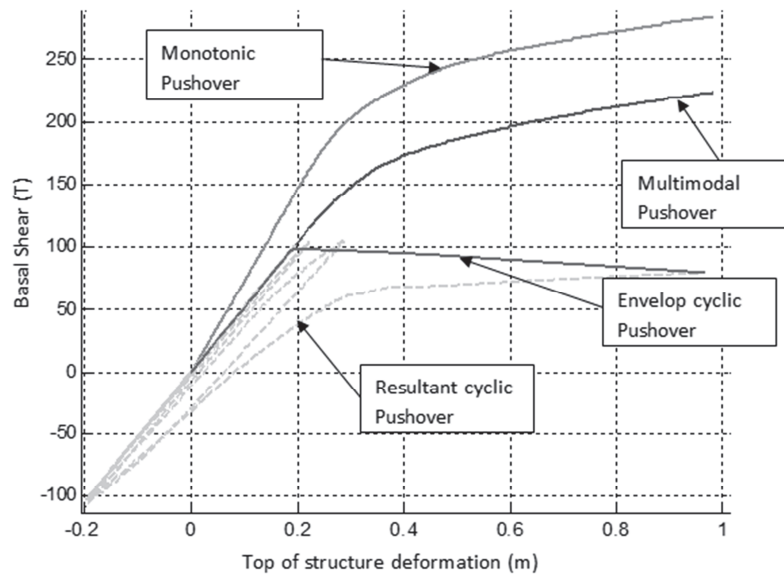
Carga aplicada en dos direcciones según la siguiente ecuación:

$$V_0 = 3 N^{0.5} \text{sen} \left(\frac{N}{5} \right) \quad (5.24)$$

FIGURA 5.22 VARIACIÓN DE CARGAS EN DOS DIRECCIONES



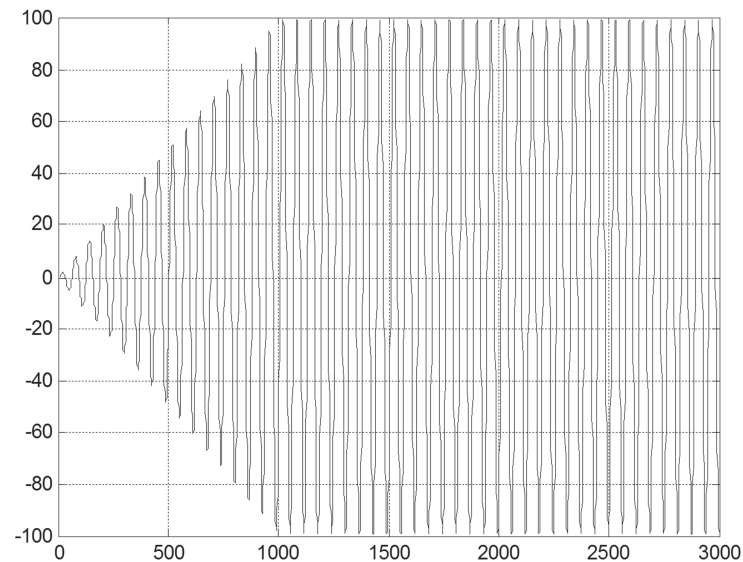
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.23 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD

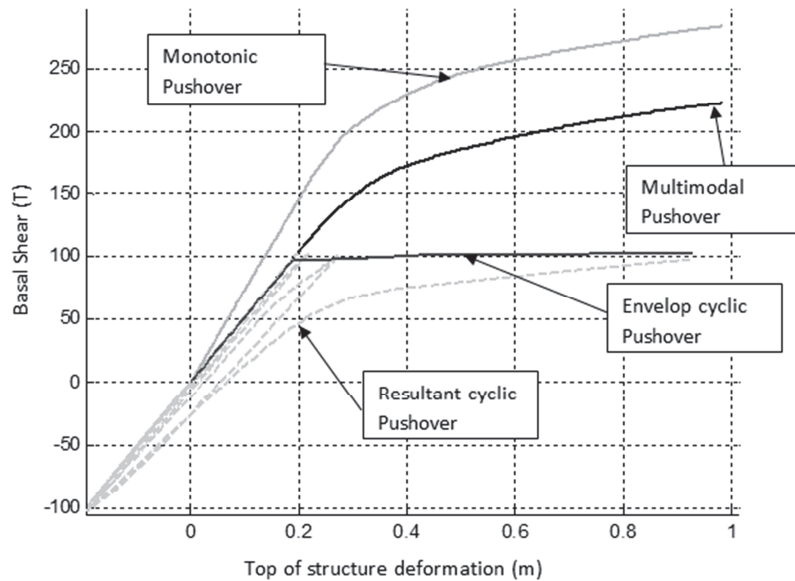
Fuente: Realizado por E. David Mora.

4to Patrón de Cortante Basal:

Incremento Sinusoidal linealmente incremental, y constante luego de la fluencia de alguna sección:

FIGURA 5.24 VARIACIÓN DE CARGAS EN DOS DIRECCIONES

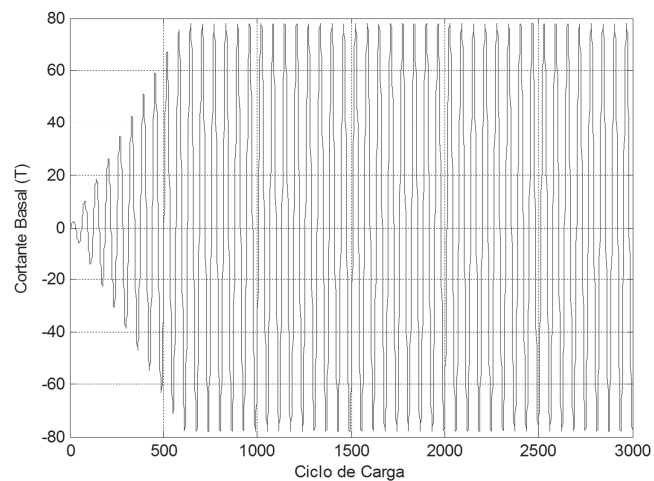
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.25 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD

Fuente: Realizado por E. David Mora.

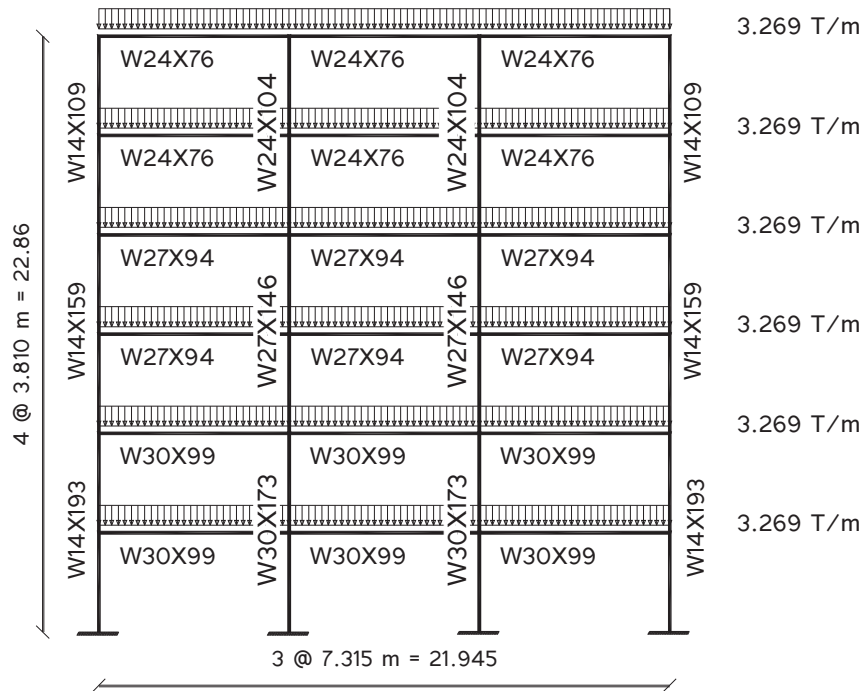
5.6.3 EJEMPLO DE RESULTADOS DE PUSHOVER CÍCLICO MULTIMODAL DE EDIFICIO REGULAR

A continuación se presenta el patrón de cargas usado para el edificio regular estudiado en capítulos anteriores y puesto en la figura 5.27, con el que se probó el análisis de pushover cíclico multimodal:

FIGURA 5.26 VARIACIÓN DE CARGAS EN DOS DIRECCIONES

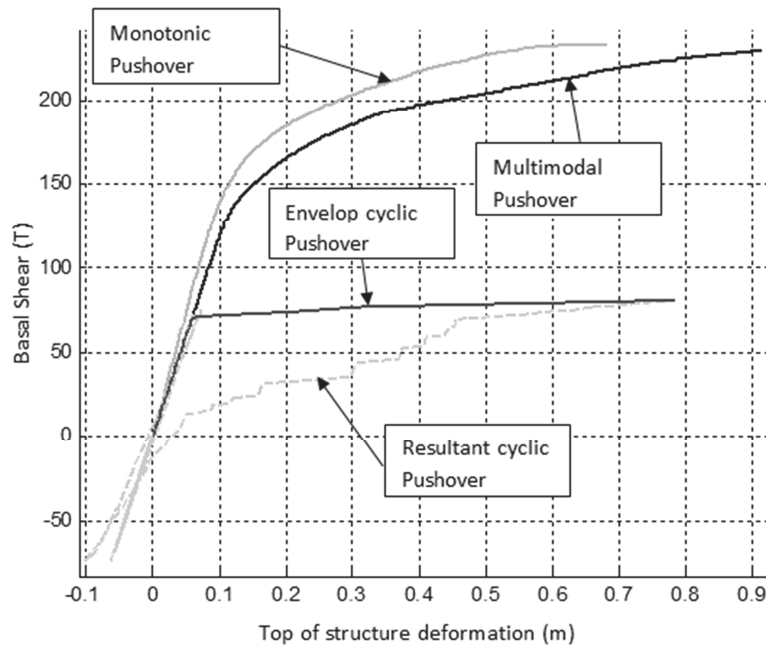
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.27 EDIFICIO REGULAR DE ACERO, SECCIONES A36



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.28 RESULTADOS DE CURVA DE CAPACIDAD



Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.7 MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD

Para hallar el punto de desempeño referido en el capítulo 1 se usó el método A del código ATC-40 con consideraciones del código FEMA 440 (2005), y el método de coeficientes modificado del código FEMA 440 (2005).

5.7.1 MÉTODO “A” ATC40

Primero se necesita tener la curva de capacidad en el mismo sistema que el espectro de diseño, es decir que se debe transformar la curva de capacidad $V - D_t$ en un espectro de capacidad $S_a - S_d$ en sistemas de un grado de libertad.

Las ecuaciones de cálculo son las siguientes:

$$S_{ain} = \frac{V_i}{\alpha_n M_T} \quad (5.25)$$

$$S_{din} = \frac{D_{tn}}{\Gamma_n} \quad (5.26)$$

Donde D_{ti}, V_i son las coordenadas de un punto de la curva de capacidad sísmica resistente para los cuales se determina el desplazamiento y aceleración espectral S_{din}, S_{ain} ; M_T es la masa total de la estructura; α_n es el coeficiente de masa modal del primer modo; Γ es el factor de participación del primer modo.

$$\alpha_n = \frac{(\phi_n^t M J)^2}{M_T (\phi_n^t M \phi_n)} \quad (5.27)$$

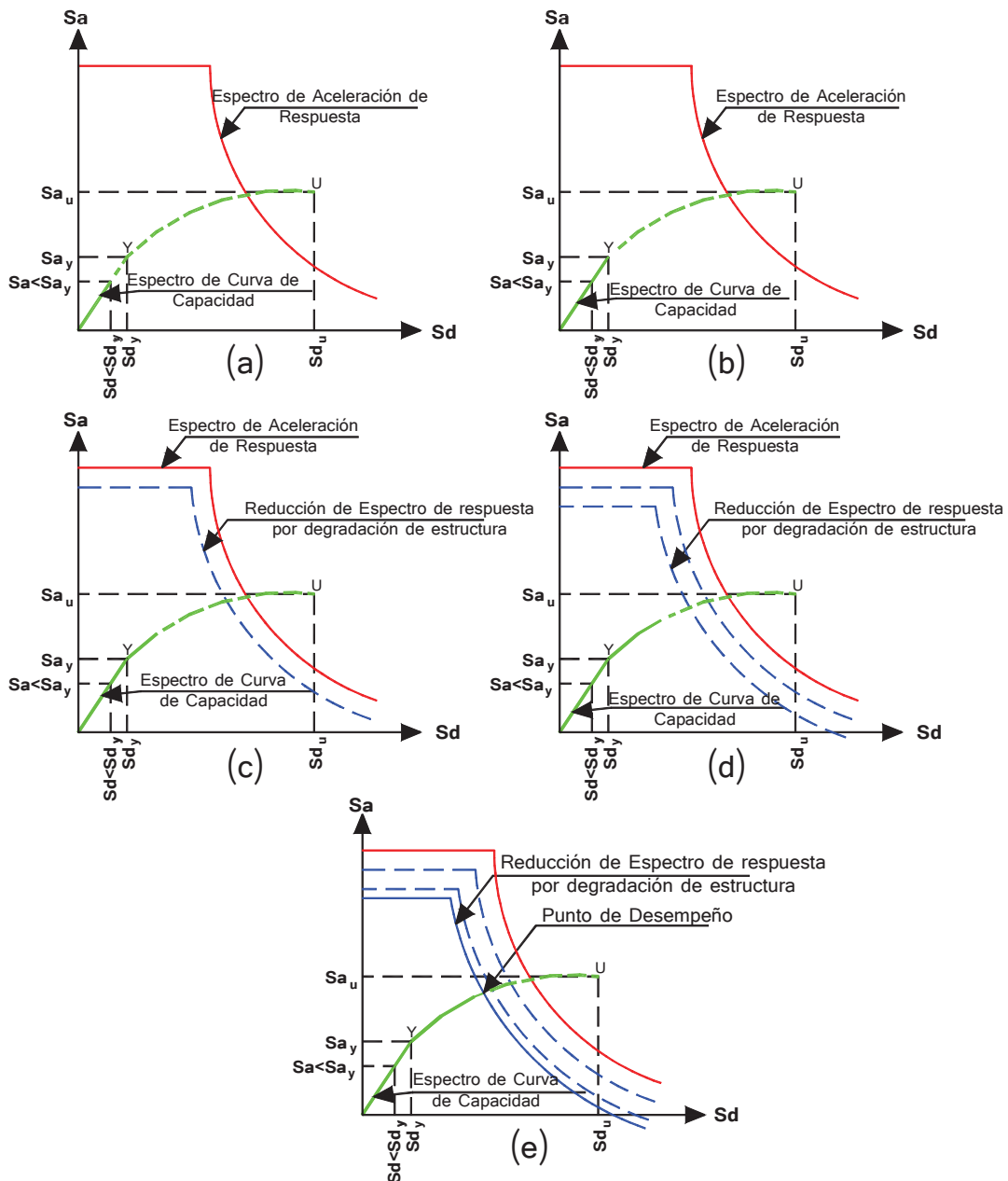
$$\Gamma_n = \frac{\phi_n^t M J}{\phi_n^t M \phi_n} \quad (5.28)$$

Las variables todavía no indicadas son: ϕ_n es el modo de vibración n normalizado a la unidad en el tope; M es la matriz de masas; J es el vector de incidencia del movimiento del suelo con las coordenadas laterales del pórtico; para el caso plano J es un vector unitario. Se destaca que el factor de participación modal se obtiene

en valor absoluto, y se toma el modo de vibración $n = 1$.

Luego con la degradación de las secciones como lo mostrado en la figura 5.29 se reduce el espectro de diseño por un coeficiente B , hasta que el espectro de diseño y el espectro de capacidad se encuentran en el punto de desempeño.

FIGURA 5.29 OBTENCIÓN DEL PUNTO DE DESEMPEÑO CON EL ESPECTRO DE CAPACIDAD Y ESPECTRO DE DISEÑO



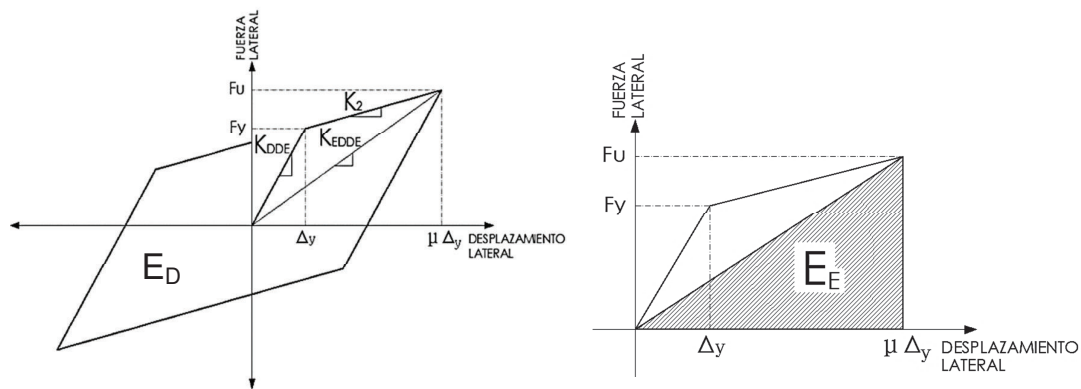
Fuente: Realizado por E. David Mora.

$$B = \frac{4}{1 - \ln(\xi_{eq} + \xi_1)} \quad (5.11)$$

Donde ξ_1 es el factor de amortiguamiento intrínseco de la estructura; se tomó $\xi_1 = 5\%$ por recomendaciones del código ASCE7 y NEC15.

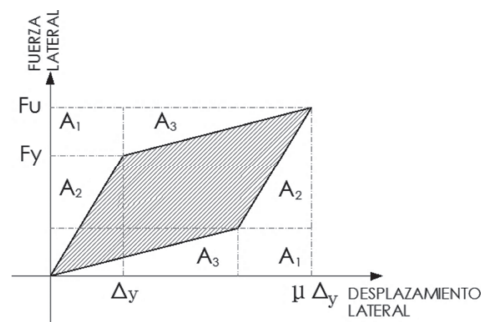
Para el amortiguamiento equivalente ξ_{eq} se calcula según la energía disipada y la energía de deformación, ATC40 y Chopra (2014).

FIGURA 5.30 DERECHA: ENERGÍA DISIPADA, IZQUIERDA: ENERGÍA DE DEFORMACIÓN



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

FIGURA 5.31 1ER CUADRANTE DE ÁREA PARA ENERGÍA DISIPADA



Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015).

Sea E_D la energía disipada, en un ciclo de histéresis, la misma que se obtiene evaluando el área sombreada que se presenta en la figura 5.31, multiplicada por 4, debido a que ésta área representa la cuarta parte del área de un ciclo de histéresis.

$$E_D = 4 A_{RAY} \quad (5.29)$$

$$A_{RAY} = F_u \mu \Delta_y - 2 A_1 - 2 A_2 - 2 A_3$$

$$A_1 = (F_u - F_y) \Delta_y$$

$$A_2 = \frac{1}{2} F_y \Delta_y$$

$$A_3 = \frac{(F_u - F_y)(\mu \Delta_y - \Delta_y)}{2}$$

$$E_D = 4 [F_u \mu \Delta_y - 2 \Delta_y (F_u - F_y) - F_y \Delta_y - (F_u - F_y)(\mu \Delta_y - \Delta_y)] \quad (5.30)$$

Al desarrollar términos y luego de las simplificaciones correspondientes se halla la energía disipada en función del desplazamiento de fluencia Δ_y , de la fuerza de fluencia F_y , de la fuerza última F_u y de la ductilidad del disipador μ .

$$E_D = 4 \Delta_y (\mu F_y - F_u) \quad (5.31)$$

El área achurada de la figura 5.28, representa la energía elástica en un ciclo de histéresis, que se denomina E_E

$$E_E = \frac{1}{2} F_u \mu \Delta_y \quad (5.32)$$

Se considera que el amortiguamiento es de tipo viscoso, en consecuencia se tiene:

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4 \pi E_E} \quad (5.33)$$

5.7.1.1 Programa para hallar el punto de desempeño por el Método “A” del ATC40

El programa ***Spectrum_Capacity_Method3*** en el Anexo No2, A2.1, calcula el punto de desempeño por el método “A” del ATC40. Este programa necesita conocer el espectro de diseño, el espectro de capacidad, el amortiguamiento

intrínseco de la estructura, y un punto de referencia del punto de fluencia. El programa también necesita del subprograma *ginputc*, ver Anexo No2, A2.1. Este programa trabaja con bucles hasta tener un error aceptable, calculando el cruce de los espectros de diseño y capacidad usando ecuaciones de rectas.

5.7.2 MÉTODO DE LOS COEFICIENTES FEMA 440

Se tomó del código ATC 40 y FEMA 356, y modificado por el código FEMA 440. Este método consiste en obtener coeficientes de acuerdo al espectro de diseño, a la curva de capacidad linealizada, periodo fundamental, factor de participación modal y la masa modal efectiva del 1er modo de vibración.

Este método no necesita iteraciones solo reemplazar fórmulas con datos de la estructura, el programa hecho en Matlab se llama *CoefMethod440_2*, en el Anexo No2, A2.2.

5.7.3 EJEMPLO DE RESULTADOS DE PROGRAMAS PARA HALLAR EL PUNTO DE DESEMPEÑO

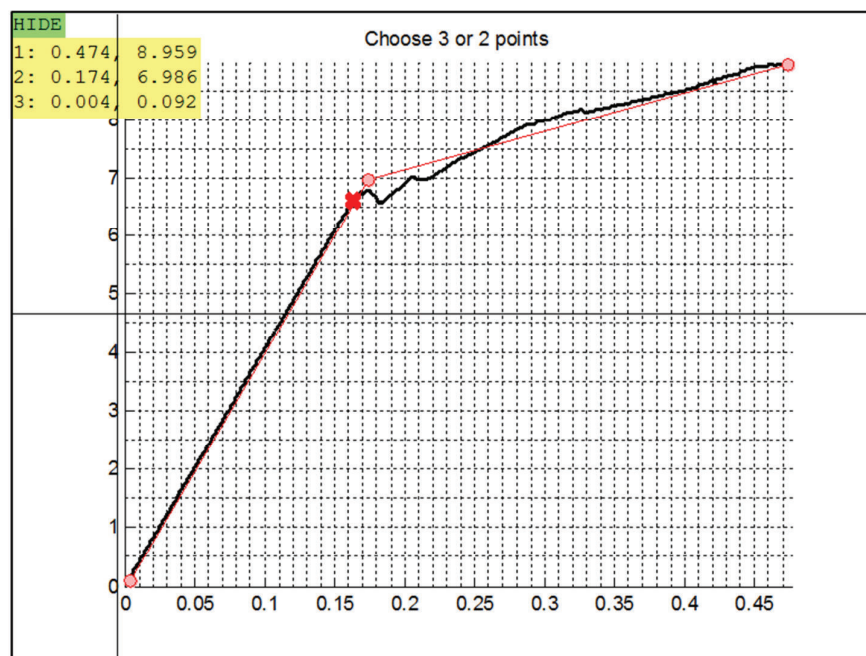
Con el edificio en la figura 5.17 se encontró el punto de desempeño para un espectro de diseño para Quito sacado de la norma NEC15, ver figura 1.1, y usando factores para un tipo de suelo D, $z=0.4$, y región sierra.

Luego de obtenidos los datos del programa *Pushover_2* o *Pushover_3* se debe escribir en la pantalla de Matlab *MEC_NEC14* o *MEC_NEC14_22*, respectivamente.

5.7.3.1 Resultados para el Método “A” de ATC40, programa *Spectrum_Capacity_Method3*

El programa primero pedirá linealizar el espectro de capacidad, el usuario podrá colocar sobre el dibujo en negro las líneas en rojo como se muestra en la figura 5.32, teniendo el criterio de que debe haber similares áreas dentro y fuera de la línea roja formadas con la línea negra.

FIGURA 5.32 ESPECTRO DE CAPACIDAD LINEALIZADO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

El programa luego reporta los siguientes resultados:

El desplazamiento en el punto de desempeño en el sistema de un grado de libertad S_d , y en el sistema de múltiples grados de libertad D_t en el tope del edificio, los cuales para el ejemplo son:

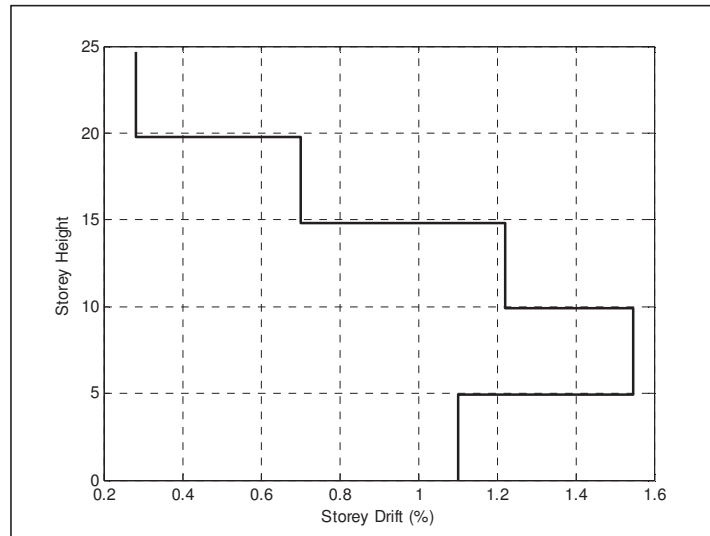
$$S_d = 0.185 \text{ m}$$

$$D_t = 0.240 \text{ m}$$

El programa ***ResultsMEC_B*** y ***ResultsMEC_B22*** imprimirán en la pantalla los

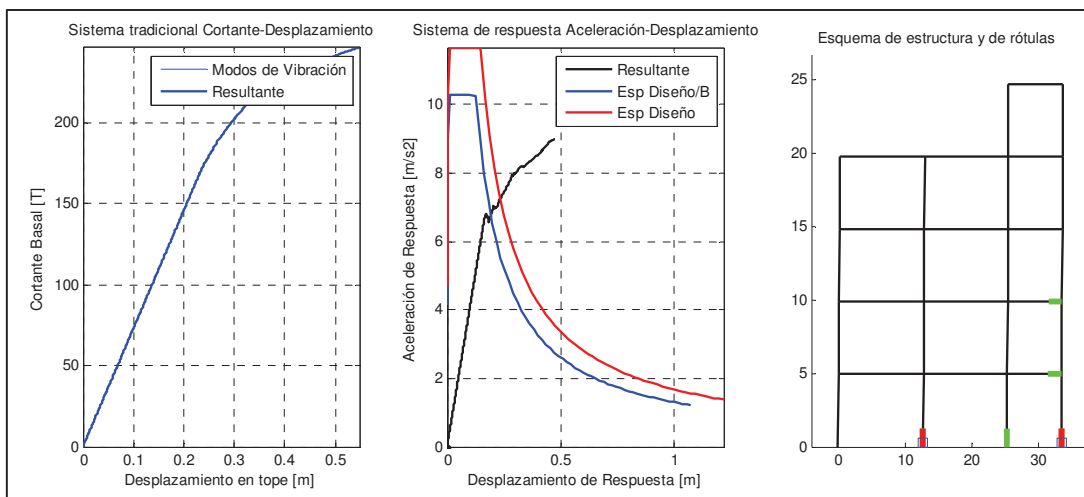
resultados vistos en la figura 5.34, de esta figura el tercer gráfico con la estructura dañada durante el punto de desempeño, el color verde indicará fluencia de una sección, el color rojo indicará que la sección está utilizando la resistencia residual (ver subcapítulo 3.3), y un cuadrado sobre una sección indicará que se formó una rótula plástica, es decir que la sección ya no resistirá más momentos.

FIGURA 5.33 DERIVAS DE PISO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.34 RESULTADOS FINALES EN PANTALLA: CURVA DE CAPACIDAD, ESPECTROS DE DISEÑO, DE CAPACIDAD Y PUNTO DE DESEMPEÑO, Y ESTRUCTURA DAÑADA EN PUNTO DE DESEMPEÑO

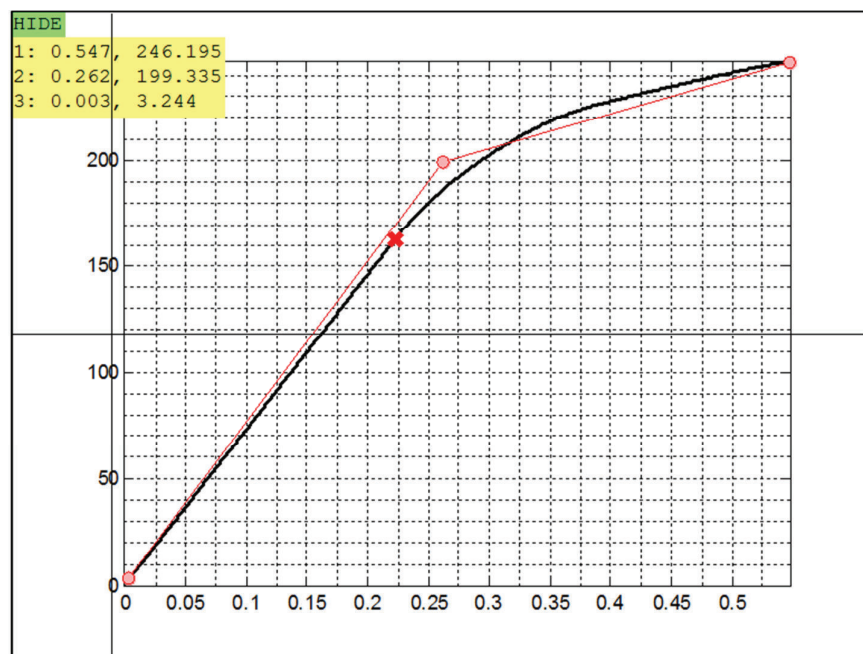


Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.7.3.2 Resultados para el Método de Coeficientes de FEMA 440, programa *CoefMethod440_2*

El programa primero pedirá linealizar la curva de capacidad, el usuario podrá colocar sobre el dibujo en negro las líneas en rojo como se muestra en la figura 5.35, teniendo el criterio de que debe haber similares áreas dentro y fuera de la línea roja formadas con la línea negra.

FIGURA 5.35 CURVA DE CAPACIDAD LINEALIZADA



Fuente: Realizado por E. David Mora.

El programa luego reporta los siguientes resultados:

El desplazamiento en el punto de desempeño en el sistema de un grado de libertad S_d , y en el sistema de múltiples grados de libertad D_t en el tope del edificio, los cuales para el ejemplo son:

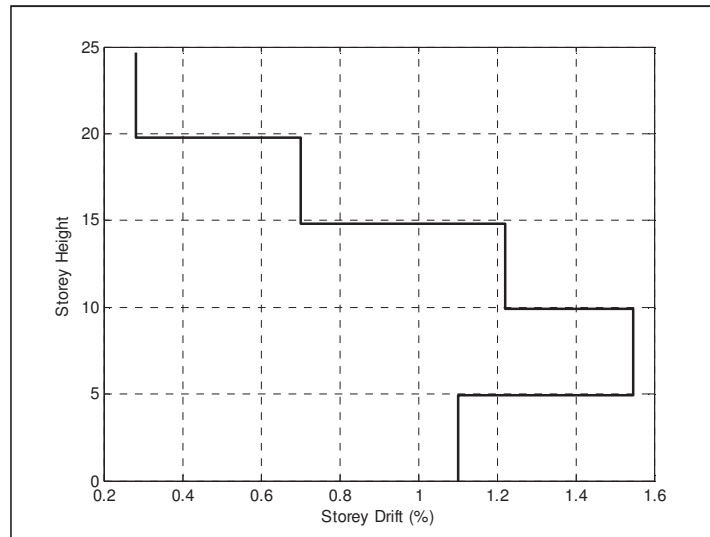
$$S_d = 0.21 \text{ m}$$

$$D_t = 0.240 \text{ m}$$

Como podemos observar los resultados son muy parecidos entre los dos

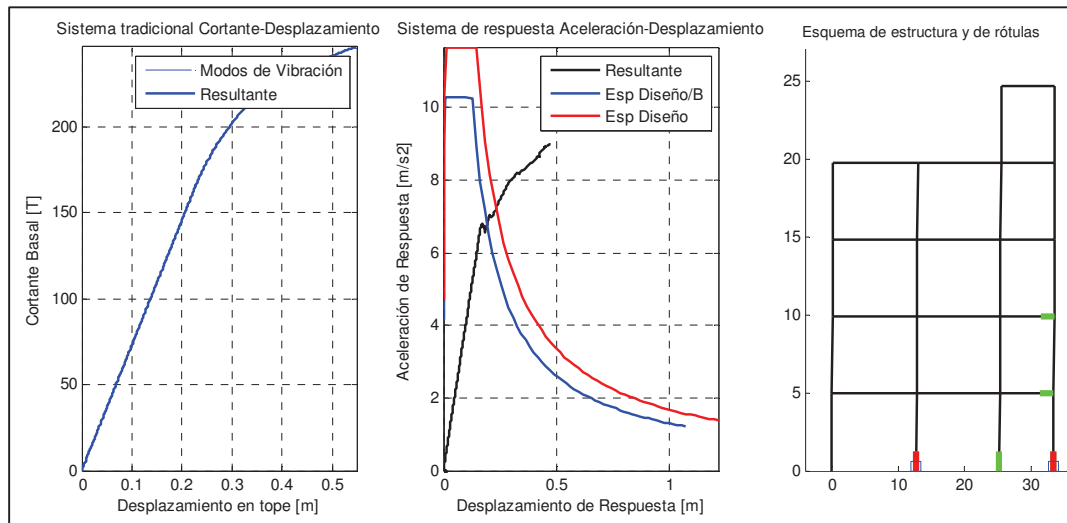
métodos.

FIGURA 5.36 DERIVAS DE PISO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

RESULTADOS FINALES EN PANTALLA: CURVA DE CAPACIDAD, ESPECTROS DE DISEÑO, DE CAPACIDAD Y PUNTO DE DESEMPEÑO, Y ESTRUCTURA DAÑADA EN PUNTO DE DESEMPEÑO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.8 EFECTO P – DELTA EN UN ANÁLISIS PUSHOVER

Los efectos P – Delta producen un aumento en las deflexiones horizontales y en las fuerzas internas de la estructura, después de varios pórticos estudiados en dos dimensiones se puede ver la importancia de tomar en cuenta este efecto en estructuras de mediana y gran altura, siendo además un factor muy influyente en la deriva de piso, amplificada por una fuerza extra lateral debido a los momentos de segundo orden.

5.8.1 DEFINICIÓN

El efecto P – Delta corresponde a los efectos adicionales, en las dos direcciones principales en planta, causados por los efectos de Segundo Orden de la estructura. Los efectos P – Delta producen un aumento en las deflexiones horizontales y en las fuerzas internas de la estructura, y que por ello deben considerarse, no solo para el cálculo de dichos incrementos sino también para la evaluación de la estabilidad estructural global.

5.8.2 CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN

Los efectos de esbeltez se clasifican, para su evaluación aproximada, en dos importantes grupos:

- Efectos locales de esbeltez.- Afecta a las columnas individualmente y se deben evaluar por separado en cada sentido principal de su sección.
- Efectos globales de esbeltez.- Afecta a todas las columnas y vigas que pertenecen a un piso en particular, y deben estimarse en cada sentido principal del nivel considerado.

En este trabajo se estudia el efecto global de esbeltez.

5.8.3 CÁLCULO DEL EFECTO P – DELTA

El efecto P – Delta se lo toma en cuenta en dos pasos:

- i) Como un nuevo vector de cargas laterales por nivel, aplicado en el centro de gravedad de los pisos de la estructura.

Si se tiene un incremento de cortante basal ΔV , la repartición de este cortante basal en cada piso sin efecto P-Delta será:

$$Q_{a_1} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_1 * \phi_1^{(n)} * \Delta V}{\sum (M_i * \phi_i^{(n)})} \left[\Gamma_i^{(n)} \right] \\ \frac{M_2 * \phi_2^{(n)} * \Delta V}{\sum (M_i * \phi_i^{(n)})} \left[\Gamma_i^{(n)} \right] \\ \vdots \\ \frac{M_i * \phi_i^{(n)} * \Delta V}{\sum (M_i * \phi_i^{(n)})} \left[\Gamma_i^{(n)} \right] \end{array} \right\} \quad (5.34)$$

Siendo:

Q_{a_1} : Vector de cargas horizontales sísmicas, cada fila representa un piso.

M_i : Masa del piso i .

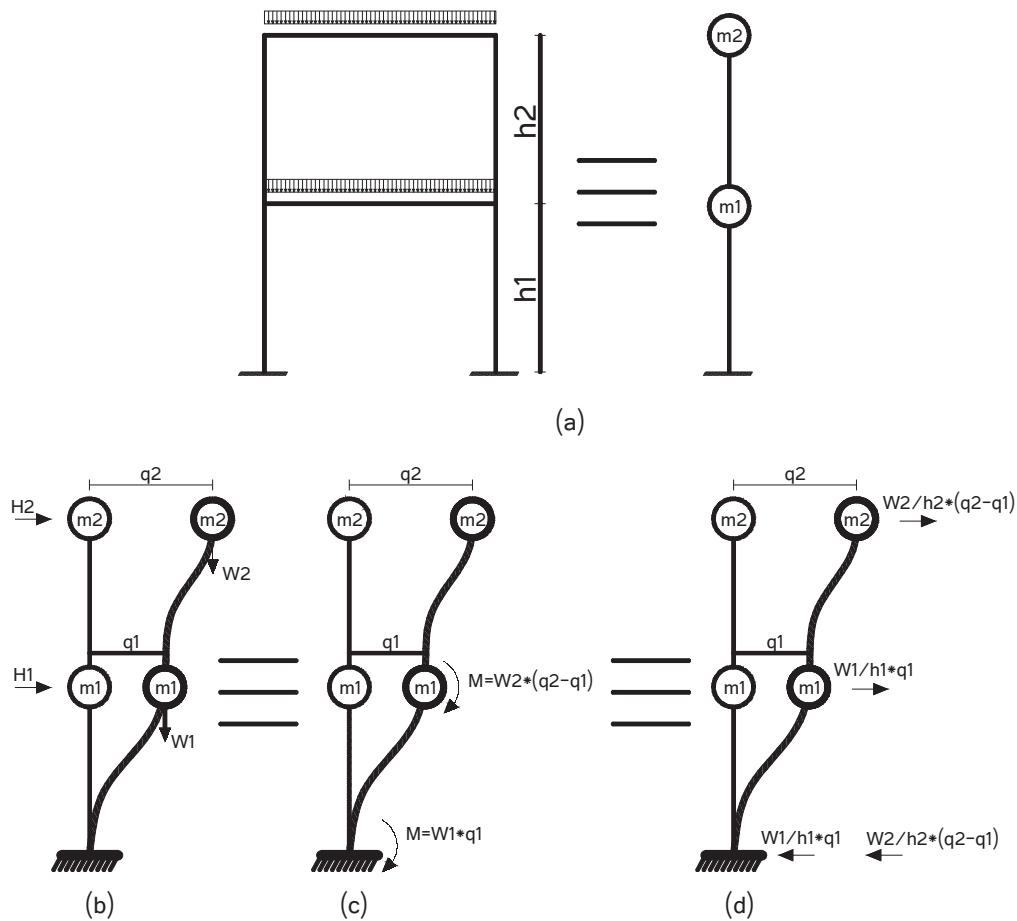
$\phi_i^{(n)}$: Amplitud de piso i por el modo n de vibración.

ΔV : Incremento de cortante basal en cada ciclo de un análisis pushover.

i : Número de piso.

Ha este vector se deberá sumar un incremento de cargas laterales por momentos de segundo orden:

FIGURA 5.37 CARGA LATERAL DEBIDO AL MOMENTO DE SEGUNDO ORDEN



Fuente: Realizado por E. David Mora.

En la figura se muestra en (a) la idealización de una estructura en una de dos grados de libertad. En (b) se tiene la deformación por cargas laterales de un sismo y se observa la fuerza vertical del peso de cada piso lo que equivale a tener momentos en los pisos como se ve en (c), a estos momentos se los puede transformar en cargas laterales considerando que el momento es una fuerza por un brazo de palanca (d).

A estas nuevas cargas laterales debido a momentos de segundo orden o efectos P – Delta, se las ordena en un vector de la siguiente manera.

$$Qa_2 = \left\{ \begin{array}{c} \frac{W_1 * q_1^{(n)}}{h_1} \\ \frac{W_2 * (q_2^{(n)} - q_1^{(n)})}{h_2} \\ \vdots \\ \frac{W_i * (q_i^{(n)} - q_{i-1}^{(n)})}{h_i} \end{array} \right\} \quad (5.35)$$

Siendo:

Qa_2 : Vector de cargas horizontales debido a momentos de segundo orden, cada fila representa un piso.

W_i : Peso total del piso i .

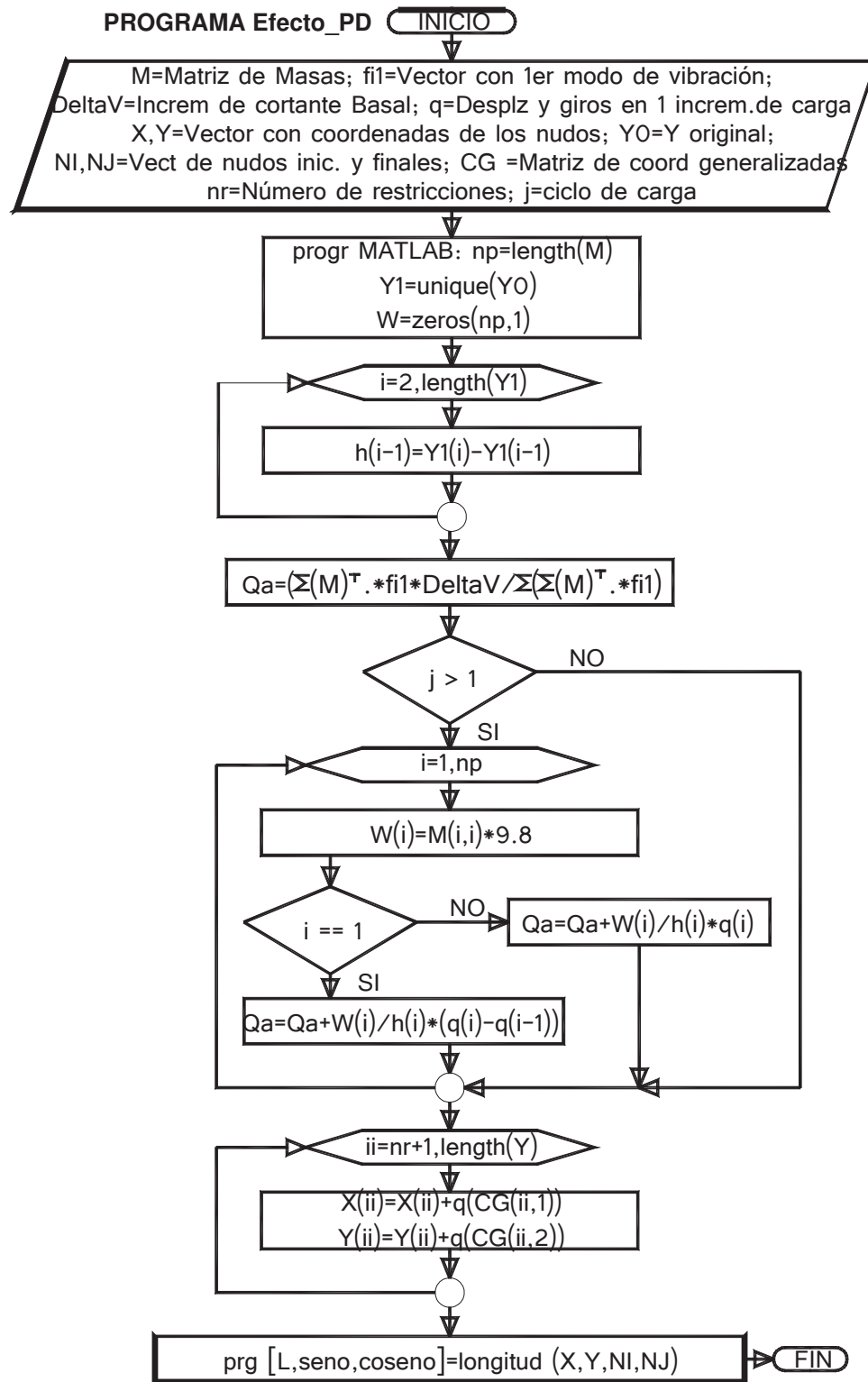
h_i : Altura de entrepiso bajo el piso en estudio.

i : Número de piso.

Entonces tendremos como resultado un vector de cargas **Qa** el cual será la suma de **Qa₁+Qa₂**.

- ii) También se toma en cuenta este efecto en las coordenadas reales de los nudos de la estructura luego de la deformación por cargas laterales, esto afectará a la longitud e inclinación de los elementos, y esto a su vez a la matriz de rigidez del elemento en el sistema de coordenadas globales.

FIGURA 5.38 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROGRAMA Efecto_PD



Fuente: Realizado por E. David Mora.

5.8.4 IMPORTANCIA DE CALCULAR EFECTOS P – DELTA

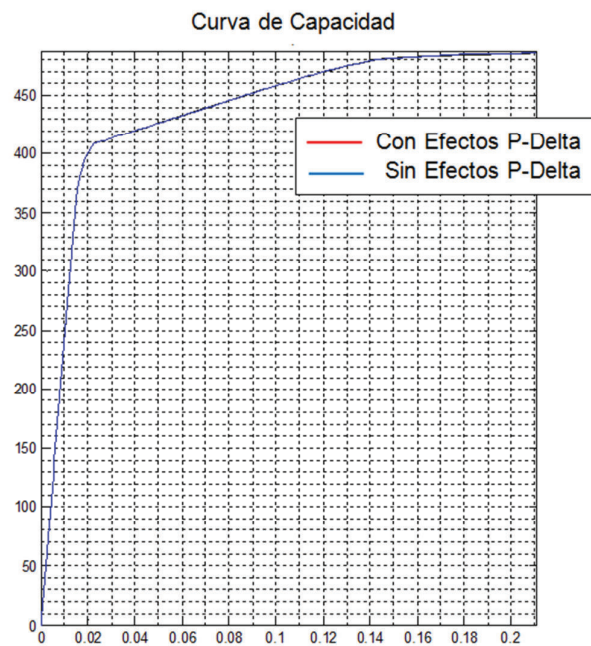
El efecto P – Delta es un efecto no lineal que ocurre en las estructuras donde los elementos están sujetos a carga axial, este es un efecto de segundo orden que directamente tiene que ver con la magnitud de la carga axial aplicada P y un desplazamiento delta.

Siempre se han considerado importantes los efectos P – Delta en el contexto de diseño de los diferentes pisos del edificio, debido a que causan incremento de momentos y una disminución de la capacidad de carga axial que puede soportar el elemento en la estructura, dado que su magnitud está relacionada con el valor de la carga axial P aplicada, Rigidez/Esbeltez de la estructura en conjunto y la esbeltez de los elementos individuales, se muestra también que tales efectos son relativamente importantes para distorsiones y derivas de pisos.

En términos generales, los efectos de esbeltez afectan principalmente a las columnas, sobre todo cuando se tiene momentos y cargas axiales de considerable magnitud, o cuando éstas pertenecen a estructuras sometidas a la combinación de cargas verticales y horizontales importantes, en cuyo caso también las vigas pueden verse afectadas.

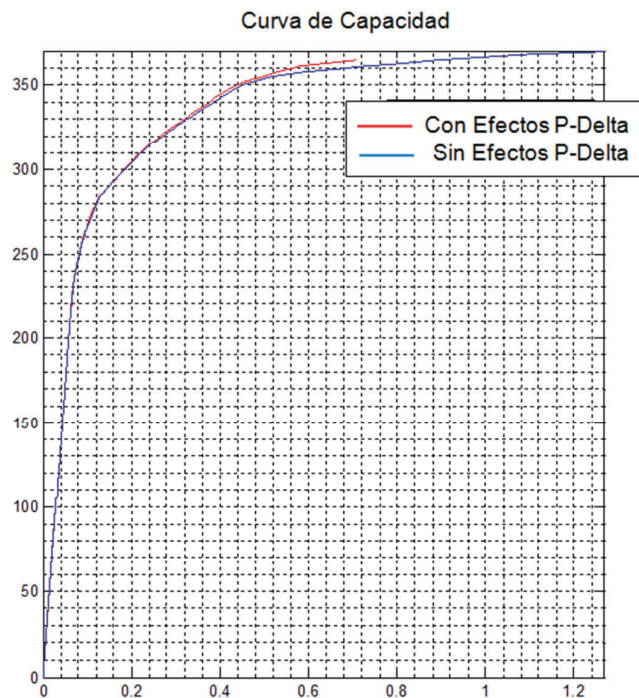
A continuación se muestra la comparación de la curva de capacidad de varios pórticos que van desde un piso de tres vanos de 4 m de luz, con pórticos y secciones basadas en el edificio mostrado en la figura 5.27, el criterio de colapso tomado es de derivas mayores o iguales al 2% de la altura de los entrepisos.

FIGURA 5.39 CURVA DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA DE 1 PISO Y 3 VANOS



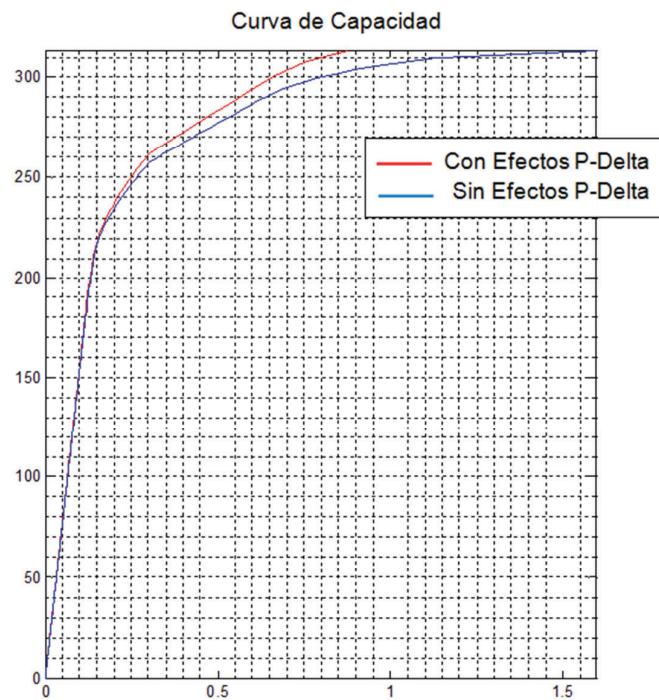
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.40 CURVA DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA DE 5 PISOS Y 3 VANOS



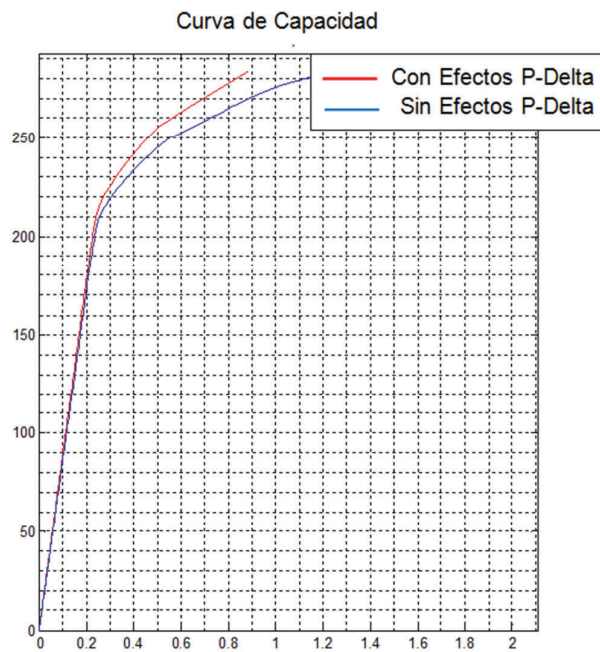
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.41 CURVA DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA DE 10 PISOS Y 3 VANOS



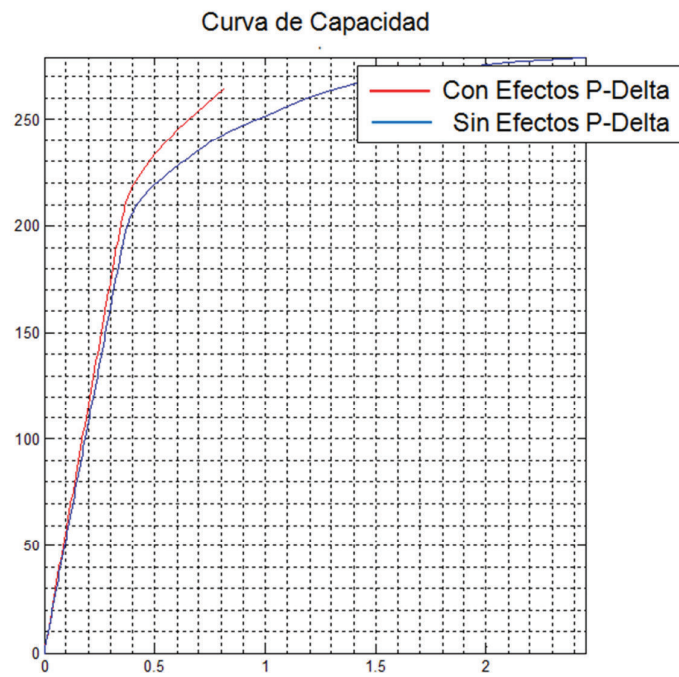
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.42 CURVA DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA DE 15 PISOS Y 3 VANOS



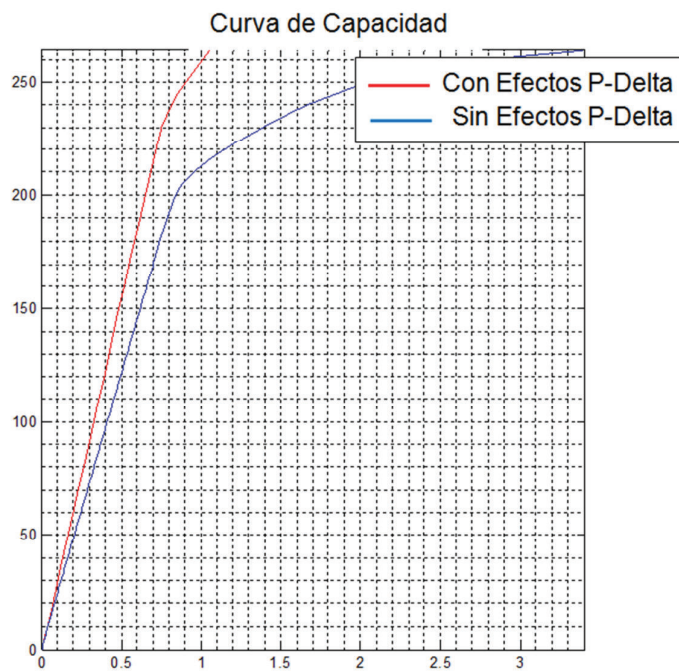
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.43 CURVA DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA DE 20 PISOS Y 3 VANOS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.44 CURVA DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA DE 30 PISOS Y 3 VANOS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

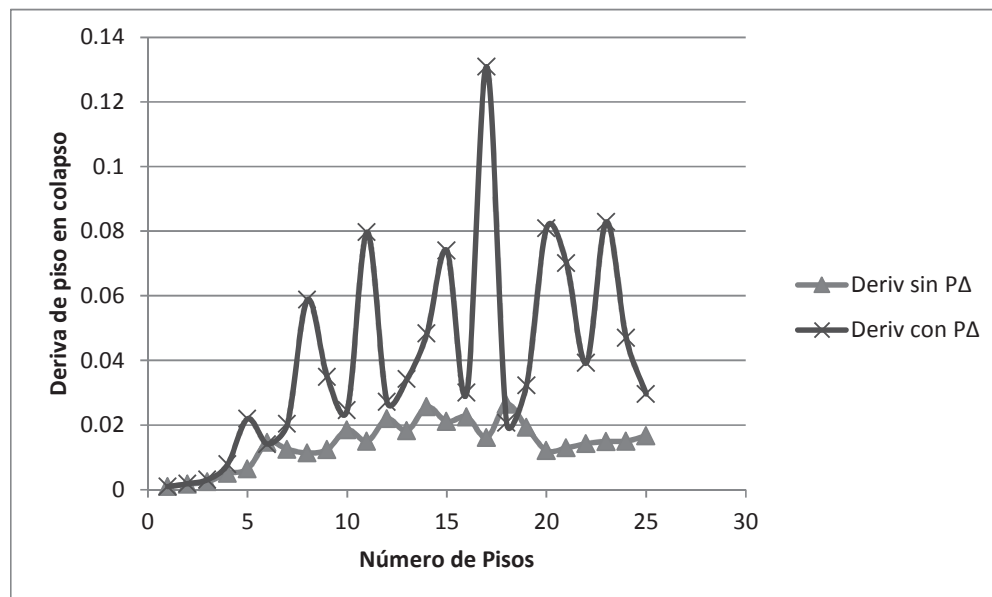
5.8.5 CONCLUSIÓN Y RESULTADOS SOBRE EFECTO P-DELTA

La figura 5.40 a la figura 5.44 son muy claras en mostrar que entre más esbelto es el edificio más afectará el efecto P – Delta a su capacidad haciendo necesario tomarlo en cuenta en estructuras de mediana y gran altura.

La disminución que se nota en la curva de capacidad en la deformación del tope de la estructura se debe al criterio de colapso para estructuras de mediana y gran altura, el colapso de la estructura se da debido a una deriva de piso mayor o igual al 2% de la altura de entrepiso, la cual se amplificó debido al efecto estudiado.

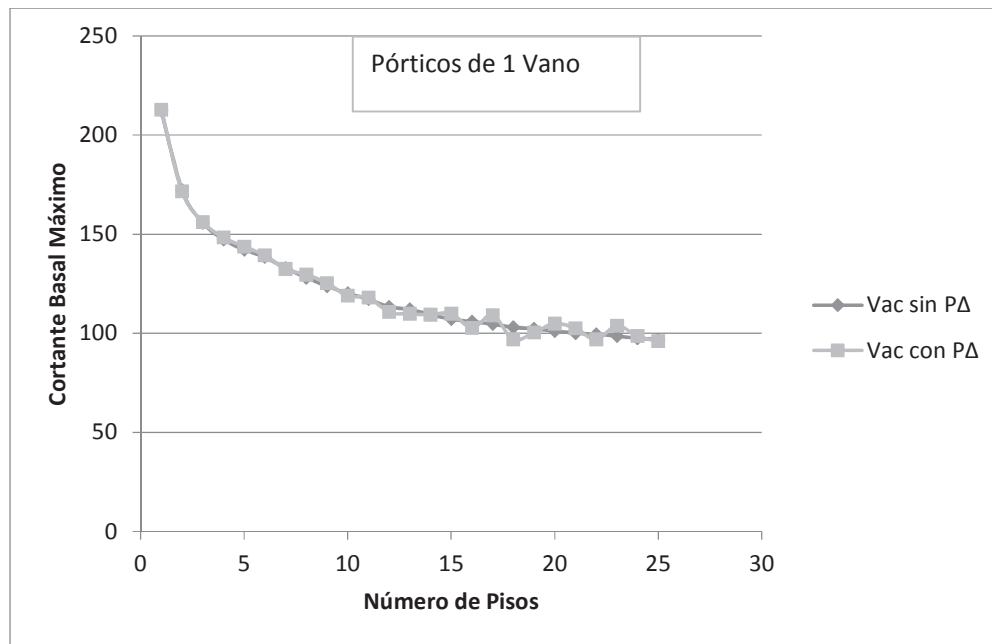
Para observar la importancia de estas solicitaciones de carga en estructuras esbeltas se modificó el programa Pushover hecho, para formar automáticamente estructuras aporricadas en dos dimensiones de 1 hasta 50 pisos de 1 y 4 vanos con secciones basadas en las del edificio de la figura 5.27, comparando resultados con y sin efectos P – Delta con un criterio de colapso solo de derivas de piso mayor o igual al 2% de la altura de entrepiso. Resultados:

FIGURA 5.45 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN TERRAZA VS. NÚMERO DE PISOS PARA PÓRTICOS DE 1 VANO



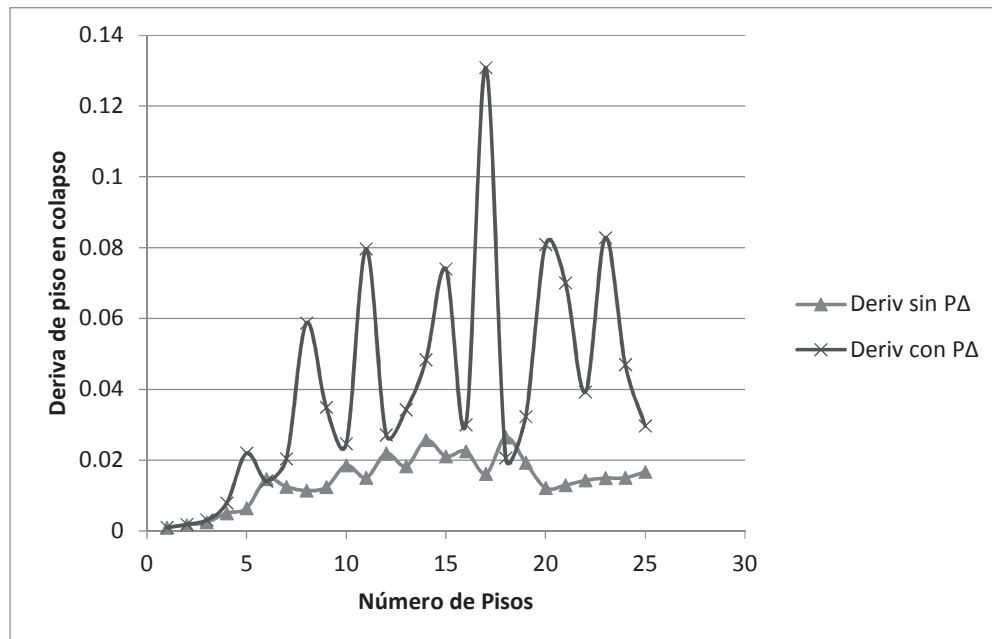
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.46 CORTANTE BASAL MÁXIMO VS. NÚMERO DE PISOS PARA PÓRTICOS DE 1 VANO



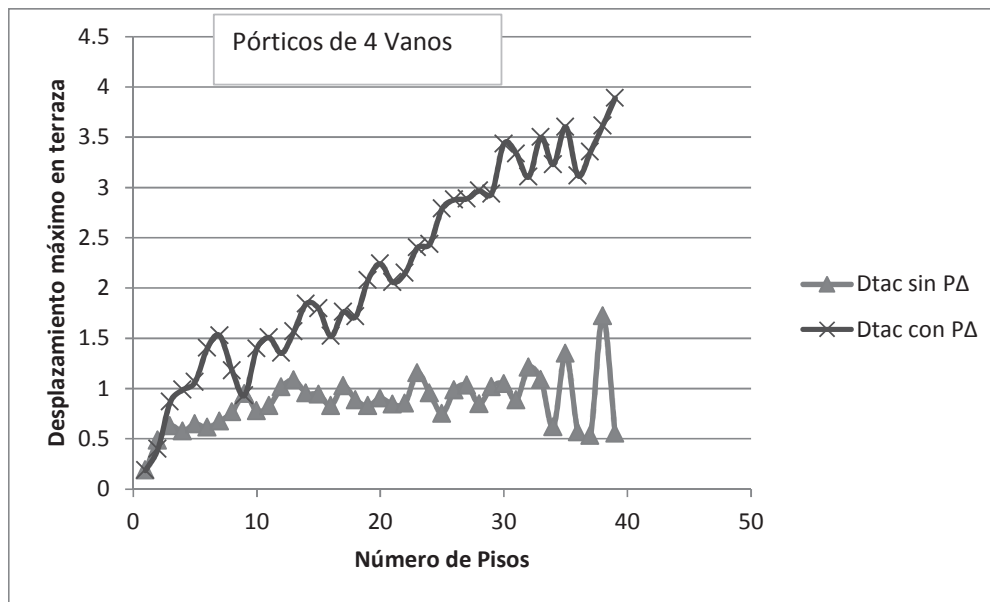
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.47 DERIVA DE PISO EN COLAPSO VS. NÚMERO DE PISOS PARA PÓRTICOS DE 1 VANO



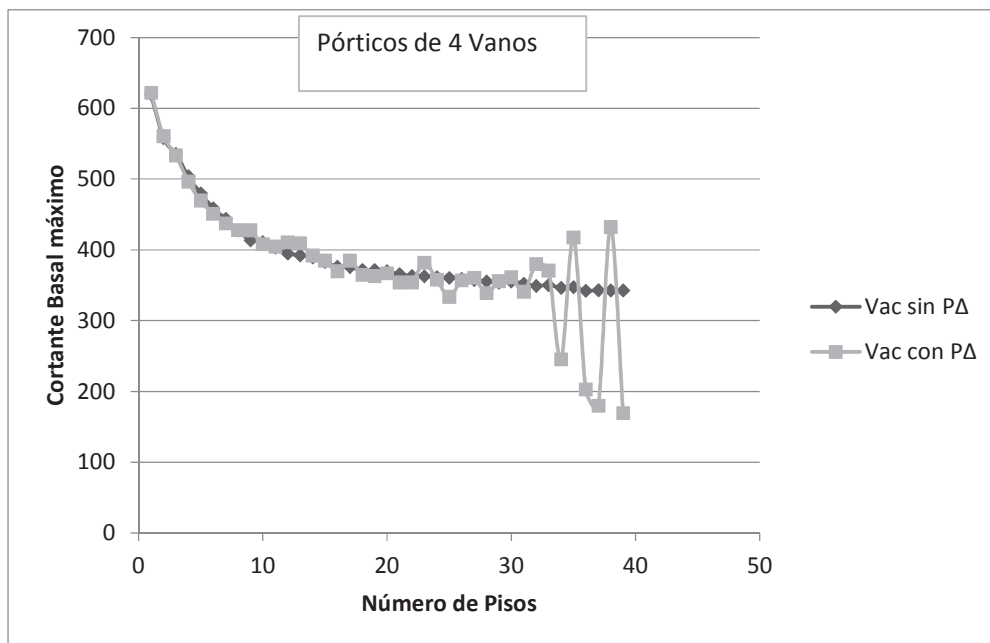
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.48 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN TERRAZA VS. NÚMERO DE PISOS PARA PÓRTICOS DE 4 VANOS



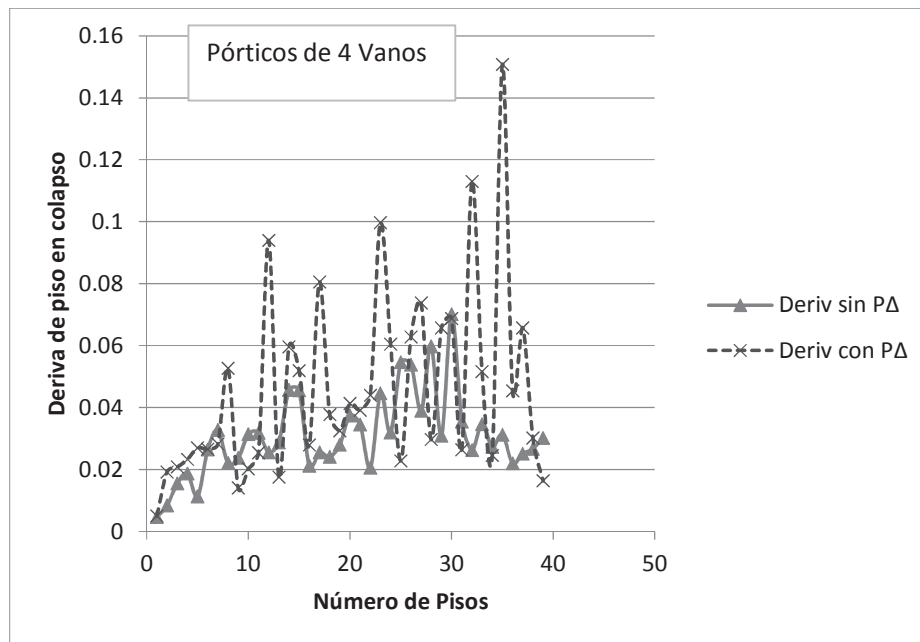
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.49 CORTANTE BASAL MÁXIMO VS. NÚMERO DE PISOS PARA PÓRTICOS DE 4 VANOS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 5.50 DERIVA DE PISO EN COLAPSO VS. NÚMERO DE PISOS PARA PÓRTICOS DE 4 VANOS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DE PUSHOVER CÍCLICO EN COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO SIN Y CON DISIPADORES DE ENERGÍA TADAS Y SHEAR LINK

6.1 INTRODUCCIÓN

A través de los ciclos de cargas generados por un sismo, las secciones de acero se irán endureciendo haciendo perder ductilidad a los elementos y a la estructura, por esta razón se ha visto la importancia de usar un pushover cíclico modal, Aguiar y Mora (2015). Si se usara un pushover normal se podría apreciar el fallo de diferentes secciones a las obtenidas por un análisis dinámico no lineal o un pushover cíclico modal pseudo-dinámico, como se muestra más adelante.

En este trabajo se pretende dar una idea clara sobre el mejor nivel de desempeño de un edificio con disipadores de energía, mostrando el incremento de amortiguamiento dado por estos a través de curvas de capacidad histeréticas de pushover cíclicos y mostrando también el estado de daño de las estructuras.

Para lograr dar una idea algo generalizada sobre el amortiguamiento que darán los disipadores de energía a una estructura se ensayaron modelos hechos en los programas de Matlab, 144 diferentes configuraciones de edificios sin y con disipadores de energía tipo TADAS y tipo Shear Link Bozzo, también se probó varias configuraciones, llegando a un total de 157 pórticos en dos dimensiones.

Se usó los disipadores Shear Link Bozzo para comparar resultados entre tipos de disipadores, con los TADAS. Para los disipadores Shear Link Bozzo, figura 6.1, se programó su funcionamiento con valores ya estandarizados Fuerza cortante de fluencia, Rigidez elástica y de post fluencia (ver Tabla 6.1), y ductilidad efectiva según tablas comerciales, Hurtado y Bozzo (2008).

FIGURA 6.1 DISIPADORES TADAS Y SHEAR LINK**TADAS****SHEAR LINK**

Fuente: Aguiar, Mora y Rodríguez (2015). y Cortesía de Dr. Luis Bozzo.

6.2 PATRÓN DE CARGAS PARA PUSHOVER CÍCLICO

Este tipo de análisis pushover es muy sensible al patrón de cargas del cortante basal introducido, debido a la variación de rigidez y ductilidad de las secciones a través de los ciclos de cargas por el efecto de Baushinger y efecto de endurecimiento en secciones de acero, entonces se utilizó análisis no lineales de historia en el tiempo para ajustar parámetros de cargas del pushover cíclico y poder conocer la energía disipada, energía de deformación y así el amortiguamiento equivalente por histéresis, ya que un análisis de pushover es una simplificación de un análisis no lineal de historia en el tiempo, Chopra (2014).

Como resultado se programó, el comienzo de la reversibilidad de las cargas, cuando el cortante basal actuante acumulado sea igual a $V_e/8$, y el ciclo de cargas hacia el otro sentido, cuando se dé un incremento al cortante del ciclo anterior de $V_e/16$, siendo V_e el cortante basal elástico, según el espectro de diseño utilizado.

TABLA 6.1 DISIPADORES SHEAR LINK

| Device | e | K ₁ (kN/cm) | K ₂ (kN/cm) | d _y (mm) | f _y (kN) | D _y (mm) | F _y (kN) | F _{max} (kN) | D _a (mm) | E _d (kN.cm) |
|--------|---|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| SL5_2 | 2 | 546,1 | 14,4 | 0,250 | 13,65 | 0,463 | 25,27 | 47,32 | 39,93 | 54 |
| SL5_3 | 3 | 663,5 | 13,4 | 0,321 | 21,30 | 0,549 | 36,40 | 56,59 | 89,87 | 69 |
| SL5_4 | 4 | 763,8 | 11,8 | 0,357 | 27,27 | 0,628 | 47,96 | 65,26 | 159,83 | 84 |
| SL5_5 | 5 | 834,3 | 8,8 | 0,357 | 29,78 | 0,716 | 59,76 | 72,93 | 249,81 | 97 |
| SL10_2 | 2 | 1 273,8 | 22,1 | 0,250 | 31,85 | 0,437 | 55,68 | 89,56 | 29,81 | 109 |
| SL10_3 | 3 | 1 644,4 | 21,6 | 0,277 | 45,55 | 0,491 | 80,67 | 113,62 | 67,10 | 146 |
| SL10_4 | 4 | 1 979,1 | 20,1 | 0,304 | 60,16 | 0,540 | 106,86 | 136,91 | 119,35 | 182 |
| SL10_5 | 5 | 2 216,7 | 17,4 | 0,331 | 73,26 | 0,600 | 133,00 | 159,27 | 186,45 | 216 |
| SL15_2 | 2 | 2 285,9 | 22,4 | 0,250 | 57,15 | 0,567 | 129,60 | 163,04 | 20,29 | 216 |
| SL15_3 | 3 | 2 929,6 | 23,3 | 0,268 | 78,51 | 0,565 | 165,55 | 200,32 | 45,66 | 271 |
| SL15_4 | 4 | 3 493,5 | 22,9 | 0,286 | 99,91 | 0,573 | 200,20 | 236,30 | 81,18 | 325 |
| SL15_5 | 5 | 3 856,1 | 22,3 | 0,321 | 123,78 | 0,618 | 238,33 | 271,48 | 126,85 | 377 |
| SL20_2 | 2 | 2 971,2 | 24,1 | 0,250 | 74,28 | 0,536 | 159,18 | 195,36 | 15,96 | 262 |
| SL20_3 | 3 | 3 980,0 | 24,9 | 0,268 | 106,66 | 0,527 | 209,68 | 247,72 | 35,92 | 339 |
| SL20_4 | 4 | 4 719,3 | 25,8 | 0,286 | 134,97 | 0,553 | 261,00 | 298,88 | 63,85 | 414 |
| SL20_5 | 5 | 5 262,7 | 24,0 | 0,321 | 168,93 | 0,596 | 313,46 | 349,12 | 99,77 | 489 |
| SL25_2 | 2 | 3 660,6 | 24,3 | 0,250 | 91,51 | 0,514 | 188,18 | 224,74 | 14,44 | 305 |
| SL25_3 | 3 | 4 859,0 | 25,2 | 0,268 | 130,22 | 0,524 | 254,52 | 292,09 | 32,50 | 404 |
| SL25_4 | 4 | 5 921,3 | 24,7 | 0,286 | 169,35 | 0,544 | 321,82 | 358,05 | 57,79 | 501 |
| SL25_5 | 5 | 6 613,5 | 24,5 | 0,321 | 212,29 | 0,588 | 389,20 | 423,17 | 90,30 | 597 |
| SL30_2 | 2 | 4 353,6 | 24,5 | 0,250 | 108,84 | 0,497 | 216,56 | 253,78 | 13,75 | 348 |
| SL30_3 | 3 | 5 791,0 | 25,5 | 0,268 | 155,20 | 0,513 | 297,22 | 336,02 | 30,93 | 468 |
| SL30_4 | 4 | 7 129,9 | 25,4 | 0,286 | 203,91 | 0,531 | 378,46 | 416,81 | 54,99 | 587 |
| SL30_5 | 5 | 7 981,8 | 25,2 | 0,321 | 256,21 | 0,575 | 459,17 | 496,73 | 85,92 | 704 |
| SL40_2 | 2 | 5 820,4 | 30,9 | 0,250 | 145,51 | 0,490 | 285,12 | 331,02 | 14,02 | 455 |
| SL40_3 | 3 | 7 778,5 | 32,0 | 0,268 | 208,46 | 0,507 | 394,44 | 442,74 | 31,55 | 619 |
| SL40_4 | 4 | 9 621,2 | 33,1 | 0,286 | 275,17 | 0,523 | 503,33 | 553,98 | 66,90 | 781 |
| SL40_5 | 5 | 10 777,4 | 31,8 | 0,321 | 345,95 | 0,570 | 614,29 | 662,15 | 104,53 | 941 |
| SL50_2 | 2 | 7 223,6 | 32,9 | 0,250 | 180,59 | 0,473 | 342,00 | 391,08 | 13,40 | 542 |
| SL50_3 | 3 | 9 703,1 | 35,9 | 0,268 | 260,04 | 0,495 | 480,00 | 533,58 | 30,16 | 749 |
| SL50_4 | 4 | 12 109,3 | 32,7 | 0,286 | 346,33 | 0,514 | 622,22 | 671,76 | 53,62 | 954 |
| SL50_5 | 5 | 13 566,7 | 31,0 | 0,321 | 435,49 | 0,563 | 764,00 | 810,65 | 83,79 | 1160 |

K₁, Initial stiffnessK₂, Post-yielding stiffnessd_y, Initial yielding displacementf_y, Initial yielding forceD_y, Yield displacementF_y, Yield forceF_{max}, 1.559 cm displacement force toD_a, Web buckling displacement

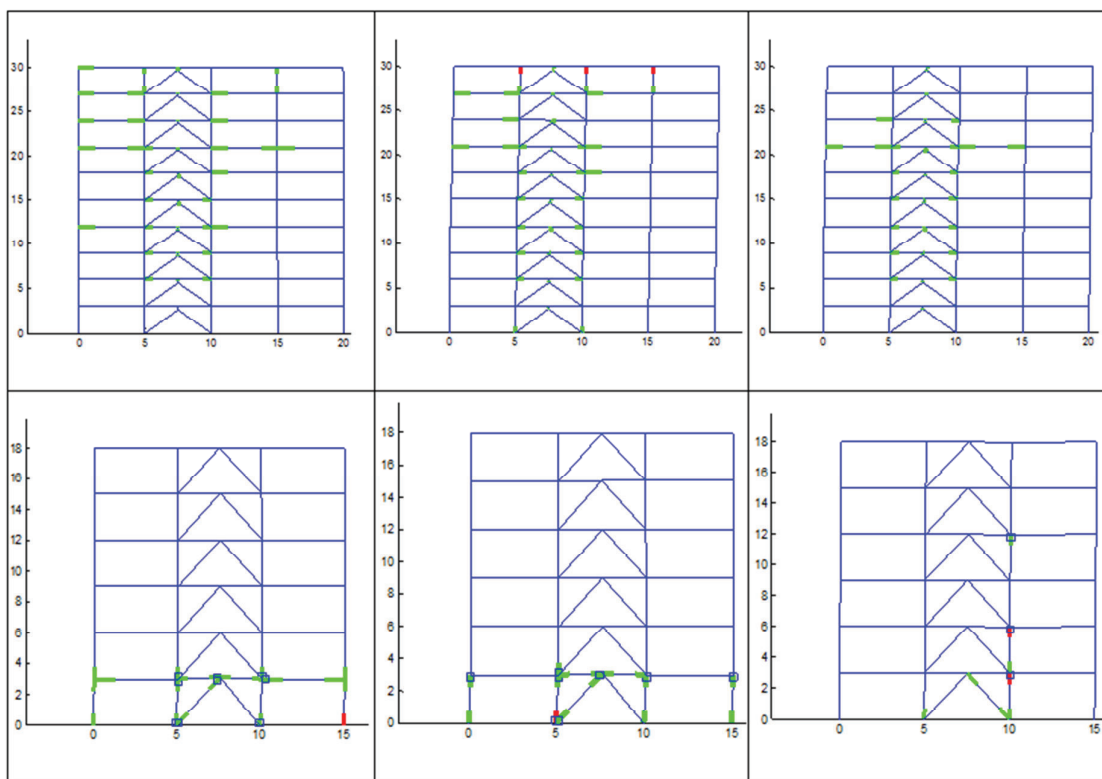
e, Milled area thickness

E_d, Dissipated energy

Fuente: Hurtado y Bozzo (2008).

En las siguientes figuras se muestra el daño de los diferentes elementos con los diferentes tipos de análisis no lineales, usando los sismos descritos en el siguiente subcapítulo. Para análisis pushover se colocó el estado de los edificios en el punto de desempeño. En las figuras: verde es estado de fluencia de la sección, rojo es estado de capacidad residual de la sección, y cuando se forma una rótula plástica se tiene en la figura un cuadrado. Las secciones pueden o no pasar por el estado de capacidad residual.

FIGURA 6.2 ARRIBA: EDIFICIO DE 10 PISOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA. ABAJO: EDIFICIO DE 6 PISOS CON CONTRAVIENTOS SIN DISIPADORES. DESDE IZQUIERDA: ESTADO DE DAÑO CON ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL, PUSHOVER CÍCLICO MODAL PSEUDO-DINÁMICO, Y PUSHOVER MODAL PSEUDO-DINÁMICO NORMAL



Fuente: Realizado por E. David Mora.

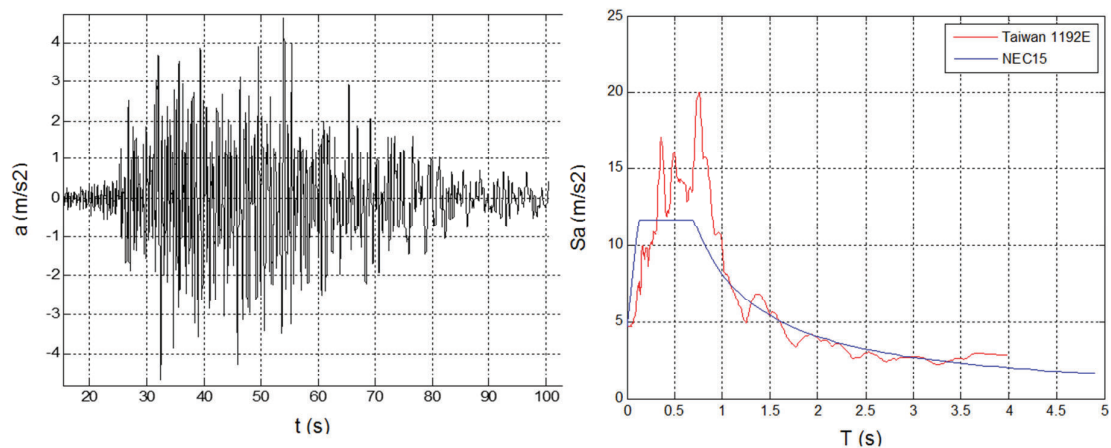
Como se observa en la figura 6.2 , considerando que el resultado más real es el obtenido por un análisis dinámico no lineal de historia en el tiempo, se pueden conocer los elementos dañados con mejor precisión con un análisis pushover

cíclico, lo cual es importante para un análisis por desempeño.

6.3 SISMO UTILIZADO

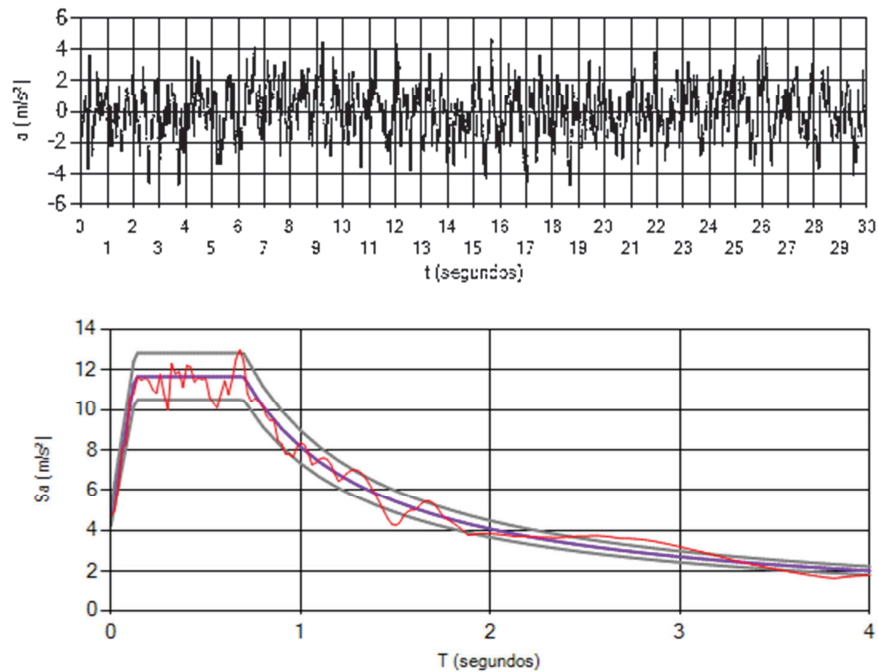
Los resultados aquí obtenidos se los puede extrapolar para otros sismos además de los descritos en este subcapítulo, ya que para cada análisis y comparaciones se utilizaron las mismas condiciones de cargas. En este estudio se utilizó el espectro de diseño para Quito – Ecuador de la norma NEC15, ver figura 1.1, y usando factores para un tipo de suelo D, $z=0.4$, y región sierra. Además para comprobar los resultados se usó análisis dinámico no lineal usando un registro de acelerograma escalado usado para edificios de periodos altos mayores a 1s y dos sismos sintéticos. Los análisis de historia en el tiempo fueron usados solo para comprobaciones de daño de algunas estructuras con el análisis de pushover cíclico, FEMA 440 (2005).

FIGURA 6.3 IZQUIERDA: ACELEROGRAMA SISMO DE TAIWÁN 1192 ESTE CON LÍNEA BASE CORREGIDA Y ESCALADO CON PGA DE ESPECTRO NEC15. DERECHA: COMPARACIÓN DE ESPECTRO DE RESPUESTA CON NEC15



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.4 ARRIBA: SISMO SINTÉTICO DE ESPECTRO NEC15 CON FUNCIÓN DE INTENSIDAD CONSTANTE. (CON PROGRAMA ACELSIN) ABAJO: ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELEROGRAMA SINTÉTICO COMPARADO CON ESPECTRO DE NEC15



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.5 ARRIBA: SISMO SINTÉTICO DE ESPECTRO NEC15 CON FUNCIÓN DE INTENSIDAD TRAPEZOIDAL. (CON PROGRAMA ACELSIN) ABAJO: ESPECTRO DE RESPUESTA DE ACELEROGRAMA SINTÉTICO COMPARADO CON ESPECTRO DE NEC15

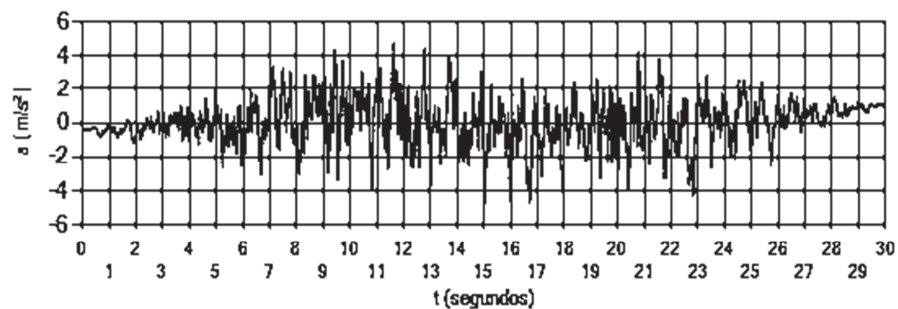
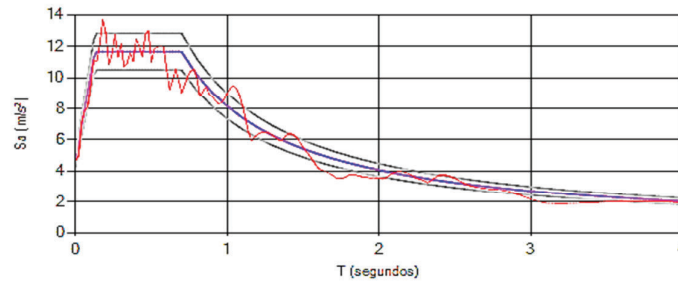


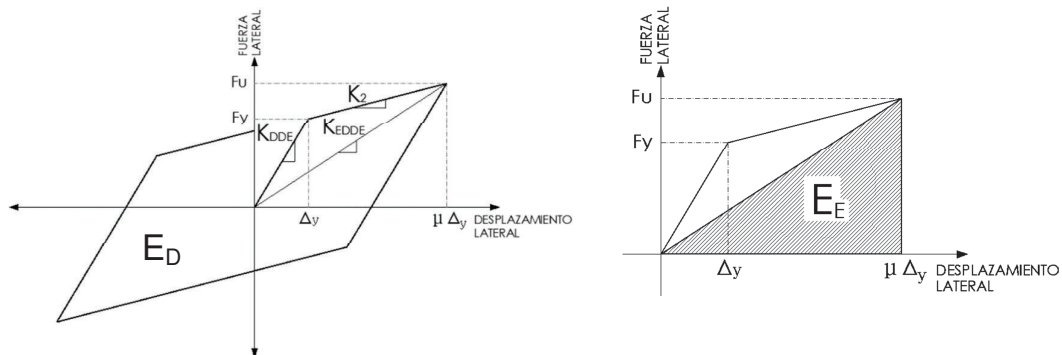
FIGURA 6.5 CONTINUACIÓN

Fuente: Realizado por E. David Mora.

6.4 CÁLCULO DEL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO HISTERÉTICO EQUIVALENTE

Dado que en edificios altos es difícil apreciar la curva de capacidad desde la curva histerética del edificio, debido a la tendencia de deformación de edificios hacia un lado por irregularidad de éste y por la influencia del efecto P-Delta, para cada ciclo de cargas se programó la realización del cálculo del área de la curva histerética S_d vs S_a , siendo S_d y S_a el desplazamiento y la aceleración en un sistema de un grado de libertad, para obtener la Energía disipada E_D , y con el máximo desplazamiento se obtuvo la energía de deformación E_E , según el método "A" del código ATC-40 y Chopra (2014), luego se calculó el amortiguamiento equivalente histerético como $\xi_{eq} = \frac{E_D}{4 \pi E_E}$.

FIGURA 6.6 DERECHA: ENERGÍA DISIPADA, IZQUIERDA: ENERGÍA DE DEFORMACIÓN



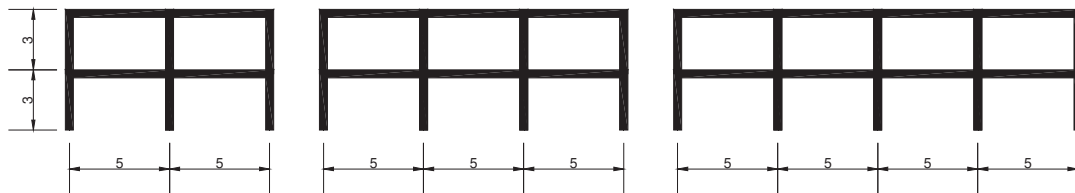
Fuente: Realizado por E. David Mora.

La reducción del sismo de respuesta para hallar el punto de desempeño se lo hizo con el factor $B = \frac{4}{1 - \ln(\xi_{eq} + \xi_1)}$, según Filiatrault (2006), donde ξ_1 es el factor de amortiguamiento intrínseco de la estructura; se tomó $\xi_1 = 5\%$ por recomendaciones del código ASCE7 y NEC15.

6.5 DESCRIPCIÓN DE EDIFICIOS ESTUDIADOS

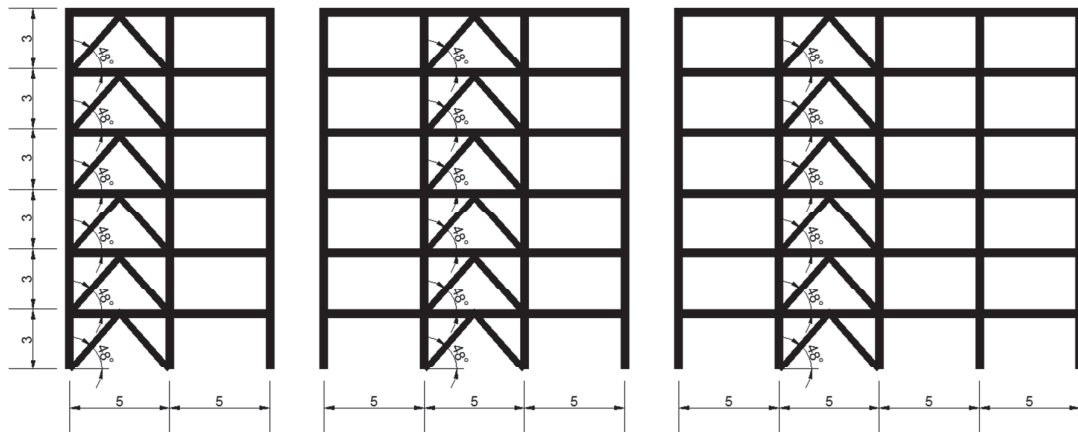
Los edificios ensayados tipo 1) sin disipadores de energía se basan en diseños de superposición modal usando una disminución de sismo con un factor de $R=8$. Los edificios tipo 2) con disipadores de energía se basan en iteraciones para intentar cumplir durante el punto de desempeño que solo exista daño en los disipadores de energía teniendo como diseño mínimo que estos edificios sin disipadores resistan el 75% del cortante basal de un diseño típico. Los edificios tipo 3) sin disipadores tienen las mismas secciones que los tipo 2) pero reemplazando los disipadores de energía y el sistema de soporte de los disipadores, por contravientos de las mismas secciones a las del sistema de soporte original, con el objetivo de medir y comparar los niveles de daño de edificios del mismo peso estructural. Se muestra las configuraciones de los edificios:

FIGURA 6.7 EDIFICIOS TIPO 1) SIN DISIPADORES DE ENERGÍA DE LUCES DE 5M DE 1 Y 2 PISOS



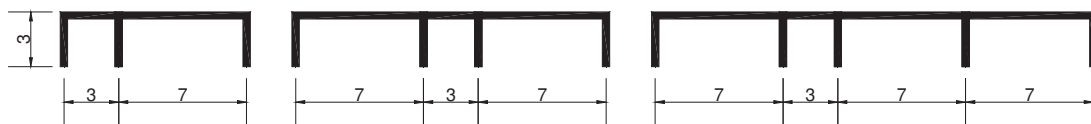
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.8 EDIFICIOS TIPO 1) SIN DISIPADORES DE ENERGÍA DE LUCES DE 5M DE 4, 6, 8 Y 10 PISOS



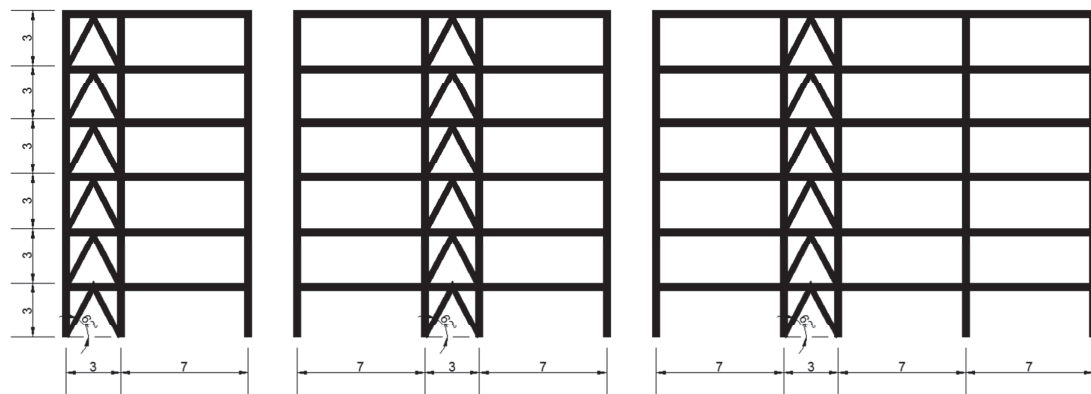
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.9 EDIFICIOS TIPO 1) SIN DISIPADORES DE ENERGÍA DE LUCES DE 7M Y 3M DE 1 Y 4 PISOS



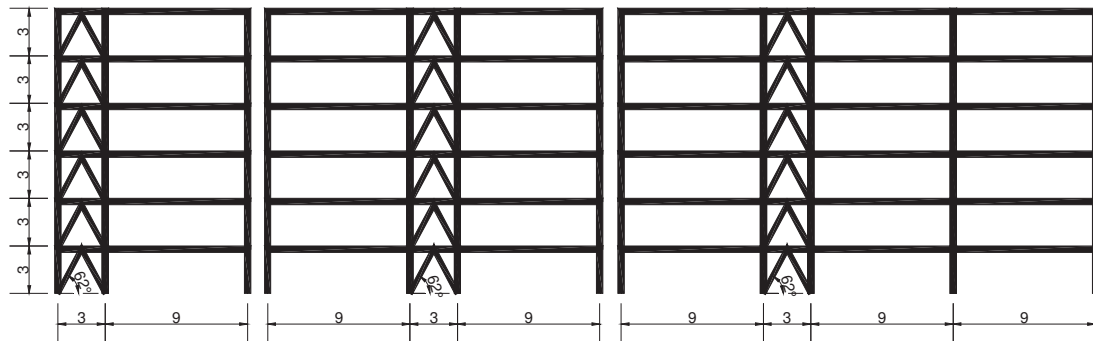
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.10 EDIFICIOS TIPO 1) SIN DISIPADORES DE ENERGÍA DE LUCES DE 7M Y 3M DE 6 Y 10 PISOS



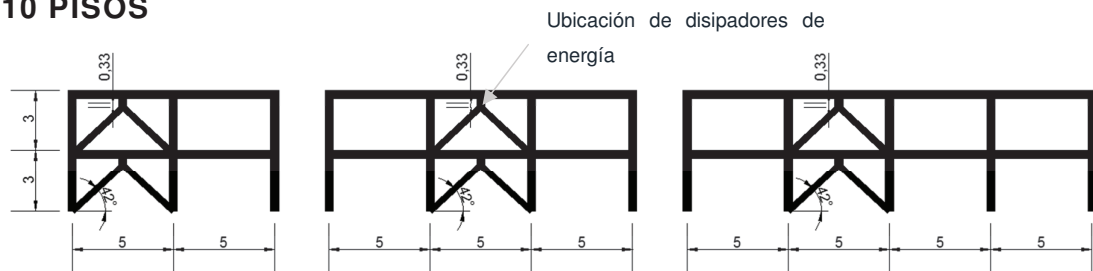
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.11 EDIFICIOS TIPO 1) SIN DISIPADORES DE ENERGÍA DE LUCES DE 9M Y 3M DE 4 Y 8 PISOS



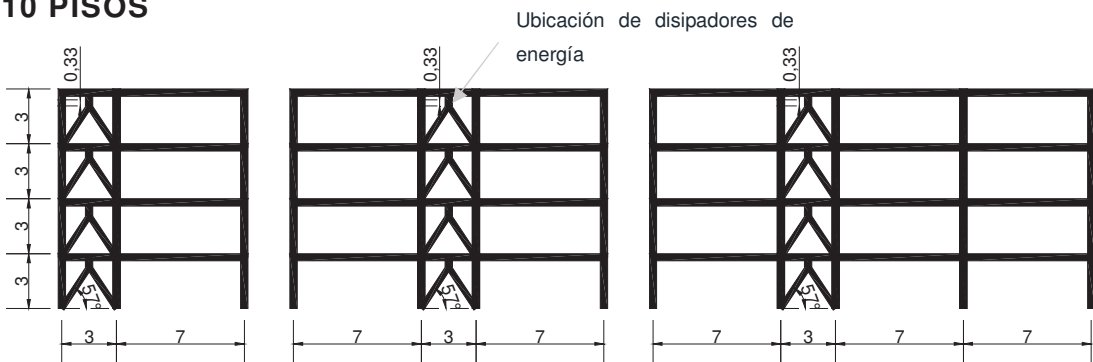
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.12 EDIFICIOS TIPO 2) Y 3) CON Y SIN DISIPADORES DE ENERGÍA RESPECTIVAMENTE, DE LUCES DE 5M DE 1, 2, 4, 6, 8 Y 10 PISOS



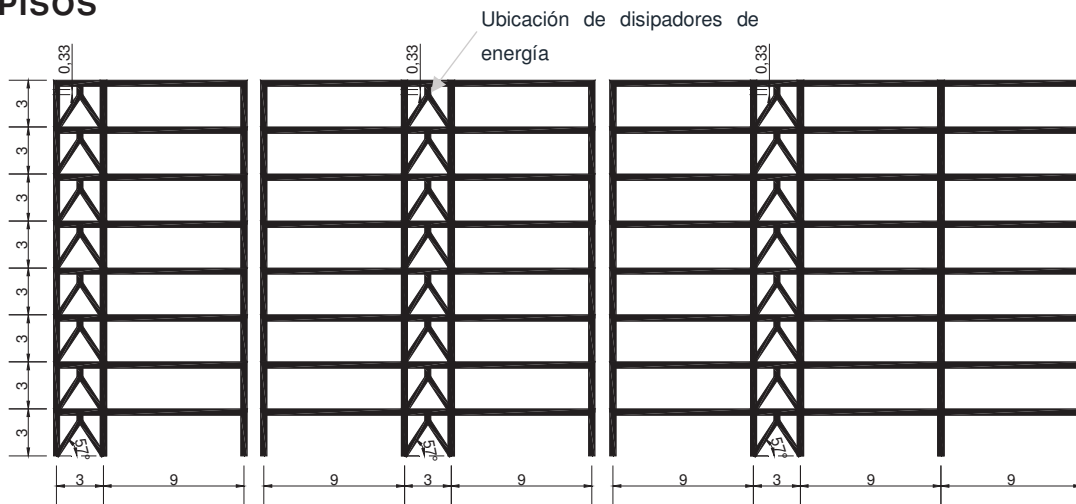
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.13 EDIFICIOS TIPO 2) Y 3) CON Y SIN DISIPADORES DE ENERGÍA RESPECTIVAMENTE, DE LUCES DE 7M Y 3M DE 1, 4, 6 Y 10 PISOS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

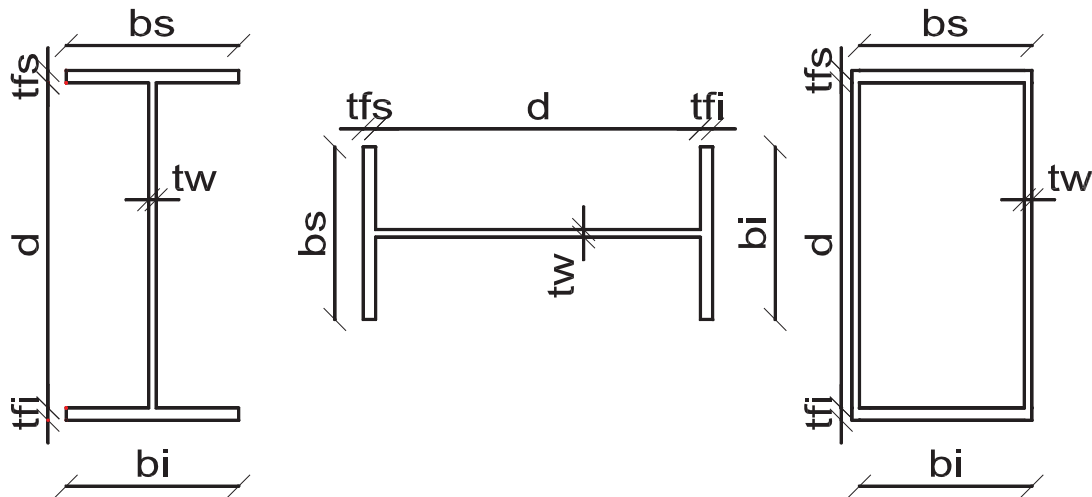
FIGURA 6.14 EDIFICIOS TIPO 2) Y 3) CON Y SIN DISIPADORES DE ENERGÍA RESPECTIVAMENTE, DE LUCES DE 9M Y 3M DE 4 Y 8 PISOS



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Las secciones utilizadas varían entre las siguientes:

FIGURA 6.15 PARÁMETROS USADOS EN CUADRO DE SECCIONES



Fuente: Realizado por E. David Mora.

TABLA 6.2 CUADRO DE SECCIONES USADAS

| Columnas | Vigas | TADAS | Shear link | |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------|--------|
| <i>TIPO CAJÓN</i> | <i>TIPO I: bfxtfhxhtw</i> | <i>TADAS: hxBxbxtxn</i> | <i>TIPO: *</i> | |
| <i>CUADRADO: bxt</i> | <i>(mm)</i> | <i>(mm)</i> | | |
| <i>(mm)</i> | 150x10x300x6 | 200x100x50x18x6 | SL5_2 | SL20_5 |
| 150x10 | 180x12x300x6 | 200x100x50x18x8 | SL5_3 | SL25_2 |
| 180x12 | 200x12x300x6 | 200x100x50x18x10 | SL5_4 | SL25_3 |
| 200x14 | 200x12x400x8 | 200x100x50x22x8 | SL5_5 | SL25_4 |
| 250x16 | 200x12x500x8 | 200x100x50x22x10 | SL10_2 | SL25_5 |
| 300x20 | 200x12x500x10 | 200x100x50x26x8 | SL10_3 | SL30_2 |
| 400x24 | 200x12x700x10 | 200x100x50x26x10 | SL10_4 | SL30_3 |
| 400x28 | 200x14x700x14 | 200x100x50x30x8 | SL10_5 | SL30_4 |
| 450x32 | | 200x100x50x30x8 | SL15_2 | SL30_5 |
| | | 200x100x50x30x9 | SL15_3 | SL40_2 |
| <i>TIPO H: bfxtfhxhtw</i> | | 200x100x50x30x11 | SL15_4 | SL40_3 |
| <i>(mm)</i> | | 200x100x50x30x13 | SL15_5 | SL40_4 |
| 150x10x300x6 | | 200x100x50x30x15 | SL20_2 | SL40_5 |
| 200x12x300x6 | | 200x120x50x30x14 | SL20_3 | SL50_2 |
| | | 200x140x50x30x14 | SL20_4 | SL50_3 |
| | | 200x150x50x30x14 | | SL50_4 |
| | | 200x160x50x30x14 | | SL50_5 |
| | | 200x180x50x30x14 | | |
| | | 200x190x50x30x14 | | |

* Tamaños de tipos de disipadores definidos en Hurtado y Bozzo (2008) – Notación: SLX_Y, X es el total de ancho en cm y Y es el espesor del alma pulida en mm, todos tienen una altura de 31 cm.

Fuente: Realizado por E. David Mora.

Para los disipadores TADAS se consideró una ductilidad (*Deformación horizontal de fallo* dividido para *Deformación horizontal de fluencia*) alrededor de 15, según trabajos de H. T. Chen (1996), Mussa Mahmoudi (2014) y Whittaker (1991), y teniendo en cuenta que mientras mayor sea el espesor de las placas menor será la posibilidad de falló por pandeo. Y para los disipadores Shear Link se utilizó ductilidades que varían cerca de 30, según Hurtado y Bozzo (2008).

6.6 MEDICIÓN DE ÍNDICES DE DAÑO

Existen varias propuestas de escalas de daño en edificios, Hernández (2002): EERI (Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, 1996), NHRC (Natural Hazard Research Centre, Universidad de Macquarie, Australia, 1973-1978), ATC 13 (Applied Technology Council, 1985). En este estudio se utilizará la propuesta de NHRC (1978) haciendo evaluaciones visuales de daño de las secciones y derivas de entrepiso mayores al 2%, y ayudado por conceptos similares de las otras propuestas mencionadas, especialmente de la dada por el EERI (1996).

TABLA 6.3 DEFINICIÓN DE DAÑO DE ACUERDO A NHRC (1978)

| Estado de Daño | Daño Estructural | Daño no Estructural | Relación de daño (%) | Descripción de daño |
|----------------|--------------------|---------------------|----------------------|--|
| 0 | Ninguno | Ninguno | 0.00 – 0.05 | Sin daño. |
| 1 | Ninguno | Menor | 0.05 – 0.30 | Daño no estructural menor – grietas en algunos muros y tabique agrietados, daños irrelevantes en componentes mecánicos y eléctricos. |
| 2 | Ninguno | Localizado | 0.30 – 1.25 | Daño no estructural localizado – agrietamiento más importante (pero todavía no generalizado); posible daño en elevadores y/o otros componentes mecánicos no apreciables. |
| 3 | No apreciable | Generalizado | 1.25 – 3.50 | Daño no estructural generalizado – posible agrietamiento en algunas vigas y columnas, aunque no apreciable. |
| 4 | Menor | Sustancial | 3.50 – 7.50 | Daño estructural menor – agrietamiento obvio o cedencia de algunos elementos estructurales; asociado a un daño importante en elementos no estructurales. |
| 5 | Sustancial | Extensivo | 7.50 – 20.0 | Daño estructural mayor, en donde se requiere reparar o reemplazar muchos elementos estructurales; el daño no estructural asociado requiere reparar la mayor parte del interior, el edificio se desaloja durante la reparación. |
| 6 | Mayor | Cercano al total | 20.0 – 65.0 | Edificio en ruinas. |
| 7 | Declarado en ruina | | 100 | Colapso total. |
| 8 | Colapso | | 100 | |

Fuente: Hernández (2002).

TABLA 6.4 DEFINICIÓN DE DAÑO DE ACUERDO A EERI (1996)

| Nivel | Estado de Daño (%) | Definición |
|----------|--------------------|--|
| Ninguno | 0 | Sin Daño. |
| Ligero | 0 – 5 | Daño estructural aislado; costo de reparación menor al 5% del valor del mercado del edificio. |
| Moderado | 5 – 25 | Daño no estructural y daño estructural ligero: costo de reparación menor al 25% del valor de mercado. |
| Severo | 25 – 50 | Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo: costo de reparación menor al 50% del valor de mercado. |
| Total | 50 – 100 | Más económico demoler que reparar. |
| Colapso | >100 | Colapso de la estructura. |

Fuente: Hernández (2002).

6.7 RESULTADOS DE CURVAS CORTANTE BASAL VS DEFORMACIÓN DEL TOPE DEL EDIFICIO

A continuación se muestran los resultados de curvas histeréticas de los edificios. En negro con líneas punteadas, los resultados del pushover cíclico de los edificios sin disipadores de energía tipo 1) y en negro, con línea continua la curva de capacidad uniendo los picos máximos absolutos según los resultados de este pushover cíclico, con esta curva se calcula un amortiguamiento histerético equivalente debido al daño de los elementos, pero con la curva en líneas punteadas se verá que los edificios no pueden recuperarse hacia su posición quedando inutilizados para posteriores sismos que pudieran ocurrir.

En verde se muestran las curvas histeréticas de los edificios tipo 2) con disipadores de energía TADAS y en magenta edificios tipo 2) con disipadores Shear Link. En estas, aunque varios edificios si llegan a recibir daño en otros elementos además de los disipadores, los edificios aún podrán resistir sismos de la misma intensidad, esto se ve en la capacidad cíclica de las curvas mostradas y comprobadas en edificios con análisis dinámicos no lineales duplicando los sismos con sus elementos dañados, como se ve en la figura 6.17.

En color cyan se muestran los resultados de los edificios 2) sin disipadores de

energía con iguales secciones de vigas, columnas y diagonales que los edificios con disipadores. Para obtener resultados con las curvas de capacidad se usa las mismas consideraciones que los edificios sin disipadores tipo 1), con respecto a las líneas punteadas y continuas en cian.

FIGURA 6.16 CURVAS HISTERÉTICAS CORTANTE BASAL VS DEFORMACIÓN EN TOPE DE LA ESTRUCTURA

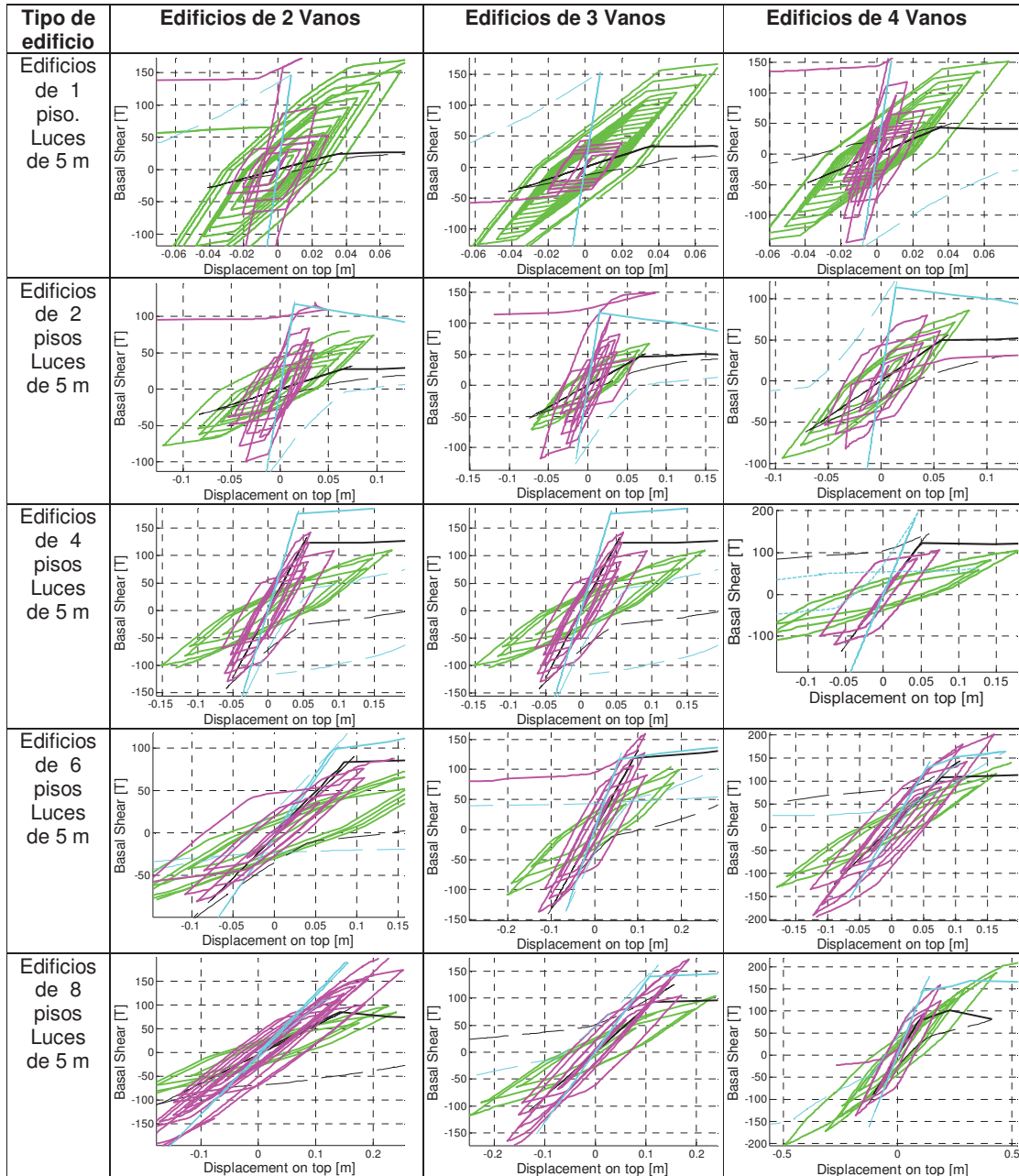


FIGURA 6.16 CONTINUACIÓN

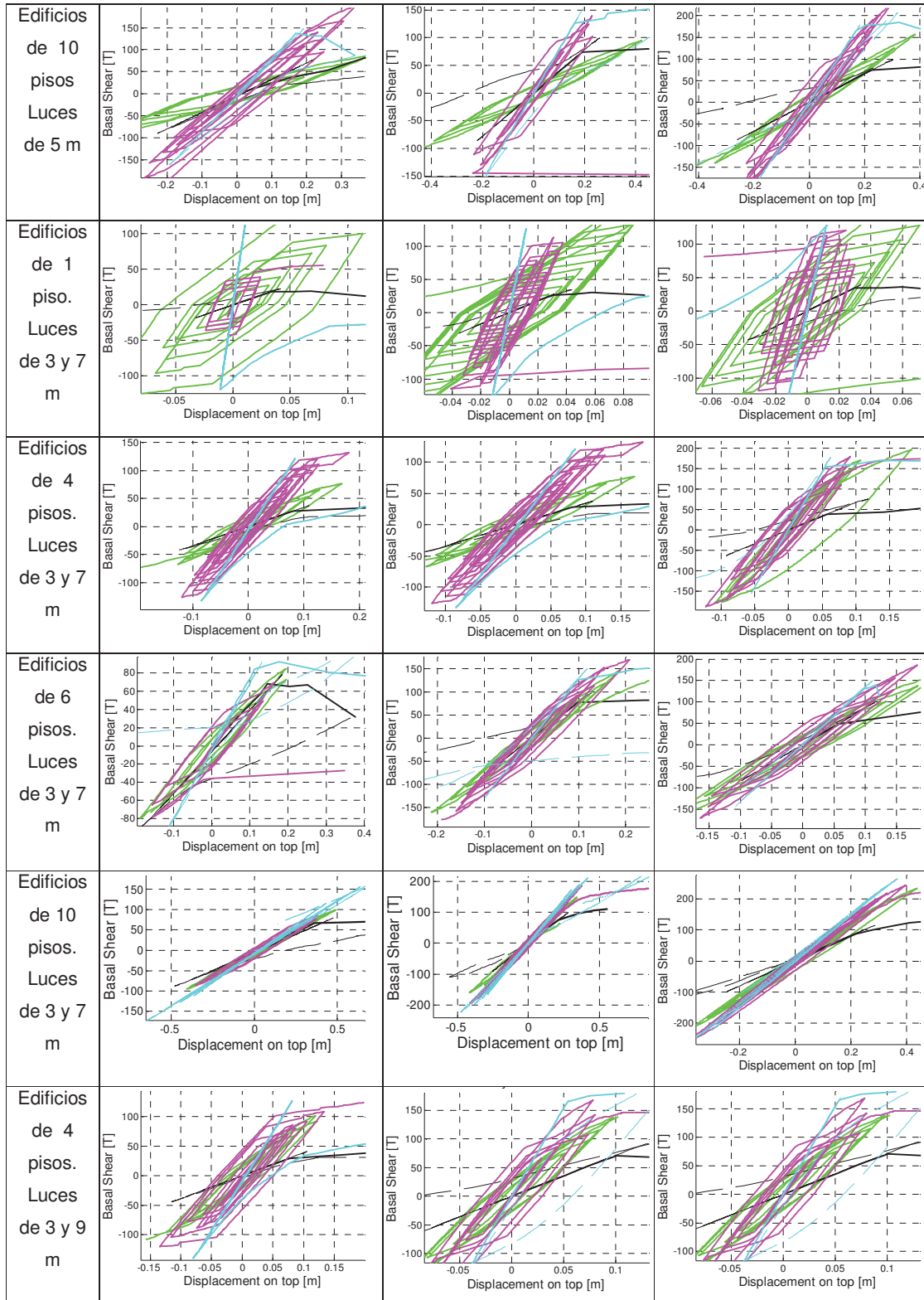
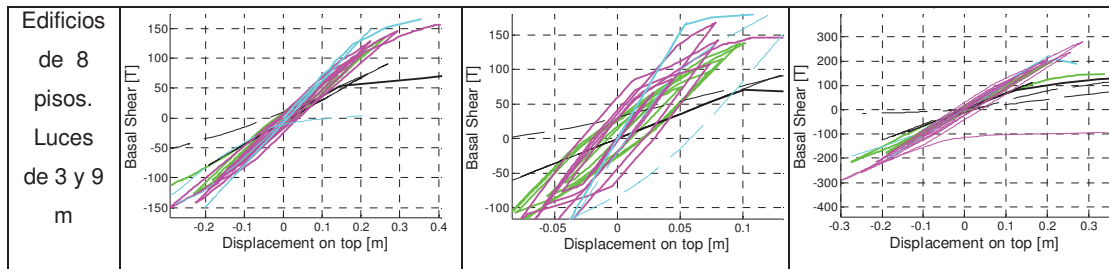
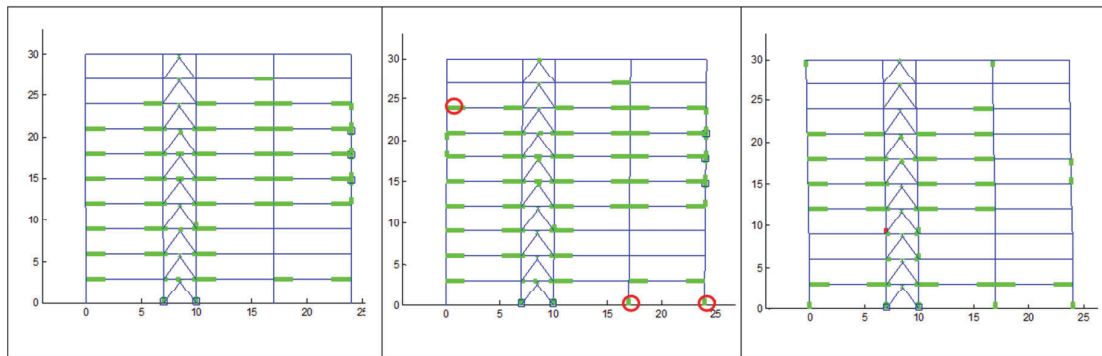


FIGURA 6.16 CONTINUACIÓN

Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.17 DESDE IZQUIERDA: ESTRUCTURA CON DISIPADORES CON ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL CON ACELEROGRAMA SINTÉTICO DE NEC15; SIGUIENTE, CON ACELEROGRAMA SINTÉTICO DUPLICÁNDOLO LUEGO DE REPOSO DE ESTRUCTURA, SIG. MISMA ESTRUCTURA ANALIZADA CON PUSHOVER CÍCLICO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

6.8 PUNTO DE DESEMPEÑO DE EDIFICIOS ANALIZADOS

El punto de desempeño se lo obtuvo como lo indicado en el subcapítulo 6.4. A continuación se muestra los resultados en la obtención del punto de desempeño solo de varios edificios, edificios de luces de 5m de 2 pisos, 6 pisos y 10 pisos con disipadores TADAS y Shear Link (SL).

En los gráficos de la figura 6.17 se muestran en verde y magenta el ciclo de la curva histerética donde el factor B (ver subcapítulo 6.4) del amortiguamiento resultante es suficiente para tocar el espectro de diseño reducido por este factor

en coordenadas de estructura en un grado de libertad Aceleración - Desplazamiento, en rojo el espectro de diseño de la estructura, y en azul el espectro de diseño dividido para *B* del subcapítulo 6.4.

FIGURA 6.18 CURVAS HISTERÉTICAS ACELERACIÓN VS DESPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA EN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON ESPECTRO DE DISEÑO ORIGINAL Y REDUCIDO

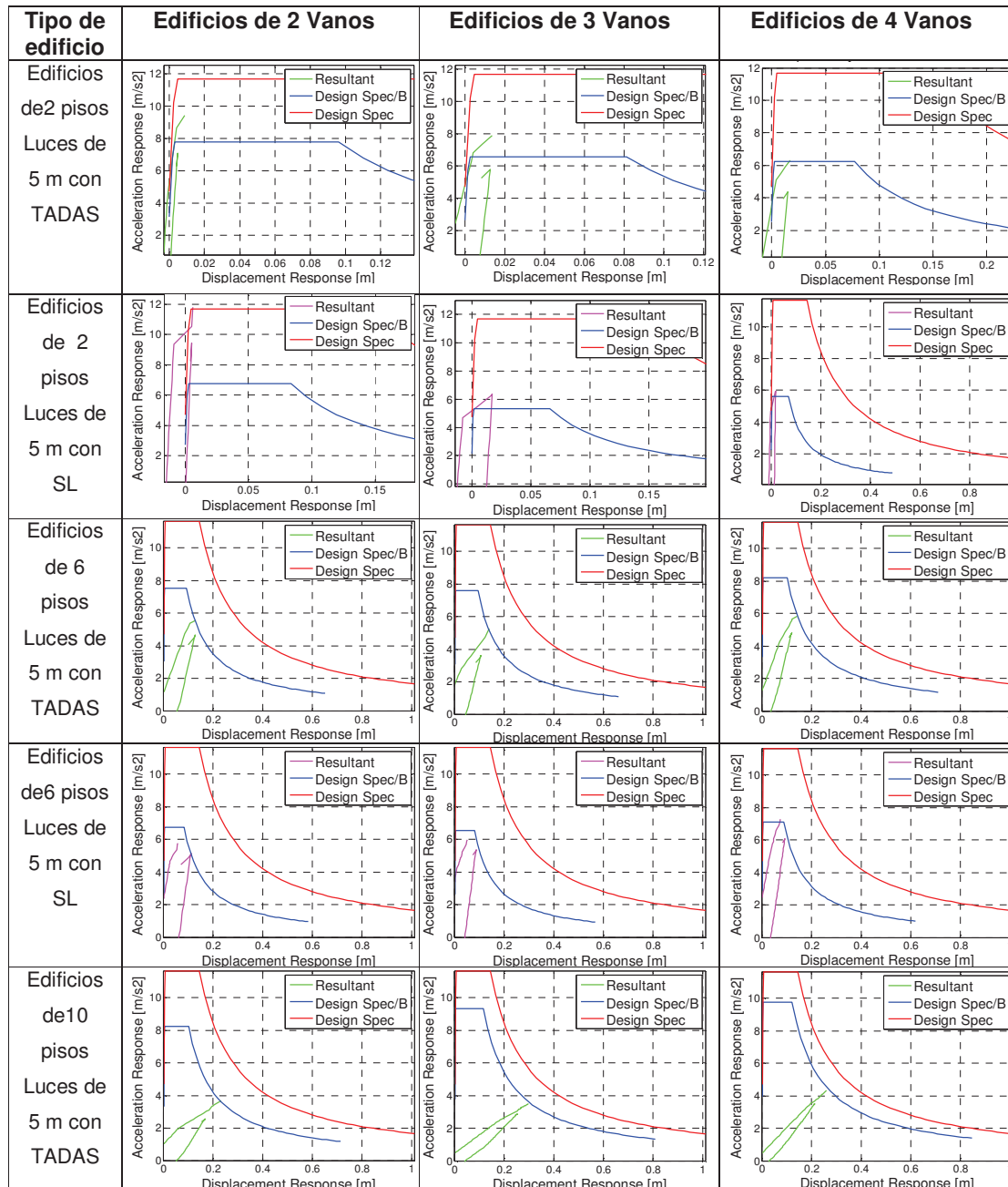
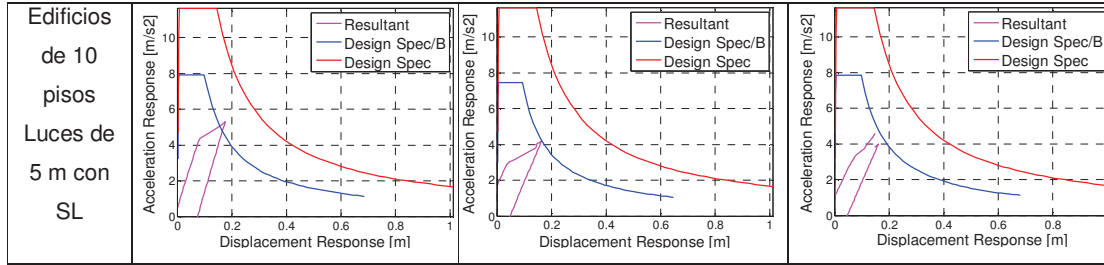


FIGURA 6.18 CONTINUACIÓN

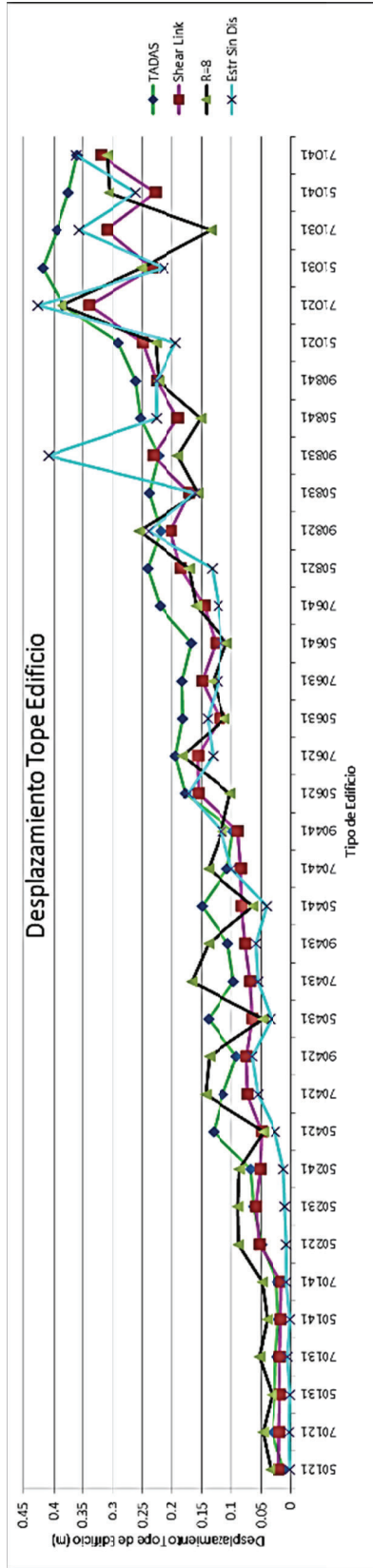
Fuente: Realizado por E. David Mora.

6.9 RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados más relevantes, con la leyenda “R=8” las estructuras diseñadas por el método de superposición modal con el sismo reducido con un factor $R=8$, con las leyendas “TADAS”, “Shear Link” y “Estr sin Dis” estructuras con iguales secciones pero la primera con disipadores TADAS, la segunda con disipadores Shear Link Bozzo y la tercera con la estructura con diagonales rigidizadoras sin disipadores de energía.

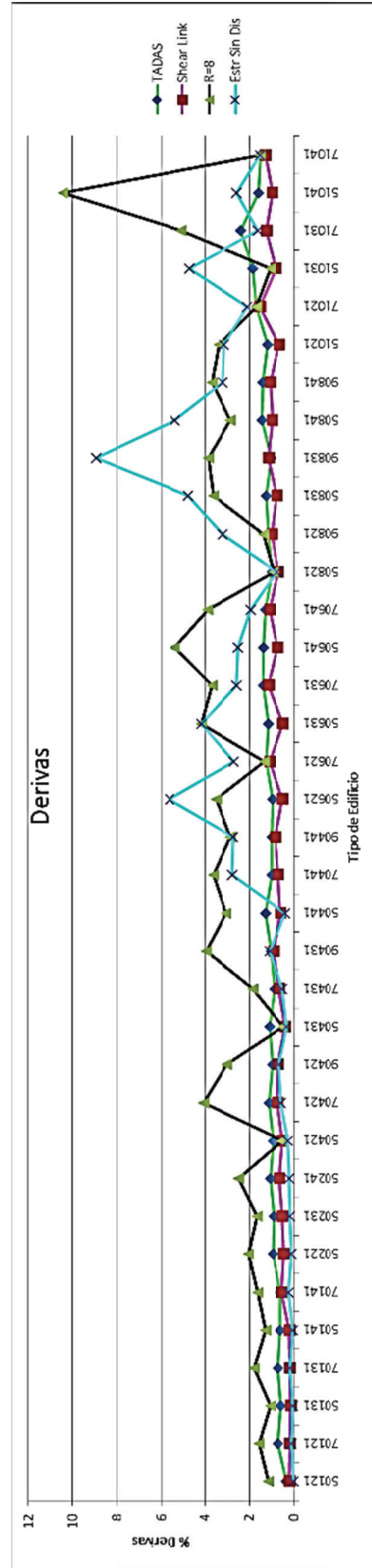
En el eje horizontal se muestra el código del edificio analizado de la figura 6.13, donde el primer número representa la medida de luz del mayor vano, los 2 siguientes el número de pisos, el siguiente el número de vanos y el último número no es usado para estos casos.

FIGURA 6.19 MÁXIMO DESPLAZAMIENTO DE TOPE DE EDIFICIO DURANTE EL PUNTO DE DESEMPEÑO



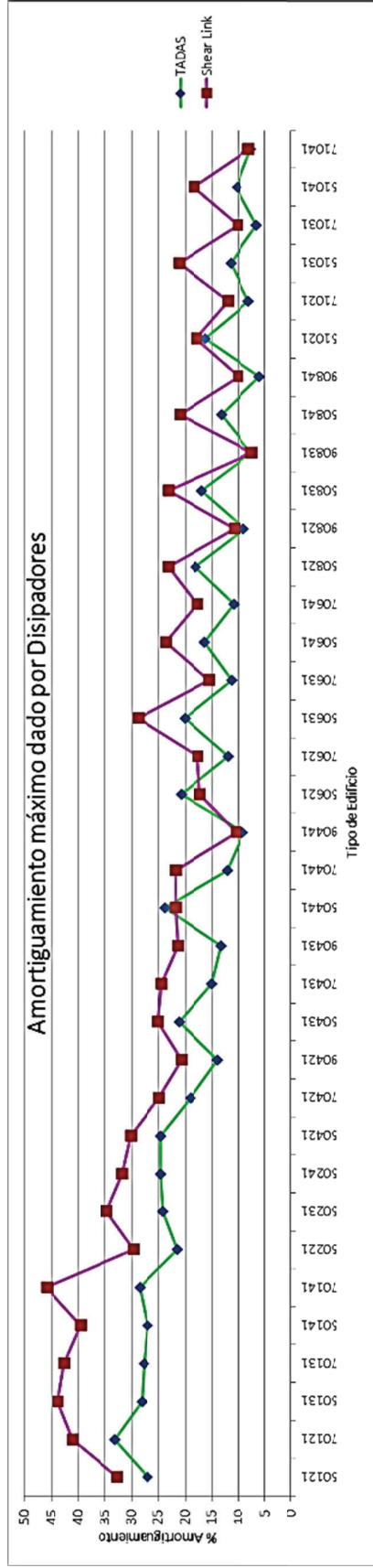
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.20 MÁXIMAS DERIVAS DE PISOS DE EDIFICIO DURANTE EL PUNTO DE DESEMPEÑO



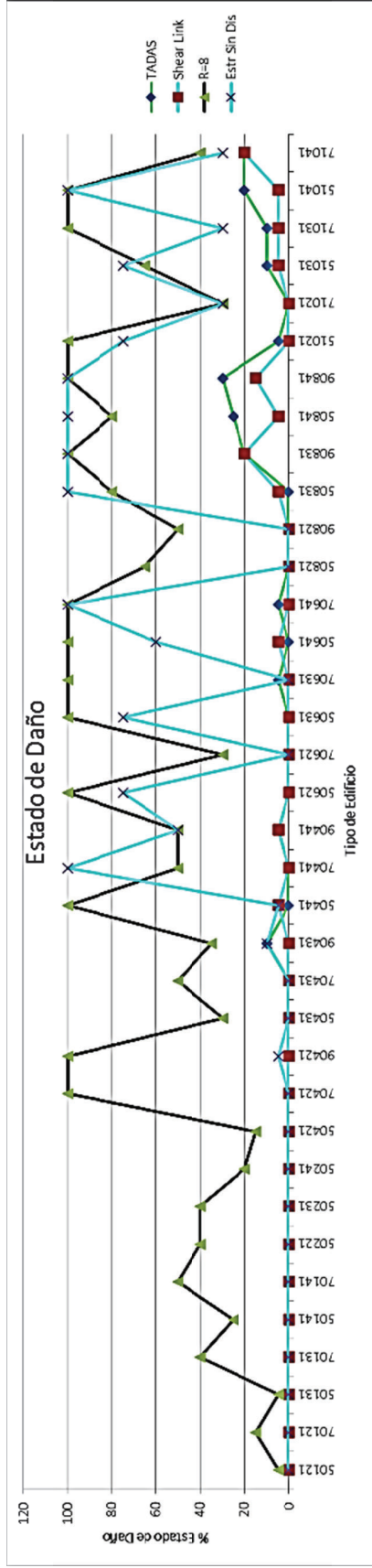
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.21 MÁXIMO AMORTIGUAMIENTO DADO POR LOS DISIPADORES DE ENERGÍA, NO NECESARIAMENTE DURANTE EL PUNTO DE DESEMPEÑO



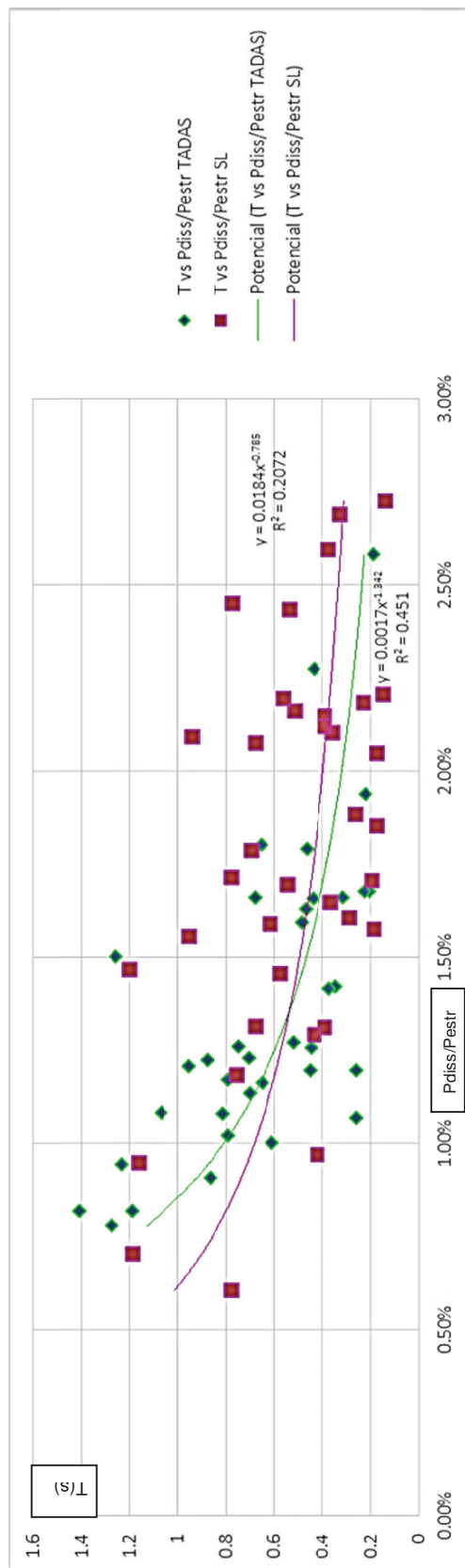
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.22 ESTADO DE DAÑO DE EDIFICIO DURANTE EL PUNTO DE DESEMPEÑO



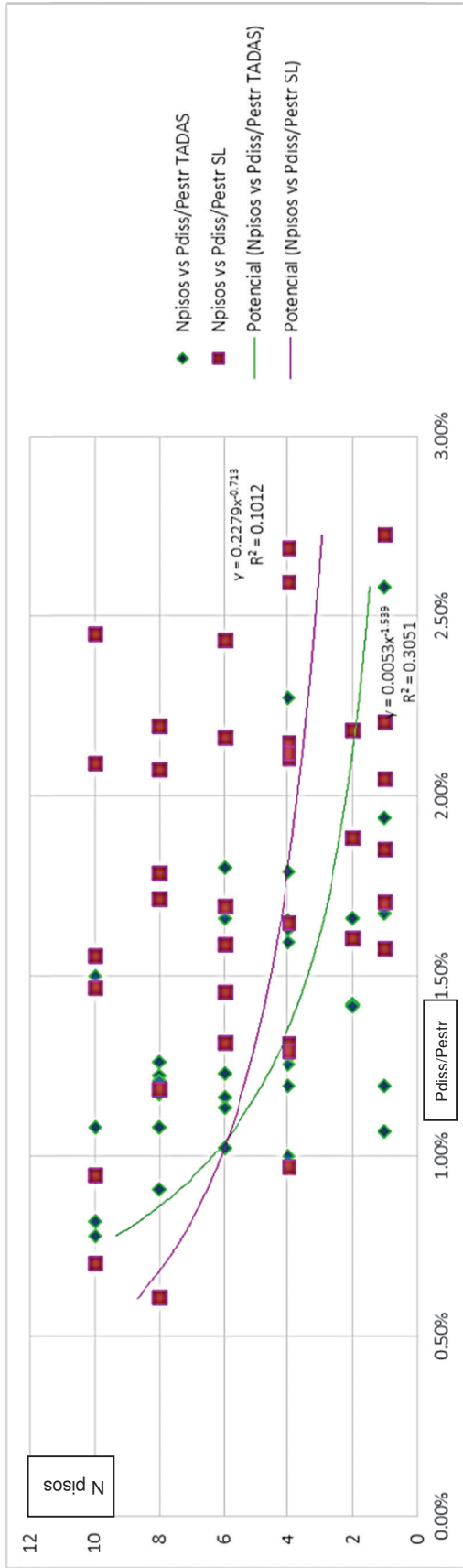
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.23 TENDENCIA DE PESO DE DISIPADORES CON RELACIÓN AL PESO DE TODO EL PÓRTICO ANALIZADO SEGÚN EL PERIODO DEL PÓRTICO



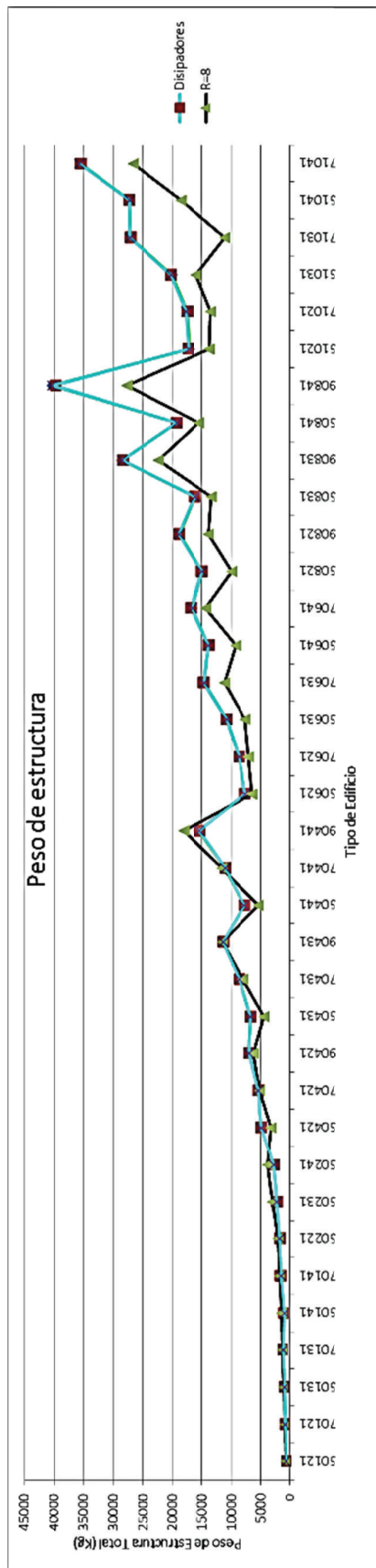
Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.24 TENDENCIA DE PESO DE DISIPADORES CON RELACIÓN AL PESO DE TODO EL PÓRTICO ANALIZADO SEGÚN EL NÚMERO DE PISOS DEL PÓRTICO



Fuente: Realizado por E. David Mora.

FIGURA 6.25 PESO TOTAL DEL PÓRTICO CON DISIPADORES Y SIN DISIPADORES CON REDUCCIÓN DE SISMO R=8



Fuente: Realizado por E. David Mora.

6.10 DIFERENTES DISPOSICIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA

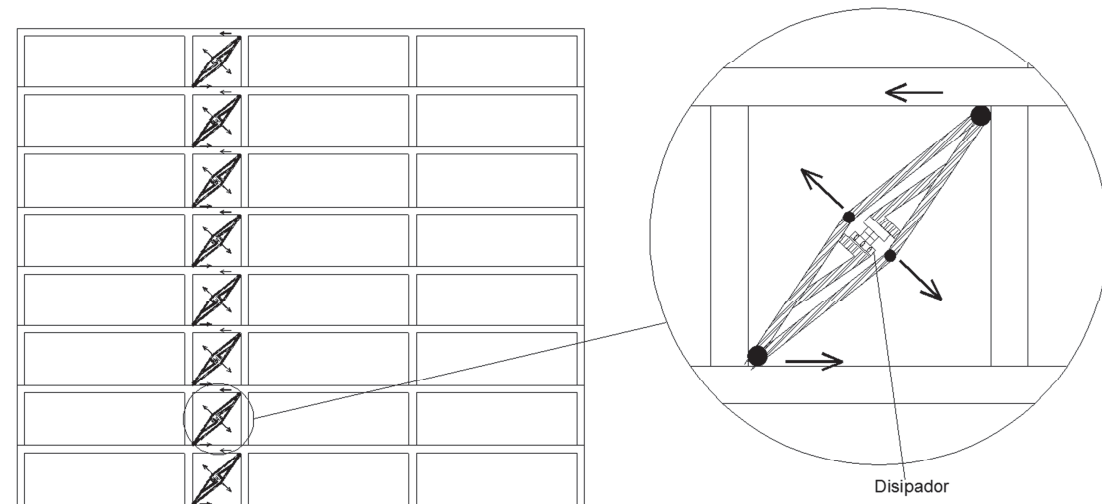
Como se muestra en los resultados, edificios altos, flexibles y de grandes luces con disipadores sobre diagonales chevron de ángulos de apertura menores a 45° son difíciles de mejorar su desempeño, entonces se plantea el ejercicio de reforzar el edificio de 8 pisos de altura, con 1 vano de 3 m y 3 vanos de 9 m como se indica en la figura 6.13 tercer edificio, con disipadores dispuestos de diferentes maneras para medir su mejor desempeño basado en daño, derivas y amortiguamiento con respecto al peso total del edificio correspondiente.

Alternativas de modelos con diferentes disposiciones de disipadores:

- 1) En la primera alternativa se ve los disipadores de energía sobre diagonales tipo chevron en la luz corta.
- 2) En la segunda alternativa se refuerza la luz de 9m con disipadores dejando espacio bajo esta para posible circulación, estos disipadores se los podría poner en una viga a la misma altura de la viga principal con los disipadores puestos acostados.
- 3) En la tercera alternativa se tiene disipadores sobre muros de corte en la luz corta.
- 4) Para la cuarta opción se reforzaron las columnas colocando disipadores a un metro de estas con diagonales en V invertida.
- 5) La quinta opción son disipadores en medio de diagonales formando una x.
- 6) La sexta opción es de disipadores dispuestos horizontalmente, en diagonales hacia las columnas.
- 7) La séptima alternativa, son disipadores colocados en disposición Sissors-Jack a 70° (Wittaker, Constantinou (2004)).

- 8) La octava alternativa, son disipadores colocados en disposición Sissors-Jack a 45° .
- 9) La novena alternativa, son disipadores colocados en disposición Sissors-Jack a 45° en sentido contrario a la octava alternativa.

FIGURA 6.26 DISPOSICIÓN DE DISIPADORES EN SISSORS-JACK



Fuente: Realizado por E. David Mora.

- 10) La décima alternativa es de disipadores sobre diagonales chevron que ocupan dos pisos y se los coloca cada dos pisos.
- 11) La décima primera alternativa es de disipadores sobre diagonales chevron que ocupan dos pisos y se los coloca en cada piso.
- 12) La décima segunda alternativa es con disipadores sobre diagonales alternando en chevron y en V.
- 13) En la décimo tercera alternativa se colocaron disipadores en la luz de 9m posiblemente reforzando los bordes exteriores de un edificio pero quizá cambiando la fachada del edificio.

FIGURA 6.27 MODELOS DE ALTERNATIVAS, ESTRUCTURAS DAÑADAS DURANTE EL MOMENTO DEL PUNTO DE DESEMPEÑO

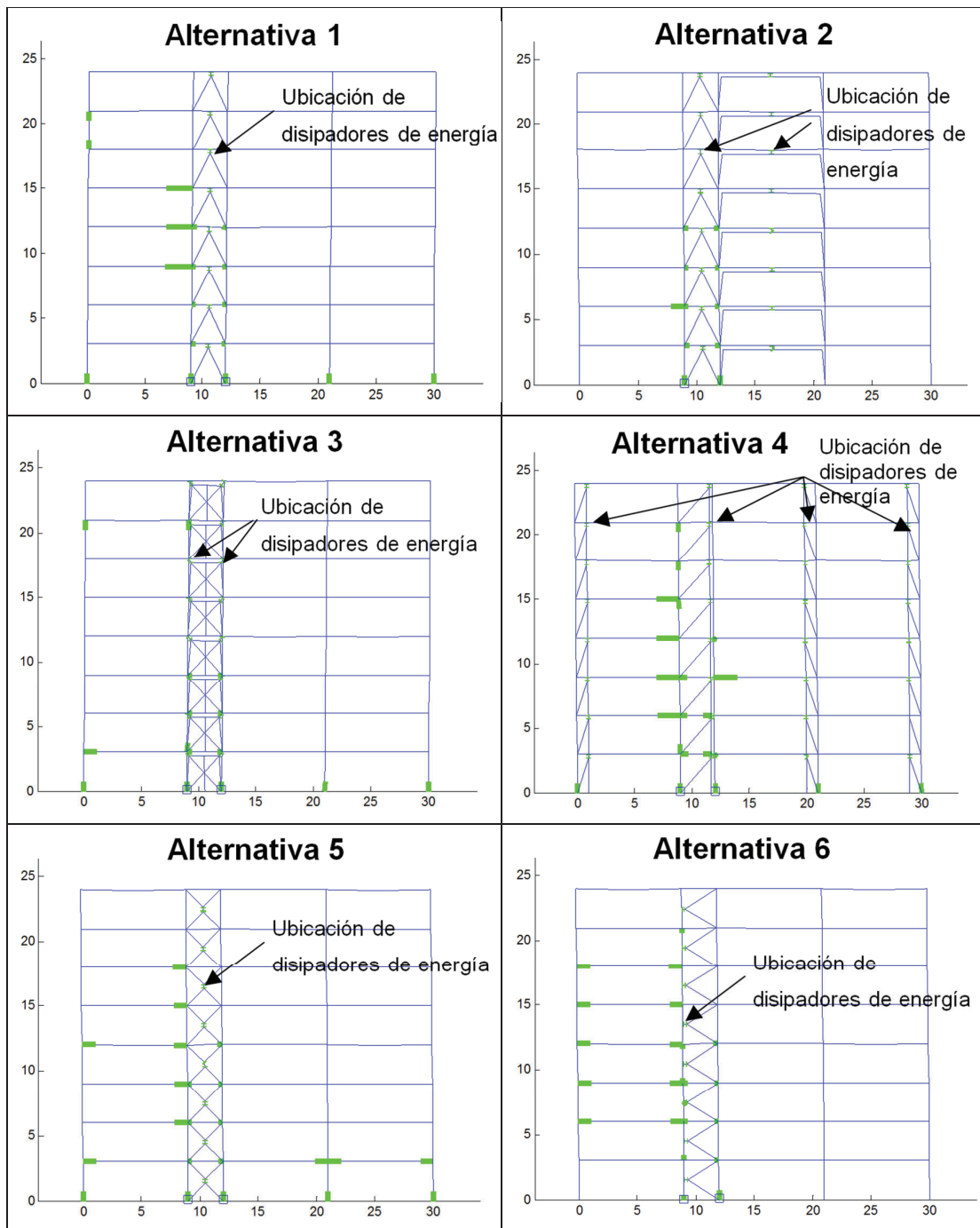
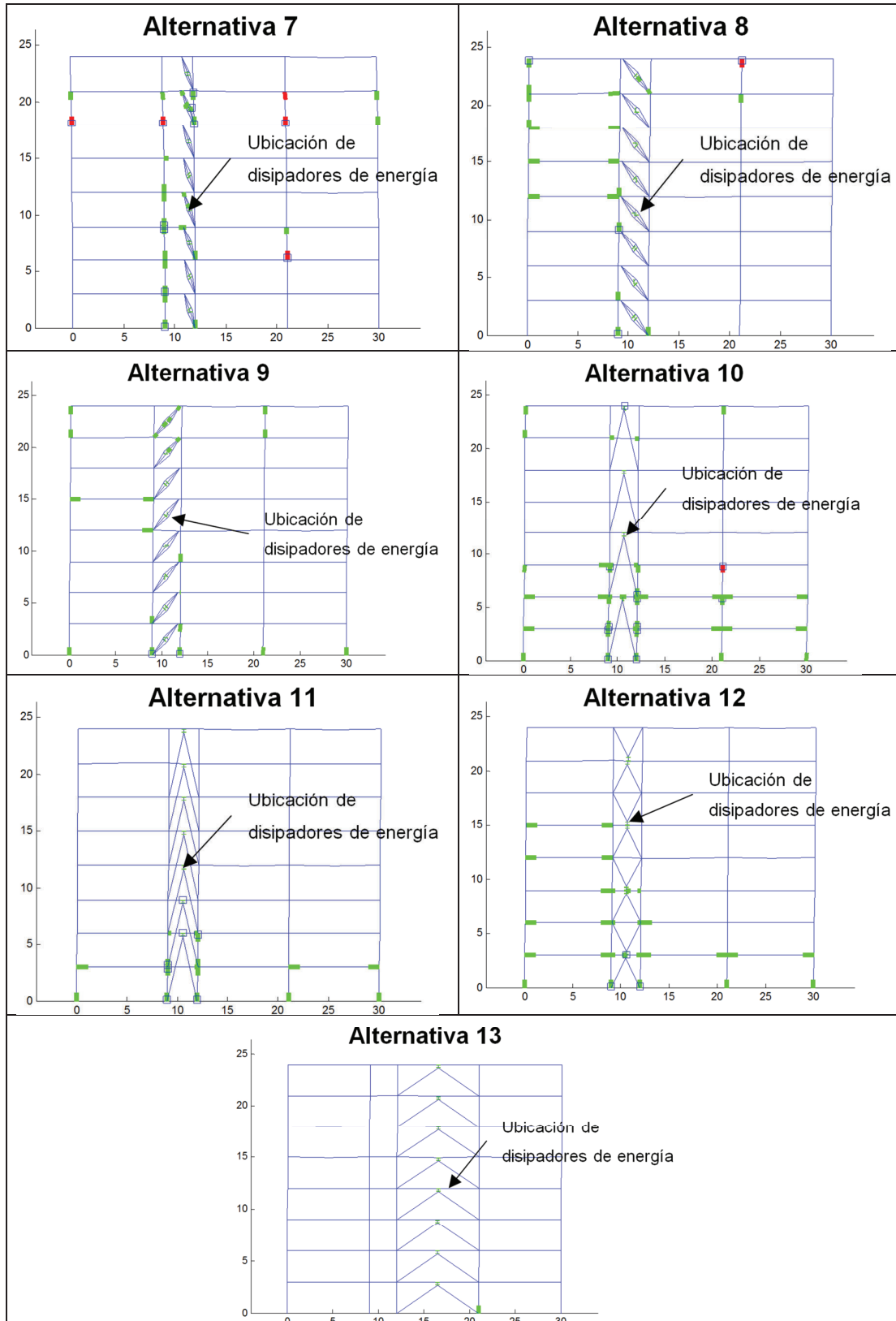


FIGURA 6.27 CONTINUACIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora.

Resultados de alternativas de modelos:

FIGURA 6.28 RESULTADOS DE DIFERENTES MODELOS

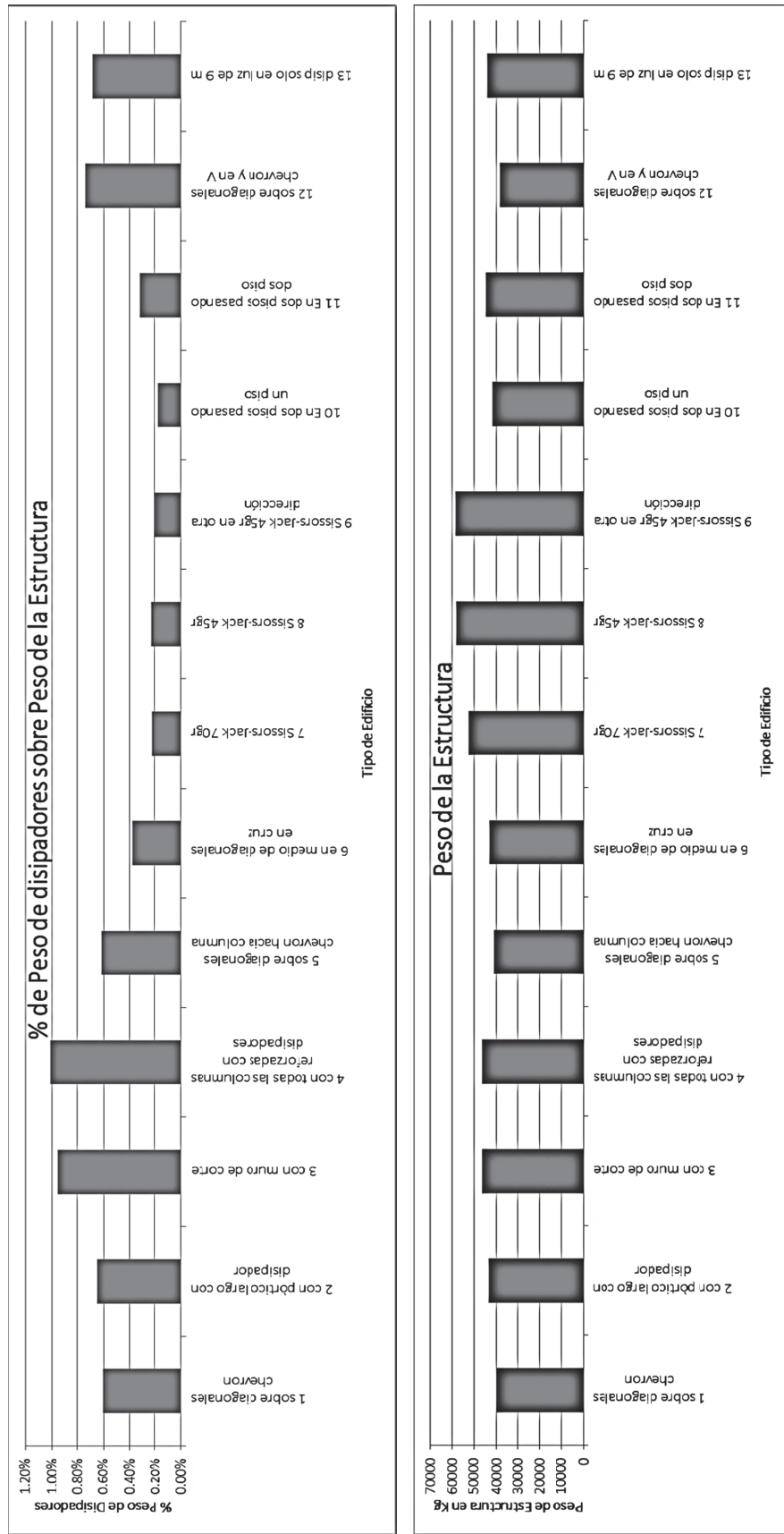


FIGURA 6.28 CONTINUACIÓN

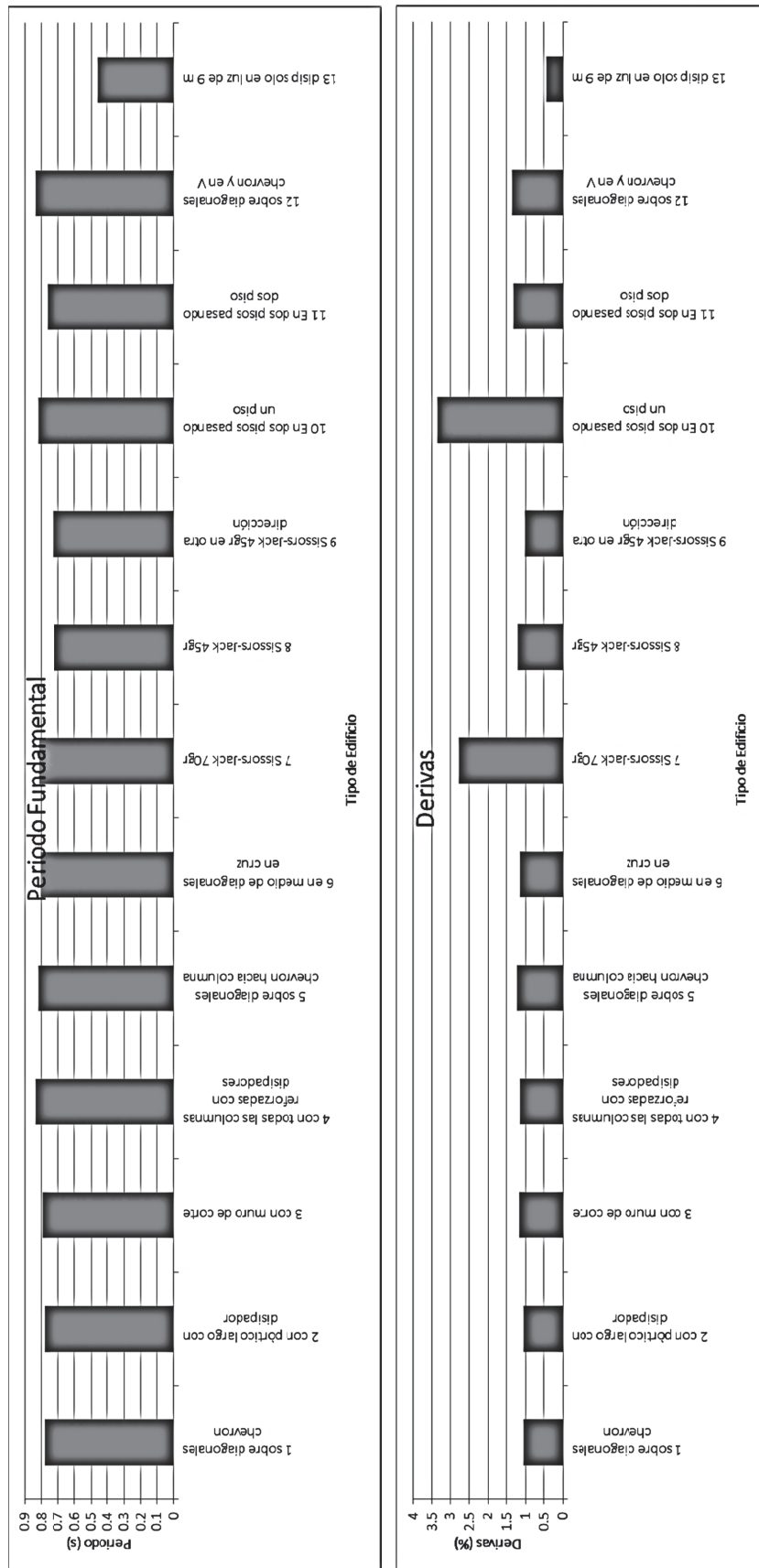
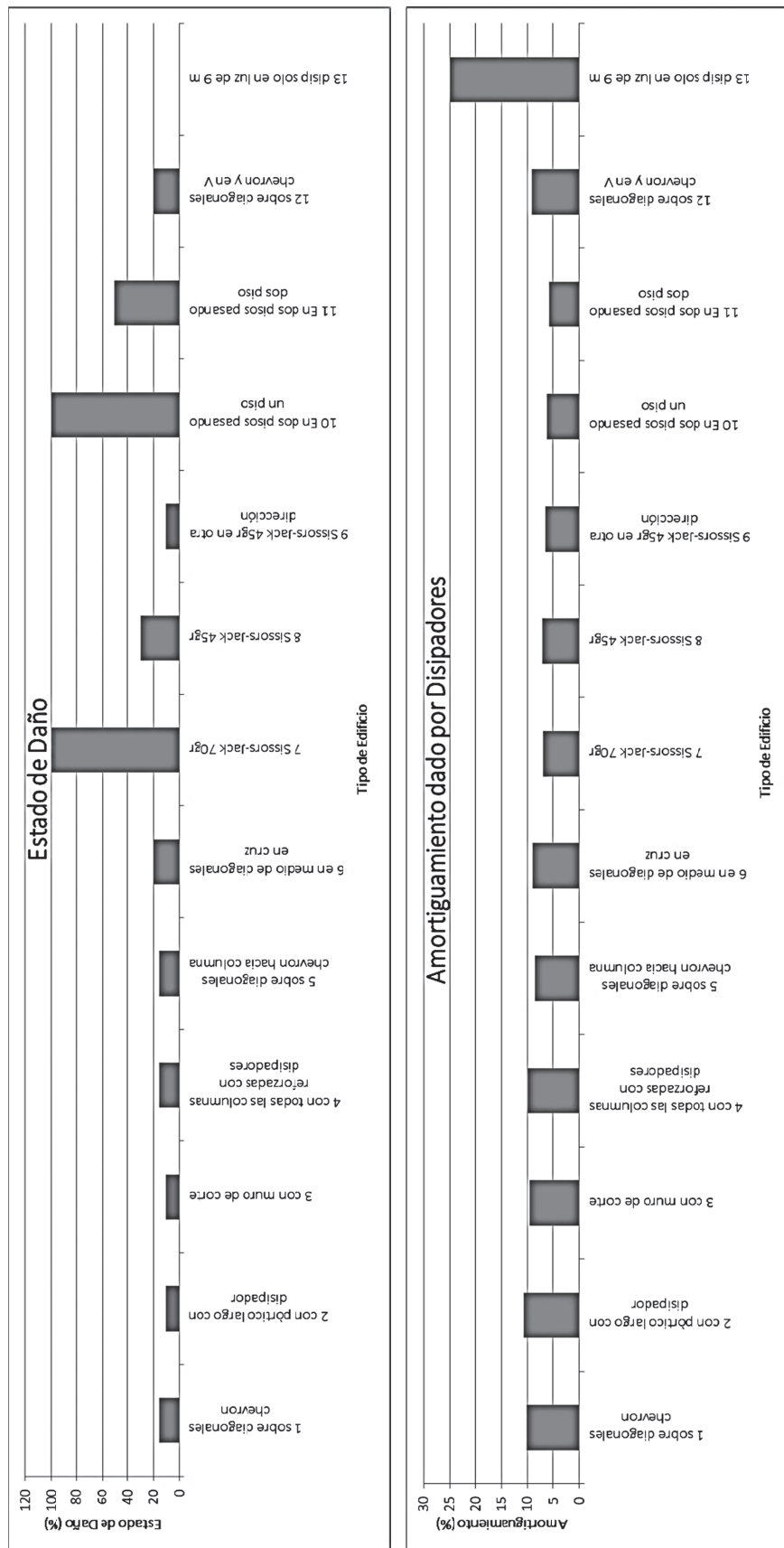
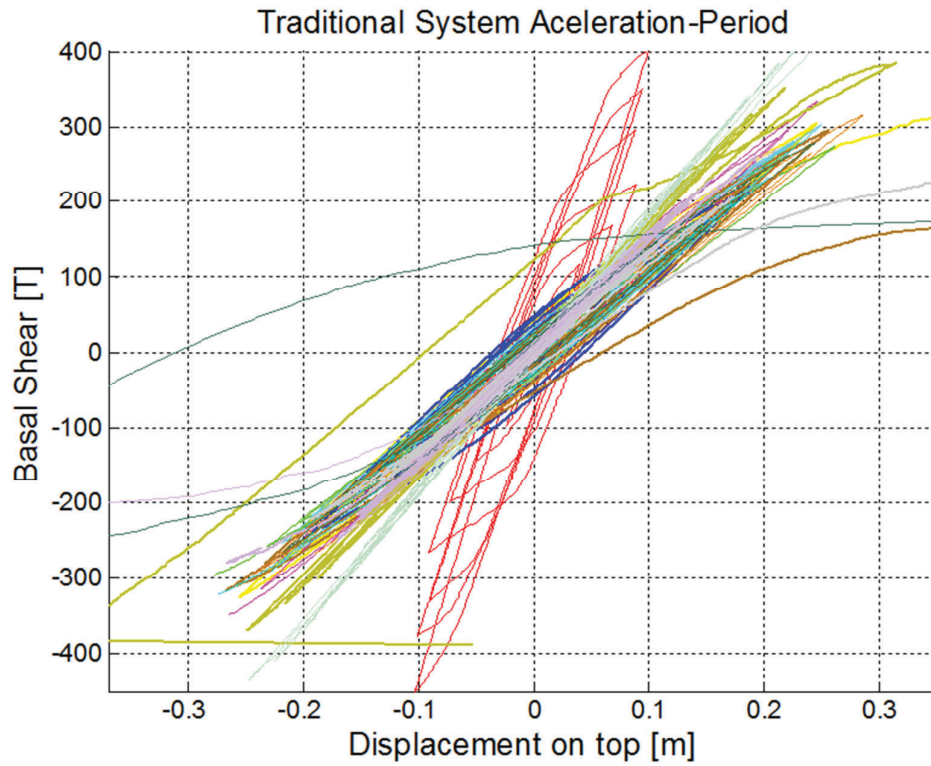


FIGURA 6.28 CONTINUACIÓN



Fuente: Realizado por E. David Mora

FIGURA 6.29 CURVAS HISTERÉTICAS DE EDIFICIOS. ALTERNATIVA 1=MAGENTA, 2=AZUL, 3=AMARILLO, 4=CAFÉ OSCURO, 5=NARANJA, 6=CYAN, 7= CAFÉ CLARO, 8=DORADO, 9=VERDE AGUA, 10=GRIS, 11=VIOLETA, 12=VERDE OSCURO, 13=ROJO



Fuente: Realizado por E. David Mora

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Al haber realizado varios análisis con diferentes métodos no lineales se ha visto que puede haber variación en la secuencia de daño de los elementos de una estructura, el análisis estático que acerca más sus resultados con los obtenidos con pocos análisis dinámicos no lineales realizados, es el análisis Pushover Multimodal Cíclico. En consecuencia para un diseño por desempeño el Método del espectro de capacidad nos dará una idea de que sectores del edificio deben recibir mayor atención para resistir un sismo, pero el daño específico de elementos como vigas y columnas pueden variar.

Se han diseñado edificios de iguales condiciones para poder obtener comparaciones, fueron 36 edificios con análisis lineal con sismo reducido $R=8$, 36 edificios de iguales condiciones con disipadores TADAS, 36 edificios con disipadores Shear Link Bozzo, 36 edificios con arriostramientos sin disipadores de iguales secciones a los edificios con disipadores y 13 edificios con diferentes disposiciones de los disipadores de energía, en total 157 estructuras. Los edificios con análisis lineales con sismo reducido 8 veces en general resultaron con muchos daños y colapso en edificios desde una altura media. Comparando los resultados de edificios con disipadores de energía se mejoró el desempeño, para las estructuras menores a 4 pisos, el peso total de la estructura fue menor o igual, y para estructuras de 6 pisos, el peso de la estructura fue mayor en un promedio del 30%.

Usando el método del pushover cíclico se observó que las estructuras sin arriostramientos o disipadores de energía tuvieron una falla frágil, las estructuras

tuvieron suficiente deformación para encontrar el punto de desempeño usando el método "A" del ATC 40, pero no pudieron recuperar su posición original.

Con disipadores de energía las estructuras de baja altura pueden alcanzar amortiguamientos de más del 40%, para estructuras de mediana altura se alcanzó amortiguamientos del 20% y para estructuras de alturas de 6 a 10 pisos el amortiguamiento es más dependiente del ángulo de apertura de las diagonales de soporte de los disipadores, variando el amortiguamiento entre 9 y 18 %.

Para estructuras que puedan tener grandes vanos con relativamente poco arrostramiento con disipadores, se intentó varias disposiciones de disipadores. Los mejores resultados de amortiguamiento, menor daño y menor peso de la estructura fueron con los disipadores sobre diagonales tipo chevron, sin contar con la alternativa de poner las diagonales chevron y disipadores en los vanos grandes como lo es la alternativa 13 arriba estudiada en el subcapítulo 6.10 capítulo 6.

7.2 RECOMENDACIONES

En este trabajo se hizo una considerable investigación sobre análisis no lineales y análisis estructural en pórticos de dos dimensiones. Pero este tipo de análisis en dos dimensiones es útil para estructuras regulares, o como se usó en este trabajo, para obtener resultados generales de investigación, para el análisis de otras estructuras es mejor usar modelos en tres dimensiones.

Basándose en muchos de los programas hechos, se debería ahora adaptar matrices de rigidez y diagramas de momento - curvatura para pórticos en tres dimensiones con elementos en tres dimensiones de doce grados de libertad. La mayor dificultad que puede existir es obtener diagramas para elementos con momentos biaxiales y torsión simultáneas pero hay una buena guía para resolver este problema en Li (2007).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar Roberto, (2003), Análisis sísmico por desempeño, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército.
2. Aguiar Roberto, (2012), *Dinámica de Estructuras con **CEINCI-LAB***, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH. Segunda edición.
3. Aguiar Roberto, (2014), *Análisis Matricial de Estructuras con **CEINCI-LAB***, Cuarta Edición. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, Ecuador.
4. Aguiar, Mora y Rodríguez, 2015. Monografía. Análisis sísmico de estructuras con disipadores ADAS o TADAS.
5. AISC/SEI 7 "American Society of Engineers", Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2010
6. AISC/SEI 41 "American Society of Engineers", Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2013
7. ATC-40 "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
8. ASM International – The Materials Information Society - Atlas of Stress – Strain Curves, 2002.
9. ASTM A 6/A 6M, Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling.
10. ASTM A 36/A 36M, Standard Specification for Carbon Structural Steel.

11. Borda, Luis M. (2007). Desempeño sísmico de un edificio aporricado Peruano de Seis Pisos, Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Perú.
12. Cervera Miguel y Blanco Elena, 2002. Mecánica de estructuras, Libro 2, Métodos de análisis, Edición UPC.
13. Chandrasekaran, Srinicasan (2010), Seismic Design Aids for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures.
14. Christopoulos, C. and Filiatrault, A. (2006). Principles of passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. IUSS Press, Instituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Pavia, Pavia, IT.
15. Chopra, A. K. y R. K. Goel (2001), "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Theory and preliminary evaluation", Report No. PEER 2001-03, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
16. Chopra, A. K. y R. K. Goel (2002), "A modal pushover analysis for estimating seismic demands of buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31.
17. Chopra, A. K. (2014), Dynamic of Structures Theory and application to earthquake engineering. 4th edition.
18. FEMA 356, (2000), Prestandard and commentary for the seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, FEMA 356.
19. FEMA 440, (2005), Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, FEMA 440.
20. Ger and Cheng. (2012). Seismic Design Aids for Nonlinear Pushover Analysis of Reinforced Concrete and Steel Bridges.

21. H. T. Chen, Y. F. SU and D. S. Juang (1996). Strength-Reduction Factors for Structures with Added Damping and Stiffness Device. Article in Eleventh World Conference on Earthquake Engineering.
22. Holzer et al. 1975. SINDER. A Computer Code for General Analysis of Two-Dimensional Reinforced Concrete Structures. Report. AFWL-TR-74-228 Vol. 1. Air Force Weapons Laboratory, Kirtland, AFB, New Mexico.
23. Hurtado and Bozzo (2008). Numerical and experimental analysis of a shear-link energy dissipator for seismic protection of buildings. Article in Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering.
24. Khamis Marion y Osorio Claudio, 2013. América del Sur: Una Visión regional de la situación de riesgo de desastres.
25. Krawinkler H, S. (1998), "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", Engineering Structures. Volume 20, No. 4–6.
26. Li, Guo-Qiang (2007), Advanced Analysis and Design of Steel Frames.
27. Mena, Ulises (2002), Evaluación del Riesgo Sísmico en zonas Urbanas. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña.
28. Mussa Mahmoudi, et. al (2014). Influence of the TADAS Dampers on the Ductility Reduction Factor of Steel Frames. Article in Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.
29. NEC-2015, Norma Ecuatoriana de la Construcción. Capítulo 2: Peligro Sísmico y requisitos de diseño sismo resistente. Cámara de la Construcción de Quito.
30. Rogac, M. (2012). Plastic Analysis of Steel Frame Structure, Civil Engineering Forum, Volume XXI/2.

31. Tena, A. (1997), "Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device", *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 10, pp. 811-821.
32. Tena, A. (2000), "Modelado analítico de edificios con disipadores de energía", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 62, pp. 29-62, enero-junio.
33. Tena A., Nangullasmú H., (2013) "Diseño sísmico de marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos: Definición de parámetros de diseño". *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 13 (2), 275-299.
34. Tena-Colunga, A. y H. J. Nangullasmú-Hernández (2015), "Assessment of seismic design parameters of moment resisting RC braced frames with metallic fuses", *Engineering Structures*, Vol. 95, pp. 138-153, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.062>.
35. Tsai K-C., Chen H-W., Hong C-P. y Su Y-F, (1993), "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthquake Spectra*, 9 (3), 505-528.
36. Web.MIT.edu, Moment – Curvature, Beam Review.
37. Wittaker and Constantinou (2004). *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. Chapter 12: Seismic Energy Dissipation Systems for Buildings.
38. Whittaker (1991). *Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices*. Article in *Earthquake Spectra*.

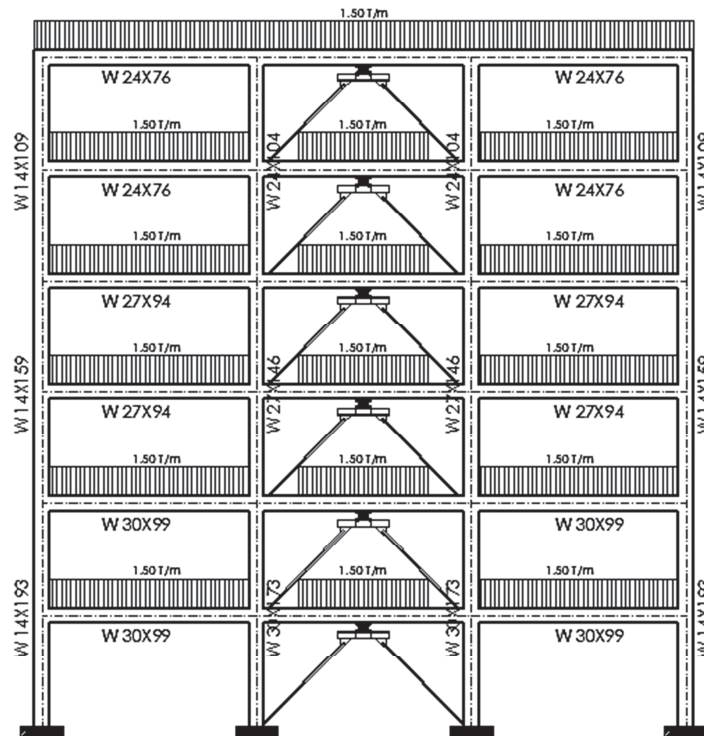
ANEXOS

ANEXO No1

**EJEMPLO DE COMO REALIZAR ANÁLISIS POR EL
MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD CON LOS
PROGRAMAS REALIZADOS EN MATLAB**

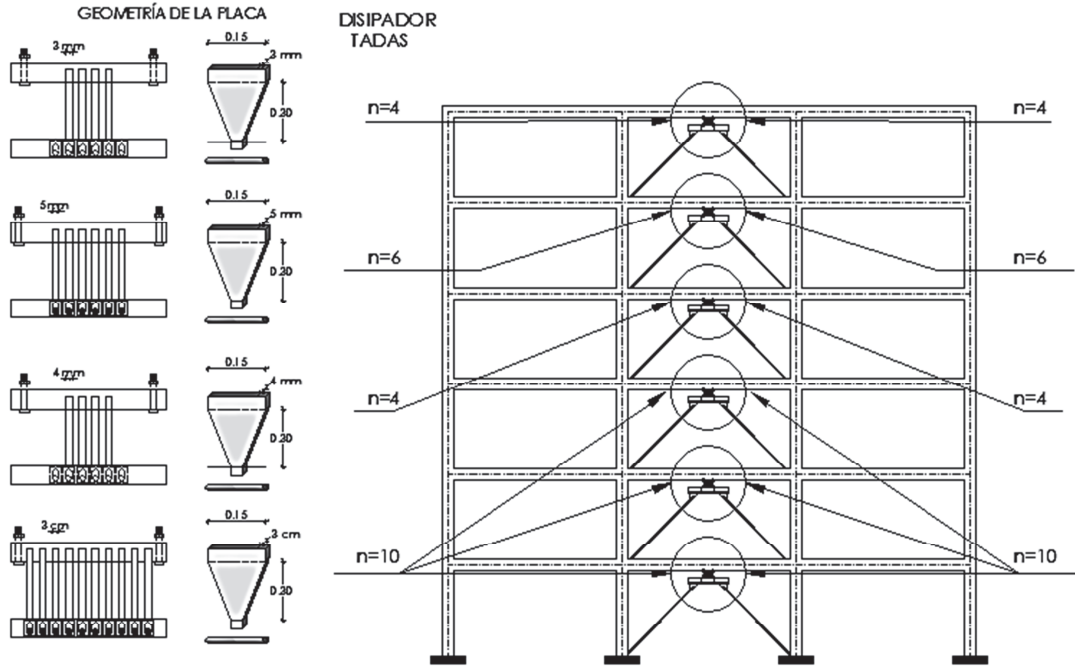
En la siguiente figura se muestra la estructura con la que se realiza un ejemplo utilizando los programas hechos en la plataforma de Matlab.

FIGURA A1.1 ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGÍA TADAS A SER ANALIZADA



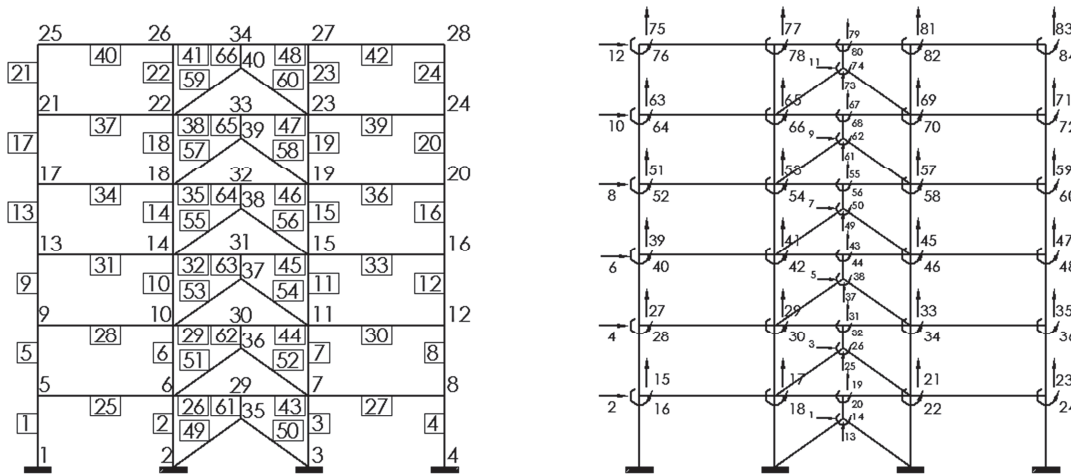
Fuente: Realizado por E. David Mora

FIGURA A1.2 GEOMETRÍA DE LOS DISIPADORES TADAS EMPLEADOS PARA LA ESTRUCTURA DE ACERO



Fuente: Realizado por Michael Rodríguez

FIGURA A1.3 NUMERACIÓN DE NUDOS, ELEMENTOS Y GRADOS DE LIBERTAD



Fuente: Realizado por Michael Rodríguez

Comandos escritos en Command Window o programa ejecutable en Matlab (Nota: En Matlab luego del símbolo “%” se han escrito comentarios):

```

% Building of 6 floors with steel structure - with braces and TADAS.
%                               Ing. David Mora
%.....Data Structure.....
clear
%Units T-m
%Steel Section:  [Material (1),fy ,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
%                Type=1 is a I section.
%                2 is a H section.
%                3 is a rectangular tube section.
%Concrete Section: [Material (2),f'c,Ey,fy,Type,h,b,bw,tF,d',As_sup...
%                  ,As_inf,Stirrup separation,Av,As1,As2...]
%                As1,As2... is to steel in the middle of the section, to
%                columns.
%                Type=1 is a T or L or Rectangular Section.
%Brace section equivalent with or without Damper, no transmit
%moments:[Material(1.1),fy ,fu,Ey ,Type(1,2,3),d,tw,bs,bi,...
%         tfs,tfi,[Damper Section Vector]]
%ADAS Damper Section: [Material (1.2),fy ,fu,Ey , Type (4),h,tw,B,b,n,miu]
%                    B=    ADAS Wider
%                    h=    ADAS height
%                    t=    One plate tickness
%                    n=    Number of plates
%                    fy=   Yield stress
%                    Es=   Young's Modulus
%                    b=    Smaller width
%                    miu=  Ductility dissipator
%TADAS Damper Section: [Material (1.2),fy ,fu,Ey ,Tipo(5),h,tw,bs,bi,n,miu]
%                    b=    TADAS Wider
%                    h=    TADAS height
%                    t=    One plate tickness
%                    n=    Number of plates
%                    fy=   Yield stress
%                    Es=   Young's Modulus
%                    bi=   Bottom width
%                    miu=  Ductility dissipator
%SL Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Type(6),b,h,ht,n,np,e,t,z,miu]
%                    b    One window width
%                    h    One window height
%                    ht   Total heigth of the parante
%                    n    Number of windows
%                    np   Numbers of parantes
%                    e    Window tickness
%                    t    Parante tickness
%                    z    Parante Width
%                    fy   Yield stress
%                    Es   Young's Modulus
%                    miu  Ductility dissipator
%Isolator: [Material (1.3),Type(1),Fy,qy,Fu,qu,Li,Lj,kv]
%          Type= 1 is FPT

%NOTE: ALL SECTION VECTORS SHOULD HAVE THE SAME DIMENTION, CAN BE FILLED
%WITH ZEROS
Ey=20430000;%Steel modulus of elasticity
fy=25300;   %Yield steel stress
fu=40800;   %Ultimate steel stress
Section5=[1,fy,fu,Ey,1,.36322,.013335,.37084,.37084,.021844,.021844,zeros(1,11)];%W14x109
Section6=[1,fy,fu,Ey,1,.61214,.0127,.32512,.32512,.01905,.01905,zeros(1,11)];%W24x104
Section3=[1,fy,fu,Ey,1,.381,.018923,.39624,.39624,.030226,.030226,zeros(1,11)];%W14x159
Section4=[1,fy,fu,Ey,1,.69596,.015367,.3556,.3556,.024765,.024765,zeros(1,11)];%W27x146
Section1=[1,fy,fu,Ey,1,.3937,.022606,.39878,.39878,.036576,.036576,zeros(1,11)];%W14x193
Section2=[1,fy,fu,Ey,1,.77216,.016637,.381,.381,.027178,.027178,zeros(1,11)];%W30x173
Section9=[1,fy,fu,Ey,1,.60706,.011176,.22835,.22835,.017272,.017272,zeros(1,11)];%W24x76
Section8=[1,fy,fu,Ey,1,.68326,.012446,.254,.254,.018923,.018923,zeros(1,11)];%W27x94
Section7=[1,fy,fu,Ey,1,.75438,.013208,.2667,.2667,.017018,.017018,zeros(1,11)];%W30x99
SectionTADAS(1,1:11)=[1.2,fy,fu,Ey,5,.3,.03,.15,.015,10,10];
SectionTADAS(2,1:11)=[1.2,fy,fu,Ey,5,.3,.004,.15,.015,4,10];
SectionTADAS(3,1:11)=[1.2,fy,fu,Ey,5,.3,.005,.15,.015,6,10];
SectionTADAS(4,1:11)=[1.2,fy,fu,Ey,5,.3,.003,.15,.015,4,10];

```

```

SectionBrace(1,:)=[1.1,Section2(2:11),zeros(1,11)];
SectionBrace(2,:)=[1.1,Section9(2:11),zeros(1,11)];
SectionBrace(3,:)=[1.1,Section8(2:11),zeros(1,11)];
SectionBrace(4,:)=[1.1,Section9(2:11),zeros(1,11)];

%In "Table1" each row is an element. 1st, 2nd and 3rd columns are the initial, medium
% and final sections in each element
Table1=[Section1    Section1    Section1    %elem 1
        Section2    Section2    Section2    %elem 2
        Section2    Section2    Section2    %elem 3
        Section1    Section1    Section1    %elem 4
        Section1    Section1    Section1    %elem 5
        Section2    Section2    Section2    %elem 6
        Section2    Section2    Section2    %elem 7
        Section1    Section1    Section1    %elem 8
        Section3    Section3    Section3    %elem 9
        Section4    Section4    Section4    %elem 10
        Section4    Section4    Section4    %elem 11
        Section3    Section3    Section3    %elem 12
        Section3    Section3    Section3    %elem 13
        Section4    Section4    Section4    %elem 14
        Section4    Section4    Section4    %elem 15
        Section3    Section3    Section3    %elem 16
        Section5    Section5    Section5    %elem 17
        Section6    Section6    Section6    %elem 18
        Section6    Section6    Section6    %elem 19
        Section5    Section5    Section5    %elem 20
        Section5    Section5    Section5    %elem 21
        Section6    Section6    Section6    %elem 22
        Section6    Section6    Section6    %elem 23
        Section5    Section5    Section5    %elem 24
        Section7    Section7    Section7    %elem 25
        Section7    Section7    Section7    %elem 26
        Section7    Section7    Section7    %elem 27
        Section7    Section7    Section7    %elem 28
        Section7    Section7    Section7    %elem 29
        Section7    Section7    Section7    %elem 30
        Section8    Section8    Section8    %elem 31
        Section8    Section8    Section8    %elem 32
        Section8    Section8    Section8    %elem 33
        Section8    Section8    Section8    %elem 34
        Section8    Section8    Section8    %elem 35
        Section8    Section8    Section8    %elem 36
        Section9    Section9    Section9    %elem 37
        Section9    Section9    Section9    %elem 38
        Section9    Section9    Section9    %elem 39
        Section9    Section9    Section9    %elem 40
        Section9    Section9    Section9    %elem 41
        Section9    Section9    Section9    %elem 42
        Section7    Section7    Section7    %elem 43
        Section7    Section7    Section7    %elem 44
        Section8    Section8    Section8    %elem 45
        Section8    Section8    Section8    %elem 46
        Section9    Section9    Section9    %elem 47
        Section9    Section9    Section9    %elem 48
        SectionBrace(1,:) SectionBrace(1,:) SectionBrace(1,:) %elem 49
        SectionBrace(1,:) SectionBrace(1,:) SectionBrace(1,:) %elem 50
        SectionBrace(1,:) SectionBrace(2,:) SectionBrace(1,:) %elem 51
        SectionBrace(1,:) SectionBrace(2,:) SectionBrace(1,:) %elem 52
        SectionBrace(1,:) SectionBrace(3,:) SectionBrace(2,:) %elem 53
        SectionBrace(1,:) SectionBrace(3,:) SectionBrace(2,:) %elem 54
        SectionBrace(2,:) SectionBrace(3,:) SectionBrace(2,:) %elem 55
        SectionBrace(2,:) SectionBrace(3,:) SectionBrace(2,:) %elem 56
        SectionBrace(3,:) SectionBrace(4,:) SectionBrace(3,:) %elem 57
        SectionBrace(3,:) SectionBrace(4,:) SectionBrace(3,:) %elem 58
        SectionBrace(4,:) SectionBrace(4,:) SectionBrace(3,:) %elem 59
        SectionBrace(4,:) SectionBrace(4,:) SectionBrace(3,:) %elem 60
        SectionTADAS(1,1:11) zeros(1,22*2+11) %elem 61
        SectionTADAS(1,1:11) zeros(1,22*2+11) %elem 62
        SectionTADAS(1,1:11) zeros(1,22*2+11) %elem 63
        SectionTADAS(2,1:11) zeros(1,22*2+11) %elem 64
        SectionTADAS(3,1:11) zeros(1,22*2+11) %elem 65
        SectionTADAS(4,1:11) zeros(1,22*2+11)]; %elem 66

np=6; nr=4;%np=number of floors;nr=number of fixed supports on the first nr elements

```

```

% GEN=[i,ia,ib,nig,ii,ina,inb]
% i Element Number
% ia Initial node of element
% ib Final node of element
% nig Amount of elements to generate
% ii Incremento en la numeración de los elementos
% ina Numeration increase to initial node
% inb Numeration increase to final node
GEN=[1 1 5 6 4 4 4
      2 2 6 6 4 4 4
      3 3 7 6 4 4 4
      4 4 8 6 4 4 4
      25 5 6 5 3 4 4
      26 6 29 5 3 4 1
      27 7 8 5 3 4 4
      43 29 7 5 1 1 4
      49 2 35 5 2 4 1 %Brace
      50 3 35 5 2 4 1
      61 35 29 5 1 1 1];%Brace
%NODE=[i,xi,yi,ij,inci,dx,dy]
% i Node number
% xi,yi Coordinates of initial node
% ij Amount of nodes to generate
% inci Numeration increase to initial node
% dx Length increase in X
% dy Length increase in Y
NODE=[1 0 0 6 4 0 3.815
      2 7.315 0 6 4 0 3.815
      3 7.315*2 0 6 4 0 3.815
      4 7.315*3 0 6 4 0 3.815
      29 7.315*1.5 3.815 5 1 0 3.815
      35 7.315*1.5 3.815-.3 5 1 0 3.815];
Fm=[25 1.5]; %Loads on beams
for kk=26:48
    Fm=[Fm
        kk,1.5];
end

```

Para Pushover normal:

```

%-----Used Programs-----
Structure_Geom_2D_v2%Define structure geometry
Pushover_2%Define Capacity Curve
MEC_NEC14%Define Target Point with NEC14 Design Spectrum
ResultsMEC_B%Show Results

```

Para Pushover Multimodal:

```

%-----Used Programs-----
Structure_Geom_2D_v2%Define structure geometry
Pushover_3%Define Capacity Curve
MEC_NEC14_22%Define Target Point with NEC14 Design Spectrum
ResultsMEC_B22%Show Results

```

Para Pushover Multimodal Cíclico:

```

espectro_nec14_mec%Define Design Elastic Spectrum to Ecuador
%-----Used Programs-----
Structure_Geom_2D_v2%Define structure geometry
Pushover_4%Define Capacity Curve
MEC_NEC14_5%Define Target Point with NEC14 Design Spectrum
ResultsMEC_B22%Show Results

```

Los resultados se los puede ver en el subcapítulo 4.10.

ANEXONo2
PROGRAMAS REALIZADOS EN MATLAB PARA EL
MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD

Los programas presentados a continuación son necesarios para modelar la estructura, hallar las curvas de capacidad, hallar el punto de desempeño, y mostrar los resultados. Muchos de estos programas han sido descritos en los capítulos de esta tesis mostrando sus resultados.

A2.1 PROGRAMAS Y SUBPROGRAMAS EN Pushover_2

A2.1.1 Programa Pushover_2

```
% Pushover_2
% Program to calculate Capacity Curve of a Structure with non symmetric
% elements
% Program need the follow structure data:
% NI,NJ,X,Y,Y0,L,seno,coseno,CG,VC,ngl,np,Fm,Dib
%           Ing. David Mora and Dr. Roberto Aguiar
%           April-2015

L0=L;
NDissip=sum(Table1(:,1)==1.2);
NISolat=sum(Table1(:,1)==1.3);
if exist('pDt')==0,pDt=np;end
if exist('Dib')==0,Dib=10;end
if exist('maxderg')==0,
    if NISolat>0, maxderg=100;LimitDrift=100;
    else maxderg=2;LimitDrift=4;end
end
Ht=max(Y); %Total Height
mbr=length(L); %Members
% [Mt,M]=masas2(Fm,NI,NJ,Y,L,np); % Report Mass Matrix M and Total Mass Mt
[Mt,M]=masas(Fm,NI,Y,L,np); % Report Mass Matrix M and Total Mass Mt
%.....

DeltaV=Mt*.05% horizontal load increase
Initialization2

%.....Start Pushover.....
while j>=0 %Start infinite loop, stop when the structure collapse
    j=j+1;
    [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Hinge,tetay,TableMfi]=...
        krigidez_ASCE41_2(ngl,Table1,Table2(:, :, j),Table3,Table4(:, :, j)...
            ,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pa,pqacum,...
            Q2cg,Hinge,tetay);%Matriz de Rigidez
    [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableFDelta,~,TableMt_Fd]=...
        krigidez_brace_eq2(K,K3,ngl,Table1,Table2(:, :, j),...
            Table3,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pa,L0,NJ,coseno0);
    [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableMfi,zetaj]=...
        =krigidez_damper3(K,K3,ngl,Table1,Table2(:, :, j),...
            Table3,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pa,L0,TableMfi,zetaj);
```

```

    if j==1;TableMfi0=TableMfi;TableFDelta0=TableFDelta;
    TableMt_Fd0=TableMt_Fd;iconi=icon;Table3i=Table3;
    end,if j==2;iconi=icon;Table3i=Table3;end
    detK=det(K);
    if (j>1 && det(K)<=1e-10 && det(K)>=-1e-10)%Stop loop singular matrix
        fprintf(...
            ' Singular Stiffness Matrix --> Collapse unstable structure\n');
    [Q,V,Q2]=cargas_po(Qa(:,j),ngl,Fm,L,seno,coseno,VC);
    break
    end
    if j==2
        Q2cg=Q2;Table2cg=Table2;
        Fm(1:size(Fm,1),2)=zeros(size(Fm,1),1);
    end
    %Generalized load and base shear vectors
    [Q,V,Q2]=cargas_po(Qa(:,j),ngl,Fm,L,seno,coseno,VC);
    q=K\Q; %Displacement in generalized vector coordinates
    Dt=q(pDt); %Roof displacement
    Vac(j+1)=Vac(j)+V;Dtac(j+1)=Dtac(j)+Dt; %Accumulated values
    %.....Capacity Spectrum.....
    [Sd(j+1),Sa(j+1),fil(:,j+1),Tl(j+1),gama1(j+1)]=espe_cap(K,...
        M,Mt,np,ngl,Dtac(j+1),Vac(j+1));
    TableMt_Fd(:,1)=TableMt_Fd(:,1)/Tl(end);
    %.....
    derg=Dtac(j+1)/Ht; %Total Global Drift
    if abs(derg)>=maxderg%Stop loop when total global drift beyond limit
    fprintf(' Colapso por Deriva global>=%4.2f \n',maxderg);
    break
    end
    [Drift]=deriva(Y0,qacum(1:np),np,CG,0);MaxDrift=max(Drift);
    if MaxDrift>=LimitDrift%Stop loop when total global drift beyond limit
    fprintf(' Colapso por Deriva de Piso>= %4.2f porciento\n'...
        ,LimitDrift);
    break
    end
    [FF,pq]=fuerzas_0(K3,VC,q,Q2,seno,coseno);% Element Forces and Moments
    qacum=qacum+q;
    % Element Forces and Moments with accumulated q
    [FFreal(:, :, j)]=fuerzas_0(K3,VC,qacum,Q2cg,seno,coseno);
    pqacum=pqacum+pq;
    Table2(:, :, j+1)=FF+Table2(:, :, j);

in1=find(VC(VC(:,3)==0,4)==0);VC1=VC;qn1=q;
    if isempty(in1)==0,VC1(in1,4)=ngl+1;qn1(ngl+1)=0;end
    if size(L,1)==1,Table40(:, :, j+1)=Table40(:, :, j)+[[-qn1(VC1(VC1(:,3)...
        ==0,4))./L(VC1(:,3)==0)'];(qn1(VC1(VC1(:,3)~=0,3)))]...
        ,qn1(VC1(:,6))];end
    if size(L,2)==1,Table40(:, :, j+1)=Table40(:, :, j)+[[-qn1(VC1(VC1(:,3)...
        ==0,4))./L(VC1(:,3)==0)'];(qn1(VC1(VC1(:,3)~=0,3)))]...
        ,qn1(VC1(:,6))];end
    Table4(:, :, j+1)=max(abs(Table40(:, :, j+1)),Table4(:, :, j));
    Pa=Table2(:,1,j+1);

% Iteration to find the Base Shear where the first element yield
Iteration_Vy2

    [Qa(:,j+1),X,Y,L,seno,coseno]=Efecto_PD2(gama1(j+1),M,fil(:,j+1)...
    ,DeltaV,q,X,Y,Y0,NI,NJ,CG,nr,j);%Static loads and deformed coordinates
    if cont1My==0 || cont1My>=3
        X1(j,:)=X;Y1(j,:)=Y;% For Video function
    Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,Dib)
    end
    % if mod(j,50)==0
    % Table2(1, :, j)
    % end
    j_DeltaV=[j_DeltaV;[j,Vac(j)]];

```

```

    if sum(Table1(:,1)==1.3)>0,mbr_isol=find(Table1(:,1)==1.3,1);...
        Disol(j+1)=Disol(j)+abs(q(VC(mbr_isol,4)));end
end
%For strong jumps in Dtacc
while max(Dtac(end,:))>maxderg*Ht || abs(Dtac(end))<abs(Dtac(end-1))
    derg
    j=j-1;
    Dtac=Dtac(1:j);
    %Vacc(j+1)=Vacc(j);Sac(j+1)=Sac(j);Sdc(j+1)=Sdc(j);
Sd=Sd(1:j);Sa=Sa(1:j);
Vac=Vac(1:j);Dtac=Dtac(1:j);
derg=Dtac(j)/Ht
end
Dibuj_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,max(1,Dib/10000)),pause(2)
%     Video

```

A2.1.2 Programa masas

```

function [Mt,M]=masas(Fm,NI,Y,L,np)
%
% Programa para encontrar la matriz de masas de un portico plano
%     Diciembre de 2014
%     David Mora
%-----
% [Mt,M]=masas(Fm,NI,Y,L,np)
%-----
%Datos:
%Fm Matriz que contiene el número del elemento y la carga repartida por
% piso
%NI Vector que contiene el número del nudo inicial de cada elemento
%L Vector de longitudes de cada elemento
%Y Vector que contiene cooredenada en Y de cada nudo
%np Número de pisos
%
%M=Matriz de masas
%Mt=Masa total

M=zeros(np);
[~,~,kk]=unique(Y(NI(Fm(:,1)))));
for mm=1:size(Fm,1)
    M(kk(mm),kk(mm))=M(kk(mm),kk(mm))+L(Fm(mm,1))*abs(Fm(mm,2));
end
for i=1:np
    M(i,i)=M(i,i)/9.81;
end
Mt=sum(sum(M));

```

A2.1.3 Programa Initialization2

```

%Initialization2
%Initialization of variables, matrices and vectors
if exist('nmodos')==0%if not number of modes are defined nmodos is np
nmodos=np;

```



```

else
    nmodos=min(nmodos,np);
end
if exist('zeta1')==0
    zeta1=0.05;
end
zeta=zeta1;
if nmodos>1
    %Damping factor by Naoki (2003)
    for zz=2:nmodos
        zeta(zz,1)=1.4*zeta(zz-1,1);
    end
end
zetai=zeta;zetaj=zeta;
zetai=zeta;zetaj=zeta;
derg=0;
Qa=zeros(np,1);
j=0;
cont1My=0;
Vac=0;
Dtac=0;
Table40=zeros(mbr,2);
Table4=zeros(mbr,2);%[M(a),M(b)]
Table5=Table4;
Hinge=zeros(mbr,5);
Pa=zeros(mbr,1);
pqacum=zeros(6,mbr);
Q2cg=zeros(mbr,6);
qacum=zeros(ngl,1);
j_DeltaV=[0,0];
Mreal=zeros(mbr,2);
tetay=ones(mbr,2)*Inf;
Sdy=[];
Vacy=[];
Dtacy=[];
FFy=[];
Table2=zeros(mbr,6);
Table20=zeros(mbr,6);
Table3=zeros(mbr,12);
icon=0;
iconu=0;iconc=0;
q=zeros(ngl,1);
Disol=0;

```

A2.1.4 Programa krigidez_ASCE41_2

```

function [SS,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Hinge,tetay,TableMfi]=...
    krigidez_ASCE41_2(ngl,Table1,Table2,Table3,Table4,L,seno,coseno,...
        VC,icon,iconu,iconc,jj,Pa,pq,Q2cg,Hinge,tetay)
% Program to calculate the siffness matrix of a Plane Frame with no
% symmetric elements
%                               Pushover
%                               Ing. David Mora
%                               April-2015
%-----
% [SS,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Hinge,tetay,TableMfi]...
%=krigidez_ASCE41_2(ngl,Table1,Table2,Table3,Table4,L,seno,...

```

```

%coseno,VC,icon,iconu,iconc,jj,Pa,pq,Q2cg,Hinge,tetay)
%-----
% ngl      Número de grados de libertad
% Table1= Matrix containing the type of section in the initial, medium and
%         final of each element.
%         Table1=[Section1 Section1 Section1]
% Table2 Six x mbr Matrix(mbr=number of elements).
%         [N V M N' V' M'
%          N V M N' V' M'
%          : : : : : :
%          N V M N' V' M'] -->(Axial Shear y Moment)
% Table3 12 x mbr Matrix(mbr=number of elements).
%         1 Column instant to My in initial node.
%         2 Column instant to My in final node.
%         3 Column instant to Mresidual in initial node.
%         4 Column instant to Mresidual in final node.
%         5 Column instant to Mu in initial node.
%         6 Column instant to Mu in final node.
%         7 Column damage sequence to My in initial node.
%         8 Column damage sequence to My in final node.
%         9 Column damage sequence to Mresidual in initial node.
%        10 Column damage sequence to Mresidual in final node.
%        11 Column damage sequence to Mu in initial node.
%        12 Column damage sequence to Mu in final node.
% Table4 Two x mbr Matrix(mbr=number of elements).
%         1 Column Ultimate rotation accumulated in initial node.
%         2 Column Ultimate rotation accumulated in final node.
% L      Vector contining lengths elements
% seno  Vector contining sine elements
% coseno Vector contining cosine elements
% VC    Elements Placement Vectors Matrix
% icon  My sequence counter
% iconu Mu sequence counter
% jj    Cycle Number
% Pa    Axial force accumulated Matrix in intial and final node of elements
% pq    Accumulated deformation in each dof by element.
% Q2cg  Matrix with fixed end actions, by element.
% Hinge Matrix containing:
%       [Plstic length Ni,Plastic length Nj,beta_a,beta_o,beta_b]
%       where beta are shear deformation coefficient, by element.
% tetay Plastic rotation reached in each node, by element.
% SS    Structure siffness matrix
%
mbr=length(L); SS=zeros(ngl);TableMfi=zeros(mbr,12);
K3=zeros(6,6,mbr);
ST1=size(Table1,2)/3;
for i=1:mbr
if Table1(i,1)~=1.1 && Table1(i,1)~=1.2 && Table1(i,1)~=1.3
tetayi=tetay(i,1);tetayj=tetay(i,2);
lon=L(i);sen=seno(i);cosen=coseno(i);
tetai=abs(Table4(i,1));tetaj=abs((Table4(i,2)));
Mi=-Table2(i,3);Mj=Table2(i,6);
Vi=abs(Table2(i,2));Vj=abs(Table2(i,5));
if (sen>=-.707106 && sen<=.707106)
[ai,bi,ci,tetayi,EAA,EIya,Myi,pa]=Momento_Rotacion_ASCE41B(...
Table1(i,1:ST1),lon,Mi,tetai,tetayi,Vi);
[~,~,~,~,EAo,EIyo,~]=Momento_Rotacion_ASCE41B(...
Table1(i,ST1+1:ST1*2),lon,0,0,0,0);
[aj,bj,cj,tetayj,EAb,EIyb,Myj,pb]=Momento_Rotacion_ASCE41B(...
Table1(i,ST1*2+1:ST1*3),lon,Mj,tetaj,tetayj,Vj);
else
[ai,bi,ci,tetayi,EAA,EIya,Myi,pa]=Momento_Rotacion_ASCE41C(...
Table1(i,1:ST1),lon,Mi,Pa(i),tetai,tetayi,Vi);
[~,~,~,~,EAo,EIyo,~]=Momento_Rotacion_ASCE41C(...
Table1(i,ST1+1:ST1*2),lon,0,Pa(i),0,0,0);
[aj,bj,cj,tetayj,EAb,EIyb,Myj,pb]=Momento_Rotacion_ASCE41C(...
Table1(i,ST1*2+1:ST1*3),lon,Mj,Pa(i),tetaj,tetayj,Vj);

```

```

end

%-----
%i linear y j linear
    EIA=EIYa;EIO=EIYo;EIB=EIYb;
%-----
Mreal=[Mi,Mj];
    [Lpa,Lpb,beta_a,beta_o,beta_b]=PlasticHinge(...
Table1(i,:),lon,Mreal,EIA,EIO,EIB,Myi,Myj);
Lo=lon-Lpa-Lpb;
Mui=(ai/Lpa)*EIYa*pa+Myi;
Muj=(aj/Lpb)*EIYb*pb+Myj;
%i nonlinear
tetay(i,:)=[tetayi,tetayj];
    if tetai>=tetayi
        EIA=pa*EIYa;
        if Table3(i,1)==0
            icon=icon+1;
            Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=jj;
        end
    end
%-----
%j nonlinear
    if tetaj>=tetayj
        EIB=pb*EIYb;
        if Table3(i,2)==0
            icon=icon+1;
            Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=jj;
        end
    end

%-----
%+++++
if (Table3(i,5)~=0 || Table3(i,6)~=0) || (tetai>tetayi+bi ||...
    tetaj>tetayj+bj)
    if tetai>tetayi+bi || Table3(i,5)~=0
        if Table3(i,5)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,11)=iconu;Table3(i,5)=jj;end
        T12=[0 1/lon 0 0 -1/lon 1; %Transformation Matrix from 1 to 2
            -1 0 0 1 0 0];
        K1=[(6*EIB*EIO)/(lon*(EIB+EIO)) 0
            0 (EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo+EAa*EAo*Lpb+EAb*EAo*Lpa)];
    end
    if tetaj>tetayj+bj || Table3(i,6)~=0
        if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,12)=iconu;Table3(i,6)=jj;end
        T12=[0 1/lon 1 0 -1/lon 0; %Transformation Matrix from 1 to 2
            -1 0 0 1 0 0];
        K1=[(6*EIA*EIO)/(lon*(EIA+EIO)) 0
            0 (EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo+EAa*EAo*Lpb+EAb*EAo*Lpa)];
    end
    if tetai>tetayi+bi && tetaj>tetayj+bj
        K1=(EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo+EAa*EAo*Lpb+EAb*EAo*Lpa);%Stiffness Matrix
        T12=[-1 0 0 1 0 0]; %Transformation Matrix from 1 to 2 system
    end
else
    T12=[0 1/lon 1 0 -1/lon 0; %Transformation Matrix from 1 to 2
        0 1/lon 0 0 -1/lon 1; % System 2 are local coordinates
        -1 0 0 1 0 0];
%Giberson
% K1= [(6*EIA*(EIB + EIO))/(lon*(EIA + EIB + EIO)),...
%      (6*EIA*EIB)/(lon*(EIA + EIB + EIO)), 0
%      (6*EIA*EIB)/(lon*(EIA + EIB + EIO)),...
%      (6*EIB*(EIA + EIO))/(lon*(EIA + EIB + EIO)),0
%      0, EA/lon];
[K1]=K1_eqcortee4(EIA,EIYa,EIO,EIYb,EIB,EAa,EAa,EAo,EAb,EAb,Lpa...
,max(lon/3-Lpa,0),lon/3+min(lon/3-Lpa,0)+min(0,lon/3-Lpb),...
max(0,lon/3-Lpb),Lpb,beta_a);

```

```

% [K1]=K1_escalonado(EIa, (EIa*max(lon/3-Lpa,0)+EIo*(lon/3+min(...
%   lon/3-Lpa,0)+min(0,lon/3-Lpb))+EIb*max(0,lon/3-Lpb))/lon,EIb,...
%   EAa,EAo,EAb,Lpa,Lo,Lpb,4);
end
%+++++
%////////////////////////////////////
if (tetai>tetayi+ai && tetai<=tetayi+bi || (tetaj>tetayj+aj && ...
tetaj<=tetayj+bj) || Table3(i,3)~=0 || Table3(i,4)~=0
%i rótula pl
    if tetai>tetayi+ai && tetai<=tetayi+bi || (Table3(i,3)~=0 &&...
        Table3(i,5)==0)

K1(1,1)=- (Q2cg(i,3)*lon-(-sign(Mi))*ci*Myi*lon)/(cosen*pq(2,i)...
-cosen*pq(5,i)+lon*pq(3,i)-pq(1,i)*sen+pq(4,i)*sen);
K1(1,2)=0;K1(2,1)=0;
    if length(K1)==3
        K1(2,2)=(6*EIb*EIo)/(lon*(EIb+EIo))*...
            (1/2*(2+beta_o)/(1+2*beta_o));
    end
    if Table3(i,3)==0
        iconc=iconc+1;
        Table3(i,9)=iconc+1;Table3(i,3)=jj;
    end
end
%////////////////////////////////////
%j rótula pl
    if tetaj>tetayj+aj && tetaj<=tetayj+bj || (Table3(i,4)~=0 ...
&& Table3(i,6)==0) || (Table3(i,4)~=0 && Table3(i,6)==0)
        K1cMy=- (Q2cg(i,6)*lon-(sign(Mj))*cj*Myj*lon)/(cosen*pq(2,i)...
-cosen*pq(5,i)+lon*pq(6,i)-pq(1,i)*sen+pq(4,i)*sen);
        K1(1,2)=0;K1(2,1)=0;
        if length(K1)==3
K1(1,1)=(6*EIa*EIo)/(lon*(EIa+EIo))*(1/2*...
            (2+beta_o)/(1+2*beta_o));
K1(2,2)=K1cMy;
        else
            K1(1,1)=K1cMy;
        end
        if Table3(i,4)==0
            iconc=iconc+1;
            Table3(i,10)=iconc+1;Table3(i,4)=jj;
        end
end
end
%////////////////////////////////////
%*****
K2=T12'*K1*T12; % Stiffness matrix on local coordinates
T23= [cosen sen 0 0 0 0
      -sen cosen 0 0 0 0
        0 0 1 0 0 0
        0 0 0 cosen sen 0
        0 0 0 -sen cosen 0
        0 0 0 0 0 1];
K3(:, :, i)=T23'*K2*T23;
for j=1:6
    J=VC(i, j);
    if J==0
        continue
    end
    for m=1:6
        mm=VC(i, m);
        if mm==0
            continue
        end
        SS(J, mm)=SS(J, mm)+K3(j, m, i);
    end
end
end

```

```

%      if i==2 && icon>1
%          Lpa,Lpb
%      end
fiyi=Myi/EIya;fiyj=Myj/EIyb;fiui=(Mui-Myi)/pa/EIya+fiyi;
fiuj=(Muj-Myj)/pb/EIyb+fiyj;
if jj==1
fiui=min(10*fiyi,(Mui-Myi)/pa/EIya+fiyi);
fiuj=min(10*fiyi,(Muj-Myj)/pb/EIyb+fiyj);
Mui=min(Mui,(fiui-fiyi)*pa*EIya+Myi);Muj=min(Muj,(fiuj-fiyj)*pb*EIyb+Myj);
end
TableMfi(i,:)=[0,fiyi,fiui,0,Myi,Mui,0,fiyj,fiuj,0,Myj,Muj];
end

end
%---end---

```

A2.1.5 Programa Momento_Rotacion_ASCE41B

```

function [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp,p]=...
Momento_Rotacion_ASCE41B(Section,L,M,teta,tetay,V)
a=0;b=0;c=0;EA=0;EIy=0;Mp=0;p=0;
Mat=Section(1);%Material: 1: Acero
%          2: Hormigón Armado
if Mat==1
    if M<0 % bottom flange in compression
        bs=Section(8);bi=Section(9);tfs=Section(10);tfi=Section(11);
        %[Material,fy, fu,Ey, Tipo,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
        Section(8:11)=[bi,bs,tfi,tfs];
    end
    [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=...
Momento_Rotacion_AceroASCE41B(Section,L,M,teta,tetay);
p=0.03;
elseif Mat==2
    if M<0

bw=Section(8);dp=Section(10);As_sup=Section(11);As_inf=Section(12);
    As=As_sup;Asp=As_inf;% As = Trac Steel; Asp = Compr Steel;
    %[Material,f'c,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,d',As_sup,
    %          As_inf,Stirrup
separation,Av,As1,As2...]
    Section(7:12)=[bw,bw,0,dp,Asp,As];
    else
        As_sup=Section(11);As_inf=Section(12);%As=Trac Steel;Asp=Com
Steel;
        As=As_inf;Asp=As_sup;Section(11:12)=[As,Asp];
    end
    [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=...
        Momento_Rotacion_ConcrASCE41B(Section,M,teta,tetay,V);
    p=0.05;
end
end

```

A2.1.6 Programa Momento_Rotacion_AceroASCE41B

```
function [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=...
Momento_Rotacion_AceroASCE41B(Section,L,M,teta,tetay)
%Program to calculate ASCE 41 parameters of a steel section
%with negligible compression
%
%          David Mora
%-----
% [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=Momento_Rotacion_AceroASCE41B(Section,L,M,teta,tetay)
%-----
%NOTE:    Consistent Units.
%Section: [Material,fy,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
%
%M:        Applied Moment
%EI:       Flexural Stiffness
%EA:       Axial Stiffness
%tetay:    Plastic rotation reached in each node, by element.
fy=Section(2);
[EIy,EA,~,~,Z,~,~,~,tw]=Geom(Section);
bfs=Section(8)-tw;tfs=Section(10);d=Section(6)-tfs*2;
Mp=fy*Z;%Plastic Moment
if abs(M)>=Mp && tetay==Inf
tetay=teta;
% tetay=Mp*L/6/EIy;
% Mp*L/6/EIy,Mp*L/3/EIy,
end
Fye=fy*.0014223316;%t-m a Ksi
if bfs/2/tfs<=52/sqrt(Fye) && d/tw<=418/sqrt(Fye)
a=9*tetay;b=11*tetay;c=0.6;
elseif bfs/2/tfs>=65/sqrt(Fye) || d/tw>=640/sqrt(Fye)
a=4*tetay;b=6*tetay;c=0.2;
else
a1=(9-(9-4)/((65-52)/sqrt(Fye)))/(bfs/2/tfs)*tetay;
b1=(11-(11-6)/((65-52)/sqrt(Fye)))/(bfs/2/tfs)*tetay;
a2=(9-(9-4)/((640-418)/sqrt(Fye)))/(d/tw)*tetay;
b2=(11-(11-6)/((640-418)/sqrt(Fye)))/(d/tw)*tetay;
a=min(a1,a2);b=min(b1,b2);
c=0.2;
end
end
```

A2.1.7 Programa Momento_Rotation_ConcrASCE41B

```
function [a,b,c,tetay,EA,EIy,My]=...
Momento_Rotation_ConcrASCE41B(Section,M,teta,tetay,V)
%Program to calculate ASCE 41 parameters of a concrete section
%with negligible compression
%
%          David Mora
%-----
% [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mn]=Momento_Rotation_ConcrASCE41B(Section,M,teta,tetay,V)
%-----
%NOTE:    This program use T-m units.
%Section: [Material,f'c,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,d',As_sup,As_inf,...
%
%          Stirrup separation,Av,As1,As2...]
%
%M:        Applied Moment
%EI:       Flexural Stiffness
%EA:       Axial Stiffness
%tetay:    Plastic rotation reached in each node, by element.

fcp=Section(2);fy=Section(4);h=Section(6);
```

```

bw=Section(8);dp=Section(10);
As=Section(11);Asp=Section(12);s=Section(13);Av=Section(14);
[EIy,EA,~,~,~,Ag]=Geom(Section);
%-----
%                               ASCE41 Model
%-----
%-----For t-m:
if fcp<=2800
    beta1=0.85;
else
    beta1=min(max(1.05-fcp/14000,0.65),.85);
end
%-----
ro=As/Ag;
ro_p=Asp/Ag;
ro_b=0.85*fcp/fy*6120/(6120+fy)*beta1;
d=h-dp;
pa1=(ro-ro_p)/ro_b;
pa2=abs(V/bw/d/sqrt(fcp)*1.1926);%t-m a p-in

Vs=Av*fy*d/s;
if s<=d/3 && Vs>=3/4*V,C=1;else C=0;end

if C==1
    if pa2<=3
        a1=0.025;b1=0.05;c1=0.2;
    elseif pa2>=6
        a1=0.02;b1=0.04;c1=0.2;
    else
        a1=0.025+(.02-.025)/(6-3)*(pa2-3);b1=0.05+...
            (.04-.05)/(6-3)*(pa2-3);c1=0.2;
    end
elseif C==0
    if pa2<=3
        a1=0.02;b1=0.03;c1=0.2;
    elseif pa2>=6
        a1=0.01;b1=0.015;c1=0.2;
    else
        a1=0.02+(.01-.02)/(6-3)*(pa2-3);b1=0.015+(.015-.03)/...
            (6-3)*(pa2-3);c1=0.2;
    end
end
if C==1
    if pa2<=3
        a2=0.02;b2=0.03;c2=0.2;
    elseif pa2>=6
        a2=0.015;b2=0.02;c2=0.2;
    else
        a2=0.02+(.015-.02)/(6-3)*(pa2-3);b2=0.03+(.02-.03)/...
            (6-3)*(pa2-3);c2=0.2;
    end
elseif C==0
    if pa2<=3
        a2=0.01;b2=0.015;c2=0.2;
    elseif pa2>=6
        a2=0.005;b2=0.01;c2=0.2;
    else
        a2=0.01+(.005-.01)/(6-3)*(pa2-3);b2=0.01+(.01-.015)/...
            (6-3)*(pa2-3);c2=0.2;
    end
end

if pa1<=0
    a=a1;b=b1;c=c1;
elseif pa1>=0.5
    a=a2;b=b2;c=c2;

```

```

else
    a=a1+(a2-a1)/(0.5-0)*(pa1-0);b=b1+(b2-b1)/(0.5-0)*(pa1-0);c=c1;
end

% cc=min(h,(-(61000*Asp-As*fy)/(0.85*fcp*beta1*bw))+sqrt(((61000*Asp...
% -As*fy)/(0.85*fcp*beta1*bw))^2+4*((61000*Asp*dp)/(0.85*fcp*beta1*bw))))/2);
% fs=min(fy,61000*(1-dp/cc));
% Mn=0.85*fcp*beta1*cc*bw*(d-beta1*cc/2)+Asp*fs*(d-dp);

%Park and Ang
Pa=0;As_total=As;Asp_total=Asp;
epsilon_o=.0021;epsilon_y=.002;epsilon_u=0.004;
ro_t=As_total*fy/bw/d/fcp;ro_tp=Asp_total*fy/bw/d/fcp;
beta_c=dp/d;alfa_y=epsilon_y/epsilon_o;eta_o=Pa/bw/d/fcp;

k=sqrt((ro_t+ro_tp)^2*1/4/alfa_y^2+(ro_t+beta_c*ro_tp)*1/alfa_y)...
    -(ro_t+ro_tp)*1/2/alfa_y;
C2=1+(.45/(.84+ro_t));
fi_y=(1.05+(C2-1.05)*eta_o/.03)*epsilon_y/(1-k)/d;

epsilon_c=min(fi_y*d-epsilon_y,epsilon_u);
eta=.75/(1+alfa_y)*(epsilon_c/epsilon_o)^.7;
alfa_c=min((1-beta_c)*epsilon_c/epsilon_y-beta_c,1);
My=.5*fcp*bw*d^2*((1+beta_c-eta)*eta_o+(2-eta)*ro_t+...
    (eta-2*beta_c)*alfa_c*ro_tp);

if abs(M)>My && tetay==Inf
tetay=teta;
end

```

A2.1.8 Programa Momento_Rotacion_ASCE41C

```

function [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp,p]=...
Momento_Rotacion_ASCE41C(Section,L,M,Pa,teta,tetay,V)
a=0;b=0;c=0;EA=0;EIy=0;Mp=0;p=0;
Mat=Section(1);%Material: 1: Acero
    %           2: Hormigón Armado
if Mat==1
    if M<0 % bottom flange in compression
        bs=Section(8);bi=Section(9);tfs=Section(10);tfs=Section(11);
        % [Material, fy ,fu,Ey ,Tipo,d,tw,bs,bi,tfs,tfs]
        Section(8:11)=[bi,bs,tfs,tfs];
    end
    [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=...
Momento_Rotacion_AceroASCE41C(Section,L,M,Pa,teta,tetay);
p=0.03;
elseif Mat==2
    if M<0
        h=Section(6);b=Section(7);bw=Section(8);tf=Section(9);
        dp=Section(10);As_sup=Section(11);As_inf=Section(12);
        As=As_sup;Asp=As_inf;% As = Trac Steel; Asp = Compr Steel;
        Section(7:12)=[bw,b,h-tf,dp,As,Asp];
        if length(Section)>15
            Section(16:end)=Section(end:-1:16);
        end
    end
else
    As_sup=Section(11);As_inf=Section(12);%As=TracSteel;Asp=ComprSteel;
    As=As_inf;Asp=As_sup;Section(11:12)=[As,Asp];
end
[a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=...
Momento_Rotacion_ConcrASCE41C(Section,M,teta,tetay,V,Pa);

```



```

    p=0.05;
end

```

A2.1.9 Programa Momento_Rotacion_AceroASCE41C

```

function [a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=...
Momento_Rotacion_AceroASCE41C(Section,L,M,Pa,teta,tetay)
%Program to calculate ASCE 41 parameters of a steel section
%with flexural compression
%
%          David Mora
%-----
[a,b,c,tetay,EA,EIy,Mp]=Momento_Rotacion_AceroASCE41C(Section,L,M,Pa,teta,tetay)
%-----
%NOTE:    Consistent Units.
%Section: [Material,fy,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
%
%M:        Applied Moment
%EI:       Flexural Stiffness
%EA:       Axial Stiffness
%tetay:    Plastic rotation reached in each node, by element.
%tetay:    Plastic rotation reached in each node, by element.
Pa=abs(Pa);%Pa=-Pa;%Compression is positive
fy=Section(2);
[EIy,EA,~,~,Z,A,I,~,~,tw]=Geom(Section);
bfs=Section(8)-tw;tfs=Section(10);d=Section(6)-2*tfs;
Mpi=fy*Z;Pye=A*fy;
Mp=Mpi*(1-Pa/Pye);%Plastic Moment
r=sqrt(I/A);
if abs(M)>=Mp && tetay==Inf
tetay=teta;
% tetay=Mp*L/6/EIy;
% Mp*L/6/EIy,Mp*L/3/EIy,
end
if L/r<=108
Fcr=12*703.069;
else
Fcr=1.4e5/(L/r)^2*703.069;
end
Fye=fy*.0014223316;%t-m a ksi
Pcl=A*Fcr;
if Pa/Pcl<.2
if bfs/2/tfs<=52/sqrt(Fye) && d/tww<=300/sqrt(Fye)
a=9*tetay;b=11*tetay;c=0.6;
elseif bfs/2/tfs>=65/sqrt(Fye) || d/tww>=460/sqrt(Fye)
a=4*tetay;b=6*tetay;c=0.2;
else
a1=(9-(9-4)/((65-52)/sqrt(Fye)))/(bfs/2/tfs)*tetay;
b1=(11-(11-6)/((65-52)/sqrt(Fye)))/(bfs/2/tfs)*tetay;
a2=(9-(9-4)/((460-300)/sqrt(Fye)))/(d/tww)*tetay;
b2=(11-(11-6)/((460-300)/sqrt(Fye)))/(d/tww)*tetay;
a=min(a1,a2);b=min(b1,b2);
c=0.2;
end
end
%-----
%
if Pa/Pcl>=.2 %&& Pa/Pcl<=.5
tetapl3=max(0,11*(1-5/3*Pa/Pcl))*tetay;
tetapl4=max(0,17*(1-5/3*Pa/Pcl))*tetay;
if bfs/2/tfs<=52/sqrt(Fye) && d/tww<=260/sqrt(Fye)
a=tetapl3;b=tetapl4;c=0.2;
elseif bfs/2/tfs>=65/sqrt(Fye) || d/tww>=400/sqrt(Fye)

```

```

a=1*tetay;b=1.5*tetay;c=0.2;
else
    a1=(tetapl3-(tetapl3-1)/((65-52)/sqrt(Fye))/(bfs/2/tfs))*tetay;
    b1=(tetapl4-(tetapl4-1.5)/((65-52)/sqrt(Fye))/(bfs/2/tfs))*tetay;
    a2=(tetapl3-(tetapl3-1)/((400-260)/sqrt(Fye))/(d/tww))*tetay;
    b2=(tetapl4-(tetapl4-1.5)/((400-260)/sqrt(Fye))/(d/tww))*tetay;
    a=min(a1,a2);b=min(b1,b2);
    c=0.2;
end
end

if Pa/Pcl>.5
%fprintf('el elemento es gobernado por fuerza axial:elemento= %10.0f\n',mbr);
%    a=1*tetay;b=1.5*tetay;c=0.2;
end
end

```

A2.1.10 Programa Momento_Rotation_ConcrASCE41C

```

function [a,b,c,tetay,EA,EIy,My]...
    =Momento_Rotation_ConcrASCE41C(Section,M,teta,tetay,V,Pa)
%Program to calculate ASCE 41 parameters of a concrete section
%with flexural compression
%
%          David Mora
%-----
%[a,b,c,tetay,EA,EIy,Mn]=Momento_Rotation_ConcrASCE41C(Section,M,teta,tet
ay,V,Pa)
%-----
%NOTE:    This program use T-m units.
%Section: [Material,f'c,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,d',As,As',...
%          Stirrup separation,Av,As1,As2...]
%
%M:        Applied Moment
%EI:       Flexural Stiffness
%EA:       Axial Stiffness
%tetay:    Plastic rotation reached in each node, by element.

fcp=Section(2);fy=Section(4);h=Section(6);bw=Section(8);dp=Section(10);
As=Section(11);Asp=Section(12);s=Section(13);Av=Section(14);
[EIy,EA,~,~,~,Ag]=Geom(Section);
%-----
%          ASCE41 Model
%-----
%-----For t-m:
Pa=-Pa;%Compression is positive
if fcp<=2800
    betal=0.85;
else
    betal=min(max(1.05-fcp/14000,0.65),.85);
end
%-----
d=h-dp;
pa1=Pa/Ag/fcp;
pa2=V/bw/d/sqrt(fcp)*1.1926;

Vs=Av*fy*d/s;
if s<=d/3 && Vs>=3/4*V,C=1;else C=0;end

```

```

if C==1
    if pa2<=3
        a1=0.02;b1=0.03;c1=0.2;
    elseif pa2>=6
        a1=0.016;b1=0.024;c1=0.2;
    else
        a1=0.02+(.016-.02)/(6-3)*(pa2-3);b1=0.03+(.024-.03)/...
        (6-3)*(pa2-3);c1=0.2;
    end
elseif C==0
    if pa2<=3
        a1=0.006;b1=0.015;c1=0.15;
    elseif pa2>=6
        a1=0.005;b1=0.012;c1=0.2;
    else
        a1=0.006+(.005-.006)/(6-3)*(pa2-3);b1=0.015+(.012-.015)/...
        (6-3)*(pa2-3);c1=0.2;
    end
end

if C==1
    if pa2<=3
        a2=0.015;b2=0.025;c2=0.2;
    elseif pa2>=6
        a2=0.012;b2=0.02;c2=0.2;
    else
        a2=0.015+(.012-.015)/(6-3)*(pa2-3);b2=0.25+(.02-.025)/...
        (6-3)*(pa2-3);c2=0.2;
    end
elseif C==0
    if pa2<=3
        a2=0.003;b2=0.01;c2=0.2;
    elseif pa2>=6
        a2=0.002;b2=0.008;c2=0.2;
    else
        a2=0.003+(.002-.003)/(6-3)*(pa2-3);b2=0.01+(.008-.01)/...
        (6-3)*(pa2-3);c2=0.2;
    end
end

if pa1<=0.1
    a=a1;b=b1;c=c1;
elseif pa1>=0.4
    a=a2;b=b2;c=c2;
else
    a=a1+(a2-a1)/(0.5-0)*(pa1-0);b=b1+(b2-b1)/(0.5-0)*(pa1-0);c=c1;
end
% %
% %Mn calculation for no circular sections_____
limi=14;
Cero=find(Section(limi+1:end)==0,1,'first')+limi-1;if
isempty(Cero)==0,...
    Section=Section(1:Cero);else Cero=length(Section);end
Asc=zeros(Cero-limi+2,1);
dc=Asc;fs=Asc;
dc(1)=dp;dc(end)=d;
Asc(1)=As;Asc(length(dc))=Asp;
    if Cero>limi
        for kk=2:length(dc)-1
            Asc(kk)=Section(kk+limi-1);

```

```

        dc(kk)=dc(kk-1)+(d-dp)/(size(Section,2)-limi+1);
    end
end
% n_points_cur_interaction=10;
% PPn=zeros(length(dc)+1,n_points_cur_interaction);
% PPn(2:size(PPn,1),1)=-Asc*fy;
% Pn=zeros(n_points_cur_interaction+1,1);Pn(1)=sum(PPn(:,1));
% for kk=2:n_points_cur_interaction+1
%     cc=h/betal/n_points_cur_interaction*(kk-1);
%     for jj=1:length(dc)
%         fs(jj)=min(fy,abs(61000*(1-dc(jj)/cc)));
%     end
%     PPn(1,kk)=0.85*fcp*betal*cc*bw;
%     Pn(kk)=PPn(1,kk);
%     for ii=1:length(dc)
%         PPn(ii+1,kk)=(cc-dc(ii))/abs(cc-dc(ii))*Asc(ii)*fs(ii);
%         Pn(kk)=Pn(kk)+PPn(ii+1,kk);
%     end
% end
% for ll=1:n_points_cur_interaction-1
%     if Pa>=Pn(ll) && Pa<Pn(ll+1)
%         cc1=h/betal/n_points_cur_interaction*(ll-1);
%         cc2=h/betal/n_points_cur_interaction*(ll);
%         Mn1=max(0,PPn(1,ll)*(h/2-betal*cc1/2));
%         Mn2=max(0,PPn(1,ll+1)*(h/2-betal*cc2/2));
%         for mm=1:length(dc)
%             Mn1=Mn1+PPn(mm,ll)*(h/2-dc(mm));
%             Mn2=Mn2+PPn(mm,ll+1)*(h/2-dc(mm));
%         end
%         Mn=Mn1+(Mn2-Mn1)/(Pn(ll+1)-Pn(ll))*(Pa-Pn(ll));
%     break
%     end
% end

%Park and Ang
As_total=0;Asp_total=0;
for qq=1:length(dc)
    if dc(qq)>=h/2,As_total=Asc(qq)+As_total;
    elseif dc(qq)<h/2,Asp_total=Asc(qq)+Asp_total;
end
end
Pa=0;
epsilon_o=.0021;epsilon_y=.002;epsilon_u=0.004;
ro_t=As_total*fy/bw/d/fcp;ro_tp=Asp_total*fy/bw/d/fcp;
beta_c=dp/d;alfa_y=epsilon_y/epsilon_o;eta_o=Pa/bw/d/fcp;

k=sqrt((ro_t+ro_tp)^2*1/4/alfa_y^2+(ro_t+beta_c*ro_tp)*1/alfa_y)...
    -(ro_t+ro_tp)*1/2/alfa_y;
C2=1+(.45/(.84+ro_t));
fi_y=(1.05+(C2-1.05)*eta_o/.03)*epsilon_y/(1-k)/d;

epsilon_c=min(fi_y*d-epsilon_y,epsilon_u);
eta=.75/(1+alfa_y)*(epsilon_c/epsilon_o)^.7;
alfa_c=min((1-beta_c)*epsilon_c/epsilon_y-beta_c,1);
My=.5*fcp*bw*d^2*((1+beta_c-eta)*eta_o+(2-eta)*ro_t+...
    (eta-2*beta_c)*alfa_c*ro_tp);

if abs(M)>abs(My) && tetay==Inf

```

```
tetay=teta;
end
```

A2.1.11 Programa Geom

```
function [EIy,EA,G,A_f,Z,A,I,S,alfa,tww]=Geom(Section)
%Section=[Material,...,...]
%Material:      1: Steel
%              2: Reinforced Concrete
%
%
%Steel Section: [Material,fy ,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
%              Type=1 is a I section.
%              2 is a H section.
%              3 is a rectangular tube section.
%Concrete Section: [Material,f'c,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,d',As,As',...
%                  Stirrup separation,Av,As1,As2...]
%              As1,As2... is to steel in the middle of the section, to
%              columns.
%              Type=1 is a T or L or Rectangular Section.

Mat=Section(1);
if Mat>=1 || Mat<2
    Tipo=Section(5);
%Section type
if Tipo==1 || Tipo==2 || Tipo==3
Ey=Section(4);
d=Section(6);tw=Section(7);bs=Section(8);
bi=Section(9);tfs=Section(10);tfi=Section(11);
if Tipo==1 || Tipo==3
    tww=tw;
elseif Tipo==2
    tww=2*tw;
end
A=d*tww+(bs-tww)*tfs+(bi-tww)*tfi;
if Tipo==1 || Tipo==3
    yi=(bs-tww)*tfs*(d-tfs/2)+d^2*tww/2+(bi-tww)*tfi^2/2)/A;
    ys=d-yi;
    Zi=(bi-tww)*tfi*(yi-tfi/2)+yi^2*tww/2;
    Zs=(bs-tww)*tfs*(ys-tfs/2)+ys^2*tww/2;
    Z=Zi+Zs;%Modulo plástico
    I=(bi-tww)*tfi^3/12+(bi-tww)*tfi*(yi-tfi/2)^2+(bs-tww)*...
        tfs^3/12+(bs-tww)*tfs*(ys-tfs/2)^2+d^3*tww/12+d*tww*(d/2-yi)^2;
elseif Tipo==2
    I=bs^3*tfs/12+bi^3*tfi/12+(d-tfi-tfs)*tw^3/12;
    Z=2/8*(bi^2*tfi+bs^2*tfs+(d-tfi-tfs)*tw^2);ys=max(bs,bi)/2;yi=ys;
end
Af=(bs*tfs+bi*tfi)/2;Aw=d*tww;alfa=Aw/Af;
f=A/d/tww;
miu=.2;
S=I/max(ys,yi);
%xp=3/2*(4*b*tf+d*tww)/(6*b*tf+d*tww);
EA=Ey*A;EIy=Ey*I;G=Ey/(2*(1+miu));A_f=A/f;
end

%ADAS TADAS
if Tipo==4 || Tipo==5
    b=Section(8);      %Ancho
    t=Section(7);     %Espesor de la placa
    n=Section(10);    %Numero de placas
```

```

Ey=Section(4);%Modulo de elasticidad del acero

Z=b*n*(t)^2/4;I=b*(t)^3/12;A=b*(n*t);
f=1.2;alfa=0;tww=b;S=n*I/(t/2);miu=.2;
EA=Ey*A;EIy=Ey*I;G=Ey/(2*(1+miu));A_f=A/f;
end
if Tipo==6.2
    [EIy,EA,G,A_f,Z,A,I,S,alfa,ttw]=Geom_SL(Section);
end

end

if Mat==2
%Concrete Section: [Material (2),f'c,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,d',...
%
%
%As_sup,As_inf,Stirrup separation,Av,Asl,As2...]
%As_inf is in tension:
fcp=Section(2);Ey=Section(3);fy=Section(4);Tipo=Section(5);h=Section(6);
bb=Section(7);bw=Section(8);tf=Section(9);
dp=Section(10);As=Section(11);Asp=Section(12);
d=h-dp;A=bw*h+(bb-bw)*tf;ttw=bw;
if bw==bb
    f=1.2;alfa=0;
else
    f=A/((h-tf)*bw);alfa=bw*h/((bb)*tf);
end
%-----For t-m:
if fcp<=2800
    betal=0.85;
else
    betal=min(max(1.05-fcp/14000,0.65),.85);
end
Pa=0;
limi=14;
Cero=find(Section(limi+1:end)==0,1,'first')+limi-1;
if isempty(Cero)==0,Section=Section(1:Cero);else Cero=length(Section);end
Asc=zeros(Cero-limi+2,1);
dc=Asc;fs=Asc;
dc(1)=dp;dc(end)=d;
Asc(1)=As;Asc(length(dc))=Asp;
if Cero>limi
    for kk=2:length(dc)-1
        Asc(kk)=Section(kk+limi-1);
        dc(kk)=dc(kk-1)+(d-dp)/(size(Section,2)-limi+1);
    end
end
%Park and Ang
epsilon_o=.0021;epsilon_y=.002;
ro_tp=As*fy/bw/d/fcp;ro_tp=Asp*fy/bw/d/fcp;
beta_c=dp/d;alfa_y=epsilon_y/epsilon_o;eta_o=Pa/bw/d/fcp;
k=sqrt((ro_tp+ro_tp)^2*1/4/alfa_y^2+(ro_tp+beta_c*ro_tp)*...
1/alfa_y)-(ro_tp+ro_tp)*1/2/alfa_y;
C2=1+(.45/(.84+ro_tp));
fi_y=(1.05+(C2-1.05)*eta_o/.03)*epsilon_y/(1-k)/d;
epsilon_c=fi_y*d-epsilon_y;
eta=.75/(1+alfa_y)*(epsilon_c/epsilon_o)^.7;
alfa_c=min((1-beta_c)*epsilon_c/epsilon_y-beta_c,1);
My=.5*fcp*bw*d^2*(1+beta_c-eta)*eta_o+(2-eta)*ro_tp+(eta-2*beta_c)...
*alfa_c*ro_tp);

Z=My/fcp;S=Z;
% miu=.2;
% ymi=(bb*tf*(tf/2+h-tf)+bw*(h-tf)^2/2+As*dp+Asp*d)/(A+As+Asp);
% I=bb*h^3/3-(bb-bw)*(h-tf)^3/3-A*ymi^2+As*(d-ymi)^2+Asp*(d-ymi)^2;

```

```
%S=I/max(h-ymi,ymi);
EA=Ey*A;EIy=Ey*I;G=Ey/(2*(1+miu));Af=A/f;
End
```

A2.1.12 Programa PlasticHinge

```
function [Lpa,Lpb,beta_a,beta_o,beta_b]=...
PlasticHinge(Section,L,Mreal,EIa,EIo,EIb,Mpi,Mpj)
%Program to calculate Plastic Hinge Lengths.
%      David Mora
%-----
% [Lpa,Lpb,beta_a,beta_o,beta_b]=...
%      PlasticHinge(Section,L,Mreal,EIa,EIo,EIb,Mpi,Mpj)
%-----
%NOTE: Consistent Units.
%Mreal: Applied Moment.
%Mpi,Mpj Resistant Moment.
%Lpa,Lpb: Plastic Hinge Lengths.
%beta: Shear deformation coefficient.

[~,~,G,A_f,]=Geom(Section);
if abs(Mreal(1))>abs(Mpi)
Lpa=max(min(abs((abs(Mreal(1))-abs(Mpi))/(Mreal(1)-Mreal(2)))*L,L),0);
% beta_a=6*EIa/(A/f*G*Lpa^2)
else Lpa=0;
end
if abs(Mreal(2))>abs(Mpj)
Lpb=max(min(abs((abs(Mreal(2))-abs(Mpj))/(Mreal(1)-Mreal(2)))*L,L-Lpa),0);
% beta_b=6*EIb/(A/f*G*Lpb^2)
else Lpb=0;
end
Lo=L-Lpa-Lpb;
% beta_o=6*EIo/(A/f*G*Lo^2);

%Weigth:
EIm=(EIa*Lpa+EIo*Lo+EIb*Lpb)/L;
beta=6*EIm/(A_f*G*L^2);
beta_a=beta;beta_o=beta;beta_b=beta;
```

A2.1.13 Programa K1_eqcorte4

```
function[K1_condensada]=...
K1_eqcorte4(EI1,EI2,EI3,EI4,EI5,EA1,EA2,EA3,EA4,EA5,...
L1,L2,L3,L4,L5,beta)
%      David Mora
% [K1_condensada]=K1_eqcorte4(EIa,EIpa,EIo,EIb,EIpb,EaA,EaPa,EaO,EAb,EApb,L2,L1,L3
,L5,L4,beta)
%EIa,EIo,EIb: Rigidez a flexión en extremo a, en centro y en extremo b
%EA,EAo,EAb: Rigidez axial en extremo a, en centro y en extremo b
%Lpa,Lo,Lpb: Longitud en extremo a, en centro y en extremo b
%beta_a,beta_o,beta_b:factor de deformación por corte
%      beta=6*EIy/(A/f*G*L^2) en extremo a, en centro y en extremo b

% % Ejemplo
% EIa=10838.66632;EIpa=.3*EIa;
```



```

3*EI5*L2*L1^2*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L2^2*L1*kv+2*EI4*EI3*EI1*EI5*L2*L5^2*kv+2*EI4*
EI3*EI1*EI5*L2^2*L5*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L4*L1^2*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L4^2*L1*kv+
2*EI2*EI3*EI1*EI5*L4*L5^2*kv+2*EI2*EI3*EI1*EI5*L4^2*L5*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L3*L1
^2*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L3^2*L1*kv+2*EI2*EI4*EI1*EI5*L3*L5^2*kv+2*EI2*EI4*EI1*EI5
*L3^2*L5*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L1*L5^2*kv+2*EI2*EI4*EI3*EI5*L1^2*L5*kv+4*EI4*EI3*E
I1*EI5*L2*L4*L3*av+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L2*L4*L1*av+4*EI4*EI3*EI1*EI5*L2*L4*L5*av+4*
EI2*EI4*EI3*EI5*L2*L3*L1*av+4*EI4*EI3*EI1*EI5*L2*L3*L5*av+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L4*L3
*L1*av+4*EI2*EI4*EI1*EI5*L4*L3*L5*av+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L2*L1*L5*av+4*EI2*EI4*EI3*
EI5*L4*L1*L5*av+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L3*L1*L5*av+4*EI4*EI3*EI1*EI5*L2*L4*L3*kv+4*EI2
*EI4*EI3*EI5*L2*L4*L1*kv+4*EI4*EI3*EI1*EI5*L2*L4*L5*kv+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L2*L3*L1
*kv+4*EI4*EI3*EI1*EI5*L2*L3*L5*kv+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L4*L3*L1*kv+4*EI2*EI4*EI1*EI5
*L4*L3*L5*kv+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L2*L1*L5*kv+4*EI2*EI4*EI3*EI5*L4*L1*L5*kv+4*EI2*EI
4*EI3*EI5*L3*L1*L5*kv), 0
0, 0, (EA2*EA4*EA3*EA1*EA5) / (EA4*EA3*EA1*EA5*L2+EA2*EA3*EA1*EA5*L4+EA2*EA4*EA1*EA5*
L3+EA2*EA4*EA3*EA5*L1+EA2*EA4*EA3*EA1*L5) );

```

A2.1.14 Programa krigidez_brace_eq2

```

function [K, icon, iconu, iconc, Table3, K3, TableFDelta, Pa, TableMt_Fd]=...
krigidez_brace_eq2(K, K3, ngl, Table1, Table2, Table3, L, seno, coseno, ...
    VC, icon, iconu, iconc, jj, Pa, L0, NJ, coseno0)
% Programa para determinar rigidez axial de braces solos o equivalentes
% con disipadores
% Programm to determinate axial stiffness to braces alone and equivalent
% braces and dampers.
TableFDelta=0; TableMt_Fd=0;
ibrace=(Table(:,1)==1.1); %tadas element index
ipos_brace=find(ibrace==1); %tadas element ubication index
if ipos_brace~=0
mbr=length(L); TableFDelta=zeros(mbr, 6); TableMt_Fd=zeros(mbr, 18);
KD=zeros(ngl); KD1=KD; K3D=zeros(6, 6, mbr); K3D1=K3; ii=0;
for i=1:mbr
    ichevron=ipos_brace(NJ(ipos_brace)==NJ(i));
    if Table1(i,1)==1.1
        ii=ii+1;
    q1=L(i)-L0(i); %pos trac, neg compr
    SectionBrace=Table1(i,1:11); TypeBr=SectionBrace(5);
    if TypeBr<=3 && Table1(i,12)~=0, SectionDISSIP=Table1(i,12:end); ...
        else SectionDISSIP=zeros(1,11); end
%-----
%                               ADAS, TADAS Y SHEAR LINK
%-----
Type=SectionDISSIP(5); %4:ADAS, 5:TADAS Y 6:SL
if Type==4 || Type==5
    % ADAS Damper Section:[Material(1), fy, fu, Ey , Tipo(4), h, tw, bs, bi, n, miu]
    %TADAS Damper Section:[Material(1), fy, fu, Ey , Tipo(5), h, tw, bs, bi, n, miu]
    b=SectionDISSIP(8); %Ancho del ADAS Y TADAS
    h=SectionDISSIP(6); %Altural del ADAS Y TADAS
    t=SectionDISSIP(7); %Espesor de la placa
    n=SectionDISSIP(10); %Numero de placas
    fy=SectionDISSIP(2); %Fluencia del acero
    EsT=SectionDISSIP(4); %Modulo de elasticidad del acero
    bi=SectionDISSIP(9); %Ancho inferior
    miu=SectionDISSIP(11); %Ductilidad del disipador ADAS Y TADAS
elseif Type==6
    %SL Damper Section:[Material(1), fy, fu, Ey, Tipo(6), b, h, ht, n, np, e, t, z, miu]
    b=SectionDISSIP(6); %b Ancho de una ventana del disipador en m
    h=SectionDISSIP(7); %h Altura de una ventana del disipador en m
    ht=SectionDISSIP(8); %ht Altura total de un parante
    n=SectionDISSIP(9); %n numero de ventanas
    np=SectionDISSIP(10); %np numero de elementos verticales de altura ht

```

```

e=SectionDISSIP(11); %e Espesor de la ventana del disipador en m
t=SectionDISSIP(12); %t Espesor del marco del disipador en m
z=SectionDISSIP(13); %z Base del marco de altura h en m
fy=SectionDISSIP(2); %fy Fluencia del acero en t/m2
EsT=SectionDISSIP(4); %Es Modulo de elasticidad del material en t/m2
miu=SectionDISSIP(14); %miu ductilidad esperada de disipador
end
qydiss=0;qudiss=0;
if Type==4
    [ke,kd,~,~,qudiss,qydiss,kef,TableMt_Fd(i,:)]=...
        histeresis_adas(b,h,t,n,fy,EsT,bi,miu);
elseif Type==5
    [ke,kd,~,~,qudiss,qydiss,kef,TableMt_Fd(i,:)]=...
        histeresis_tadas(b,h,t,n,fy,EsT,bi,miu);
elseif Type==6
    [ke,kd,~,~,qudiss,qydiss,kef,TableMt_Fd(i,:)]=...
        histeresis_SL(b,h,ht,n,np,e,t,z,fy,EsT,miu);
elseif Type==6.1;
    %% [Material (1),0,0,0,Tipo(6.1),ke,kd,qudiss,qydiss,kef]
    ke=SectionDISSIP(6);kd=SectionDISSIP(7);qudiss=SectionDISSIP(8);
    qydiss=SectionDISSIP(9);kef=SectionDISSIP(10);
end
%-----
%
%-----
[~,EA,~,~,~,A]=Geom(SectionBrace);
Lcon=L0(i);
cos=coseno0(i);
kdiag=EA/Lcon;
[ac,~,~,at,~,~,deltac,deltat,p,Fy,Fcr]=...
    Braces_AceroASCE41(SectionBrace,Lcon);
if sum(SectionDISSIP)~=0,qydiag=qydiss*ke/kdiag/2/abs(cos)^3;...
else if sign(q1)==-1;qydiag=min(deltac,deltat);else qydiag=deltat;end,end

if isnan(qydiss)==1,qydiss=0;end
qyttotal=qydiag+qudiss/abs(cos);
if sum(SectionDISSIP)~=0,if length(ichevron)>1,nn=2;else nn=1;end,...
    Keq=kdiag*ke/(ke+nn*cos^2*kdiag);EA=Keq*Lcon;p=ke/kd;end
    if sum(SectionDISSIP)~=0,deltau=qydiag+qudiss/abs(cos);
        Fyy=kdiag*ke/(ke+nn*cos^2*kdiag)*qyttotal;
        Fu=Fyy+kdiag*kd/(kd+nn*cos^2*kdiag)*(qudiss-qydiss);Fy=Fyy;Fcr=Fyy;
    else
        if q1<0,deltau=qyttotal+ac;Fyy=min(Fy,Fcr);...
        else deltau=qyttotal+at;Fyy=Fy;end
Fu=(deltau-qyttotal)*p*EA+Fyy;
end
alfa=p;%<=====
%Análisis No Lineal::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
if abs(q1)<=qyttotal && sum(SectionDISSIP)~=0 && qudiss~=0 && ...
    sum(Table3(ichevron,2))==0
    Keq=kdiag*ke/(ke+nn*cos^2*kdiag); % Rigidez equivalente
else
    if sum(SectionDISSIP)~=0 && abs(q1)<=qydiag+qudiss || ...
        (Table3(i,2)~=0 && Table3(i,1)==0)
        if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(ichevron,8)=icon;...
            Table3(ichevron,2)=jj;end
        if length(ichevron)>1,nn=2;else nn=1;end,
Keq=kdiag*kd/(kd+nn*cos^2*kdiag); % Rigidez equivalente
else
    qyttotal=qydiag;
    if sum(Table3(ichevron,2))==0 && sum(SectionDISSIP)~=0,...
        icon=icon+1;Table3(ichevron,8)=icon;Table3(ichevron,2)=jj;end
    if sum(Table3(ichevron,2))~=0 && sum(SectionDISSIP)~=0,kdiag=0;end
    if abs(q1)>qyttotal || (Table3(i,1)~=0 && Table3(i,2)~=0)...
&& sum(SectionDISSIP)==0 || kdiag==0
        delta=q1;%pos tracc, neg compr

```

```

if Table3(i,1)==0,icon=icon+1;Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=jj;end
if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=jj;end
kdiag=alfa*kdiag;
if sum(SectionDISSIP)~=0,at=qudiss;ac=qudiss;end
%----->if we are using equivalent braces
if deltaL>deltat+at || deltaL<-(deltac+ac) || ...
    Table3(i,5)~=0 || kdiag==0
    if Table3(i,5)==0,iconu=iconu+1;...
        Table3(i,11)=icon;Table3(i,5)=jj;end
    if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;...
        Table3(i,12)=icon;Table3(i,6)=jj;end
    kdiag=0;%qyttotal=0;
end
end
Keq=kdiag; % Equivalent Stiffness
end
end
ELEMT(ii,1)=Keq;

TableFDelta(i,:)= [0,qyttotal,deltau,0,Fyy,Fu];
end
end

VCT(1:length(ipos_brace),:)=VC(ibrace,:);

senT(1:length(ipos_brace))=seno(ibrace);
cosT(1:length(ipos_brace))=coseno(ibrace);
[KD1,K3D1]=krigidez_tadas(mbr,ngl,ELEMT,senT,cosT,VCT,ipos_brace);
K3D=K3D1+K3D;
KD=KD1+KD;

K=KD+K;
K3=K3D+K3;
end

```

A2.1.15 Programa histeresis_adas

```

function [ke,kd,zeda,Vu,qu,qy,kef,TableMt_Fd]...
=histeresis_adas(b1,h,t,n,fy,Es,b2,miu)
%Programa para determinar la rigidez efectiva, factor de amortiguamiento
%y el cortante ultimo de un disipador ADAS
%   Dr. Roberto Aguiar Y Michael Rodriguez
%       02 de Julio del 2015
%.....
% [kef,zeda,Vu]=histeresis_adas(b1,h,t,n,fy,Es,b2,miu,alfa)
%.....
% Usar unidades coinsistentes
% b1   Ancho de la Placa (Base mayor).
% h    Altura de Placa.
% t    Espesor de la Placa.
% n    Numero de placas
% fy   Fluencia de acero A-36
% Es   Modulo de elasticidad del acero
% b2   Ancho en el medio de la Placa
% miu  ductilidad del disipador
%.....Programa reporta.....
% kef  Rigidez efectiva del disipador ADAS
% zeda Factor de amortiguamiento
% Vu   Cortante ultimo
%.....

```

```

%.....Parametros de modelo de histeresis bilineal.....
bleq=(b1-b2);
ke=2*n*Es*bleq*t^3/(3*h^3); % Rigidez Elastica
Vy=n*fy*bleq*t^2/(3*h); % Cortante de plastificacion maximo
qy=Vy/ke; % Desplazamiento de Fluencia
Vu=n*fy*bleq*t^2/(2*h);
qu=miu*qy; % Desplazamiento lateral maximo
kd=(Vu-Vy)/(qu-qy); % Rigidez Plastica
kef=Vu/qu; % Rigidez efectiva
zeda=2*(ke-kd)*qy*(qu-qy)/(pi*kef*qu*qu);% Amortiguamiento equivalente
My=Vy*h/2;Mu=Vu*h/2;tetay=qy/h;tetau=qu/h;
dAy=fy/Es*h;dAu=miu*dAy;Am=b2*n*t;FAy=(Es*Am)/h*dAy;
FAu=FAy+(dAu-dAy)*.03*(Es*Am)/h;
TableMt_Fd=[0,tetay,tetau,0,My,Mu,0,qy,qu,0,Vy,Vu,0,dAy,dAu,0,FAy,FAu];
%.....Dibujo de Diagrama de Histéresis.....
% Qd=(ke-kd)*qy;
% Fmax2=Vu-2*Qd; %Fuerza máxima de segundo punto
% X=[0; qy; qu; qu-qy; -qu; -(qu-qy); 0];
% Y=[0; Vy; Vu; Fmax2; -Vu; -Fmax2; Qd];
% plot (X,Y,'LineWidth',2)
% title('Diagrama de histéresis, Disipador ADAS')
% xlabel('Desplazamiento')
% ylabel('Fuerza')
% grid on;
return

```

A2.1.16 Programa histeresis_tadas

```

% Programa que determina la matriz de rigidez de un Disipador
% TADAS sin viga Chevron. El programa primero encuentra la matriz
% de rigidez en coordenadas locales, posteriormente con la matriz de
% Paso se halla la matriz de rigidez en coordenadas globales de
% 6 por 6.
% Dr. Roberto Aguiar
% 20 de abril de 2014
%.....
function [ke,kd,zeda,Vu,qu,qy,kef,TableMt_Fd]...
=histeresis_tadas(b,h,t,n,fy,Es,bi,miu)
% Usar Unidades Consistentes
% b Ancho de la Placa Triangular, que esta empotrada
% h Altura de Placa Triangular.
% t Espesor de la Placa
% n Numero de placas
% fy Fluencia de acero A-36
% Es Modulo de elasticidad del acero
% bi Base inferior de Disipador TADAS
% q Es el desplazamiento lateral esperado
%.....Programa reporta.....
%[ked] Matriz de rigidez de elemento TADAS.
% ko Matriz de rigidez de Tadas en coordenadas Locales de 2 por 2
%.....
%.....Parametros de modelo de histeresis bilineal.....
ke=n*Es*b*t^3/(6*h^3); % Rigidez Elastica
Vy=n*fy*b*t^2/(6*h); % Cortante de Fluencia
Vu=n*fy*b*t^2/(4*h); % Cortante de plastificacion maximo
qy=fy*h^2/(Es*t); % Desplazamiento de Fluencia
qu=miu*qy; % Desplazamiento lateral maximo
kef=Vu/qu; % Rigidez efectiva
kd=(Vu-Vy)/(qu-qy); % Rigidez Plastica
zeda=2*(ke-kd)*qy*(qu-qy)/(pi*kef*qu*qu);% Amortiguamiento equivalente

My=Vy*h/2;Mu=Vu*h/2;tetay=qy/h;tetau=qu/h;

```

```

dAy=fy/Es*h;dAu=miu*dAy;Am=bi*n*t;FAy=(Es*Am)/h*dAy;
FAu=FAy+(dAu-dAy)*.03*(Es*Am)/h;
TableMt_Fd=[0,tetay,tetau,0,My,Mu,0,qy,qu,0,Vy,Vu,0,dAy,dAu,0,FAy,FAu];
alfa=kd/ke;% Relacion entre rigidez plastica a elastica
%.....Dibujo de Diagrama de Histéresis.....
% Qd=(ke-kd)*qy;
% Fmax2=Vu-2*Qd; %Fuerza máxima de segundo punto
% X=[0; qy; qu; qu-qy; -qu; -(qu-qy); 0];
% Y=[0; Vy; Vu; Fmax2; -Vu; -Fmax2; Qd];
%
% plot (X,Y,'LineWidth',2)
% title('Diagrama de histéresis, Disipador TADAS')
% xlabel('Desplazamiento (cm)')
% ylabel('Fuerza (kg)')
% grid on;
return

```

A2.1.17 Programa histeresis_SL

```

function [ke,kd,zedaf,Fu,du,dy,keff,TableMt_Fd,C]...
=histeresis_SL (b,h,ht,n,np,e,t,z,fy,Es,miu)

%Programa que determina la matriz de rigidez de un Disipador SL
%      Dr. Roberto Aguiar y Michael Rodriguez
%      20 de mayo de 2015
%-----
% [keff,zedaf,Fu]=histeresis_SL_new (b,h,ht,n,np,e,t,z,fy,Es,miu)
%-----DATOS-----
%b      Ancho de una ventana del disipador en m
%h      Altura de una ventana del disipador en m
%ht     Altura total de un parante
%n      numero de ventanas en X
%np     numero de elementos verticales de altura ht
%e      Espesor de la ventana del disipador en m
%t      Espesor del marco del disipador en m
%z      Base del marco de altura h en m
%fy     Fluencia del acero en t/m2
%Es     Modulo de elasticidad del material en t/m2
%miu    ductilidad esperada de disipador
%-----REPORTA-----
%keff   Rigidez efectiva en t/m
%zedaf  Factor de amortiguamiento equivalente
%Fu     Fuerza cortante ultima que resiste disipador
%-----
tao =(1/sqrt(3))*fy; %esfuerzo de corte del acero a nivel de fluencia
%-----VENTANAS DEL DISISPADOR-----
G=Es/(2*(1+0.30)); %Modulo del corte del acero
aw=b*e; % Area al corte de las ventanas
kw=n*np*(aw*G/h); % Rigidez al corte de las ventanas
fw=n*np*tao*aw; % fuerza de corte a nivel de fluencia.
%-----MARCO DEL DISISPADOR-----
I=((t*z^3)/12); %Inercia a flexion de un parante del marco
kr=(12*Es*I/h^3)*np*(n+1); % Es rigidez del marco en sentido horizontal
% fr=kr*fw/kw; % Fuerza lateral del marco a nivel de fluencia
%-----DIAGONAL-----
% FFy=fw+fr; % Fuerza total lateral a nivel de fluencia del conjunto
ke=kw+kr; % rigidez elastica
kd=kr; % rigidez post fluencia
dy=fw/kw; % desplazamiento a nivel de fluencia
if dy >0.002
dy = 0.002;
end

```

```

FFy=dy*ke; % Fuerza total lateral a nivel de fluencia del conjunto
du=miu*dy; %desplazamiento ultimo
alfa=kd/ke; %relaciones de rigidez postfluencia con respecto a elastica
Fu=FFy+alfa*ke*dy*(miu-1); % desplazamiento ultimo
kef=Fu/(miu*dy); % Rigidez efectiva
zeda=(2*(miu-1)*(1-alfa))/(pi*miu*(1+alfa*miu-alfa));
if alfa >0.05
    alfa1=0.05;
else
    alfa1=alfa;
end
Ful=FFy+alfa1*ke*dy*(miu-1); % desplazamiento ultimo
kef1=Ful/(miu*dy); % Rigidez efectiva
zedal=(2*(miu-1)*(1-alfa1))/(pi*miu*(1+alfa1*miu-alfa1));
d0=(du+dy)/2;C=4*(ke-kd)*dy*(d0-dy)/(2*pi^2*d0^2);%/T
keff=min(kef,kef1);
zedaf=min(zeda,zedal);
My=FFy*ht/2;Mu=Fu*ht/2;tetay=dy/ht;tetau=du/ht;
dAy=fy/Es*ht;dAu=miu*dAy;Am=n/np*e*b*h+z*t*(n/np+1);
FAy=(Es*Am)/ht*dAy;FAu=FAy+(dAu-dAy)*.03*(Es*Am)/ht;
TableMt_Fd=[C,tetay,tetau,0,My,Mu,0,dy,du,0,FFy,Fu,0,dAy,dAu,0,FAy,FAu];
return

```

A2.1.18 Programa krigidez_tadas

```

function [SS,K3]=krigidez_tadas(mbr,ngl,ELEM,seno,coseno,VC,ipos_tadas)
%
% Programa para encontrar la matriz de rigidez de los disipadores
% Tadas
%-----
% [SS]=krigidez_tadas(ngl,ELEM,seno,coseno,VC)
%-----
% ELEM Vector que contiene la rigidez efectiva de los disipadores
% seno Vector que contiene los senos de los elementos
% coseno Vector que contiene los cosenos de los elementos
% VC Matriz que contiene los vectores de colocación de elementos
% SS Matriz de rigidez de la estructura
% ngl Número de grados de libertad
%
SS=zeros(ngl);icod=6;K3=zeros(6,6,mbr);
for i=1:length(ipos_tadas)
    kef=ELEM(i); %Rigidez efectiva
    sen=seno(i);cose=coseno(i);
    [k]=kdiagonal_tadas(kef,sen,cose);
    K3(:, :, ipos_tadas(i))=k;
    for j=1:icod
        jj=VC(i, j);
        if jj==0
            continue
        end
        for m=1:icod
            mm=VC(i, m);
            if mm==0
                continue
            end
            SS(jj, mm) =SS(jj, mm) +k(j, m);
        end
    end
end
end
return
%---fin---

```

A2.1.19 Programa krigidez_damper3

```

function [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableMfi,zeta]=...
    krigidez_damper3(K,K3,ngl,Table1,Table2,Table3,L,seno,coseno,...
VC,icon,iconu,iconc,j,Pa,L0,TableMfi,zeta)
%
%      David Mora
% Programm to determinate the stiffness matriz to only dampers.
% Programm to determinate the stiffness matriz to only dampers.
% K   Matriz de rigidez total de la estructura
% K3  Matriz de rigidez en tres dimensiones de los elementos
% Table1 Tiene las secciones
% Table2 Fuerzas y momentos en cada elemento en coordenadas locales
% Table3 Secuencia de como ingresan de como sobrepasa My y despues a Mr
% icon Contador de Momento de fluencia
% iconu Contador de momento cuando falla completamente
% iconc Contador de momento residual
% j     Numero de ciclo
% Pa    Es la carga axial acumulada
% L0    Longitudes inidicales de la estructura sin deformar
% NJ    Vector de nudos finales
%.....

mbr=length(L);
SS=zeros(ngl);icod=6;K3D=zeros(6,6,mbr);
for i=1:mbr
if Table1(i,1)==1.2
    Mi=abs(Table2(i,3));Mj=abs(Table2(i,6));M=max(Mi,Mj);zetaD=0;
    if Table1(i,5)==4 %ADAS
        %ADAS Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(4),h,tw,B,b,n,miu]
SectionADAS=Table1(i,:);
        B=SectionADAS(8); %Ancho mayor del ADAS
        h=SectionADAS(6); %Altura del ADAS
        t=SectionADAS(7); %Espesor de la placa
        n=SectionADAS(10); %Numero de placas
        fy=SectionADAS(2); %Fluencia del acero
        Es=SectionADAS(4);%Modulo de elasticidad del acero
        b=SectionADAS(9); %Ancho menor
        miu=SectionADAS(11); %Ductilidad del disipador ADAS
        Z=B*n*(t)^2/4;I=B*n*(t)^3/12;EIy=Es*I;A=B*(n*t);
p=0.05;
        Mp=Z*fy*(1-abs(Pa(i))/(A*fy));fiy=Mp/EIy;fiu=miu*fiy;
        Mu=EIy*p*(fiu-fiy)+Mp;%M,My
        if M>Mp || Table3(i,2)~=0,alfa=p;

        if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=j;...
            [~,zetaD]=histeresis_adas(B,h,t,n,fy,Es,b,miu);end
        else alfa=1;
        end
        be=[B*4/5,B*1/2,B*1/10,B*1/2,B*4/5];
        Ie=be*n*(t)^3/12;EIe=alfa*Es*Ie;
        [alfa_ax,Table3,icon,iconu]=...
AxialADAS(Table3,icon,iconu,B,h,t,n,fy,Es,b,miu,L,L0,i,j);

elseif Table1(i,5)==5 %TADAS
    %TADAS Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(5),h,tw,bs,bi,n,miu]
SectionTADAS=Table1(i,:);
        b=SectionTADAS(8); %Ancho del TADAS
        h=SectionTADAS(6); %Altura del TADAS
        t=SectionTADAS(7); %Espesor de la placa
        n=SectionTADAS(10); %Numero de placas
        fy=SectionTADAS(2); %Fluencia del acero
        Es=SectionTADAS(4);%Modulo de elasticidad del acero
        bi=SectionTADAS(9); %Ancho inferior
        miu=SectionTADAS(11); %Ductilidad del disipador TADAS

```



```

Z=b*n*(t)^2/4;I=b*n*(t)^3/12;EIy=Es*I;A=b*(n*t);
p=0.05;

Mp=Z*fy*(1-abs(Pa(i))/(A*fy));fiy=Mp/EIy;
fiu=miu*fiy;Mu=EIy*p*(fiu-fiy)+Mp;%M,My
if M>Mp || Table3(i,2)~=0,alfa=p;
if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=j;...
[~,zetaD]=histeresis_tadas(b,h,t,n,fy,Es,bi,miu);end
else alfa=1;
end
be=[b*1/10,b*3/10,b*5/10,b*7/10,b*9/10];
Ie=be*n*(t)^3/12;EIe=alfa*Es*Ie;
[alfa_ax,Table3,icon,iconu]=...
    AxialTADAS(Table3,icon,iconu,b,h,t,n,fy,Es,bi,miu,L,L0,i,j);
end

%-----
%                               Stiffness matrix calculation
%-----

Ae=be*(n*t);EAe=alfa_ax*Es*Ae;
G=Es/(2*(1+.2));f=1.2;A_f=sum(Ae)/length(Ae)*f;
EIIm=sum(EIe)/length(EIe);beta=6*EIIm/(A_f*G*L(i)^2);
[K1]=K1_eqcorte4(EIe(1),EIe(2),EIe(3),EIe(4),EIe(5),...
EAe(1),EAe(2),EAe(3),EAe(4),EAe(5),h/5,h/5,h/5,h/5,beta);
if alfa_ax==0,K1=zeros(3);end

T12=[0 1/L(i) 1 0 -1/L(i) 0; %Transformation Matrix
0 1/L(i) 0 0 -1/L(i) 1; % System 2 are local coordinates
-1 0 0 1 0 0];
K2=T12'*K1*T12; % Stiffness matrix on local coordinates
T23= [coseno(i) seno(i) 0 0 0 0
      -seno(i) coseno(i) 0 0 0 0
      0 0 1 0 0 0
      0 0 0 coseno(i) seno(i) 0
      0 0 0 -seno(i) coseno(i) 0
      0 0 0 0 0 1];
k3=T23'*K2*T23;
K3D(:, :, i)=k3;
if M>Mu || Table3(i,6)~=0
    K3D(6, :, i)=zeros(1,6);K3D(:, 6, i)=zeros(6,1);
    if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;...
        Table3(i,12)=icon;Table3(i,6)=j;end
end

for j1=1:icod
    jj1=VC(i,j1);
    if jj1==0
        continue
    end
    for m=1:icod
        mm=VC(i,m);
        if mm==0
            continue
        end
        SS(jj1,mm)=SS(jj1,mm)+K3D(j1,m,i);
    end
end
end
TableMfi(i,:)=[0,0,0,0,0,0,0,0,fiy,fiu,0,Mp,Mu];
zeta=zeta+zetaD;

end

end
K3=K3+K3D;
K=SS+K;

```

A2.1.20 Programa AxialADAS

```
function [alfa_ax,Table3,icon,iconu]=...
AxialADAS(Table3,icon,iconu,B,h,t,n,fy,Es,b,miu,L,L0,i,jj)
%Programa que identifica si un disipador fluyó o falló
% L Es la longitud deformada debido a que vectores X, Y, se van
% actualizando
% i Identifica el número de elemento analizado
Lcon=L(i);q1=Lcon-L0(i);%pos trac, neg compr
[~,~,~,qudam,qydam]=histeresis_adas(B,h,t,n,fy,Es,b,miu);
if abs(q1)>qydam || (Table3(i,1)~=0 && Table3(i,2)~=0)
deltaL=q1;%pos compr, neg trac
if Table3(i,1)==0,icon=icon+1;Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=jj;...
    elem=i,jj,'Axial yield',end
    if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=jj;end
    alfa_ax=0.05;
    if deltaL>qydam || deltaL<-qydam || Table3(i,5)~=0
        if Table3(i,5)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,11)=icon;...
            Table3(i,5)=jj;elem=i,jj,'Axial Fail',end
        if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,12)=icon;...
            Table3(i,6)=jj;end
        alfa_ax=0;
    end
else alfa_ax=1;
end
```

A2.1.21 Programa AxialTADAS

```
function [alfa_ax,Table3,icon,iconu]=...
AxialTADAS(Table3,icon,iconu,b,h,t,n,fy,Es,bi,miu,L,L0,i,jj)
%Programa que identifica si un disipador fluyó o falló
% L Es la longitud deformada debido a que vectores X, Y, se van
% actualizando
% i Identifica el número de elemento analizado
Lcon=L(i);q1=Lcon-L0(i);%pos trac, neg compr
[~,~,~,qudam,qydam]=histeresis_tadas(b,h,t,n,fy,Es,bi,miu);
if abs(q1)>qydam || (Table3(i,1)~=0 && Table3(i,2)~=0)
deltaL=q1;%pos compr, neg trac
if Table3(i,1)==0,icon=icon+1;Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=jj;...
    elem=i,jj,'Axial yield',end
    if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=jj;end
    alfa_ax=0.05;
    if deltaL>qydam || deltaL<-qydam || Table3(i,5)~=0
        if Table3(i,5)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,11)=icon;...
            Table3(i,5)=jj;elem=i,jj,'Axial Fail',end
        if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,12)=icon;...
            Table3(i,6)=jj;end
        alfa_ax=0;
    end
else alfa_ax=1;
end
```

A2.1.22 Programa espe_cap

```
function [Sdd,Saa,fil,T1,gama1,alfa1,KL]=espe_cap(K,M,Mt,np,ngl,Dt,Vac)
```

```

% Programa que determina el Espectro de Capacidad a partir de la Curva
% de Capacidad Sismica Resistente
%
%      Dr. Roberto Aguiar
%      14 de diciembre de 2014
%.....
% K      Matriz de rigidez total de orden ngl por ngl
% M      Matriz de masas de orden np por np
% Mt     Masa total igual a suma de las masas
% np     Numero de pisos
% ngl    Numero de grados de libertad
% Dt     Desplazamiento en el tope es un solo valor
% Vac    Cortante basal es un solo valor
% Sdd    Desplazamiento espectral
% Saa    Aceleracion Espectral
% fil    Regresa el primer modo de vibración
%.....
kaa=K(1:np,1:np);kab=K(1:np,np+1:ngl);kbb=K(np+1:ngl,np+1:ngl);kba=kab';
KL=kaa-kab*kbb^-1*kba; % Matriz de rigidez lateral de orden np por np
[T,fi,~]=orden_eig(KL,M);
Tl=T(1);
% Modo de vibracion normalizado a 1 en el ultimo piso
fil=fi(:,1);fil=fil/fil(np);
for ji=1:np; J(ji)=1; end;J=J'; % Vector de incidencia
gamal=abs((fil'*M*J)/(fil'*M*fil)); %Factor de participacion modal
alfal=(fil'*M*J)^2/(Mt*(fil'*M*fil));
Sdd=Dt/gamal;Saa=Vac/(Mt*alfal);
% end

```

A2.1.23 Programa cargas_po

```

function [Q,V,Q2]=cargas_po(Qa,ngl,Fm,L,seno,coseno,VC)
% Programa que determina el vector de cargas Q (Cargas Generalizadas)
% para un pushover plano.
%      Dr. Roberto Aguiar
%      3 Nov. de 2014
%.....
% Qa     Vector que contiene las cargas que aplico en cada piso
% ngl    Numero de grados de libertad de la estructura
% Fm     Matriz que contiene elemento cargado y la carga para cada
%        elemento
% L      Vector con la longitud de los elementos
% seno   Vector con el seno de los elementos
% coseno Vector con el coseno de los elementos
% VC     Matriz con el vector de colocacion de los elementos
% Q      Vector de Cargas generalizadas.
% V      Cortante basal
% Q2     Matriz con acciones de empotramiento perfecto
na=length(Qa); % Numero de coordenadas laterales (Coord principales)
V=sum(Qa); % Cortante Basal
nb=ngl-na; % Numero de coordenadas secundarias(despl vert y giro de c/nudo)

Qb(nb)=0;

Q=[Qa;Qb'];
mbr=length(L);nmc=length(Fm(:,1));Q2=zeros(mbr,6);
for icon=1:nmc
    i=Fm(icon,1); % Numero de elemento cargado
    P=Fm(icon,2); % Carga en elemento
    Q2(i,2)=P*L(i)/2;Q2(i,5)=Q2(i,2);
    Q2(i,3)=P*L(i)*L(i)/12;Q2(i,6)=-Q2(i,3);

```

```

    Q2(i,1)=0;Q2(i,4)=0;
    T23=zeros(6,6);T23(1,1)=coseno(i);T23(2,2)=T23(1,1);T23(3,3)=1;
    T23(4,4)=T23(1,1);T23(5,5)=T23(1,1);T23(6,6)=1;T23(2,1)=-seno(i);
    T23(1,2)=seno(i);T23(5,4)=-seno(i);T23(4,5)=seno(i);
Q3=-T23'*Q2(i,:)'; % Vector de empotramiento en coordenadas globales
    % Ensamblaje del Vector Q en los elementos que no se generan
for ki=1:6
    gdl=VC(i,ki);
    if gdl==0
        continue
    else
        Q(gdl)=Q(gdl)+Q3(ki);
    end
end
end
return

```

A2.1.24 Programa deriva

```

function [Drift]=deriva(Y,qtine,np,CG,DibDri)
%
% Programa para encontrar la deriva de piso
%                               David Mora
%-----
% [Drift]=deriva(Y,qtine,np,CG,DibDri)
%-----
%Datos:
%Y      Vector que contiene coordenada en Y de cada piso
%qtine  desplazamiento inelastico de cada piso
%np     Número de Pisos
%CG     Grados de Libertad en Nudos
%DibDri 0:No dibuja, 1:Imprime dibujo en pantalla
%Resultado
%Derv= Deriva de piso

d=length(qtine);n=0;
for i=2:length(Y)
    for ii=1:np
        if CG(i,1)==ii
            n=n+1;
            Y1(n)=Y(i);
        end
    end
end
Y2=unique(Y1);h=Y2(1);
for iii=2:length(Y2)
    h(iii)=Y2(iii)-Y2(iii-1);
end
a=np;
if d>a
    for g=1:a
        Drift(g)=abs((qtine(g+1)-qtine(g))*100/h(g));
    end
else
    Drift(1)=qtine(1)*100/h(1);
    for g=2:a
        Drift(g)=abs((qtine(g)-qtine(g-1))*100/h(g));
    end
end

Drift1(length(Drift)*2)=0;

```

```

for s=2:2:length(Drift1)
    Drift1(s)=Drift(s/2);
    Drift1(s-1)=Drift(s/2);
end

np1=0;
for w=1:length(Y2)
    np1=[np1,Y2(w),Y2(w)];
end
np1=np1(1:end-1);
if DibDri==1
    hold off
    graph=plot(Drift1,np1);
    xlabel('Storey Drift (%)');
    ylabel('Storey Height');
    %title('Storey Drift');
end
grid on

```

A2.1.25 Programa fuerzas_0

```

function [FF,pq]=fuerzas_0(K3,VC,q,Q2,seno,coseno)
%Program to calculate forces and moments in elements ends of a plane frame.
%      Dr. Roberto Aguiar and Ing. David Mora
%      April-2015
%-----
% [FF,pq]=fuerzas_0(K3,VC,q,Q2,seno,coseno)
%-----
% K3      Tridimensional Stiffness Matrix Element in global coordinates syst.
% ngl     Degrees of freedom
% seno    Vector contining sine elements
% coseno  Vector contining cosine elements
% VC      Elements Placement Vectors Matrix
% q       Vector with Deformation in each dof
% Q2      Matrix with fixed end actions, by element.
%..... Reporta.....
% FF      Final Forces and Moments in each element in local coordinates
% pq      Matrix with Deformation in each dof by element.
mbr=size(VC,1);FF=zeros(mbr,6);pq=zeros(6,mbr);
for i=1:mbr
    cosen=coseno(i);sen=seno(i);
    for j=1:6;
        jj=VC(i,j);
        if jj==0
            continue
        else
            pq(j,i)=q(jj);
        end
    end
    end
    PG=K3(:, :, i)*pq(:, i); % Glllobal Load coordinates Vector
    T23= [cosen sen    0    0    0    0
          -sen cosen 0    0    0    0
           0    0    1    0    0    0
           0    0    0 cosen sen 0
           0    0    0 -sen cosen 0
           0    0    0    0    0    1];
    PL=T23*PG; % Local Load coordinates Vector
    FF(i, :)=Q2(i, :)+PL';
end
return
%---end---

```

A2.1.26 Programa Iteration_Vy2

```
% Iteration to find the Base Shear where the first element yield
%                               David Mora
if icon>0 && cont1My<3
    cont1My=cont1My+1;
end
if cont1My==1
    mbr=size(Table2,1);
    cont1My=cont1My+1;
    DeltaV=DeltaV/1000;
    if j-2<=1,cont1My=3;else
        Table40=Table40(:, :, 1:j);
        Table2=Table2(:, :, 1:j); Table4=Table4(:, :, 1:j);
        Table3=zeros(mbr,12); icon=0; iconu=0; iconc=0;
        Pa=Table2(:, 1, end);
        if size(zeta, 2)>1, zeta=zeta(:, 1:j-1); end
        j=j-3;
    end
end
if cont1My==3
    cont1My=cont1My+1;
    DeltaV=DeltaV*100
    Vac(j+1)=Vac(j); Dtac(j+1)=Dtac(j);
    %Cycle immediately before the yield of the structure
    Sdy=Sd(j); Vacy=Vac(j), Dtacy=Dtac(j), FFy=FF; jy=j,
    Table3Col=ceil(find(Table3==1)/size(FF,1));
    Element=find(Table3==1)-(Table3Col-1)*size(FF,1), pause(1)
    input('Yield instant, enter')
end
end
```

A2.1.27 Programa Efecto_PD2

```
function [Qa,X,Y,L,seno,coseno]=...
Efecto_PD2(gama,M,fi,DeltaV,q,X,Y,Y0,NI,NJ,CG,nr,j)
%Programa que determina el vector de cargas laterales considerando el
%efecto P-Delta (P_D)
%
%   Dr. Aguiar e Ing. David Mora
%   17 enero de 2015
%.....
% M      matriz de masas
% fil    Vector modal con 1er Modo de vibración.
% DeltaV valor del incremento de cargas(cortante basal).
% q      desplazamientos y giros en un incremento de carga
% X,Y    Vector con coordenadas X y Y
% NI,NJ  Vectores con los nudos iniciales y finales generados
% CG     Matriz de coordenadas generalizadas
% nr     Numero de nudos empotrados
% nr     Número de restricciones
% j      ciclo de cargas
% .....
np=length(M(:,1)); % Numero de pisos.
Yl=unique(Y0); % Altura de entre piso
W=zeros(np,1);
for i=2:length(Yl)
    h(i-1)=Yl(i)-Yl(i-1);
end
% Qa=M*fi*DeltaV;
% Qa=gama*M*fi*DeltaV;
```

```

Qa=(sum(M)'.*fi)/sum(sum(M)'.*fi)*DeltaV*gamma;
if j>1
    for i=1:np
        W(i)=M(i,i)*9.8; %Gravedad por metros por seg cuadrado
        if i==1
            Qa(i)=Qa(i)+(W(i)/h(i))*q(i);
        else
            Qa(i)=Qa(i)+(W(i)/h(i))*(q(i)-q(i-1));
        end
    end
end
for ii=nr+1:length(Y)
    X(ii)=X(ii)+q(CG(ii,1));
    Y(ii)=Y(ii)+q(CG(ii,2));
end
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ);% Longitud, seno y coseno de elementos

```

A2.1.28 Programa Dibujo_Din2

```

function Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Tabla3,intervalo)
%Programa que dibuja la estructura en cada lazo
%
% Ing. David Mora
% 18 enero de 2015
%.....
% j          ciclo de cargas
% X,Y       Vector con coordenadas X y Y
% NI,NJ     Vectores con los nudos iniciales y finales generados
% L,seno,coseno Longitud, seno y coseno de elementos
%intervalo  Intervalo de iteración en que se dibujará la estructura
mbr=length(L);
if mod(j,intervalo)==0
figure(1);
clf
maxX1=max(X(Y==min(Y)));maxY1=max(Y);minX1=min(X(Y==min(Y)));
axis([minX1-4,maxX1+4 , min(Y), maxY1*1.1]);
for i=1:mbr
    line([X(NI(i)) X(NJ(i))], [Y(NI(i)) Y(NJ(i))],...
'Color','black','LineWidth',2); %Grafica a la estructura
    hold on
    if Tabla3(i,7)~=0 %Grafica las rótulas en nudo inicial
line([X(NI(i)),X(NI(i))+.25*L(i)*coseno(i)], [Y(NI(i)),...
Y(NI(i))+.25*L(i)*seno(i)],'color','green','LineWidth',4);
    end
    if Tabla3(i,8)~=0 %Grafica las rótulas en nudo final
plot([X(NJ(i)),X(NJ(i))-0.25*L(i)*coseno(i)], [Y(NJ(i)),...
Y(NJ(i))-0.25*L(i)*seno(i)],'color','green','LineWidth',4);
    end
    if Tabla3(i,9)~=0 %Grafica las rótulas en nudo inicial
line([X(NI(i)),X(NI(i))+.25*L(i)*coseno(i)], [Y(NI(i)),...
Y(NI(i))+.25*L(i)*seno(i)],'color','red','LineWidth',4);
    end
    if Tabla3(i,10)~=0 %Grafica las rótulas en nudo final
plot([X(NJ(i)),X(NJ(i))-0.25*L(i)*coseno(i)], [Y(NJ(i)),...
Y(NJ(i))-0.25*L(i)*seno(i)],'color','red','LineWidth',4);
    end
    if Tabla3(i,11)~=0 %Grafica las rótulas en nudo inicial
plot(X(NI(i))+.05*L(i)*coseno(i), Y(NI(i))+.05*L(i)*seno(i),'bs');
    end
    if Tabla3(i,12)~=0 %Grafica las rótulas en nudo final
plot(X(NJ(i))-0.05*L(i)*coseno(i), Y(NJ(i))-0.05*L(i)*seno(i),'bs');
    end
end

```

```

end
drawnow
hold off
%pause(0.01)
end

```

A2.2 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN Pushover_3

No se colocarán los códigos de programas ya puestos con anterioridad.

A2.2.1 Programa Pushover_3

```

% Pushover_3
% Program to calculate Capacity Curve of a Structure with non symmetric
% elements
% Program need the follow structure data:
% NI,NJ,X,Y,Y0,L,seno,coseno,CG,VC,ngl,np,Fm
%           Ing. David Mora
%           April-2015
if exist('pDt')==0,pDt=np;end
if exist('Dib')==0,Dib=10;end
NDissip=sum(Table1(:,1)==1.2);
NISolat=sum(Table1(:,1)==1.3);
if exist('maxderg')==0,if NIsolat>0, maxderg=100;LimitDrift=100;...
    else maxderg=2;LimitDrift=4;end,end
graphMode=0;%Number of Mode to the graphics
Ht=max(Y); %Total Height
mbr=length(L); %Members
% [Mt,M]=masas2(Fm,NI,NJ,Y,L,np); % Report Mass Matrix M and Total Mass Mt
[Mt,M]=masas(Fm,NI,Y,L,np); % Report Mass Matrix M and Total Mass Mt
%.

Initialization3
cg_data3
[~,T,~,~,OM]=espe_cap3(K,M,Mt,np,ngl,nmodos);
if find(isinf(OM),1)>0,nmodos=min(nmodos,min(find(OM==Inf))-1),...
    Initialization3,end
DeltaV=Mt*.01%Scale factor of horizontal load
%.
%.Start Pushover.....
while j>=0 %Start infinite loop, stop when the structure collapse
    j=j+1;
    [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Hinge,tetay,TableMfi]=...
        krigidez_ASCE41_2(ngl,Table1,Table2c(:, :, j),Table3,...
            Table4c(:, :, j),L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pac,...
            pqacumc,Q2cg,Hinge,tetay);
    [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableFDelta,~,TableMt_Fd]=...
        krigidez_brace_eq2(K,K3,ngl,Table1,Table2c(:, :, j),Table3,...
            L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pac,L0,NJ,coseno0);...
    TableMt_Fd(:,1)=TableMt_Fd(:,1)/T(end,1);
    [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableMfi,zetaj]=...
        krigidez_damper3(K,K3,ngl,Table1,Table2c(:, :, j),Table3,L,...
            seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pac,L0,TableMfi,zetaj);

    if j==1;TableMfi0=TableMfi;TableFDelta0=TableFDelta;...
    TableMt_Fd0=TableMt_Fd;iconi=icon;Table3i=Table3;end

```



```

    if j==2;iconi=icon;Table3i=Table3;end
    detK=det(K);
    if detK<=1e-10 && detK>=-1e-10%Stop loop if the matrix is singular
    fprintf(' Singular Stiffness Matrix --> Collapse unstable structure\n');
break
    end
    [FI(:, :, j), T(:, j), gama(:, j), alfa(:, j), OM(:, j)]=...
espe_cap3(K, M, Mt, np, ngl, nmodos);

for nm=1:nmodos %Loop for each Mode
    if isreal(T(:, j))==0, T(:, j)=max(real(T(:, j)), imag(T(:, j)));...
        OM(:, j)=max(real(OM(:, j)), imag(OM(:, j)));end
    %Generalized load and base shear vectors
    [Q, V, Q2]=cargas_po(Qa(:, nm, j), ngl, Fm, L, seno, coseno, VC);
    qn(:, nm)=K\Q; %Displacement in generalized vector coordinates
    Dt=qn(pDt, nm); %Roof displacement
    Vac(j+1, nm)=Vac(j, nm)+V; Dtac(j+1, nm)=Dtac(j, nm)+Dt; %Accumulated values
    %.....Capacity Spectrum.....
    Sd(j+1, nm)=abs(Dtac(j+1, nm)/gama(nm, j));
    Sa(j+1, nm)=abs(Vac(j+1, nm)/(Mt*alfa(nm, j)));
    %.....
    % Element Forces and Moments
    [FF(:, :, nm), pq]=fuerzas_0(K3, VC, qn(:, nm), Q2, senon(:, nm), cosenon(:, nm));
    qacum(:, nm)=qacum(:, nm)+qn(:, nm);
    % Element Forces and Moments with accumulated q
    [FFreal(:, :, nm, j)]=fuerzas_0(K3, VC, qacum(:, nm), Q2cg, ...
        senon(:, nm), cosenon(:, nm));
    pqacum(:, :, nm)=pqacum(:, :, nm)+pq;

Table2(:, :, nm, j+1)=FF(:, :, nm)+Table2(:, :, nm, j);
    in1=find(VC(VC(:, 3)==0, 4)==0); VC1=VC; qn1=qn(:, nm);
    if isempty(in1)==0, VC1(in1, 4)=ngl+1; qn1(ngl+1)=0; end
    if size(L, 1)==1, Table4(:, :, nm, j+1)=Table4(:, :, nm, j)+...
        [[-qn1(VC1(VC1(:, 3)==0, 4))./L(VC1(:, 3)==0)];...
        (qn1(VC1(VC1(:, 3)~=0, 3)))] , qn1(VC1(:, 6))]; end
    if size(L, 2)==1, Table4(:, :, nm, j+1)=Table4(:, :, nm, j)+...
        [[-qn1(VC1(VC1(:, 3)==0, 4))./L(VC1(:, 3)==0)];...
        (qn1(VC1(VC1(:, 3)~=0, 3)))] , qn1(VC1(:, 6))]; end
    %Static loads and deformed coordinates
    [Qa(:, nm, j+1), Xn(:, nm), Yn(:, nm), Ln(:, nm), senon(:, nm), cosenon(:, nm)]...
=Efecto_PD2(gama(nm, j), M, FI(:, nm, j), DeltaV, qn(:, nm), ...
    Xn(:, nm), Yn(:, nm), Y0, NI, NJ, CG, nr, j);
if cont1My==0 || cont1My>=3
    Xln(:, j, nm)=Xn(:, nm); Yln(:, j, nm)=Yn(:, nm); % For Video function
    if nm==graphMode
        Dibujo_Din2(j, Xn(:, nm), Yn(:, nm), NI, NJ, ...
            Ln(:, nm), senon(:, nm), cosenon(:, nm), Table3, Dib)
    end
end
    %
    V1(j, nm)=V;
end
%-----
%                               CQC Combinations
%-----
zeta;
    for rrf=1:mbr
        for rrc=1:size(Table2, 2)
            aux=zeros(nmodos, 1);
            for xx=1:nmodos, aux(xx, 1)=Table2(rrf, rrc, xx, j+1); end
            Table2c(rrf, rrc, j+1)=CQC(aux, zeta(:, end), OM(:, j));
aux=zeros(nmodos, 1);
            for xx=1:nmodos, aux(xx, 1)=pqacum(rrc, rrf, xx); end
            pqacumc(rrc, rrf)=CQC(aux, zeta(:, end), OM(:, j));
end
        for rrc=1:size(Table4, 2)
            aux=zeros(nmodos, 1);

```

```

        for xx=1:nmodos, aux(xx,1)=Table4(rrf,rrc,xx,j+1);end
        Table4c(rrf,rrc,j+1)=CQC(aux,zeta(:,end),OM(:,j));
    end
end
Pac=Table2c(:,1,j+1);
for rrf=1:ngl
    q(rrf,1)=CQC(qn(rrf,:),zeta(:,end),OM(:,j));
end

%Sum of gravity responses
if j>=2
    qcgl=zeros(length(qcgl),1);%Pacgl=zeros(length(Pacgl),1);
    Table2cgl=zeros(size(Table2cgl,1),size(Table2cgl,2));
    Table4cgl=zeros(size(Table4cgl,1),size(Table4cgl,2));
    pqcgl=zeros(size(pqcgl,1),size(pqcgl,2));
else
    qcgl=qcg;%Pacgl=zeros(length(Pacgl),1);
    Table2cgl=Table2cg;
    Table4cgl=Table4cg;
    pqcgl=pqcg;
end
q=q+qcgl;
qacumc(:,j+1)=qacumc(:,j)+q;
Pac=Pac+Pacgl;
Table2c(:,j+1)=Table2c(:,j+1)+Table2cgl;
Table4c(:,j+1)=Table4c(:,j+1)+Table4cgl;
pqacumc=pqacumc+pqcgl;
for ii=nr+1:length(Y)
X(ii)=X(ii)+q(CG(ii,1));Y(ii)=Y(ii)+q(CG(ii,2));
end
X1(:,j)=X;Y1(:,j)=Y;
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ);L=L';seno=seno';coseno=coseno';
L1(:,j)=L;seno1(:,j)=seno;coseno1(:,j)=coseno;
Dtacc(j+1)=Dtacc(j)+q(pDt);
derg=abs(Dtacc(j+1))/Ht; %Total Global Drift
if NIsolat>0,mbr_isol=find(Table1(:,1)==1.3,1);...
    Disol(j+1)=Disol(j)+abs(q(VC(mbr_isol,4)));end
%Stop loop when total global drift beyond the limit
if NIsolat==0 && abs(derg)>=maxderg
    fprintf(' Colapso por Deriva global>=%4.2f \n',maxderg);
break
end
[Drift]=deriva(Y0,qacumc(1:np,j),np,CG,0);MaxDrift=max(Drift);
%Stop loop when total global drift beyond the limit
if MaxDrift>=LimitDrift
    fprintf(' Colapso por Deriva de Piso>= %4.2f porciento\n',LimitDrift);
break
end

    Table31(:,j)=Table3;
% Iteration_event0
    Iteration_Vy3 % Iteration to find the Base Shear yield
if graphMode==0
    Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,Dib)
end
% Table31(:,j)=Table3;
end

derg
while derg>=maxderg %To strong jumps in Dtacc
    j=j-1;
    Dtacc=Dtacc(1:j+1);Table31=Table31(:,1:j);
    %Vacc(j+1)=Vacc(j);Sac(j+1)=Sac(j);Sdc(j+1)=Sdc(j);
    Sd=Sd(1:j+1,:);Sa=Sa(1:j+1,:);%Sdcc=Sdcc(1:j+1);
    Vac=Vac(1:j+1,:);Dtacc=Dtacc(1:j+1,:);
X1=X1(:,1:j);Y1=Y1(:,1:j);

```

```

        L1=L1(:,1:j);seno1=seno1(:,1:j);coseno1=coseno1(:,1:j);
    derg=abs(Dtacc(end))/Ht
    end
    %Sacc=sum(Sa');
    if nmodos==1,Vacc=Vac';else Vacc=sum(Vac');end
    hold off
    if graphMode==0
        Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,max(1,Dib/10000))
    else
        Dibujo_Din2(j,Xn(:,nm),Yn(:,nm),NI,NJ,Ln(:,nm),...
        senon(:,nm),cosenon(:,nm),Table3,max(1,Dib/10000))
    end
    % beams=find(Y0(NI(VC(:,1)<=np))==Y0(NJ(VC(:,4)<=np)));
    %         Video

```

A2.2.2 Programa Initialization3

```

%Initialization3
%Initialization of variables, matrices and vectors
if exist('nmodos')==0%if not number of modes are defined nmodos is np
nmodos=np;
else
    nmodos=min(nmodos,np);
end
if exist('zeta1')==0
    zeta1=0.05;
end
zeta=zeta1;
if nmodos>1
    %Damping factor by Naoki (2003)
    for zz=2:nmodos
        zeta(zz,1)=1.4*zeta(zz-1,1);
    end
end
zetai=zeta;zetaj=zeta;
%Zero initialization
derg=0;
Qa=zeros(np,nmodos,1);
j=0;
cont1My=0;
Vac=zeros(1,nmodos);Vacc=0;
Dtac=zeros(1,nmodos);Dtacc=0;
Table40=zeros(mbr,2,nmodos);
Table4=zeros(mbr,2,nmodos);%[M(a),M(b)]
Table5=Table4;
Table4c=zeros(mbr,2);
Hinge=zeros(mbr,5);
Pa=zeros(mbr,nmodos);
Pac=zeros(mbr,1);Pac1=Pac;
pqacum=zeros(6,mbr,nmodos);
pqacumc=zeros(6,mbr);
Q2cg=zeros(mbr,6);
qacum=zeros(ngl,mbr,nmodos);
Mreal=zeros(mbr,2);
tetay=ones(mbr,2)*Inf;
Sdy=[];Sdcy=[];Sacy=[];
Vacy=[];Vaccy=[];
Dtacy=[];Dtaccy=[];
FFy=[];
qacumcy=[];qacumc=zeros(ngl,1);
Table2=zeros(mbr,6,nmodos);
Table2c=zeros(mbr,6);

```

```

Table20=zeros(mbr,6,nmodos);
Table3=zeros(mbr,12);
icon=0; iconc=0;
iconu=0;
senon=repmat(seno,1,nmodos);
cosenon=repmat(coseno,1,nmodos);
Ln=repmat(L,1,nmodos);
Xn=repmat(X,1,nmodos); Yn=repmat(Y,1,nmodos);
aux1=0; ji=0; qn=zeros(ngl,nmodos);
Disol=0;

```

A2.2.3 Programa cg_data3

```

% cg_data3
% Program to calculate Stiffness matrix of a Structure with non symmetric
% elements
% Program need the follow structure data:
% NI,NJ,X,Y,Y0,L,seno,coseno,CG,VC,ngl
%
%           Ing. David Mora
%           April-2015
j=1;DeltaV=0;
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Hinge,tetay,TableMfi]=...
    krigidez_ASCE41_2Mfi(ngl,Table1,Table2c(:, :, j),Table3,...
    Table4c(:, :, j),L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,...
    Pac,pqacumc,Q2cg,Hinge,tetay);
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3]=krigidez_brace_eq2(K,K3,ngl,Table1,...
    Table2(:, :, j),Table3,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,...
    Pac,L0,NJ,coseno0);
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableMfi,zetaj]=...
    krigidez_damper3(K,K3,ngl,Table1,Table2(:, :, j),Table3,L,seno,coseno,...
    VC,icon,iconu,iconc,j,Pac,L0,TableMfi,zetaj);
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3]=krigidez_isolator(K,K3,ngl,Table1,...
    Table2c(:, :, j),qacumc(:, j),Table3,VC,icon,iconu,iconc,j);

zeta(:,j)=zetaj;
%Generalized load and base shear vectors
[Q,V,Q2]=cargas_po(zeros(np,1),ngl,Fm,L,seno,coseno,VC);
qcg=K\Q; %Displacement in generalized vector coordinates
%.....
% Element Forces and Moments
[FFcg,pqcg]=fuerzas_0(K3,VC,qcg,Q2,seno,coseno);
Table2cg=FFcg;

in1=find(VC(VC(:,3))==0,4)==0; VC1=VC;qcg1=qcg;
if isempty(in1)==0, VC1(in1,4)=ngl+1;qcg1(ngl+1)=0;end
if size(L,1)==1, Table4cg=[[-qcg1(VC1(VC1(:,3))==0,4))./...
    L(VC1(:,3))==0]; (qcg1(VC1(VC1(:,3)~=0,3))), qcg1(VC1(:,6))];end
if size(L,2)==1, Table4cg=[[-qcg1(VC1(VC1(:,3))==0,4))./...
    L(VC1(:,3))==0]; (qcg1(VC1(VC1(:,3)~=0,3))), qcg1(VC1(:,6))];end
Pacg=FFcg(:,1);

[~,X,Y,L,seno,coseno]=Efecto_PD2(0,M,zeros(np,1),DeltaV,qcg,X,Y...
,Y0,NI,NJ,CG,nr,j); %Static loads and deformed coordinates
L=L';seno=seno';coseno=coseno';
if cont1My==0 || cont1My>=3
    X1cg=X;Y1cg(:,j)=Y;% For Video function
Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,1)
end
Q2cg=Q2;
Fm(1:size(Fm,1),2)=zeros(size(Fm,1),1);
% Table2c(:, :, j)=Table2cg;Table4c(:, :, j)=Table4cg;j=0;

```

```
Table2c(:, :, j)=Table2c; Table4c(:, :, j)=Table4c; j=0;
Table2cg1=Table2cg; Table4cg1=Table4cg; qcgl=qcg; pqcg1=pqcg; Pacg1=Pacg;
```

A2.2.4 Programa espe_cap3

```
function [FI,T,gama,alfa,OM,KL]=espe_cap3(K,M,Mt,np,ngl,nmodos)
% Programa que determina el Espectro de Capacidad a partir de la Curva
% de Capacidad Sismica Resistente
%
%          Dr. Roberto Aguiar e Ing. David Mora
%          Abril de 2014
%.....
% K      Matriz de rigidez total de orden ngl por ngl
% M      Matriz de masas de orden np por np
% Mt     Masa total igual a suma de las masas
% np     Numero de pisos
% ngl    Numero de grados de libertad
% Dt     Desplazamiento en el tope es un solo valor
% Vac    Cortante basal es un solo valor
% Sdd    Desplazamiento espectral
% Saa    Aceleracion Espectral
% fil    Regresa el primer modo de vibración
%.....
kaa=K(1:np,1:np); kab=K(1:np,np+1:ngl); kbb=K(np+1:ngl,np+1:ngl); kba=kab';
KL=kaa-kab*kbb^-1*kba; % Matriz de rigidez lateral de orden np por np
[T,FI,OM]=orden_eig(KL,M);
% if isreal(T)==0
%     e=1
% end
gama=zeros(nmodos,1); alfa=gama;
% Modo de vibracion normalizado a 1 en el ultimo piso
FI=FI./repmat(FI(np,:),np,1);
J=ones(np,1);
for i=1:min(size(FI,2),nmodos)
    fi_n=FI(:,i);
    Ln=(fi_n'*M*J); Mn=(fi_n'*M*fi_n);
    gama(i)=Ln/Mn; %gama=Ln/Mn Factor de participacion modal
    %alfa=Mn_a/Mt; sn=gama*M*fi_n    alfa=Ln.^2/Mt/Mn;
    alfa(i)=(fi_n'*M*J)^2/(Mt*(fi_n'*M*fi_n));
end
% end
```

A2.2.5 Programa CQC

```
function [ro]=CQC(r,zeta,OM)
% Programa para combinar resultados de modos de vibración
%          Abril de 2015
%          David Mora
N=length(r);
ro=0;
for i=1:N
    for n=1:N
        betain=OM(i)/OM(n);
        pin=(8*sqrt(zeta(i)*zeta(n))*(betain*zeta(i)+zeta(n))*...
            betain^(3/2))/((1-betain^2)^2+4*zeta(i)*zeta(n)*betain*...
            (1+betain^2)+4*(zeta(i)^2+zeta(n)^2)*betain^2);
        ro=ro+pin*r(i)*r(n);
    end
end
```

```

    end
end
ro=ro^.5;
if max(r)<abs(min(r))
    ro=-ro;
end

```

A2.2.6 Programa Iteration_Vy3

```

%Iteration_Vy3
% Iteration to find the Base Shear where the first element yield
%                               David Mora
if icon>iconi && cont1My<3+iconi
    cont1My=cont1My+1;
end
if cont1My==1
    mbr=size(Table20,1);nmodos=size(qn,2);
    cont1My=cont1My+1;
    DeltaV=DeltaV/100;
    if j-2<=1,cont1My=3;else
        Table2=Table2(:, :, :, 1:j-2);Table4=Table4(:, :, :, 1:j-2);
        Table2c=Table2c(:, :, 1:j-2);Table4c=Table4c(:, :, 1:j-2);
        tetay=ones(mbr,2)*Inf;Hinge=zeros(mbr,5);
        Vac=Vac(1:j-1, :);Dtac=Dtac(1:j-2, :);
        qacum(:, nm)=qacum(:, nm)-qn(:, nm);Qa=Qa(:, :, 1:j-2);%Pac=Pac(:, 1, 1:j-2);
        Table3=Table3i;icon=iconi;iconu=0;iconc=0;
        if size(zeta,2)>1,zeta=zeta(:, 1:j-1);end
        j=j-3;
    end
end
if cont1My==3
    cont1My=cont1My+1;
    DeltaV=DeltaV*10;
    Sdy=Sd(j+1, :);Vacy=Vac(j+1, :),Dtacy=Dtac(j+1, :),
    FFy=FF;Vaccy=sum(Vacy), jy=j,
    %Sdycc=Sdcc(j+1);%Cycle immediately after the yield of the structure
    Vac(j+1, :)=Vac(j, :);Dtac(j+1, :)=Dtac(j, :);qacumcy=qacumc;
    Table3Col=ceil(find(Table3==iconi+1)/size(FF,1));Dtaccy=Dtacc(j);
    Element=find(Table3==iconi+1)-(Table3Col-1)*size(FF,1),pause(1)
    input('Yield instant, enter')
end
end

```

A2.3 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN Pushover_4

No se colocarán los códigos de programas ya puestos con anterioridad.

A2.3.1 Programa Pushover_4

```

% Pushover_4
% Program to calculate Capacity Curve of a Structure with non symmetric

```

```

% elements
% Program need the follow structure data:
% NI,NJ,X,Y,Y0,L,seno,coseno,CG,VC,ngl,DeltaV,np,Fm
%           Ing. David Mora and Dr. Roberto Aguiar
%           June-2015

Vhis=0;if exist('Vo')==0,Vo=0:3:100000;Vhis=1;jV=1;end
DeltaV=Vo(2:end)-Vo(1:end-1);
NDissip=sum(Table1(:,1)==1.2);

if exist('Dib')==0,Dib=10;end
pDt=np;%Floor to Top Displacement to capacity spectrum
graphMode=0;%Number of Mode to the graphics
Ht=max(Y); %Total Height
mbr=length(L); %Members
[Mt,M]=masas(Fm,NI,Y,L,np); % Report Mass Matrix M and Total Mass Mt
%.....max(np/2,1.5)

Initialization4
cg_data4
%.....Start Pushover.....
while j>=0 && j<=length(DeltaV)-1 %Start infinite loop, stop when collapse
    j=j+1;
    %Option without Vo of data, creates cyclic loads_____
    if Vhis==1 && j>3 && abs(Vacc(end))>Vsup/8,Vhis=2;jV(end+1)=j;
    DeltaV(j:j+10)=-.001*DeltaV(j:j+10);DeltaV(j+11:end)=-DeltaV(j+11:end);
    end,
    if Vhis==2 && j-jV(end)>10 && j>2 && ((Dtacc(j)>0 && ...
        Dtacc(jV(end))<0 && abs(Dtacc(j))>abs(Dtacc(jV(end)))) || ...
        (Dtacc(j)<0 && Dtacc(jV(end))>0 && ...
        abs(Dtacc(j))>abs(Dtacc(jV(end)))) && ...
        ((Vacc(j)>0 && Vacc(jV(end))<0 && ...
        abs(Vacc(j))>abs(Vacc(jV(end)))+Vsup/24) || ...
        (Vacc(j)<0 && Vacc(jV(end))>0 && ...
        abs(Vacc(j))>abs(Vacc(jV(end)))+Vsup/24)),
    DeltaV(j:j+10)=-.001*DeltaV(j:j+10);
    DeltaV(j+11:end)=-DeltaV(j+11:end);jV(end+1)=j;
    end
    if NDissip>0 && ccoo==0 && Vhis==2 && length(jV)>3 && ...
        (sum(Table3(Table1(:,5)<4,2))>0 || ...
        sum(Table3(Table1(:,5)<4,1))>0),ccoo=1;
        ld=min(length(Dtacc),length(gama));Sdcc=Dtacc(1,1:ld)./gama(1,1);
        Sacc=Vacc(1,1:ld)/Mt./alfa(1,1);
        jV(end)=min(jV(end),length(Sdcc));en=max(0,jV(end)-length(Sdcc));
        in=en+numA;ljV=length(jV);
        [ED,~,~]=polygeom(Sdcc(jV(1jV-in):jV(1jV-en))',...
            Sacc(jV(1jV-in):jV(1jV-en))');ED=ED(1),
        [EE,~,~]=polygeom([0;max(abs(Sdcc(jV(max(1jV-in,1))):...
            jV(max(1jV-en,1)))));max(abs(Sdcc(jV(max(1jV-in,1))):...
            jV(max(1jV-en,1)))));[0;max(Sacc(abs(Sdcc)==...
            max(abs(Sdcc(jV(max(1jV-in,1)):jV(max(1jV-en,1))))))];0]);...
        EE=EE(1),zeta_eq=ED(1)/EE(1)/4/pi,...
        zeta_ray_eq=zeta_eq+zeta(1,1),jV,zeta_ray_eqDiss=zeta_ray_eq;
    Stop=input('Stop=');
    if Stop==1
break
        end
        end
        %
        iiP=find(max(abs(Pabr(ipos_brace,:))),1,'First');
        Pabr=[Pabr(:,iiP:end),Table2c(:,1,j)];
        ii=find(max(abs(Momi)),1,'First');id=find(max(abs(Momd)),1,'First');
        Momi=[Momi(:,ii:end),Table2c(:,3,j)];
        Momd=[Momd(:,id:end),Table2c(:,6,j)];
        Pmomi=[Pmomi(:,ii:end),Table2c(:,1,j)];
        Pmomd=[Pmomd(:,id:end),Table2c(:,4,j)];

```

```

[K, icon, iconu, iconc, Table3, K3, tetay(:, :, j+1), Momi, Momd, TableMfi]=...
    krigidez_ASCE41_21(ngl, Table1, Table2c(:, :, j), ...
        Table3, Table4c(:, :, j), L, seno, coseno, VC, icon, iconu, iconc, j, ...
        Pac, pqacumc, Q2cg, tetay(:, :, j), Momi, Momd, Pmomi, Pmomd);
[K, icon, iconu, iconc, Table3, K3, TableFDelta, Pabr, TableMt_Fd]=...
    krigidez_brace_eq3(K, K3, ngl, Table1, Table2c(:, :, j), Table3, L, ...
seno, coseno, VC, icon, iconu, iconc, j, Pabr, L0, NJ, coseno0);
[K, icon, iconu, iconc, Table3, K3, Momi, Momd, TableMfi]=...
    krigidez_damper31(K, K3, ngl, Table1, Table2c(:, :, j), Table3, L, seno, ...
        coseno, VC, icon, iconu, iconc, j, Pac, L0, Momi, Momd, Pmomi, Pmomd, ...
TableMfi, qacumc(:, j), seno0);

    if j==1; TableMfi0=TableMfi; TableFDelta0=TableFDelta; ...
TableMt_Fd0=TableMt_Fd; iconi=icon; Table3i=Table3; end,
    if j==2; iconi=icon; Table3i=Table3; end
    detK=det(K); %Stop loop if the matrix is singular
if (detK<=1e-10 && detK>=-1e-10) || isnan(detK)==1
fprintf(' Singular Stiffness Matrix --> Collapse unstable structure\n');
break
end
    [FI(:, :, j), T(:, j), gama(:, j), alfa(:, j), OM(:, j)]=...
espe_cap3(K, M, Mt, np, ngl, nmodos);
TableMt_Fd(:, 1)=TableMt_Fd(:, 1)/T(end, 1);
    for nm=1:nmodos %Loop for each Mode
    if isreal(T(:, j))==0, T(:, j)=max(real(T(:, j)), imag(T(:, j))); ...
        OM(:, j)=max(real(OM(:, j)), imag(OM(:, j))); end
[Q, V, Q2]=cargas_po(Qa(:, nm, j), ngl, Fm, L, seno, coseno, VC);
qn(:, nm)=K\Q; %Displacement in generalized vector coordinates
Dt=qn(pDt, nm); %Roof displacement
Vac(j+1, nm)=Vac(j, nm)+V; Dtac(j+1, nm)=Dtac(j, nm)+Dt; %Accumulated values
%.....Capacity Spectrum.....
Sd(j+1, nm)=abs(Dtac(j+1, nm)/gama(nm, j));
Sa(j+1, nm)=abs(Vac(j+1, nm)/(Mt*alfa(nm, j)));
%.....
[FF(:, :, nm), pqj]=fuerzas_0(K3, VC, qn(:, nm), Q2, senon(:, nm), cosenon(:, nm));
qacum(:, nm)=qacum(:, nm)+qn(:, nm);
%
[FFreal(:, :, nm, j)]=fuerzas_0(K3, VC, qacum(:, nm), Q2cg, senon(:, nm), ...
%
    cosenon(:, nm)); % Element Forces and Moments with accumulated q
pqacum(:, :, nm)=pqacum(:, :, nm)+pqj;

Table2(:, :, nm, j+1)=FF(:, :, nm)+Table2(:, :, nm, j);
in1=find(VC(VC(:, 3))==0, 4)==0; VC1=VC; qn1=qn(:, nm);
if isempty(in1)==0, VC1(in1, 4)=ngl+1; qn1(ngl+1)=0; end
if size(L, 1)==1, Table4(:, :, nm, j+1)=Table4(:, :, nm, j)+...
    [[-qn1(VC1(VC1(:, 3))==0, 4))./L(VC1(:, 3))==0]; ...
    (qn1(VC1(VC1(:, 3)~=0, 3)))] , qn1(VC1(:, 6))]; end
if size(L, 2)==1, Table4(:, :, nm, j+1)=Table4(:, :, nm, j)+...
    [[-qn1(VC1(VC1(:, 3))==0, 4))./L(VC1(:, 3))==0]; ...
    (qn1(VC1(VC1(:, 3)~=0, 3)))] , qn1(VC1(:, 6))]; end

[Qa(:, nm, j+1), Xn(:, nm), Yn(:, nm), Ln(:, nm), senon(:, nm), cosenon(:, nm)] ...
    =Efecto_PD2(gama(nm, j), M, FI(:, nm, j), DeltaV(j), qn(:, nm) ...
, Xln(:, nm, j), Yln(:, nm, j), Y0, NI, NJ, CG, nr, j);

Xln(:, nm, j+1)=Xn(:, nm); Yln(:, nm, j+1)=Yn(:, nm); % For Video function
    if nm==graphMode
        Dibujo_Din2(j, Xn(:, nm), Yn(:, nm), NI, NJ, Ln(:, nm), ...
            senon(:, nm), cosenon(:, nm), Table3, Dib)
    end
end
end
%-----
%
%-----
zeta;
for rrf=1:mbr
    for rrc=1:size(Table2, 2)

```



```

        aux=zeros(nmodos,1);
        for xx=1:nmodos,aux(xx,1)=Table2(rrf,rrc,xx,j+1);end
        Table2c(rrf,rrc,j+1)=CQC(aux,zeta,OM(:,j));
aux=zeros(nmodos,1);
        for xx=1:nmodos,aux(xx,1)=pqacum(rrc,rrf,xx);end
        pqacumc(rrc,rrf)=CQC(aux,zeta,OM(:,j));
end
        for rrc=1:size(Table4,2)
            aux=zeros(nmodos,1);
            for xx=1:nmodos,aux(xx,1)=Table4(rrf,rrc,xx,j+1);end
            Table4c(rrf,rrc,j+1)=CQC(aux,zeta,OM(:,j));
        end
    end
    Pac=Table2c(:,1,j+1);
    for rrf=1:ngl
        q(rrf,1)=CQC(qn(rrf,:),zeta,OM(:,j));
    end

%Sum of gravity responses
    if j>=2
        qcg1=zeros(length(qcg1),1);%Pacg1=zeros(length(Pacg1),1);
        Table2cg1=zeros(size(Table2cg1,1),size(Table2cg1,2));
        Table4cg1=zeros(size(Table4cg1,1),size(Table4cg1,2));
        pqcg1=zeros(size(pqcg1,1),size(pqcg1,2));
    else
        qcg1=qcg;%Pacg1=zeros(length(Pacg1),1);
        Table2cg1=Table2cg;
        Table4cg1=Table4cg;
        pqcg1=pqcg;
    end
    q=real(q)+qcg1;
    qacumc(:,j+1)=qacumc(:,j)+q;
    Pac=Pac+Pacg1;
    Table2c(:,j+1)=Table2c(:,j+1)+Table2cg1;
    Table4c(:,j+1)=Table4c(:,j+1)+Table4cg1;
    pqacumc=pqacumc+pqcg1;

    X(nr+1:end)=X(nr+1:end)+q(CG(nr+1:end,1));
    Y(nr+1:end)=Y(nr+1:end)+q(CG(nr+1:end,2));
X1(:,j)=X;Y1(:,j)=Y;
    [L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ);L=L';seno=seno';coseno=coseno';
    L1(:,j)=L;seno1(:,j)=seno;coseno1(:,j)=coseno;
Dtacc(j+1)=Dtacc(j)+q(pDt);
    if nmodos==1,Vacc=Vac';else Vacc=sum(Vac');end
    derg=abs(Dtacc(j+1))/Ht; %Total Global Drift
    if abs(derg)>=0.05%Stop loop when total global drift beyond the limit
fprintf(' Colapso por Deriva global>=0.05\n');
    break
    end

    Table31(:,j)=Table3;Iteration_event
    Iteration_Vy4 % Iteration to find the Base Shear yield

    [Drift(j,:)] = deriva(Y0,qacumc(1:np,j),np,CG,0);MaxDrift=max(Drift);
%     if MaxDrift>=2%Stop loop when total global drift beyond the limit
%     fprintf(' Colapso por Deriva de Piso>=2 por ciento\n');
% break
%     end
%     if graphMode==0
        Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,Dib)
    end
end

derg
maxderg=max(abs(Dtacc/Ht))
while derg>=0.05 %To strong jumps in Dtacc

```

```

        j=j-1;
        Dtacc=Dtacc(1:j+1);Vacc=Vacc(1:j+1);Table31=Table31(:, :, 1:j);
        %Vacc(j+1)=Vacc(j);Sac(j+1)=Sac(j);Sdc(j+1)=Sdc(j);
        Sd=Sd(1:j+1, :);Sa=Sa(1:j+1, :);
        Vac=Vac(1:j+1, :);Dtac=Dtac(1:j+1, :);
        X1=X1(:, 1:j);Y1=Y1(:, 1:j);
        L1=L1(:, 1:j);senol=senol(:, 1:j);cosenol=cosenol(:, 1:j);
        derg=abs(Dtacc(end))/Ht
    end

hold off
j1=min(j, size(Table31, 3));
if graphMode==0
    Dibujo_Din2(j, X1(:, end), Y1(:, end), NI, NJ, L1(:, end), ...
        senol(:, end), cosenol(:, end), Table31(:, :, j1), max(1, Dib/10000))
else
    Dibujo_Din2(j, Xn(:, nm), Yn(:, nm), NI, NJ, Ln(:, nm), senon(:, nm), ...
        cosenon(:, nm), Table31(:, :, j1), max(1, Dib/10000))
end

Voo=cumsum(DeltaV);plot(real(Dtacc), 'r'), hold on,
plot(Voo(1:min(length(Voo), length(Dtacc)))/1000, 'b') ...
    , legend('Dtacc', 'Vo/SF');input('enter')
% hold off, cometd(Dtacc, Vacc);
close(gcf)
CapCur
%      Video

```

A2.3.2 Programa Initialization4

```

%Initialization4
%Initialization of variables, matrices and vectors
if exist('nmodos')==0%if not number of modes are defined nmodos is np
nmodos=np;
else
    nmodos=min(nmodos, np);
end
if exist('zetal')==0
    zetal=0.05;
end
zeta=zetal;
if nmodos>1
    %Damping factor by Naoki (2003)
    for zz=2:nmodos
        zeta(zz, 1)=1.4*zeta(zz-1, 1);
    end
end
zetai=zeta;zetaj=zeta;
%Zero initialization
derg=0;
Qa=zeros(np, nmodos, 5000);
j=0;
cont1My=0;
Vac=zeros(1, nmodos);Vacc=0;
Dtac=zeros(1, nmodos);Dtacc=0;
% Table40=zeros(mbr, 2, nmodos);
Table4=zeros(mbr, 2, nmodos, 5000);%[M(a), M(b)]
Table5=Table4;
Table4c=zeros(mbr, 2, 5000);
Hinge=zeros(mbr, 5);

```

```

Pa=zeros(mbr,nmodos);Pabr=Pa;
Pac=zeros(mbr,1);
pqacum=zeros(6,mbr,nmodos);
pqacumc=zeros(6,mbr);
Q2cg=zeros(mbr,6);
qacum=zeros(ngl,mbr,nmodos);
Mreal=zeros(mbr,2);
tetay=ones(mbr,2)*Inf;
Sdy=[];Sdcy=[];Sacy=[];
Vacy=[];Vaccy=[];
Dtacy=[];Dtaccy=[];
FFy=[];
qacumcy=[];qacumc=zeros(ngl,1);
Table2=zeros(mbr,6,nmodos,5000);
Table2c=zeros(mbr,6,5000);
% Table20=zeros(mbr,6,nmodos);
Table3=zeros(mbr,12);Table3l=zeros(mbr,12,5000);
icon=0;
iconu=0;iconc=0;
senon=repmat(seno,1,nmodos);
cosenon=repmat(coseno,1,nmodos);
Ln=repmat(L,1,nmodos);
Xln=repmat(X,1,nmodos);Yln=repmat(Y,1,nmodos);
Momi=zeros(mbr,1);Momd=zeros(mbr,1);Pmomi=Momi;Pmomd=Momd;
%braces element ubication index
ibrace=(Table1(:,1)==1.1);ipos_brace=find(ibrace==1);
auxl=0;ji=1;
ccoo=0;jV=1; numA=2;

```

A2.3.3 Programa cg_data4

```

% cg_data4
% Program to calculate Capacity Curve of a Structure with non symmetric
% elements
% Program need the follow structure data:
% NI,NJ,X,Y,Y0,L,seno,coseno,CG,VC,ngl
% Ing. David Mora and Dr. Roberto Aguiar
% April-2015
j=1;
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,tetay,Momi,Momd]=...
krigidez_ASCE41_21(ngl,Table1,Table2c(:,:,j),Table3,Table4c(:,:,j)...
,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pac,pqacumc,Q2cg,tetay,...
Momi,Momd,Pmomi,Pmomd);
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableFDelta,Pabr]=...
krigidez_brace_eq3(K,K3,ngl,Table1,Table2c(:,:,j),Table3,L,seno,...
coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,Pabr,L0,NJ,coseno0);
cgrav=1;
[K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Momi,Momd]=krigidez_damper31(K,K3,ngl...
,Table1,Table2c(:,:,j),Table3,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,iconc,j,...
Pac,L0,Momi,Momd,Pmomi,Pmomd,zeros(mbr,12),zeros(ngl,1),seno0);
cgrav=0;
zeta(:,j)=zetaj;
[Q,V,Q2]=cargas_po(zeros(np,1),ngl,Fm,L,seno,coseno,VC);
qcg=K\Q; %Displacement in generalized vector coordinates
%.....
[FFcg,pqcg]=fuerzas_0(K3,VC,qcg,Q2,seno,coseno);%Element Forces & Mom
Table2cg=FFcg;
inl=find(VC(VC(:,3))==0,4)==0);VC1=VC;qcgl=qcg;
if isempty(inl)==0,VC1(inl,4)=ngl+1;qcgl(ngl+1)=0;end
if size(L,1)==1,Table4cg=[-qcgl(VC1(VC1(:,3))==0,4))./...
L(VC1(:,3))==0)'];(qcgl(VC1(VC1(:,3)~=0,3)))],qcgl(VC1(:,6))];end
if size(L,2)==1,Table4cg=[-qcgl(VC1(VC1(:,3))==0,4))./...

```

```

L(VC1(:,3)==0);(qcg1(VC1(VC1(:,3)~=0,3))],qcg1(VC1(:,6))];end
Pacg=FFcg(:,1);

[~,X,Y,L,seno,coseno]=Efecto_PD2(0,M,zeros(np,1),DeltaV,qcg,X,...
Y,Y0,NI,NJ,CG,nr,j); %Static loads and deformed coordinates
L=L';seno=seno';coseno=coseno';
if cont1My==0 || cont1My>=3
    X1cg=X;Y1cg=Y;% For Video function
Dibuj_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,1)
end
Q2cg=Q2;
Fm(1:size(Fm,1),2)=zeros(size(Fm,1),1);
% Table2c(:, :, j)=Table2cg;Table4c(:, :, j)=Table4cg; j=0;
% Table2c(:, :, j)=Table2cg;Table4c(:, :, j)=Table4cg;
j=0;
Table2cg1=Table2cg;Table4cg1=Table4cg;qcg1=qcg;pqcg1=pqcg;Pacg1=Pacg;
% NDissip=sum(Table1(:,5)>=4);
if NDissip~=0,
Table2cg(Table1(:,5)>=4,:)=zeros(NDissip,size(Table2cg,2));
end
[~,T1,gama1,alfa1,~]=espe_cap3(K,M,Mt,np,ngl,nmodos);
Vsup=EspectroD(min(find(EspectroD(:,1)>T1(1,1)),2)*Mt*alfa1(1,1),

```

A2.3.4 Programa polygeom

```

function [ geom, iner, cpmo ] = polygeom( x, y )
%POLYGEOM Geometry of a planar polygon
%
% POLYGEOM( X, Y ) returns area, X centroid,
% Y centroid and perimeter for the planar polygon
% specified by vertices in vectors X and Y.
%
% [ GEOM, INER, CPMO ] = POLYGEOM( X, Y ) returns
% area, centroid, perimeter and area moments of
% inertia for the polygon.
% GEOM = [ area X_cen Y_cen perimeter ]
% INER = [ Ixx Iyy Ixy Iuu Ivv Iuv ]
% u,v are centroidal axes parallel to x,y axes.
% CPMO = [ I1 ang1 I2 ang2 J ]
% I1,I2 are centroidal principal moments about axes
% at angles ang1,ang2.
% ang1 and ang2 are in radians.
% J is centroidal polar moment. J = I1 + I2 = Iuu + Ivv

% H.J. Sommer III - 02.05.14 - tested under MATLAB v5.2
%
% sample data
% x = [ 2.000 0.500 4.830 6.330 ]';
% y = [ 4.000 6.598 9.098 6.500 ]';
% 3x5 test rectangle with long axis at 30 degrees
% area=15, x_cen=3.415, y_cen=6.549, perimeter=16
% Ixx=659.561, Iyy=201.173, Ixy=344.117
% Iuu=16.249, Ivv=26.247, Iuv=8.660
% I1=11.249, ang1=30deg, I2=31.247, ang2=120deg, J=42.496
%
% H.J. Sommer III, Ph.D., Professor of Mechanical Engineering,
% The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802
% (814)863-8997 FAX (814)865-9693 hjs1@psu.edu www.me.psu.edu/sommer/

% begin function POLYGEOM

```

```

% check if inputs are same size
if ~isequal( size(x), size(y) ),
    error( 'X and Y must be the same size' );
end

% number of vertices
[ x, ns ] = shiftdim( x );
[ y, ns ] = shiftdim( y );
[ n, c ] = size( x );

% temporarily shift data to mean of vertices for improved accuracy
xm = mean(x);
ym = mean(y);
x = x - xm*ones(n,1);
y = y - ym*ones(n,1);

% delta x and delta y
dx = x( [ 2:n 1 ] ) - x;
dy = y( [ 2:n 1 ] ) - y;

% summations for CW boundary integrals
A = sum( y.*dx - x.*dy )/2;
Axc = sum( 6*x.*y.*dx - 3*x.*x.*dy + 3*y.*dx.*dx + dx.*dx.*dy )/12;
Ayc = sum( 3*y.*y.*dx - 6*x.*y.*dy - 3*x.*dy.*dy - dx.*dy.*dy )/12;
Ixx = sum( 2*y.*y.*y.*dx - 6*x.*y.*y.*dy - 6*x.*y.*dy.*dy ...
    - 2*x.*dy.*dy.*dy - 2*y.*dx.*dy.*dy - dx.*dy.*dy.*dy )/12;
Iyy = sum( 6*x.*x.*y.*dx - 2*x.*x.*x.*dy + 6*x.*y.*dx.*dx ...
    + 2*y.*dx.*dx.*dx + 2*x.*dx.*dx.*dy + dx.*dx.*dx.*dy )/12;
Ixy = sum( 6*x.*y.*y.*dx - 6*x.*x.*y.*dy + 3*y.*y.*dx.*dx ...
    - 3*x.*x.*dy.*dy + 2*y.*dx.*dx.*dy - 2*x.*dx.*dy.*dy )/24;
P = sum( sqrt( dx.*dx + dy.*dy ) );

% check for CCW versus CW boundary
if A < 0,
    A = -A;
    Axc = -Axc;
    Ayc = -Ayc;
    Ixx = -Ixx;
    Iyy = -Iyy;
    Ixy = -Ixy;
end

% centroidal moments
xc = Axc / A;
yc = Ayc / A;
Iuu = Ixx - A*yc*yc;
Ivv = Iyy - A*xc*xc;
Iuv = Ixy - A*xc*yc;
J = Iuu + Ivv;

% replace mean of vertices
x_cen = xc + xm;
y_cen = yc + ym;
Ixx = Iuu + A*y_cen*y_cen;
Iyy = Ivv + A*x_cen*x_cen;
Ixy = Iuv + A*x_cen*y_cen;

% principal moments and orientation
I = [ Iuu  -Iuv ;
    -Iuv  Ivv ];
[ eig_vec, eig_val ] = eig(I);
I1 = eig_val(1,1);
I2 = eig_val(2,2);
ang1 = atan2( eig_vec(2,1), eig_vec(1,1) );
ang2 = atan2( eig_vec(2,2), eig_vec(1,2) );

```

```

% return values
geom = [ A x_cen y_cen P ];
iner = [ Ixx Iyy Ixy Iuu Iuv Iuv ];
cpmo = [ I1 ang1 I2 ang2 J ];

% end of function POLYGEOM

```

A2.3.5 Programa krigidez_ASCE41_21

```

function [SS,icon,iconu,iconc,Table3,K3,tetay,Momi,Momd,TableMfi]=...
    krigidez_ASCE41_21 (ngl,Table1,Table2,Table3,Table4,L,seno,coseno,...
    VC,icon,iconu,iconc,jj,Pa,pq,Q2cg,tetay,Momi,Momd,Pmomi,Pmomd)
% Program to calculate the siffness matrix of a Plane Frame with no
% symmetric elements
%
%                               Pushover
%                               Ing. David Mora
%                               Jun-2015
%-----
% [SS,icon,iconu,iconc,Table3,K3,tetay,Momi,Momd,TableMfi]=...
% krigidez_ASCE41_21 (ngl,Table1,Table2,Table3,Table4,L,seno,coseno,...
% VC,icon,iconu,iconc,jj,Pa,pq,Q2cg,tetay,Momi,Momd,Pmomi,Pmomd)
%-----
% ngl      Número de grados de libertad
% Table1= Matrix containing the type of section in the initial, medium and
%          final of each element.
%          Table1=[Section1 Section1 Section1]
% Table2 Six x mbr Matrix(mbr=number of elements).
%          [N V M N' V' M'
%           N V M N' V' M'
%           : : : : : :
%           N V M N' V' M'] -->(Axial Shear y Moment)
% Table3 Eight x mbr Matrix(mbr=number of elements).
%          1 Column instant to My in initial node.
%          2 Column instant to My in final node.
%          3 Column instant to Mu in initial node.
%          4 Column instant to Mu in final node.
%          5 Column damage sequence to My in initial node.
%          6 Column damage sequence to My in final node.
%          7 Column damage sequence to Mu in initial node.
%          8 Column damage sequence to Mu in final node.
% Table4 Two x mbr Matrix(mbr=number of elements).
%          1 Column Ultimate rotation accumulated in initial node.
%          2 Column Ultimate rotation accumulated in final node.
% L      Vector contining lengths elements
% seno  Vector contining sine elements
% coseno Vector contining cosine elements
% VC    Elements Placement Vectors Matrix
% icon  My sequence counter
% iconu Mu sequence counter
% jj    Cycle Number
% Pa    Axial force accumulated Matrix in intial and final node of elements
% pq    Accumulated deformation in each dof by element.
% Q2cg  Matrix with fixed end actions, by element.
% Hinge Matrix containing:
%       [Plstic length Ni,Plastic length Nj,beta_a,beta_o,beta_b]
%       where beta are shear deformation coefficient, by element.
% tetay Plastic rotation reached in each node, by element.
% SS    Structure siffness matrix
%
mbr=length(L); SS=zeros(ngl);TableMfi=zeros(mbr,12);

```

```

K3=zeros(6,6,mbr);
ST1=size(Table1,2)/3;
for i=1:mbr
if Table1(i,1)~=1.1 && Table1(i,1)~=1.2
    tetayi=tetay(i,1);tetayj=tetay(i,2);
    lon=L(i);sen=seno(i);cosen=coseno(i);
    tetai=abs(Table4(i,1));tetaj=abs(Table4(i,2));
    Mi=-Table2(i,3);Mj=Table2(i,6);
    Vi=abs(Table2(i,2));Vj=abs(Table2(i,5));
if (sen>=-.707106 && sen<=.707106)
    [ai,bi,ci,tetayi,~,EIya,Mpi,pi_]=Momento_Rotacion_ASCE41B(...
        Table1(i,1:ST1),lon,Mi,tetai,tetayi,Vi);
    [~,~,~,~,EAo,EIo,~]=Momento_Rotacion_ASCE41B(...
        Table1(i,ST1+1:ST1*2),lon,0,0,0,0);
    [aj,bj,cj,tetayj,~,EIyb,Mpj,pj]=Momento_Rotacion_ASCE41B(...
        Table1(i,ST1*2+1:ST1*3),lon,Mj,tetaj,tetayj,Vj);
else
    [ai,bi,ci,tetayi,~,EIya,Mpi,pi_]=Momento_Rotacion_ASCE41C(...
        Table1(i,1:ST1),lon,Mi,Pa(i),tetai,tetayi,Vi);
    [~,~,~,~,EAo,EIo,~]=Momento_Rotacion_ASCE41C(...
        Table1(i,ST1+1:ST1*2),lon,0,Pa(i),0,0,0);
    [aj,bj,cj,tetayj,~,EIyb,Mpj,pj]=Momento_Rotacion_ASCE41C(...
        Table1(i,ST1*2+1:ST1*3),lon,Mj,Pa(i),tetaj,tetayj,Vj);
end
Mreal=[Mi,Mj];
[Lpa,Lo,Lpb]=PlasticHinge2(lon,Mreal,Mpi,Mpj);
Mui=(ai/Lpa)*EIya*pi_+Mpi;
Muj=(aj/Lpb)*EIyb*pj+Mpj;
%Weigth:
[~,~,G,A_f,]=Geom(Table1(i,:));

%Hysteretic Curves of elements extremes
[EIa,EAa,Momi(i,:)]=...
    HisteresisMom_curv_BiS(Table1(i,1:ST1),Momi(i,:),Pmomi(i,:),pi_,0);
[EIb,EAa,Momd(i,:)]=...
    HisteresisMom_curv_BiS(Table1(i,ST1*2+1:ST1*3),Momd(i,:),Pmomd(i,:),pj,0);
%-----
%i linear y j linear
%    EIa=EIya;EIb=EIyb;
%-----
%i nonlinear
if EIa<EIya
if Table3(i,1)==0
    icon=icon+1;
    Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=jj;
end
end
%-----
%j nonlinear
if EIb<EIyb
if Table3(i,2)==0
    icon=icon+1;
    Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=jj;
end
end
EIIm=(EIa*Lpa+EIo*Lo+EIb*Lpb)/lon;
beta=6*EIIm/(A_f*G*lon^2);
beta_a=beta;beta_o=beta;beta_b=beta;
tetay(i,:)=[tetayi,tetayj];
%-----
+++++
if (Table3(i,5)~=0 || Table3(i,6)~=0) || (tetai>tetayi+bi ...
    || tetaj>tetayj+bj)
if tetai>tetayi+bi || Table3(i,5)~=0
if Table3(i,5)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,11)=iconu;Table3(i,5)=jj;end
Momi(i,end)=Inf;
T12=[0    1/lon    0    0    -1/lon    1; %Transformation Matrix from 1 to 2

```

```

-1 0 0 1 0 0];
K1=[(6*EIB*EIo)/(lon*(EIB+EIo)) 0
0 (EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo+EAa*EAo*Lpb+EAb*EAo*Lpa)];
end
if tetaj>tetayj+bj || Table3(i,6)~=0
if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;Table3(i,12)=iconu;Table3(i,6)=jj;
end
Momd(i,end)=Inf;
T12=[0 1/lon 1 0 -1/lon 0; %Transformation Matrix from 1 to
-1 0 0 1 0 0];
K1=[(6*EIA*EIo)/(lon*(EIA+EIo)) 0
0 (EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo+EAa*EAo*Lpb+EAb*EAo*Lpa)];
end
if tetai>tetayi+bi && tetaj>tetayj+bj
K1=(EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo+EAa*EAo*Lpb+EAb*EAo*Lpa);
T12=[-1 0 0 1 0 0]; %Transformation Matrix from 1 to 2 system
end
else
T12=[0 1/lon 1 0 -1/lon 0; %Transformation Matrix from 1 to 2
0 1/lon 0 0 -1/lon 1; % System 2 are local coordinates
-1 0 0 1 0 0];
%Giberson
% K1= [(6*EIA*(EIB + EIo))/(lon*(EIA + EIB + EIo)),...
% (6*EIA*EIB)/(lon*(EIA + EIB + EIo)), 0
% (6*EIA*EIB)/(lon*(EIA + EIB + EIo)),...
% (6*EIB*(EIA + EIo))/(lon*(EIA + EIB + EIo)),0
% 0, 0, EA/lon];
[K1]=K1_eqcorte4(EIA,EIya,EIo,EIyb,EIB,EAa,EAa,EAo,EAb,EAb,...
Lpa,max(lon/3-Lpa,0),lon/3+min(lon/3-Lpa,0)+...
min(0,lon/3-Lpb),max(0,lon/3-Lpb),Lpb,beta_a);
end
%+++++
%////////////////////////////////////
if (tetai>tetayi+ai && tetai<=tetayi+bi) || (tetaj>tetayj+aj && ...
tetaj<=tetayj+bj) || Table3(i,3)~=0 || Table3(i,4)~=0
%i rótula pl
if Table3(i,5)==0 && ((tetai>tetayi+ai && tetai<tetayi+bi) ...
|| Table3(i,3)~=0)
K1(1,1)=- (Q2cg(i,3)*lon-(-sign(Mi))*ci*Mpi*lon)/(cosen*pq(2,i)...
-cosen*pq(5,i)+lon*pq(3,i)-pq(1,i)*sen+pq(4,i)*sen);
K1(1,2)=0;K1(2,1)=0;
if length(K1)==3
K1(2,2)=(6*EIB*EIo)/(lon*(EIB+EIo))*...
(1/2*(2+beta_o)/(1+2*beta_o));
K1(1,2)=0;%K1(2,2)*pi/(pi+1);
K1(2,1)=0;%K1(1,2);
end
if Table3(i,3)==0
iconc=iconc+1;
Table3(i,9)=iconc;Table3(i,3)=jj;
end
end
%////////////////////////////////////
%j rótula pl
if Table3(i,6)==0 && ((tetaj>tetayj+aj && tetaj<tetayj+bj)...
|| Table3(i,4)~=0)
K1cMy=- (Q2cg(i,6)*lon-(sign(Mj))*cj*Mpj*lon)/(cosen*pq(2,i)...
-cosen*pq(5,i)+lon*pq(6,i)-pq(1,i)*sen+pq(4,i)*sen);
K1(1,2)=0;K1(2,1)=0;
if length(K1)==3
K1(1,1)=(6*EIA*EIo)/(lon*(EIA+EIo))*(1/2*(2+beta_o)/...
(1+2*beta_o));
K1(1,2)=0;%K1(1,1)*pj/(pj+1);
K1(2,1)=0;%K1(1,2);
K1(2,2)=K1cMy;
else

```



```

        K1(1,1)=K1cMy;
    end
    if Table3(i,4)==0
        iconc=iconc+1;
        Table3(i,10)=iconc;Table3(i,4)=jj;
    end
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
K2=T12'*K1*T12; % Stiffness matrix on local coordinates
T23= [cosen sen 0 0 0 0
      -sen cosen 0 0 0 0
       0 0 1 0 0 0
       0 0 0 cosen sen 0
       0 0 0 -sen cosen 0
       0 0 0 0 0 1];
K3(:, :, i)=T23'*K2*T23;
for j=1:6
    J=VC(i, j);
    if J==0
        continue
    end
    for m=1:6
        mm=VC(i, m);
        if mm==0
            continue
        end
        SS(J, mm)=SS(J, mm)+K3(j, m, i);
    end
end
end
fiyi=Mpi/EIya;fiyj=Mpj/EIyb;fiui=(Mui-Mpi)/pi_/EIya+fiyi;
fiuj=(Muj-Mpj)/pj/EIyb+fiyj;
if jj==1
    fiui=min(10*fiyi, (Mui-Mpi)/pi_/EIya+fiyi);
    fiuj=min(10*fiyi, (Muj-Mpj)/pj/EIyb+fiyj);
    Mui=min(Mui, (fiui-fiyi)*pi_*EIya+Mpi);
    Muj=min(Muj, (fiuj-fiyj)*pj*EIyb+Mpj);
end
TableMfi(i, :)= [0, fiyi, fiui, 0, Mpi, Mui, 0, fiyj, fiuj, 0, Mpj, Muj];
end
end
%---end---

```

A2.3.6 Programa HisteresisMom_curv_BiS

```

function [EI,EA,Mcondensado,alfa]=...
HisteresisMom_curv_BiS(Section, Ma, Pa, q, Dib, mbr)
%clear;Section=[1,42000,40800,20430000,1,.25,.006,0.18,0.18,0.012,0.012];
% Ma=[23,21,20,30,-21,31,-40,45,46,47,48,-50,55];
% Pa=[23,21,20,30,-21,31,-40,45,46,47,48,-50,55]*2;q=.03;Dib=2;%example 1
%Programa que calcula Curva de Histeresis Momento-Curvatura de secciones de
%acero para pórticos en dos dimensiones
%-----
% [EI,EA,Mcondensado,alfa]=HisteresisMom_curv_BiS(Section, Ma, Pa, q, Dib, mbr)
%-----
%Referencia: Advanced Analysis and Design of steel frames-Guo Qiang Li
%Datos:
%Steel Section: [Material (=1),fy ,fu,Ey ,Tipo,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
%
%                Type=1 is a I section.
%                2 is a H section.
%                3 is a rectangular tube section.

```

```

%NOTA: Se deben usar unidades consistentes.
%q=EIp/EIy que se debería considerar
%alfa=EIp/EIy real final
%Ma:      Vector de Momentos actuantes en cada ciclo de carga
%Pa:      Vector de Fuerzas actuantes en cada ciclo de carga
%correspondientes a Ma
%Dib:      Dib=0---> No muestra dibujo
%          Dib=1---> Muestra dibujo final
%          Dib=2---> Muestra dibujo con cometd

fy=Section(2);Pa=abs(Pa);
%Relación xp=Z/S
[EIy,EA,~,~,Z,A,~,S,al]=Geom(Section);
Mp1=fy*Z;xp=Z/S;Ms1=Mp1/xp;Py=fy*A;Ms=Ms1*(1-Pa(end)/Py);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
%                               Simplificación de Ma:
%-----
if max(abs(Ma))==Inf && Dib==0
iMu=find(max(Ma)==Ma);
alfa=0;EI=0;Mcondensado(length(Ma)-iMu+1:length(Ma))=Ma(1:iMu);
%Mcondensado=Ma;
else

Mal(1)=Ma(1);Pal(1)=Pa(1);
if length(Ma)>1
o=find(Ma,1,'first');
for m=max(o,2):length(Ma)
    if length(Ma)>3 && abs(Ma(m))<=1e-9 && m<length(Ma)-3 && ...
abs(Ma(m+1))<=1e-9 && abs(Ma(m+2))<=1e-9 && abs(Ma(m+3))<=1e-9
break
    else
    if (m<length(Ma)-1 && Ma(m)>=Ma(m-1) && Ma(m)<=Ma(m+1)) || ...
(m<length(Ma)-1 && Ma(m)<=Ma(m-1) && Ma(m)>=Ma(m+1))
else
    Mal(end+1)=Ma(m);Pal(end+1)=Pa(m);
end
end
end
for xx=1:length(Mal),if abs(Mal(xx))>=Ms,break;end,end
    Mal=Mal(xx:end);Pal=Pal(xx:end);
else Mal=Ma;Pal=Pa;
end
Mcondensado(length(Ma)-length(Mal)+1:length(Ma))=Mal;
Ma2=abs(Mal);
if length(Ma2)==1 && Ma2==0;
Ma2=realmin;
end

%-----
%                               Cálculo de Momentos plásticos y de fluencia
%-----
Mp1=fy*Z;xp=Z/S;Ms1=Mp1/xp;Py=fy*A;Ms2=(1-min(Pal/Py,1));Ms=Ms1*Ms2;
fis=Ms/(EIy);fip=10*fis;
Mp2=zeros(1,length(Mal));
for zz=1:length(Mal)
if Pal(zz)==0
    Mp2(zz)=1;
else
    if al~=0 && min(Pal(zz)/Py,1)>=0 && min(Pal(zz)/Py,1)<al/(2+al)
        Mp2(zz)=(1-(2+al)^2/(4+al))/al*(min(Pal(zz)/Py,1))^2;
    elseif al~=0 && min(Pal(zz)/Py,1)<=1 && min(Pal(zz)/Py,1)>=al/(2+al)
        Mp2(zz)=(1-(min(Pal(zz)/Py,1)))^2*(2+al)/(4+al);
    else Mp2(zz)=(1-(min(Pal(zz)/Py,1))^2);
end
end
end

```

```

end
Mp=Mp1*Mp2;
%-----
%                               Cálculo de Curvas de Histéresis
%-----
i=0;n=1;
Gamma_b(n)=1;%Gamma Valores característicos, considera efecto Bauschinger
Gamma_p(n)=1;%Gamma plástico
Gamma_s(n)=Ms1*Ms2(n)/Mp1/Mp2(n);
EI=EIy;
Gamma_u=zeros(1,length(Ma2));Gamma=0;

for n=1:length(Ma2)
    Gamma_u(n)=Ma2(n)/Mp1/Mp2(n);fisn=fis(n);fipn=fip(n);
    ii=0;
    if Pal(n)/Py<0
        ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_u(n);R(i)=0;R_u(n)=R(i);
        Mr(i)=Gamma(i)*Mp(n);fisir(i)=fipn;
        break
    else
        if Gamma_u(n)<=Gamma_s(n)
            ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_u(n);R(i)=1;R_u(n)=R(i);
        end
        %.....
        if Gamma_u(n)>Gamma_s(n) && Gamma_u(n)<Gamma_p(n)
            if (n>1 && sign(Ma1(n-1))~=sign(Ma1(n))) || ...
                (n>1 && Ma2(n)>=Ma2(n-1)) || n==1
                if (n>1 && Gamma_s(n)>-Gamma_u(n-1) && ...
                    ((Gamma_u(n-1)<=Gamma_s(n)) || ...
                    sign(Ma1(n-1))~=sign(Ma1(n)))) || ...
                    n==1,ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_s(n);R(i)=1;
            end
            ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_u(n);
            R(i)=((Gamma_p(1)-Gamma_s(1))/(1-fisn/fipn));R_u(n)=R(i);
                %q;R_u(n)=R(i);
                if isnan(R(i))==1,R(i)=1;end
            else ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_u(n);R(i)=-1;R_u(n)=R(i);
            end
        end
        %.....
        if Gamma_u(n)>=Gamma_p(n)
            if (n>1 && sign(Ma1(n-1))~=sign(Ma1(n))) || ...
                (n>1 && Ma2(n)>=Ma2(n-1)) || n==1
                if (n>1 && Gamma_s(n)>-Gamma_u(n-1) && ...
                    ((Gamma_u(n-1)<=Gamma_s(n)) ||...
                    sign(Ma1(n-1))~=sign(Ma1(n)))) ||...
                    n==1,ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_s(n);R(i)=1;
            end
            if (n>1 && ((Gamma_u(n-1)<=Gamma_p(n)) || ...
                sign(Ma1(n-1))~=sign(Ma1(n)))) || ...
                n==1,ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_p(n);
                R(i)=((Gamma_p(1)-Gamma_s(1))/(1-fisn/fipn));
                end%q;end%
                if isnan(R(i))==1,R(i)=1;end
                ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_u(n);R(i)=q;R_u(n)=R(i);
            else ii=ii+1;i=i+1;Gamma(i)=Gamma_u(n);R(i)=-1;R_u(n)=R(i);
            end
        end
        if Gamma_u(n)>Gamma_b(n) && ((n>1 && sign(Ma1(n-1))~=sign(Ma1(n)))...
        || (n>1 && Ma2(n)>=Ma2(n-1) && R_u(n-1)==-1) || n==1)
            Gamma_b(n+1)=Gamma_u(n);
            Gamma_s(n+1)=Gamma_s(1)-(Gamma_b(n+1)-1);
        else
            Gamma_b(n+1)=Gamma_b(n);
            Gamma_s(n+1)=Gamma_s(n);
        end
        Gamma_p(n+1)=Gamma_b(n+1);

```

```

    if Ma1(n)<0
        R(i-(ii-1):i)=-R(i-(ii-1):i);
        Gamma(i-(ii-1):i)=-Gamma(i-(ii-1):i);
    end
    Mr(i-(ii-1):i)=Gamma(i-(ii-1):i)*Mp1*Mp2(n);
    fisr(i-(ii-1):i)=ones(1,ii)*fisn;
end
end

%R: deltaGamma/deltaFI
%FI: |fi/fip|
%Mr: Momento Resistente
EI=EIy*abs(R_u(end));
%-----
%
%                               Dibujo de Curva
%-----
j=0;
if Dib~=0
    Mr=[0,Mr];fi(1)=0;R=[0,R];
if Gamma(1)==0
    fi(2)=0;
end
for j=2:length(Mr)
    if abs(Mr(j))<Mp1*max(Mp2)*120% && Mr(j)~=Mr(j-1)
        fi(j)=(Mr(j)-Mr(j-1))/abs(R(j))/EIy+fi(j-1);
    else
        Mr=Mr(1:length(fi));
break
end
end
% fi,Mr,Ms1*Ms2,Mp1*Mp2,fis,fip,fisr,Gamma,R,EIy
%%Gráfico de Curva Momento-Curvatura
    if Dib==1,plot(fi,Mr),
elseif Dib==2,cometd(fi,Mr)
end
drawnow
end
% Gamma,Gamma_b,Gamma_u,Gamma_p,Gamma_s,R
alfa=abs(R_u(end));
if alfa<q,EI=0;alfa=0;end

end
%end

```

A2.3.7 Programa krigidez_brace_eq3

```

function [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,TableFDelta,Pa,TableMt_Fd]=...
    krigidez_brace_eq3(K,K3,ngl,Table1,Table2,Table3,L,seno,coseno,...
        VC,icon,iconu,iconc,jj,Pa,L0,NJ,coseno0)
%
%                               David Mora
% Programm to determinate axial stiffness to braces alone and equivalent
% braces and dampers.
TableFDelta=0;TableMt_Fd=0;
ibrace=(Table1(:,1)==1.1);%tadas element index
ipos_brace=find(ibrace==1);%tadas element ubication index
if ipos_brace~=0
mbr=length(L);TableFDelta=zeros(mbr,6);TableMt_Fd=zeros(mbr,18);
KD=zeros(ngl);KD1=KD;K3D=zeros(6,6,mbr);K3D1=K3;ii=0;
for i=1:mbr
    ichevron=ipos_brace(NJ(ipos_brace)==NJ(i));
    if Table1(i,1)==1.1

```

```

        ii=ii+1;
        q1=L(i)-L0(i);%pos trac, neg compr
        SectionBrace=Table1(i,1:11);TypeBr=SectionBrace(5);
        if TypeBr<=3 && Table1(i,12)~=0 && Table1(i,16)>=4,...
            SectionDISSIP=Table1(i,12:end);else SectionDISSIP=zeros(1,11);end

%-----
%
%                               ADAS, TADAS Y SHEAR LINK
%-----
Type=SectionDISSIP(5); %4:ADAS, 5:TADAS Y 6:SL
if Type==4 || Type==5
    %ADAS Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(4),h,tw,bs,bi,n,miu]
    %TADAS Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(5),h,tw,bs,bi,n,miu]
    b=SectionDISSIP(8); %Ancho del ADAS Y TADAS
    h=SectionDISSIP(6); %Altural del ADAS Y TADAS
    t=SectionDISSIP(7); %Espesor de la placa
    n=SectionDISSIP(10); %Numero de placas
    fy=SectionDISSIP(2); %Fluencia del acero
    EsT=SectionDISSIP(4);%Modulo de elasticidad del acero
    bi=SectionDISSIP(9); %Ancho inferior
    miu=SectionDISSIP(11); %Ductilidad del disipador ADAS Y TADAS
elseif Type==6
    %SL Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(6),b,h,ht,n,np,e,t,z,miu]
    b=SectionDISSIP(6); %b Ancho de una ventana del disipador en m
    h=SectionDISSIP(7); %h Altura de una ventana del disipador en m
    ht=SectionDISSIP(8); %ht Altura total de un parante
    n=SectionDISSIP(9); %n numero de ventanas
    np=SectionDISSIP(10); %np numero de elementos verticales de altura ht
    e=SectionDISSIP(11); %e Espesor de la ventana del disipador en m
    t=SectionDISSIP(12); %t Espesor del marco del disipador en m
    z=SectionDISSIP(13); %z Base del marco de altura h en m
    fy=SectionDISSIP(2); %fy Fluencia del acero en t/m2
    EsT=SectionDISSIP(4); %Es Modulo de elasticidad del material en t/m2
    miu=SectionDISSIP(14); %miu ductilidad esperada de disipador
end
qydiss=0;qudiss=0;
if Type==4
    [ke,kd,~,~,qydiss,qydiss,kef,TableMt_Fd(i,:)]=...
        histeresis_adas(b,h,t,n,fy,EsT,bi,miu);
elseif Type==5
    [ke,kd,~,~,qydiss,qydiss,kef,TableMt_Fd(i,:)]=...
        histeresis_tadas(b,h,t,n,fy,EsT,bi,miu);
elseif Type==6
    [ke,kd,~,~,qydiss,qydiss,kef,TableMt_Fd(i,:)]=...
        histeresis_SL(b,h,ht,n,np,e,t,z,fy,EsT,miu);
elseif Type==6.1;
    % % [Material (1),0,0,0,Tipo(6.1),ke,kd,qudiss,qydiss,kef]
    ke=SectionDISSIP(6);kd=SectionDISSIP(7);qudiss=SectionDISSIP(8);
    qydiss=SectionDISSIP(9);kef=SectionDISSIP(10);
end
%-----
%
%                               CONTRAVIENTO
%-----

[~,EA,~,~,~,A]=Geom(SectionBrace);
Lcon=L0(i);
cos=coseno0(i);
kdiag=EA/Lcon;
[ac,~,~,at,~,~,deltac,deltat,p,Fy,Fcr]=...
    Braces_AceroASCE41(SectionBrace,Lcon);
if sum(SectionDISSIP)~=0,qydiag=qydiss*ke/kdiag/2/abs(cos)^3;...
else if sign(q1)==-1;qydiag=min(deltac,deltat);else qydiag=deltat;end,end
% if isnan(qytadas)==1 || qydiag<qytadas,qytadas=0;end
if isnan(qydiss)==1,qydiss=0;end
qytotal=qydiag+qydiss/abs(cos);%if i==42,qydiss,end
%ele=1;[ac,~,~,at,~,~,deltac,deltat,p,Fy,Fcr]=Braces_AceroASCE41

```

```

% (Table1(ele,:),L(ele)); [EA,~,Pacondensado,alfa]=HisteresisF_Def_Bi3(
% Table1(ele,:),Pabr(ele,:),p,2,Fy,Fcr)
if sum(SectionDISSIP)~=0,if length(ichevron)>1,nn=2;else nn=1;end
    Keq=kdiag*ke/(ke+nn*cos^2*kdiag);EA=Keq*Lcon;
    p=(kdiag*kd/(kd+nn*cos^2*kdiag))/Keq;else Keq=kdiag;
end
if sum(SectionDISSIP)~=0,deltau=qydiag+qudiss/abs(cos);
    Fyy=kdiag*ke/(ke+nn*cos^2*kdiag)*qyttotal;
    Fu=Fyy+kdiag*kd/(kd+nn*cos^2*kdiag)*(qudiss-qydiss);Fy=Fyy;Fcr=Fyy;
else
    if q1<0,deltau=qyttotal+ac;Fyy=min(Fy,Fcr);
    else deltau=qyttotal+at;Fyy=Fy;
    end
    Fu=(deltau-qyttotal)*p*EA+Fyy;
end
[~,~,Pa(i,:),alfa]=HisteresisF_Def_Bi3(Keq,Pa(i,:),p,0,Fy,Fcr);%<=====
% alfa=p;%<=====
%Análisis No Lineal:::::::::::
if alfa==1 && sum(SectionDISSIP)~=0 && qydiss~=0 &&...
    sum(Table3(ichevron,2))==0%<=====
% if abs(q1)<=qyttotal && sum(SectionDISSIP)~=0 && qydiss~=0 &&...
% sum(Table3(ichevron,2))==0 %<=====
else
    if sum(SectionDISSIP)~=0 && abs(q1)<=qydiag+qudiss ||...
        (Table3(i,2)~=0 && Table3(i,1)==0)
        if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(ichevron,8)=icon;...
            Table3(ichevron,2)=jj;end
        if length(ichevron)>1,nn=2;else nn=1;end
        Keq=alfa*Keq;
    else
        qyttotal=qydiag;
        if sum(Table3(ichevron,2))==0 && sum(SectionDISSIP)~=0,icon=icon+1;...
            Table3(ichevron,8)=icon;Table3(ichevron,2)=jj;end
        if sum(Table3(ichevron,2)~=0 && sum(SectionDISSIP)~=0,kdiag=0;end
        if abs(q1)>qyttotal || (Table3(i,1)~=0 && Table3(i,2)~=0)...
            && sum(SectionDISSIP)==0 || kdiag==0
            deltaL=q1;%pos trac, neg compr

            if Table3(i,1)==0,icon=icon+1;Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=jj;end
            if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=jj;end
            kdiag=alfa*kdiag;
            %----->if we are using equivalent braces
            if sum(SectionDISSIP)~=0,at=qudiss;ac=qudiss;end
            if deltaL>deltat+at || deltaL<-(deltac+ac) ||...
                Table3(i,5)~=0 || kdiag==0
                if Table3(i,5)==0,iconu=iconu+1;...
                    Table3(i,11)=icon;Table3(i,5)=jj;end
                if Table3(i,6)==0,iconu=iconu+1;...
                    Table3(i,12)=icon;Table3(i,6)=jj;end
                kdiag=0;%qyttotal=0;
            end
        end
        Keq=kdiag; % Equivalent Stiffness
    end
end
end

ELEMT(ii,1)=Keq;

TableFDelta(i,:)=[0,qyttotal,deltau,0,Fyy,Fu];
end
end

VCT(1:length(ipos_brace),:)=VC(ibrace,:);

senT(1:length(ipos_brace))=seno(ibrace);
cosT(1:length(ipos_brace))=coseno(ibrace);

```

```
[KD1,K3D1]=krigidez_tadas(mbr,ngl,ELEMT,senT,cosT,VCT,ipos_brace);
    K3D=K3D1+K3D;
    KD=KD1+KD;

K=KD+K;
K3=K3D+K3;
end
```

A2.3.8 Programa HisteresisF_Def_Bi3

```
function [K,Ky,Pcondensado,alfa]=HisteresisF_Def_Bi3(Ky,Pa,q,Dib,Py,Pcr)
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.20,.01,.10,.01];Ma=10;%ejemplo 1
% clear;Section=[1,25300,0,20430000,1,.36322,.013335,.37084,.37084,...
%.021844,.021844];Py=500;Pcr=200;Pa=[200,-300,600,-700,-650,100,...
%-300,800,-50];Dib=1;q=0.03;%ejemplo 2
%Programa que calcula Curva de Histeresis Momento-Curvatura de secciones
% de acero para pórticos en dos dimensiones
%-----
% [K,Ky,Pcondensado,alfa]=HisteresisF_Def_Bi3(Ky,Pa,q,Dib,Py,Pcr)
%-----
%Referencia: Advanced Analysis and Design of steel frames-Guo Qiang Li
%Datos:
%NOTA: Se deben usar unidades consistentes.
%Seccion: [fy,fu,Ey,Tipo,d,tf,b,tw]
%fy:      Esfuerzo de fluencia del acero
%fu:      Esfuerzo máximo del acero
%Ey:      Módulo de Young del acero
%Tipo:    Tipo de Sección. Escribir uno de los siguientes números:
%         1 :Sección tipo I simétrica
%         2 :Sección tipo Tubo Rectangular hueco simétrico
%d:       Alura de la Sección
%tf:      Espesor del patín
%b:       Ancho del patín
%tw:      Espesor del alma
%q=Kp/Ke
%Ma:      Vector de Momentos actuantes en cada ciclo de carga

% [~,EAY]=Geom(Section);
%Relación xp=Z/S

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Simplificación de Pa:
if max(abs(Pa))==Inf && Dib==0
    iPu=find(max(Pa)==Pa);
    alfa=0;K=0;Pcondensado(length(Pa)-iPu+1:length(Pa))=Pa(1:iPu);%Mcondensado=Ma;
else

    Pal(1)=Pa(1);
    if length(Pa)>1
        o=find(Pa,1,'first');
        for m=max(o,2):length(Pa)-1
            if length(Pa)>3 && abs(Pa(m))<=1e-9 && m<length(Pa)-3 &&...
                abs(Pa(m+1))<=1e-9 && abs(Pa(m+2))<=1e-9 && abs(Pa(m+3))<=1e-9
                break
            else
                if (Pa(m)>=1e-9 && Pal(end)>=1e-9 && Pa(m)>=Pal(end)) ||...
                    (Pa(m)<-1e-9 && Pal(end)<-1e-9 && Pa(m)<Pal(end))
                    Pal=[Pal(1:end-1),Pa(m)];
                elseif (m<length(Pa)-1 && abs(Pa(m))>=abs(Pa(m-1))...
                    && abs(Pa(m))<=abs(Pa(m+1))) ||...
                    (m<length(Pa)-1 && abs(Pa(m))<=abs(Pa(m-1)) && abs(Pa(m))>=abs(Pa(m+1)))
```

```

else
    Pal(end+1)=Pa(m);
end
end
end
Pal(end+1)=Pa(end);
for xx=1:length(Pal),if Pal(xx)>=Py || Pal(xx)<=-min(Py,Pcr),break;end,
end,Pal=Pal(xx:end);
else Pal=Pa;
end
end
Pcondensado(length(Pa)-length(Pal)+1:length(Pa))=Pal;
Pa2=abs(Pal);
if length(Pa2)==1 && Pa2==0;
Pa2=realmin;
end

%-----
%                Cálculo de Curvas de Histéresis
%-----
i=0;
for n=1:length(Pa2)
    ii=0;
    if Pal(n)<0,PPy=min(Py,Pcr);else PPy=Py;end
    if Pa2(n)<=PPy
        ii=ii+1;i=i+1;P(i)=Pa2(n);R(i)=1;R_u(n)=R(i);
    end
    %.....
    if Pa2(n)>=PPy
        if (n>1 && sign(Pal(n-1))~=sign(Pal(n))) ||...
            (n>1 && Pa2(n)>=Pa2(n-1)) || n==1
        if (n>1 && PPy>-Pa2(n-1) && ...
            ((Pa2(n-1)<=PPy) || sign(Pal(n-1))~=sign(Pal(n)))) || n==1,
            ii=ii+1;i=i+1;P(i)=PPy;R(i)=1;
        end
        % if (n>1 && ((Pa2(n-1)<=Py) || sign(Pal(n-1))~=sign(Pal(n)))) ...
        %|| n==1,ii=ii+1;i=i+1;P(i)=Py(n);R(i)=((Gamma_p(1)-Gamma_s(1))...
        %/(1-fis/fip));end;q;end%
        ii=ii+1;i=i+1;P(i)=Pa2(n);R(i)=q;R_u(n)=R(i);
        else ii=ii+1;i=i+1;P(i)=Pa2(n);R(i)=-1;R_u(n)=R(i);
        end
    end
end

if Pal(n)<0
    R(i-(ii-1):i)=-R(i-(ii-1):i);
    P(i-(ii-1):i)=-P(i-(ii-1):i);
end
end

K=Ky*abs(R_u(end));
if Dib~=0
if P(1)==0
    Pr(1)=0;Delta=0;j=2;
else
    Pr(1)=0;Delta=0;
    Pr(2)=P(1);
    Delta(2)=((P(1))/Ky/abs(R(1)));
j=3;
end
for ii=2:length(P)
    if P(ii)~=Pr(j-1) && abs(P(ii))<1e10
Pr(j)=P(ii);
    Delta(j)=((P(ii)-P(ii-1))/Ky/abs(R(ii))+Delta(j-1));
j=j+1;
%     if abs(fi(end))>=fir
%     EI=0;Mcondensado(end)=Inf;

```



```

% break
%     end
end
end
%%Gráfico de Curva Momento-Curvatura
if Dib==1,plot(Delta,Pr)
elseif Dib==2,cometd(Delta,Pr)
end
    drawnow
end
% Gamma, Gamma_b, Gamma_u, Gamma_p, Gamma_s, R
alfa=abs(R_u(end));
if alfa<q,K=0;alfa=0;end
end

```

A2.3.9 Programa krigidez_damper31

```

function [K,icon,iconu,iconc,Table3,K3,Momi,Momd,TableMfi]=...
    krigidez_damper31(K,K3,ngl,Table1,Table2,Table3,L,seno,coseno,VC,...
    icon,iconu,iconc,j,Pa,L0,Momi,Momd,Pmomi,Pmomd,TableMfi,q,seno0)
%
%     David Mora
% Programm to determinate the stiffness matriz to only dampers.
% K   Matriz de rigidez total de la estructura
% K3  Matriz de rigidez en tres dimensiones de los elementos
% Table1 Tiene las secciones
% Table2 Fuerzas y momentos en cada elemento en coordenadas locales
% Table3 Secuencia de como ingresan de como sobrepasa My y despues a Mr
% icon Contador de Momento de fluencia
% iconu Contador de momento cuando falla completamente
% iconc Contador de momento residual
% j    Numero de ciclo
% Pa   Es la carga axial acumulada
% L0   Longitudes inidicales de la estructura sin deformar
% NJ   Vector de nudos finales
%.....
mbr=length(L);
SS=zeros(ngl);icod=6;K3D=zeros(6,6,mbr);    qp=length(q)+1;q(qp)=0;
for i=1:mbr
if Table1(i,1)==1.2
    Type=Table1(i,5);
    Mi=abs(Table2(i,3));Mj=abs(Table2(i,6));M=max(Mi,Mj);
    if abs(seno0(i))==1,qH=abs(q(VC(i,1))-q(VC(i,4)));
    elseif abs(seno0(i))==0,qH=abs(q(VC(i,2))-q(VC(i,5)));
    else qH=abs(sqrt(q(iszero(VC(i,1),qp))^2+q(iszero(VC(i,2),qp))^2)...
        -sqrt(q(iszero(VC(i,4),qp))^2+q(iszero(VC(i,5),qp))^2));
    end
    if Table1(i,5)==4 %ADAS
        %ADAS Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(4),h,tw,B,b,n,miu]
        SectionADAS=Table1(i,:);
        B=SectionADAS(8);    %Ancho mayor del ADAS
        h=SectionADAS(6);    %Altura del ADAS
        t=SectionADAS(7);    %Espesor de la placa
        n=SectionADAS(10);    %Numero de placas
        fy=SectionADAS(2);    %Fluencia del acero
        Es=SectionADAS(4);%Modulo de elasticidad del acero
        b=SectionADAS(9);    %Ancho menor
        miu=SectionADAS(11);    %Ductilidad del disipador ADAS
        Z=B*n*(t)^2/4;I=B*n*(t)^3/12;EIy=Es*I;A=B*(n*t);
    end
    p=0.05;
    Mp=Z*fy*(1-abs(Pa(i,end))/(A*fy));fiy=Mp/EIy;
    fiu=miu*fiy;Mu=EIy*p*(fiu-fiy)+Mp;%M,My

```

```

[~,~,Momd(i,:),alfa]=...
    HisteresisMom_curv_BiS(SectionADAS,Momd(i,:),Pmomd(i,:),p,0);
be=[B*4/5,B*1/2,B*1/10,B*1/2,B*4/5];
Ie=be*n*(t)^3/12;EIe=alfa*Es*Ie;
[alfa_ax,Table3,icon,iconu]=...
AxialADAS(Table3,icon,iconu,B,h,t,n,fy,Es,b,miu,L,L0,i,j);

Ae=be*(n*t);EAe=alfa_ax*Es*Ae;
G=Es/(2*(1+.2));f=1.2;A_f=sum(Ae)/length(Ae)*f;
EIm=sum(EIe)/length(EIe);beta=6*EIm/(A_f*G*L(i)^2);
[K1]=K1_eqcorte4(EIe(1),EIe(2),EIe(3),EIe(4),EIe(5),EAe(1)...
,EAe(2),EAe(3),EAe(4),EAe(5),h/5,h/5,h/5,h/5,h/5,beta);

T12=[0 1/L(i) 1 0 -1/L(i) 0;%Transformation Matrix from 1 to 2
0 1/L(i) 0 0 -1/L(i) 1; % System 2 are local coordinates
-1 0 0 1 0 0];
K2=T12'*K1*T12; % Stiffness matrix on local coordinates
T23= [coseno(i) seno(i) 0 0 0 0
-seno(i) coseno(i) 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0
0 0 0 coseno(i) seno(i) 0
0 0 0 -seno(i) coseno(i) 0
0 0 0 0 0 1];
k3=T23'*K2*T23;
elseif Table1(i,5)==5 %TADAS
%TADAS Damper Section: [Material (1),fy ,fu,Ey ,Tipo(5),h,tw,bs,bi,n,miu]
SectionTADAS=Table1(i,:);
b=SectionTADAS(8); %Ancho del TADAS
h=SectionTADAS(6); %Altura del TADAS
t=SectionTADAS(7); %Espesor de la placa
n=SectionTADAS(10); %Numero de placas
fy=SectionTADAS(2); %Fluencia del acero
Es=SectionTADAS(4);%Modulo de elasticidad del acero
bi=SectionTADAS(9); %Ancho inferior
miu=SectionTADAS(11); %Ductilidad del dissipador TADAS
Z=b*n*(t)^2/4;I=b*n*(t)^3/12;EIy=Es*I;A=b*(n*t);
p=0.05;

Mp=Z*fy*(1-abs(Pa(i,end))/(A*fy));fiy=Mp/EIy;
fiu=miu*fiy;Mu=EIy*p*(fiu-fiy)+Mp;%M,My

be=[b*1/10,b*3/10,b*5/10,b*7/10,b*9/10];
Ie=be*n*(t)^3/12;EIe=alfa*Es*Ie;
[alfa_ax,Table3,icon,iconu]=...
AxialTADAS(Table3,icon,iconu,b,h,t,n,fy,Es,bi,miu,L,L0,i,j);

Ae=be*(n*t);EAe=alfa_ax*Es*Ae;
G=Es/(2*(1+.2));f=1.2;A_f=sum(Ae)/length(Ae)*f;
EIm=sum(EIe)/length(EIe);beta=6*EIm/(A_f*G*L(i)^2);
[K1]=K1_eqcorte4(EIe(1),EIe(2),EIe(3),EIe(4),EIe(5),EAe(1)...
EAe(2),EAe(3),EAe(4),EAe(5),h/5,h/5,h/5,h/5,h/5,beta);

T12=[0 1/L(i) 1 0 -1/L(i) 0;%Transformation Matrix from 1 to 2
0 1/L(i) 0 0 -1/L(i) 1; % System 2 are local coordinates
-1 0 0 1 0 0];
K2=T12'*K1*T12; % Stiffness matrix on local coordinates
T23= [coseno(i) seno(i) 0 0 0 0
-seno(i) coseno(i) 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0
0 0 0 coseno(i) seno(i) 0
0 0 0 -seno(i) coseno(i) 0
0 0 0 0 0 1];
k3=T23'*K2*T23;
elseif Table1(i,5)==6.2 %Shear Link
fy=Table1(i,2);

```

```

[EIy,EA,~,~,Z,~,~,~,~,~,qudiss,p,miu]=Geom_SL(Table1(i,:));
[EI,~,Momd(i,:),alfa]=...
    HisteresisMom_curv_BiS(Table1(i,:),Momd(i,:),Pmomd(i,:),p,0);
Mp=Z*fy;fiy=Mp/EIy;fiu=miu*fiy;Mu=EIy*p*(fiu-fiy)+Mp;
K1=[4*EI/L(i) 2*EI/L(i) 0
    2*EI/L(i) 4*EI/L(i) 0
    0 0 EA/L(i)];
T12=[0 1/L(i) 1 0 -1/L(i) 0;%Transformation Matrix from 1 to 2
    0 1/L(i) 0 0 -1/L(i) 1; % System 2 are local coordinates
    -1 0 0 1 0 0];

K2=T12'*K1*T12; % Stiffness matrix on local coordinates
K2(1,1:6)=zeros(1,6);K2(1:6,1)=zeros(6,1);
K2(1:6,4)=zeros(6,1);K2(4,1:6)=zeros(1,6);

T23= [coseno(i) seno(i) 0 0 0 0
-seno(i) coseno(i) 0 0 0 0
    0 0 1 0 0 0
    0 0 0 coseno(i) seno(i) 0
    0 0 0 -seno(i) coseno(i) 0
    0 0 0 0 0 1];
k3=T23'*K2*T23;

k3(3,:)=zeros(1,6);k3(:,3)=zeros(6,1); k3(3,3)=.001;

alfa_ax=1;
elseif Table1(i,5)==10 %Hinge

    k3=eye(6)*.00001;k3(1,1)=10^10;k3(4,4)=10^10;
    k3(2,2)=10^10;k3(5,5)=10^10;
    alfa=1;p=0;qudiss=Inf;alfa_ax=1;fiy=0;fiu=0;Mp=0;Mu=0;
end
%-----
% Stiffness matrix calculation
%-----

K3D(:, :, i)=k3;

if Type==4
    [~,~,~,~,qudiss,~,~,~]=histeresis_adas(B,h,t,n,fy,Es,b,miu);
elseif Type==5
    [~,~,~,~,qudiss,~,~,~]=histeresis_tadas(b,h,t,n,fy,Es,bi,miu);
elseif Type==6
    [~,~,~,~,qudiss,~,~,~]=...
        histeresis_SL(b,h,ht,n,np,e,t,z,fy,EsT,miu);
elseif Type==6.1;
    qudiss=SectionDISSIP(8);
end
if alfa==p || Table3(i,2)~=0
if Table3(i,1)==0,icon=icon+1;Table3(i,7)=icon;Table3(i,1)=j;end
if Table3(i,2)==0,icon=icon+1;Table3(i,8)=icon;Table3(i,2)=j;end
end
if qudiss<=qH || Table3(i,6)~=0
    K3D(6, :, i)=zeros(1, 6);K3D(:, 6, i)=zeros(6, 1);

    if Table3(i, 6)==0,iconu=iconu+1;
        Table3(i,12)=icon;Table3(i, 6)=j;
    end
end
if alfa_ax==0 || Table3(i,6)~=0
    K3D(:, :, i)=eye(6);
    if Table3(i, 6)==0,iconu=iconu+1;
        Table3(i,12)=icon;Table3(i, 6)=j;
    end
end

```

```

        end
    end
    for j1=1:icod
        jj1=VC(i,j1);
        if jj1==0
            continue
        end
        for m=1:icod
            mm=VC(i,m);
            if mm==0
                continue
            end
            SS(jj1,mm)=SS(jj1,mm)+K3D(j1,m,i);
        end
    end
    end
    TableMfi(i,:)=[0,0,0,0,0,0,0,fiy,fiu,0,Mp,Mu];
end

end
K3=K3+K3D;
K=SS+K;

```

A2.3.10 Programa CapCur

```

%CapCur
%Take the peaks to shape the Capacity Curve lika a normal pushover
%
%                               David Mora

clear('DDeq1','Veq1','DDeq2','Veq2','Deq1','VVeq1','Deq2','VVeq2',...
      'DeqP','DeqN','VeqP','VeqN','Vf','Df','ddv','vdd','dvv','vvd')
Dtacc=real(Dtacc);Vacc=real(Vacc);
DDeq1=0;ll=1;Veq1=0;
if size(gama,2)<length(Dtacc),gama(:,size(gama,2)+1)=gama(:,end);end
if size(alfa,2)<length(Dtacc),alfa(:,size(alfa,2)+1)=alfa(:,end);end
if size(Drift,1)<length(Dtacc),Drift(size(Drift,1)+1,:)=Drift(end,:);end

for kk=2:length(Dtacc)-1
    if (Dtacc(kk)>Dtacc(kk-1) && Dtacc(kk)>=Dtacc(kk+1)) && ...
        Dtacc(kk)>=0 && Vacc(kk)>=0
        ll=ll+1;
        DDeq1(ll)=Dtacc(kk);Veq1(ll)=Vacc(kk);
    %
        ggama1(ll)=gama(kk);alfal1(ll)=alfa(kk);
    end
end
DDeq2=0;ll=1;Veq2=0;
for kk=2:length(Dtacc)-1
    if (Dtacc(kk)<Dtacc(kk-1) && Dtacc(kk)<=Dtacc(kk+1)) && ...
        Dtacc(kk)<0 && Vacc(kk)<0
        ll=ll+1;
        DDeq2(ll)=Dtacc(kk);Veq2(ll)=Vacc(kk);
    %
        ggama2(ll)=gama(kk);alfa2(ll)=alfa(kk);
    end
end
Deq1=0;ll=1;VVeq1=0;
for kk=2:length(Dtacc)-1
    if (Vacc(kk)>Vacc(kk-1) && Vacc(kk)>=Vacc(kk+1)) && ...
        Dtacc(kk)>=0 && Vacc(kk)>=0
        ll=ll+1;
        Deq1(ll)=Dtacc(kk);VVeq1(ll)=Vacc(kk);
    %
        gama1(ll)=gama(kk);aalfal1(ll)=alfa(kk);
    end
end

```

```

end
Deq2=0;ll=1;VVe2=0;
for kk=2:length(Dtacc)-1
    if (Vacc(kk)<=Vacc(kk-1) && Vacc(kk)<Vacc(kk+1)) && ...
        Dtacc(kk)<0 && Vacc(kk)<0
        ll=ll+1;
        Deq2(ll)=Dtacc(kk);VVe2(ll)=Vacc(kk);
    %
        gama2(ll)=gama(kk);aalfa2(ll)=alfa(kk);
    end
end
if Dtacc(end)>0 && Vacc(end)>0,DDeq1(end+1)=Dtacc(end);
    Veq1(end+1)=Vacc(end);Deq1(end+1)=Dtacc(end);VVe1(end+1)=Vacc(end);
end
if Dtacc(end)<0 && Vacc(end)<0,DDeq2(end+1)=Dtacc(end);
    Veq2(end+1)=Vacc(end);Deq2(end+1)=Dtacc(end);VVe2(end+1)=Vacc(end);
end

DDV=sortrows([ [DDeq1',Veq1']; [abs(DDeq2'),abs(Veq2')] ]);

ll=1;ddv=0;vdd=0;
for asd=1:size(DDV,1)-1
    if DDV(asd,2)>vdd(ll) &&
DDV(asd,2)<DDV(asd+1,2), ll=ll+1;vdd(ll)=DDV(asd,2);ddv(ll)=DDV(asd,1);end
end
vdd(ll+1)=DDV(end,2);ddv(ll+1)=DDV(end,1);

DVV=sortrows([ [VVe1',Deq1']; [abs(VVe2'),abs(Deq2')] ]);

ll=1;dvv=0;vvd=0;
for asd=1:size(DVV,1)-1
    if DVV(asd,2)>dvv(ll) &&
DVV(asd,2)<DVV(asd+1,2), ll=ll+1;dvv(ll)=DVV(asd,2);vvd(ll)=DVV(asd,1);end
end
dvv(ll+1)=DVV(end,2);vvd(ll+1)=DVV(end,1);

dvv(end+1)=max(ddv(end),dvv(end));
vvd(end+1)=min(vdd(end),vvd(end));

% ddv=smooth(ddv);vdd=smooth(vdd);
% dvv=smooth(dvv);vvd=smooth(vvd);
if min(Vacc(3:end))>0
    ddv=Dtacc;dvv=Dtacc;vdd=Vacc;vvd=Vacc;
end
Dtacc0=Dtacc;Vacc0=Vacc;
if max(vvd)>max(vdd)
    Dtacc1=dvv;Vacc1=vvd;
else
    Dtacc1=ddv;Vacc1=vdd;
end

gama0=gama;alfa0=alfa;Drift0=Drift';
if nmodos>1
for qwqw=1:length(Dtacc1)
    gama1(1:nmodos,qwqw)=gama0...
        (:,max(find(abs(Dtacc1(qwqw))==abs(Dtacc0'))));
    alfa1(1:nmodos,qwqw)=alfa0...
        (:,max(find(abs(Dtacc1(qwqw))==abs(Dtacc0'))));
    Drift1(1:nmodos,qwqw)=Drift0...
        (:,max(find(abs(Dtacc1(qwqw))==abs(Dtacc0'))));
end
else
    gama1=gama0;alfa1=alfa0;Drift1=Drift0;
end
end

```

```
Dtaccl=(Dtaccl');Vaccl=(Vaccl');
```

A2.3.11 Programa iszero

```
function [res]=iszero(x,alt)

if x==0;res=alt;else res=x;end
```

A2.4 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN Structure_Geom_2D_v2

A2.4.1 Programa Structure_Geom_2D_v2

```
%Structure_Geom_2D_v2
%Program that Define structure geometry
%Program need:
% GEN,NODE,nr

%.....Structure Geometry.....
[NI,NJ]=gn_portico(GEN); %Vector of initial and final node
[X,Y]=glinea_portico(NODE); %X and Y nodes coordinates
% [CG,ngl]=cg_sismo2(nr,Y);%Degrees of freedom
dibujo(X,Y,NI,NJ)
[CG,ngl]=cg_sismo3(nr,Y,NI,NJ,Fm);%Degrees of freedom
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ);% Elements Length, seno y coseno
[VC]=vc(NI,NJ,CG); %Elements Placement Vectors Matrix
L=L';X=X';Y=Y';seno=seno';coseno=coseno';
L0=L;Y0=Y;X0=X;seno0=seno;coseno0=coseno;
```

A2.4.2 Programa gn_portico

```
function [NI,NJ]=gn_portico(GEN)
%
% Programa para generar el Nudo inicial y final de los elementos
%
% Por: Roberto Aguiar Falconi
%       CEINCI-ESPE
%       Septiembre de 2009
%       Revisado Septiembre 2011
%-----
% [NI,NJ]=gn_portico(GEN)
%-----
% GEN=[i,ia,ib,nig,ii,ina,inb]
% i   Número del elemento
```

```

% ia Nudo inicial del elemento
% ib Nudo final del elemento
% nig Número de elementos a generar
% ii Incremento en la numeración de los elementos
% ina Incremento en la numeración del nudo inicial
% inb Incremento en la numeración del nudo final
% NI,NJ Vectores con los nudos iniciales y finales generados
nf=length(GEN(:,1));
for ij=1:nf
    i=GEN(ij,1);ia=GEN(ij,2);ib=GEN(ij,3);nig=GEN(ij,4);
    ii=GEN(ij,5);ina=GEN(ij,6);inb=GEN(ij,7);
    NI(i)=ia;NJ(i)=ib;
    for k=1:nig
        i=i+ii;NI(i)=ia+ina;NJ(i)=ib+inb;
        ia=NI(i);ib=NJ(i);
    end
end
return
% ---end---

```

A2.4.3 Programa dibujo

```

function dibujo(X,Y,NI,NJ)
%
% Programa para dibujar una estructura plana
%
% Por: Roberto Aguiar Falconi
%       CEINCI-ESPE
%       Septiembre de 2009
%-----
% dibujo (X,Y,NI,NJ)
%-----
% X       Vector que contiene coordenadas en X
% Y       Vector que contiene coordenadas en Y
% NI      Vector con los nudos iniciales de los elementos
% NJ      Vector con los nudos finales de los elementos
x1=min(X)-1;x2=max(X)+1;y1=min(Y)-1;y2=max(Y)+1;mbr=length(NI);
figure(1),title('Esquema Estructural'),xlim([x1 x2]),ylim([y1 y2])
if max(Y) > 3
    for i=1:mbr
        line([X(NI(i)) X(NJ(i))], [Y(NI(i)) Y(NJ(i))],drawnow,pause(0))
    end
else
    for i=1:mbr
        line([X(NI(i)) X(NJ(i))], [Y(NI(i)) Y(NJ(i))],...
            'LineWidth',max(Y)),drawnow,pause(.05)
    end
end
return
% ---end---

```

A2.4.4 Programa cg_sismo3

```

function [CG,ngl]=cg_sismo3(nr,Y,NI,NJ,Fm)
%
% Programa para encontrar las coordenadas generalizadas
% en un Portico Plano considerando un grado de libertad por piso
% Para calcular matriz de rigidez lateral
% Sirve para porticos irregulares en elevacion
%
% Por: David Mora
%           CEINCI-ESPE
%           Diciembre de 2014
%-----
% [CG,ngl]=cg_sismo3(nr,Y,NI,NJ,Fm)
%-----
% CG      Matriz de coordenadas generalizadas
% nod     Numero de nudos
% nr      Numero de nudos empotrados
% Y       Es el vector que contiene las coordenadas Y de los nudos
%
nod=length(Y);
CG=zeros(nod,3);Yl=zeros(nod,1);
%-----Coordenadas Principales-----
NT=[NI(Fm(:,1)),NJ(Fm(:,1))];
Yl(NT)=Y(NT);
[~,~,CG(:,1)]=unique(Yl);%indice de valores unicos en Y
CG(:,1)=CG(:,1)-ones(nod,1);
ngl=max(CG(:,1));CG=CG';
%-----Coordenadas Secundarias-----
for i=nr*3+1:nod*3
if CG(i)==0
    ngl=ngl+1;
    CG(i)=ngl;
end
end
CG=CG';
return

```

A2.4.5 Programa longitud

```

function [L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ)
%
% Programa que calcula longitud, seno, coseno de los elementos
%
% Por: Roberto Aguiar Falconi
%           CEINCI-ESPE
%           Septiembre de 2009
%-----
% [L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ)
%-----
% X,Y      Vector de coordenadas de los nudos
% NI,NJ    Vector de nudos inicial y final de elementos
mbr=length(NI);
for i=1:mbr
    dx=X(NJ(i))-X(NI(i));dy=Y(NJ(i))-Y(NI(i));

```



```

    L(i)=sqrt(dx*dx+dy*dy);
    seno(i)=dy/L(i); coseno(i)=dx/L(i);
end
return
% ---end---

```

A2.4.6 Programa vc

```

function [VC]=vc(NI,NJ,CG)
%
% Programa que calcula el vector de colocación de un pórtico plano
% O de una Armadura Plana
%
% Por: Roberto Aguiar Falconi
%       CEINCI-ESPE
%       Noviembre de 2009
%-----
% [VC]=vc(NI,NJ,CG)
%-----
% NI      Vector con los nudos iniciales de los elementos
% NJ      Vector con los nudos finales de los elementos
% CG      Matriz que contiene las coord. generalizadas de nudos
mbr=length(NI); icod=length(CG(1,:)); VC=zeros(mbr,icod);
for i=1:mbr
    for j=1:icod
        VC(i,j)=CG(NI(i),j); VC(i,j+icod)=CG(NJ(i),j);
    end
end
return
% ---end---

```

A2.5 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN MEC_NEC14

A2.5.1 Programa MEC_NEC14

```

%MEC_NEC14
%Program to find the target point
%Program need:
%Sd,Sa from capacity spectrum and Dtaci,Vaci,gamali,Tli,fili,qdem,M,Y0

%Demand Spectrum
[EspecroD]=espectro_nec14_mec;
EspecroD=[EspecroD(:,1),EspecroD(:,2)];
%Target Point Calculation
EspecroC=[Sd',Sa'];
ND=input(...
'\n Seismic resistant Level 1:High, 2:Moderate, 3:Low, 4:No Seismic Design:');
[Sd_dem,Sadem,B,EspecroD_Sa_SdB]=...
    Spectrum_Capacity_Method3(EspecroD,ND,Sdy,EspecroC,zeta(1,:));

```

```

EspectroD_Sa_Sd=...
    [(EspectroD(:,1)/(2*pi)).^2.*EspectroD(:,2),EspectroD(:,2)];
%Displacement-Acceleration Spectrum

[ql,Fl,Vo,filin,Tinelast,Dt_dem,NCycle]=...
despla_fuerza2(Dtac,Vac,gama1,Tl,fil,Sd_dem,M);
[Drift,graph]=deriva0(Y0,ql);MaxDrift=max(Drift);

fprintf('Sd_dem=           %10.3f\n',Sd_dem);
fprintf('Dt_dem=           %10.3f\n',Dt_dem);
fprintf('Vo_dem=           %10.3f\n',Vo);
fprintf('Num Cycle=        %10.3f\n',NCycle);
fprintf('MaxDrift(percent)= %10.3f\n',MaxDrift);
input('Press enter')

```

A2.5.2 Programa espectro_nec14_mec

```

function [EspectroD]=espectro_nec14_mec
% Programa que reporta un espectro elastico clasico (T vs Ad)
%
% Por: Roberto Aguiar Falconi modificado David Mora
%       CEINCI-ESPE
%       Abril de 2012
%-----
% [T,Sd,Sa]=espectro_nec11_mec
%-----
% Resultados:
% EspectroD  Contiene Periodo y Aceleracion
%-----
% Sae  Espectro Elástico
% Fa   Factor de amplificación de las ordenadas espectrales por efecto
%      del tipo de suelo.
% Fd   Factor de amplificación de las ordenadas espectrales por efecto
%      del tipo de suelo.
% Fs   Factores que toma en cuenta comportamiento no lineal del suelo, la
%      degradación del período y desplazamientos relativos del suelo.
is=input (...
    '\n Ingrese codigo para perfil de suelo 1=A, 2=B, 3=C, 4=D, 5=E :');
iz=input (...
    '\n Ingrese zona sísmica 1=0.15 g, 2=0.25 g, 3=0.30 g, 4=0.35, 5=0.4 g, 6=0.5 g
    :');
ip=input ('\n Ingrese código de Región 1=Costa, 2=Sierra, 3=Oriente :');
FA=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9];
    1 1 1 1 1;
    1.4 1.3 1.25 1.23 1.2 1.18;
    1.6 1.4 1.3 1.25 1.2 1.12;
    1.8 1.4 1.25 1.1 1.0 0.85];
FD=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9];
    1 1 1 1 1;
    1.36 1.28 1.19 1.15 1.11 1.06;
    1.62 1.45 1.36 1.28 1.19 1.11;
    2.1 1.75 1.7 1.65 1.6 1.5];
FS=[0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75;
    0.75 0.75 0.75 0.75 0.75 0.75;
    0.85 0.94 1.02 1.06 1.11 1.23;
    1.02 1.06 1.11 1.19 1.28 1.40;
    1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0];
Fa=FA(is,iz);Fd=FD(is,iz);Fs=FS(is,iz);
if iz==1; z=0.15; end; if iz==2; z=0.2; end; if iz==3; z=0.3; end
if iz==4; z=0.35; end; if iz==5; z=0.4; end; if iz==6; z=0.45; end
To=0.1*Fs*Fd/Fa; % Período To

```

```

Tc=0.55*Fs*Fd/Fa; % Período donde inicia rama descendente de espectro
if is==1; r=1; end; if is==2; r=1; end; if is==3; r=1; end;
if is==4; r=1; end; if is==5; r=1.5; end;
if ip==1; eta=1.8; end; if ip==2; eta=2.48; end; if ip==3; eta=2.6; end
Tf=6.0; %Período final del espectro
dT=0.1; % Calcular con incremento de periodo dT
np=Tf/dT;
for i=1:np
    T(i)=(i-1)*dT;
    if T(i) <= To
        Sa(i)=z*Fa*(1+(eta-1)*(T(i)/To))*9.8;
    end
    if T(i) > To & T(i) <= Tc
        Sa(i)=eta*z*Fa*9.8;
    end
    if T(i) > Tc
        Sa(i)=eta*z*Fa*9.8*(Tc/T(i))^r;
    end
    EspectroD(i,1)=T(i);EspectroD(i,2)=Sa(i);
end
end

```

A2.5.3 Programa Spectrum_Capacity_Method3

```

function [Sd_dem,Sa_dem,B,EspectroD_Sa_SdB,j_dem,zeta_ray_eq,zeta_eq]...
    =Spectrum_Capacity_Method3(EspectroD,ND,Sdyi,EspectroC,zeta)
%Programa para encontrar el punto de demanda por el Método de espectro de
%Capacidad
%Edgar David Mora Martínez
%Noviembre de 2014
%-----
%[Sd_dem,Sa_dem,B,EspectroD_Sa_SdB,j_dem,zeta_ray_eq,zeta_eq]=...
%Spectrum_Capacity_Method3(EspectroD,ND,Sdyi,EspectroC,zeta)
%-----
%Método de espectro de Capacidad
%NOTA: Se pueden usar unidades consistentes.
%EspectroD: Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa
% el sismo de diseño para zeta=0.05
% EspectroD=[T1(s),A1(m/s2)
%            T2(s),A2(m/s2)
%            : , :
%            Tn(s),An(m/s2)]
%ND = Nivel de Diseño = 1:Alto, 2:Moderado, 3:Bajo, 4:Sin Nivel de Diseño
%EspectroC: Espectro de Capacidad (Sistema de un grado de libertad)
% EspectroC=[Sd1(m),Sa1(m/s2)
%            Sd2(m),Sa2(m/s2)
%            : , :
%            Sdn(m),San(m/s2)]
%Sdy = Desplazamiento en el tope de la estructura en el instante donde
%fluye el primer elemento de la estructura(Sistema de un grado de libertad)

%Linealización de espectro de diseño
Sdi=EspectroC(:,1);Sai=EspectroC(:,2);
close(gcf)
figure(1),hold off
title('Choose 3 or 2 points')
hold on,Spl=plot(Sdi,Sai,'color','black','LineWidth',2);grid minor
Saycc=Sai(round(Sdi*1000)/1000==round(Sdyi*1000)/1000);
plot(Sdyi,Saycc,'color','red','Marker','x','MarkerSize',10,'LineWidth',3)
axis([0,max(abs(Sdi)),0,max(abs(Sai))])
[Sdcc3,Sacc3]=ginputc('ShowPoints',true,'ConnectPoints',true);

if isempty(Sdcc3)==1,Sdycc1=Sdycc;Saycc1=Saycc;Sducc1=Sdcc2(end);

```

```

        Sauccl=Sacc2(end); Sdcc2=[0; Sdycc1; Sducc1]; Sacc2=[0; Saycc1; Sauccl];
    else
        [ESP]=sortrows([Sdcc3, Sacc3], -1);
        if size(ESP, 1)==1, Sdycc1=ESP(1, 1); Saycc1=ESP(1, 2);
            else Sdycc1=ESP(2, 1); Saycc1=ESP(2, 2); Sducc1=ESP(1, 1); Sauccl=ESP(1, 2);
        end
        if size(ESP, 1)>2, ESP=ESP(1:3, 1:2)-repmat(ESP(3, 1:2), 3, 1);
            ESP=sortrows(ESP, 1); Sdcc2=ESP(:, 1); Sacc2=ESP(:, 2);
        end
        if size(ESP, 1)==2, ESP(end+1, 1:2)=[0, 0]; Sdcc2=ESP(:, 1); Sacc2=ESP(:, 2); end
    end

    Sdy=Sdycc1; Say=Saycc1; Sdu=Sducc1; Sau=Sauccl;

    %Factores de corrección para diferentes Niveles de Diseño
    if ND==1
        k=1; %alfa=.2;
    elseif ND==2
        k=.8; %alfa=.15;
    elseif ND==3
        k=.6; %alfa=.1;
    elseif ND==4
        k=.333; %alfa=.05;
    end
    Sd=[0; Sdy; Sdu; Sdu*100]; Sa=[0; Say; Sau; Sdu*100];
    %Espectro de demanda Desplazamiento-Aceleración
    EspectroD_Sa_Sd=[(EspectroD(:, 1)/(2*pi)).^2.*EspectroD(:, 2), EspectroD(:, 2)];

    LSd=length(Sd);
    error=1; err=0; ii=0;
    n=.01; %incremento de qm
    Sdlim=max(Sdu);
    Sdm=0; %desplazamiento con que se comienza iteración
    %% Cálculo de Punto de Demanda
    cont=0; % contador de iteraciones
    Sa_dem=0; %inicialización de aceleración de demanda
    B=1; tolerancia=min(.0001, Sdy/10);
    Sd_dem=Sdlim+2*n; %inicialización de desplazamiento de demanda
    j_dem=1;
    while error>=tolerancia && Sdm<Sdlim+2*n
        cont=cont+1;
        miu=max(1, Sdm/Sdy);
        if size(zeta, 2)>1, cycle=j_dem; else cycle=1; end
        if miu==1, alfa=1; else alfa=max(0, ((Sau-Say)/(Sdu-Sdy))/(Say/Sdy)); end
        zeta_eq=max(0, 2*(miu-1)*(1-alfa)/(pi*miu*(1+alfa*miu-alfa)));
        zeta_ray_eq=min(.90, min(1, zeta(cycle))+k*zeta_eq);
        % B=max((zeta_ray_eq/min(1, zeta(cycle)))^0.3, 1);
    B=max(4/(1-log(zeta_ray_eq)), 1);
    %Se divide espectro para B dando un espectro que considera mayor zeta
    EspectroD_Sa_SdB=EspectroD_Sa_Sd/B;
    %Donde se cruza la curva de Espectro y Capacidad resistente se
    %obtiene una aceleración de demanda Adem
    %Bucles para encontrar punto donde se cruzan las curvas
    i=0;
    while i<size(EspectroD_Sa_SdB, 1)-1 % Bucle que itera tramos...
        %del espectro de diseño corregido
        i=i+1;
        %Pendiente de tramo de la curva de Capacidad
        m2=(EspectroD_Sa_SdB(i, 2)-EspectroD_Sa_SdB(i+1, 2))/...
            (EspectroD_Sa_SdB(i, 1)-EspectroD_Sa_SdB(i+1, 1));
        j=0;
        while j<LSd-1 % Bucle que itera tramos del espectro de capacidad
            j=j+1;
            m1=(Sa(j)-Sa(j+1))/(Sd(j)-Sd(j+1)); %Pend de tramo de Demanda
            %Se encuentra intersección de curvas con Ec de la recta
            Sd_dem1=(m1*Sd(j)-m2*EspectroD_Sa_SdB(i, 1)+...
                EspectroD_Sa_SdB(i, 2)-Sa(j))/(m1-m2);

```

```

Sa_dem1=m1*(Sd_dem1-Sd(j))+Sa(j);
l1(1)=Sd(j);l1(2)=Sa(j);l1(3)=Sd(j+1);
l1(4)=Sa(j+1);l2(1)=EspectroD_Sa_SdB(i,1);
l2(2)=EspectroD_Sa_SdB(i,2);l2(3)=EspectroD_Sa_SdB(i+1,1);
l2(4)=EspectroD_Sa_SdB(i+1,2);
l1minX=min([l1(1) l1(3)]);
l2minX=min([l2(1) l2(3)]);
l1minY=min([l1(2) l1(4)]);
l2minY=min([l2(2) l2(4)]);

l1maxX=max([l1(1) l1(3)]);
l2maxX=max([l2(1) l2(3)]);
l1maxY=max([l1(2) l1(4)]);
l2maxY=max([l2(2) l2(4)]);
if ((Sd_dem1<l1minX) || (Sd_dem1>l1maxX) || (Sa_dem1<l1minY)...
    || (Sa_dem1>l1maxY) || (Sd_dem1<l2minX) ||...
    (Sd_dem1>l2maxX) || (Sa_dem1<l2minY) || (Sa_dem1>l2maxY) )
else
    Sd_dem=Sd_dem1;Sa_dem=Sa_dem1;
    i=size(EspectroD_Sa_SdB,1);j=LSd;
    figure(1),clf,plot(Sd_dem,Sa_dem,'Marker','x','MarkerSize',7),
    hold on,plot(EspectroD_Sa_SdB(:,1),EspectroD_Sa_SdB(:,2)),
    drawnow

    break
    end
end
end
% [B,Sdm,Sd_dem,Sd_dem1]
error=abs(Sd_dem-Sdm);
if error<tolerancia && ((miu>=1 && Sd_dem>=Sdy) || (miu==1 && Sd_dem<=Sdy))
break
end
if Sd_dem>=Sdm% || isnan(Sd_dem1)==1
    Sdm=Sdm+n;
else
    Sdm=Sdm-2*n;n=n/2;%tolerancia=tolerancia/2;
    ii=ii+1;
end
err(cont)=error;
if mod(cont,50)==0
    n=.01;Sdm=Sdm-2*n;
end
if mod(cont,200)==0 && (mod(ii,200)==0 || ...
    round(err(cont)/tolerancia)==round(err(cont-100)/tolerancia))
    tolerancia=tolerancia*2;
end
end
j_dem=min(find(round(Sdi*1000)/1000==round(Sd_dem*1000)/1000));
if Sdm>Sdlim || Sd_dem>=Sdlim
display('Colapso de Estructura: Sd_demanda > Sd_u')
Sd_dem=Inf;Sa_dem=Inf;j_dem=LSd;
end
% plot(Sd,Sa,'color','green')
% hold on
% plot(EspectroD_Sa_SdB(:,1),EspectroD_Sa_SdB(:,2),'color','blue')
% plot(EspectroD_Sa_Sd(:,1),EspectroD_Sa_Sd(:,2),'--','color','red')
% legend('Curva de Capacidad','Espectro Diseño Sd-Sa / B',...
% 'Espectro Diseño Sd-Sa')
% grid minor

```

A2.5.4 Programa ginputc

```

function [x, y, button, ax] = ginputc(varargin)
%GINPUTC Graphical input from mouse.
% GINPUTC behaves similarly to GINPUT, except you can customize the
% cursor color, line width, and line style.
%
% [X,Y] = GINPUTC(N) gets N points from the current axes and returns
% the X- and Y-coordinates in length N vectors X and Y. The cursor
% can be positioned using a mouse. Data points are entered by pressing
% a mouse button or any key on the keyboard except carriage return,
% which terminates the input before N points are entered.
% Note: if there are multiple axes in the figure, use mouse clicks
% instead of key presses. Key presses may not select the axes
% where the cursor is.
%
% [X,Y] = GINPUTC gathers an unlimited number of points until the return
% key is pressed.
%
% [X,Y] = GINPUTC(N, PARAM, VALUE) and [X,Y] = GINPUTC(PARAM, VALUE)
% specifies additional parameters for customizing. Valid values for PARAM
% are:
% 'FigHandle' : Handle of the figure to activate. Default is(gcf).
% 'Color' : A three-element RGB vector, or one of the MATLAB
% predefined names, specifying the line color. See
% the ColorSpec reference page for more information
% on specifying color. Default is 'k' (black).
% 'LineWidth' : A scalar number specifying the line width.
% Default is 0.5.
% 'LineStyle' : '-', '--', '-.', ':'. Default is '-'.
% 'ShowPoints' : TRUE or FALSE specifying whether to show the
% points being selected. Default is false.
% 'ConnectPoints' : TRUE or FALSE specifying whether to connect the
% points as they are being selected. This only
% applies when 'ShowPoints' is set to TRUE. Default
% is true.
%
% [X,Y,BUTTON] = GINPUTC(...) returns a third result, BUTTON, that
% contains a vector of integers specifying which mouse button was used
% (1,2,3 from left) or ASCII numbers if a key on the keyboard was used.
%
% [X,Y,BUTTON,AX] = GINPUTC(...) returns a fourth result, AX, that
% contains a vector of axes handles for the data points collected.
%
% Requires MATLAB R2007b or newer.
%
% Examples:
% [x, y] = ginputc;
%
% [x, y] = ginputc(5, 'Color', 'r', 'LineWidth', 3);
%
% [x, y, button] = ginputc(1, 'LineStyle', ':');
%
% subplot(1, 2, 1); subplot(1, 2, 2);
% [x, y, button, ax] = ginputc;
%
% [x, y] = ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true);
%
% See also GINPUT, GTEXT, WAITFORBUTTONPRESS.
%
% Jiro Doke
% October 19, 2012
% Copyright 2012 The MathWorks, Inc.
try

```

```

        if verLessThan('matlab', '7.5')
            error('ginputc:Init:IncompatibleMATLAB', ...
                'GINPUTC requires MATLAB R2007b or newer');
        end
    catch %#ok<CTCH>
        error('ginputc:Init:IncompatibleMATLAB', ...
            'GINPUTC requires MATLAB R2007b or newer');
    end

    % Check input arguments
    p = inputParser();

    addOptional(p, 'N', inf, @(x) validateattributes(x, {'numeric'}, ...
        {'scalar', 'integer', 'positive'}));
    addParamValue(p, 'FigHandle', [], @(x) numel(x)==1 && ishandle(x));
    addParamValue(p, 'Color', 'k', @colorValidFcn);
    addParamValue(p, 'LineWidth', 0.5, @(x) validateattributes(x, ...
        {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}));
    addParamValue(p, 'LineStyle', '-', @(x) validatestring(x, ...
        {'-', '--', '-.', ':'}));
    addParamValue(p, 'ShowPoints', false, @(x) validateattributes(x, ...
        {'logical'}, {'scalar'}));
    addParamValue(p, 'ConnectPoints', true, @(x) validateattributes(x, ...
        {'logical'}, {'scalar'}));

    parse(p, varargin{:});

    N = p.Results.N;
    hFig = p.Results.FigHandle;
    color = p.Results.Color;
    linewidth = p.Results.LineWidth;
    linestyle = p.Results.LineStyle;
    showpoints = p.Results.ShowPoints;
    connectpoints = p.Results.ConnectPoints;

    %-----
    function tf = colorValidFcn(in)
        % This function validates the color input parameter

        validateattributes(in, {'char', 'double'}, {'nonempty'});
        if ischar(in)
            validatestring(in, {'b', 'g', 'r', 'c', 'm', 'y', 'k', 'w'});
        else
            assert(isequal(size(in), [1 3]) && all(in>=0 & in<=1), ...
                'ginputc:InvalidColorValues', ...
                'RGB values for "Color" must be a 1x3 vector between 0 and 1');
        % validateattributes(in, {'numeric'}, {'size', [1 3], '>=', 0, '<=', 1})
        end
        tf = true;
    end
    %-----

    if isempty(hFig)
        hFig = gcf;
    end

    % Try to get the current axes even if it has a hidden handle.
    hAx = get(hFig, 'CurrentAxes');
    if isempty(hAx)
        allAx = findall(hFig, 'Type', 'axes');
        if ~isempty(allAx)
            hAx = allAx(1);
        else
            hAx = axes('Parent', hFig);
        end
    end
end

```

```

% Handle interactive properties of HG objects. Save the current settings so
% that they can be restored later
allHG = findall(hFig);
propsToChange = {...
    'WindowButtonUpFcn', ...
    'WindowButtonDownFcn', ...
    'WindowButtonMotionFcn', ...
    'WindowKeyPressFcn', ...
    'WindowKeyReleaseFcn', ...
    'ButtonDownFcn', ...
    'KeyPressFcn', ...
    'KeyReleaseFcn', ...
    'ResizeFcn'};
validObjects = false(length(allHG), length(propsToChange));
curCallbacks = cell(1, length(propsToChange));

% Save current properties and set them to ''
for id = 1:length(propsToChange)
    validObjects(:, id) = isprop(allHG, propsToChange{id});
    curCallbacks{id} = get(allHG(validObjects(:, id)), propsToChange{id});
    set(allHG(validObjects(:, id)), propsToChange{id}, '');
end

% Save current pointer
curPointer = get(hFig, 'Pointer');
curPointerShapeCData = get(hFig, 'PointerShapeCData');

% Change window functions
set(hFig, ...
    'WindowButtonDownFcn', @mouseClickFcn, ...
    'WindowButtonMotionFcn', @mouseMoveFcn, ...
    'KeyPressFcn', @keyPressFcn, ...
    'ResizeFcn', @resizeFcn, ...
    'Pointer', 'custom', ...
    'PointerShapeCData', nan(16, 16));

% Create an invisible axes for displaying the full crosshair cursor
hInvisibleAxes = axes(...
    'Parent', hFig, ...
    'Units', 'normalized', ...
    'Position', [0 0 1 1], ...
    'XLim', [0 1], ...
    'YLim', [0 1], ...
    'HitTest', 'off', ...
    'HandleVisibility', 'off', ...
    'Visible', 'off');

% Create line object for the selected points
if showpoints
    if connectpoints
        pointsLineStyle = '-';
    else
        pointsLineStyle = 'none';
    end

    selectedPoints = [];
    hPoints = line(nan, nan, ...
        'Parent', hInvisibleAxes, ...
        'HandleVisibility', 'off', ...
        'HitTest', 'off', ...
        'Color', [1 0 0], ...
        'Marker', 'o', ...
        'MarkerFaceColor', [1 .7 .7], ...
        'MarkerEdgeColor', [1 0 0], ...
        'LineStyle', pointsLineStyle);
end

```



```

% Create tooltip for displaying selected points
hTooltipControl = text(0, 1, 'HIDE', ...
    'Parent', hInvisibleAxes, ...
    'HandleVisibility', 'callback', ...
    'FontName', 'FixedWidth', ...
    'VerticalAlignment', 'top', ...
    'HorizontalAlignment', 'left', ...
    'BackgroundColor', [.5 1 .5]);
hTooltip = text(0, 0, 'No points', ...
    'Parent', hInvisibleAxes, ...
    'HandleVisibility', 'off', ...
    'HitTest', 'off', ...
    'FontName', 'FixedWidth', ...
    'VerticalAlignment', 'top', ...
    'HorizontalAlignment', 'left', ...
    'BackgroundColor', [1 1 .5]);

% Call resizeFcn to update tooltip location
resizeFcn();

% Create full crosshair lines
hCursor = line(nan, nan, ...
    'Parent', hInvisibleAxes, ...
    'Color', color, ...
    'LineWidth', linewidth, ...
    'LineStyle', linestyle, ...
    'HandleVisibility', 'off', ...
    'HitTest', 'off');

% Prepare results
x = [];
y = [];
button = [];
ax = [];

% Wait until enter is pressed.
uiwait(hFig);

%-----
function mouseMoveFcn(varargin)
    % This function updates cursor location based on pointer location

    cursorPt = get(hInvisibleAxes, 'CurrentPoint');

    set(hCursor, ...
        'XData', [0 1 nan cursorPt(1) cursorPt(1)], ...
        'YData', [cursorPt(3) cursorPt(3) nan 0 1]);
end
%-----

%-----
function mouseClickedFcn(varargin)
    % This function captures mouse clicks.
    % If the tooltip control is clicked, then toggle tooltip display.
    % If anywhere else is clicked, record point.

    if isequal(gcf, hTooltipControl)
        tooltipClickFcn();
    else
        updatePoints(get(hFig, 'SelectionType'));
    end
end
%-----

%-----
function keyPressFcn(obj, edata) %#ok<INUSL>

```

```

% This function captures key presses.
% If "return", then exit.
% If "delete" (or "backspace"), then delete previous point.
% If any other key, record point.

key = double(edata.Character);
if isempty(key)
    return;
end

switch key
    case 13 % return
        exitFcn();

    case {8, 127} % delete or backspace
        if ~isempty(x)
            x(end) = [];
            y(end) = [];
            button(end) = [];
            ax(end) = [];

            if showpoints
                selectedPoints(end, :) = [];
                set(hPoints, ...
                    'XData', selectedPoints(:, 1), ...
                    'YData', selectedPoints(:, 2));
            end

            displayCoordinates();
        end

    otherwise
        updatePoints(key);

end
end
%-----
%-----
function updatePoints(clickType)
% This function captures the information for the selected point

hAx = gca;
pt = get(hAx, 'CurrentPoint');
x = [x; pt(1)];
y = [y; pt(3)];
ax = [ax; hAx];

if ischar(clickType) % Mouse click
    switch lower(clickType)
        case 'open'
            clickType = 1;
        case 'normal'
            clickType = 1;
        case 'extend'
            clickType = 2;
        case 'alt'
            clickType = 3;
    end
end
button = [button; clickType];

displayCoordinates();

if showpoints
    cursorPt = get(hInvisibleAxes, 'CurrentPoint');
    selectedPoints = [selectedPoints; cursorPt([1 3])];
end

```

```

        set(hPoints, ...
            'XData', selectedPoints(:, 1), ...
            'YData', selectedPoints(:, 2));
    end

    % If captured all points, exit
    if length(x) == N
        exitFcn();
    end
end
%-----
%-----
function tooltipClickFcn()
    % This function toggles the display of the tooltip

    if strcmp(get(hTooltipControl, 'String'), 'SHOW')
        set(hTooltipControl, 'String', 'HIDE');
        set(hTooltip, 'Visible', 'on');
    else
        set(hTooltipControl, 'String', 'SHOW');
        set(hTooltip, 'Visible', 'off');
    end
end
%-----
%-----
function displayCoordinates()
    % This function updates the coordinates display in the tooltip

    if isempty(x)
        str = 'No points';
    else
        str = sprintf('%d: %0.3f, %0.3f\n', [1:length(x); x; y]);
        str(end) = '';
    end
    set(hTooltip, ...
        'String', str);
end
%-----
%-----
function resizeFcn(varargin)
    % This function adjusts the position of tooltip when the figure is
    % resized

    sz = get(hTooltipControl, 'Extent');
    set(hTooltip, 'Position', [0 sz(2)]);
end
%-----
%-----
function exitFcn()
    % This function exits GINPUTC and restores previous figure settings

    for idx = 1:length(propsToChange)
        set(allHG(validObjects(:, idx)), propsToChange(idx),
curCallbacks{idx});
    end

    % Restore window functions and pointer
    % set(hFig, 'WindowButtonDownFcn', curWBDF);
    % set(hFig, 'WindowButtonMotionFcn', curWBMF);
    % set(hFig, 'WindowButtonUpFcn', curWBUF);
    % set(hFig, 'KeyPressFcn', curKPF);
    % set(hFig, 'KeyReleaseFcn', curKRF);
    % set(hFig, 'ResizeFcn', curRF);

```

```

% Restore pointer
set(hFig, 'Pointer', curPointer);
set(hFig, 'PointerShapeCData', curPointerShapeCData);

% Delete invisible axes and return control
delete(hInvisibleAxes);
uiresume(hFig);
end
%-----
end

```

A2.5.5 Programa despla_fuerza2

```

function [ql,Fl,Vo,fil,Tinelast,Dt_dem,NCycle]...
despla_fuerza2(Dtaci,Vaci,gamali,Tli,fili,Sd_dem,M)
% Calculo de Desplazamientos y Fuerzas asociados al punto de demanda
%
%      Ing, David Mora y Dr. Roberto Aguiar
%      29 de Diciembre de 2014
%.....
% Dt      Desplazamiento en el tope en cada ciclo de carga
% V      Cortante basal en cada ciclo de carga
% alfa1   Factor de masa modal
% gamal   Factor de participacion modal
% fil     contiene primer modo de vibracion en cada ciclo de carga
% M      Matriz de Masas
% Y      Vector con las coordenadas Y de los nudos del portico
%.....
% ql     Vector con los desplazamientos laterales
% Fl     Vector con fuerzas laterales
% Vo     Cortante Basal
% T1     Periodo fundamental
% fi     Modo de vibracion para el punto de desempeño
np=size(fili,1);
nj=length(Dtaci); fil=fili(:,end); gama=gamali(end); Tinelast=Tli(end);
NCycle=np; Vo=Vaci(end);
for i=1:nj
    Dtac=Dtaci(i);
    Vac=Vaci(i); gamal=gamali(i); T1=Tli(i);
    Sd_Dtac=Dtac/gamal/fili(np,i);
    if Sd_Dtac>=Sd_dem
        fil=fili(:,i);
gama=gamal;
        Vo=Vac;
        Tinelast=T1;
        NCycle=i;
break
    end
end

ql=gamal*Sd_dem*fili(:,i); % Desplazamientos laterales en el portico
Dt_dem=ql(np);
Fl=(sum(M)'.*fil*Vo)/sum(sum(M)'.*fil);

```

A2.5.6 Programa deriva0

```

function [Drift,graph]=deriva0(Y,qtine)
%
% Programa para encontrar la deriva de piso segun NEC2011
%
%                               Ing. Byron Gallegos Ortiz
%                               EPN-UTPL
%                               CIENCI ESPE
%                               byrons007@gmail.com
%                               Diciembre de 2014
%-----
% [Derv]=deriva(Y,qtine)
%-----
%Datos:
%Y      Vector que contiene coordenada en Y de cada piso
%qtine  desplazamiento inelastico de cada piso
%Resultado
%Derv= Deriva de piso

d=length(qtine);
Y1=unique(Y);
Y2=length(Y1);
for i=2:Y2
    h(i-1)=Y1(i)-Y1(i-1);
end
a=length(h);
if d>a
    for g=1:ad
        Drift(g)=(qtine(g+1)-qtine(g))*100/h(g);
    end
else
    Drift(1)=qtine(1)*100/h(1);
    for g=2:a
        Drift(g)=(qtine(g)-qtine(g-1))*100/h(g);
    end
end

Drift1(length(Drift)*2)=0;
for s=2:2:length(Drift1)
    Drift1(s)=Drift(s/2);
    Drift1(s-1)=Drift(s/2);
end

npl((length(Y1)-1)*2)=0;
for w=2:2:length(npl)
    npl(w)=Y1(w/2+1);
end

end
for q=4:2:length(npl)
    npl(q-1)=npl(q-2);
end

hold off
graph=plot(Drift1,npl);
xlabel('Storey Drift (%)');
ylabel('Storey Height');
%title('Storey Drift');
grid on

```

A2.6 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN MEC_NEC14_22

No se colocarán los códigos de programas ya puestos con anterioridad.

A2.6.1 Programa MEC_NEC14_22

```
%MEC_NEC14_22
%Program to find the target point
%Program need:
%Sd,Sa from capacity spectrum and Dtac,Vac,gama,T,fi_n,qdem,M,Y0

[EspecetroD]=espectro_nec14_mec;
EspecetroD=[EspecetroD(:,1),EspecetroD(:,2)];
%Target Point Calculation
ld=min(length(Dtac),length(gama));
Sdcc=Dtacc(1,1:ld)./gama(1,1:ld);Sacc=Vacc(1,1:ld)/Mt./alfa(1,1:ld);
Sdycc=Dtaccy./gama(1,1);
EspecetroC=[Sdcc',Sacc'];
ND=input(...
'\n Seismic resistant Level 1:High, 2:Moderate, 3:Low, 4:No Seismic Design:');
fil(:,:)=FI(:,1,:);Tl=T(1,:);gama1=gama(1,:);
% [Sd_dem,Sadem,B,EspecetroD_Sa_SdB,jdem,zeta_ray_eq,zeta_eq]=...
% Spectrum_Capacity_Method3(EspecetroD,ND,Sdycc,EspecetroC,zeta(1,1));
[Dt_dem,jdem,zeta_ray_eq,B]=CoefMethod440_2(Tl(1,1),3,[Dtacc',Vacc']...
,abs(Vaccy),abs(Dtaccy),Mt,alfa(1,1),EspecetroD(:,2),...
EspecetroD(:,1),gama(1,1),zeta(1,1)),Sd_dem=Sdcc(jdem)

EspecetroD_Sa_Sd=[(EspecetroD(:,1)/(2*pi)).^2.*...
EspecetroD(:,2),EspecetroD(:,2)];%Displacement-Acceleration Spectrum
EspecetroD_Sa_SdB=EspecetroD_Sa_Sd/B;
Vo=Vacc(jdem);Dt_dem=Dtacc(jdem);
[Drift]=deriva(Y0,qacumc(1:np,jdem),np,CG,1);MaxDrift=max(Drift);

fprintf('Sd_dem= %10.3f\n',Sd_dem);
fprintf('Dt_dem= %10.3f\n',Dt_dem);
fprintf('Vo_dem= %10.3f\n',Vo);
fprintf('Num Cycle= %10.3f\n',jdem);
fprintf('MaxDrift (percent)= %10.3f\n',MaxDrift);
input('Press enter')
jdem1=min(size(Table31,3),jdem);
Dibujo_Din2(jdem1,X1(:,jdem1),Y1(:,jdem1),NI,NJ,L1(:,jdem1),...
seno1(:,jdem1),coseno1(:,jdem1),Table31(:, :, jdem1),1)
input('Press enter')
```

A2.6.2 Programa CoefMethod440_2

```
function [Dt_dem,j_dem,zeta_ray_eq,B]=...
CoefMethod440_2(Tl,Class,Curv_Cap,Vyreal,Dtyreal,Mt,alfal,...
Sa_dem,T_dem,gama1,zeta)
%Programm to find the target point Cefficient Method FEMA440
%Edgar David Mora Martínez
%November 2015
%-----
```

```

% [Dt_dem, j_dem, zeta_ray_eq, B]=...
%   CoefMethod440_2(T1, Class, Curv_Cap, Vyreal, Dtyreal, Mt, alfa1, ...
%   Sa_dem, T_dem, gamal, zeta)
%-----
%Spectrum capacity method
%NOTE: Consistent Units
%T_dem, Sa_dem = Period and acceleration of design spectrum
%Curv_Cap = Curve of Capacity
%   EspectroC=[Sd1(m), Sa1(m/s2)
%             Sd2(m), Sa2(m/s2)
%             : , :
%             Sdn(m), San(m/s2)]
%Vyreal and Dtyreal = Basal Shear and Top Deformation of the first
%   section yield
%T1, alfa1, gamal = Period, effective modal mass and factor of modal
%participation of first mode
%Class B=1, C=2, D=3

%Linealización de espectro de diseño
Dtacc0=Curv_Cap(:,1); Vacc0=Curv_Cap(:,2);
figure(1), hold off
Spl=plot(Dtacc0, Vacc0, 'color', 'black', 'LineWidth', 2); grid minor
hold on, plot(abs(Dtyreal), abs(Vyreal), 'color', 'red', 'Marker', 'x', ...
'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 3)
axis([min(Dtacc0), max(abs(Dtacc0)), min(Vacc0), max(abs(Vacc0))])
[Dtacc2, Vacc2]=ginputc('ShowPoints', true, 'ConnectPoints', true);
[ESP]=sortrows([Dtacc2, Vacc2], -1);
if size(ESP, 1)>2, ESP=ESP(1:3, 1:2)-repmat(ESP(3, 1:2), 3, 1); end
Dty=ESP(2, 1); Vy=ESP(2, 2); Dtu=ESP(1, 1); Vu=ESP(1, 2);

%Te=Effective fundamental period of the SDOF model
Ki=Vyreal/Dtyreal; Ke=Vy/Dty;
Te=T1*sqrt(Ki/Ke);
%Coefficients calculation
if Class<=2, a=130; elseif Class==3, a=90; else a=60; end
W=Mt*9.8;
Cm=alfa1;
for i=1:length(T_dem), if T_dem(i)>=Te, Sa=Sa_dem(i); break, end, end
Rmax=Dtu/Dty;
R=max(1, min(Rmax, (Sa/9.8)/(Vy/W)*Cm));

C1=1+(R-1)/a/Te^2;
if T1>1, C1=1; else C1=(T1-.2)*abs((C1-1))/(1-0.2)+1; end

C2=1+1/800*((R-1)/T1)^2;
if T1>0.7, C1=1; else C1=(T1-.2)*abs((C1-1))/(0.7-0.2)+1; end
C0=gamal;
% Cm, Sa, C0, C1, C2, R, Rmax, Te, T1, Vy
Dt_dem=C0*C1*C2*(Sa/9.8)*Te^2/4/pi^2*9.81;
j_dem=min(find(round(Dtacc0*1000)/1000==round(Dt_dem*1000)/1000));
ND=1;
if ND==1; k=1; elseif ND==2; k=.8; elseif ND==3; k=.6; elseif ND==4; k=.333; end
miu=max(1, Dt_dem/Dty);
if miu==1, alfa=1; else alfa=max(0, ((Vu-Vy)/(Dtu-Dty))/Ke); end
zeta_eq=max(0, 2*(miu-1)*(1-alfa)/(pi*miu*(1+alfa*miu-alfa)));
zeta_ray_eq=min(.90, min(1, zeta)+k*zeta_eq);

B=max(4/(1-log(zeta_ray_eq)), 1);

```

A2.7 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN MEC_NEC14_5

No se colocarán los códigos de programas ya puestos con anterioridad.

A2.7.1 Programa MEC_NEC14_5

```

% MEC_NEC14_5
% [EspectroD]=espectro_nec14_mec2(4,5,2);
% David Mora
%Target Point Calculation
ld=min(length(Dtacc),length(gama));
Sdcc=Dtacc(1,1:ld)./gama(1,1);Sacc=Vacc(1,1:ld)/Mt./alfa(1,1);
% Sdcc=Sdc;
Sdycc=Dtaccy./gama(1,jy);
EspectroC=[Sdcc',Sacc'];

if exist('jf')==0,jf=j(end);end
figure(1),hold off,hold off

ljV=length(jV);codd=0;
while ljV>3 && codd==0
    for uuu=ljV-numA:-1:1
        display('-----')
        en=max(0,jV(end)-length(Sdcc)+(uuu-1);in=en+numA;
        [ED,~,~]=polygeom(Sdcc(jV(ljV-in):jV(ljV-en))',...
        Sacc(jV(ljV-in):jV(ljV-en))');ED=ED(1),
        [EE,~,~]=polygeom([0;max(abs(Sdcc(jV(max(ljV-in,1)):...
        jV(max(ljV-en,1)))));max(abs(Sdcc(jV(max(ljV-in,1)):...
        jV(max(ljV-en,1)))))], [0;max(Sacc(abs(Sdcc))==max(abs(...
        Sdcc(jV(max(ljV-in,1)):jV(max(ljV-en,1))))));0]);
        EE=EE(1),zeta_eq=ED(1)/EE(1)/4/pi,zeta_ray_eq=zeta_eq+zeta(1,1)
    figure(1),clf
        B=max(4/(1-log(zeta_ray_eq)),1)
    EspectroD_Sa_Sd=[(EspectroD(:,1)/(2*pi)).^2.*...
        EspectroD(:,2),EspectroD(:,2)];
        EspectroD_Sa_SdB=EspectroD_Sa_Sd/B;
        jdem=jV(max(ljV-en,1))
        Sd_dem=Sdcc(jdem)
        Sdcc2=Sdcc(jV(ljV-in):jV(ljV-en));Sacc2=Sacc(jV(ljV-in):jV(ljV-en));
    if Sd_dem<0,Sdcc2=-Sdcc2;Sacc2=-Sacc2;end
        jdeml=min(size(X1,2),min(size(Table31,3),jdem));
    subplot(1,2,1)
        Dibujo_DinMEC(jdeml,X1(:,jdeml),Y1(:,jdeml),NI,NJ,L1(:,jdeml)...
        ,seno1(:,jdeml),coseno1(:,jdeml),Table31(:, :, jdeml),1)
        subplot(1,2,2)
            plot(Sdcc(jV(ljV-in):jV(ljV-en)),Sacc(jV(ljV-in):jV(ljV-en))...
            , 'color','g','LineWidth',2);hold on % Spetrum Capacity
            plot(EspectroD_Sa_SdB(:,1),EspectroD_Sa_SdB(:,2),'color','blue'...
            , 'LineWidth',2) % Final Demand Spectrum
            plot(EspectroD_Sa_Sd(:,1),EspectroD_Sa_Sd(:,2),'color',...
            'red','LineWidth',2) % Initial Demand Spectrum
            plot(-EspectroD_Sa_SdB(:,1),-EspectroD_Sa_SdB(:,2),'color',...
            'blue','LineWidth',2) % Final Demand Spectrum
            plot(-EspectroD_Sa_Sd(:,1),-EspectroD_Sa_Sd(:,2),'color',...
            'red','LineWidth',2) % Initial Demand Spectrum
        axis([min(min(Sdcc),-max(EspectroD_Sa_Sd(:,1))), max(max(Sdcc)...
        ,max(EspectroD_Sa_Sd(:,1))), min(min(Sdcc),...
        -max(EspectroD_Sa_Sd(:,2))), max(max(Sacc),...
        max(EspectroD_Sa_Sd(:,2)))]);

```



```

        grid on,

        drawnow
        curve=input('Choose=');
        if curve==1
            codd=1;
break
        end
        end
        display('Repeat')
        display('-----')
end

Vo=Vacc(jdem);Dt_dem=Dtacc(jdem);
Vomax=max(abs(Vacc(1:jdem)));Dt_demmax=max(abs(Dtacc(1:jdem)));
Driftmax=max(max(abs(Drift(1:min(jdem,length(Drift)),:)))));
Vomax,Dt_demmax,T(1,1),Driftmax
Drift2=Drift(min(jdem,length(Drift)),:);
MaxDrift=max(abs(Drift2));

Dtacc1=Dtacc;Vaccl=Vacc;

```

A2.8 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN RESULTSMEC_B

No se colocarán los códigos de programas ya puestos con anterioridad.

A2.8.1 Programa ResultsMEC_B

```

% ResultsMEC_B
% Program to display Table3 and graphics from Pushover and MEC programs.
% Program need:
% Table3,Dtac,Vac,Sd,Sa,EspectroD_Sa_Sd,EspectroD_Sa_SdB,j,
% X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno

%.....
%.....Table3 Results.....
%.....
fprintf('      NI      NF      NI      NF      NI      NF      NI      NF
NI      NF      NI      NF\n');
fprintf('      jMy      jMy      jMc      jMc      jMu      jMu      SMY      SMY
SMc      SMc      SMu      SMu\n');
fprintf('%7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f
%7.0f\n',Table3');%Table3 Results
%.....
%.....
%.....Graphics.....
%.....
%.....
hold off
subplot(1,3,1);
ff=plot(Dtac,Vac(1,1:length(Dtac)),'color','black','LineWidth',2);
axis([0,max(Dtac),0,max(Vac(1,1:length(Dtac)))]);
grid on;title('V-Roof Deformation Curve')
if sum(Table1(:,1)==1.3)>0,hold on,limi=min(length(Disol),length(Vac));
plot(Disol(1:limi),Vac(1:limi),'red','LineWidth',2);

```

```

        legend('Complete Structure','Aisladores');
end

subplot(1,3,2);plot(Sd,Sa,'color','green','LineWidth',2);
hold on % Spetrum Capacity
plot(EspectroD_Sa_SdB(:,1),EspectroD_Sa_SdB(:,2),...
     'color','blue','LineWidth',2) % Final Demand Spectrum
plot(EspectroD_Sa_Sd(:,1),EspectroD_Sa_Sd(:,2),'color',...
     'red','LineWidth',2) % Initial Demand Spectrum
axis([0, max(max(Sd),max(EspectroD_Sa_Sd(:,1))), 0, ...
     max(max(Sa),max(EspectroD_Sa_Sd(:,2)))]);grid on
legend('Capacity Spectrum','Design Spectrum Sd-Sa/B',...
     'Design Spectrum Sd-Sa')

subplot(1,3,3);
title('Structure and hinge scheme')
Dibujo_Din(jdem1,X1(:,jdem1),Y1(:,jdem1),NI,NJ,L1(:,jdem1),...
seno1(:,jdem1),coseno1(:,jdem1),Table31(:,jdem1),1)
% Dibujo_Din(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,1)
hold off

```

A2.9 PROGRAMA Y SUBPROGRAMAS EN RESULTSMEC_B22

No se colocarán los códigos de programas ya puestos con anterioridad.

A2.9.1 Programa ResultsMEC_B22

```

% ResultsMEC_B22
% Program to display Table3 and graphics from Pushover and MEC programs.
% Program need:
% Table3,Dtac,Vac,Sd,Sa,EspectroD_Sa_Sd,EspectroD_Sa_SdB,j,
% X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno

%.....
%.....Table3 Results.....
%.....
fprintf('      NI      NF      NI      NF      NI      NF      NI      NF
NI      NF      NI      NF\n');
fprintf('      jMy      jMy      jMc      jMc      jMu      jMu      SMY      SMY
SMc      SMc      SMu      SMu\n');
fprintf('%7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f %7.0f
%7.0f\n',Table3');%Table3 Results
%.....
%.....
%.....Graphics.....
%.....
%.....
hold off
subplot(1,3,1);
gra3=plot(abs(Dtac),abs(Vac),'b--','LineWidth',1);
hold on,gra4=plot(abs(Dtacc),abs(Vacc),'b','LineWidth',2.2);
axis([0, max(max(Dtac)), 0, max(max(Vac))]);
legend([gra3(1),gra4],'Modos de Vibración','Resultante')
if sum(Table1(:,1)==1.3)>0,hold on,

```

```

    gra6=plot(Disol,Vacc,'red','LineWidth',2);
    legend([gra3(1),gra4,gra6],'Modos de Vibración',...
    'Estructura Completa','Aisladores','Location','SouthEast');
end
grid on,ylabel('Cortante Basal [T]'); xlabel('Desplazamiento en tope [m]');
title('Sistema tradicional Cortante-Desplazamiento')

subplot(1,3,2);plot(Sdcc,Sacc,'color','black','LineWidth',2);
hold on % Spetrum Capacity
plot(EspectroD_Sa_SdB(:,1),EspectroD_Sa_SdB(:,2),'color',...
'blue','LineWidth',2) % Final Demand Spectrum
plot(EspectroD_Sa_Sd(:,1),EspectroD_Sa_Sd(:,2),'color','red',...
'LineWidth',2) % Initial Demand Spectrum
axis([0, max(max(Sdcc),max(EspectroD_Sa_Sd(:,1))), 0,...
max(max(Sacc),max(EspectroD_Sa_Sd(:,2)))]);
grid on,ylabel('Aceleración de Respuesta [m/s2]');
xlabel('Desplazamiento de Respuesta [m]');
legend('Resultante','Esp Diseño/B','Esp Diseño')
title('Sistema de respuesta Aceleración-Desplazamiento')

subplot(1,3,3);
title('Structure and hinge scheme')
% Dibujo_Din2(j,X,Y,NI,NJ,L,seno,coseno,Table3,1)
Dibujo_Din(jdem1,X1(:,jdem1),Y1(:,jdem1),NI,NJ,L1(:,jdem1),...
seno1(:,jdem1),coseno1(:,jdem1),Table31(:,jdem1),1)
hold off

```

ANEXO No3
OTROS PROGRAMAS REALIZADOS EN MATLAB

A3.1 PROGRAMA Diagr_Momento_Curvatura_AceroV

Este programa encuentra el diagrama Momento curvatura para elementos sometidos a flexión.

Diagr_Momento_Curvatura_AceroV

```

function [EI,EA,R,EIbi]=Diagr_Momento_Curvatura_AceroV(Seccion,Ma)
%Programa que calcula EI de una sección de acero con un Momento Actuante
%este programa es válido para vigas con carga axial despreciable.
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.20,.01,.10,.01];Ma=10;Pa=100; %ejemplo
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.77216,.027178,.381,.016637];Ma=300;
%ejemplo W30x173
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.36322,.021844,.37084,.013335];Ma=200;
%ejemplo W14x109
%-----
% [EI,EA,R,EIbi]=Momento_Curvatura_AceroV(Seccion,Ma)
%-----
%NOTA: Se deben usar unidades consistentes.
%Sección: [fy,fu,Ey,Tipo,d,tf,b,tw]
%fy:      Esfuerzo de fluencia del acero
%fu:      Esfuerzo máximo del acero
%Ey:      Módulo de Young del acero
%Tipo:    Tipo de Sección. Escribir uno de los siguientes números:
%         1 :Sección tipo I simétrica
%         2 :Sección tipo Tubo Rectangular hueco simétrico
%d:       Altura de la Sección
%tf:      Espesor del patín
%b:       Ancho del patín
%tw:      Espesor del alma
%
%Ma:      Momento actuante
%EI:      Rigidez por flexión correspondiente a Ma
%EA:      Rigidez Axial
%R:       Relación entre EI actuante y EI en Mp: EI/EIp
fy=Sección(1);fu=Sección(2);Ey=Sección(3);Tipo=Sección(4);
d=Sección(5);tf=Sección(6);b=Sección(7);tw=Sección(8);

%Para acero (ASTM)
epsilon_y=fy/Ey;%Deformación unitaria en fluencia
epsilon_sh=0.02;%Deformación unitaria en luego de zona plástica
epsilon_u=0.14;%Deformación unitaria en esfuerzo máximo
epsilon_r=0.2;%Deformación unitaria en esfuerzo rotura

%Puntos principales de Deformación unitaria
epsilon=[0;
    epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/20+epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/10+epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/4+epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/1.1+epsilon_y;
    epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/8+epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/4+epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/2+epsilon_sh;
    epsilon_u;
    abs((epsilon_r-epsilon_u))/2+epsilon_u;
    epsilon_r];

```

```

%Tipo de Sección
if Tipo==1
    tww=tw;
elseif Tipo==2
    tww=2*tw;
end
A=d*tww+(b-tww)*tf;

fi=epsilon/(d/2);%Puntos de curvatura partiendo de Hipótesis de Navier

endurecimiento=find(epsilon==epsilon_sh);%ubicación de epsilon_sh
%-----
%           Cálculo de curva esfuerzo deformación unitaria
%-----
ii=1;
f(ii)=0;

%Fluencia
ii=ii+1;
f(ii)=fy;%Esfuerzo

%Endurecimiento
for j=ii+1:endurecimiento
    ii=ii+1;
    f(ii)=fy;%Esfuerzo
end

%Plastificado
syms epsi
for i=ii+1:length(epsilon)
    ii=ii+1;
    r=(epsi-epsilon_sh)/(epsilon_u-epsilon_sh);
    ecf=fy*(1+r*(fu/fy-1)*exp(1-r));%ecuación de esf después de zona plást
    f(ii)=subs(ecf,epsi,epsilon(ii));%Esfuerzo
end

%-----
%           Cálculo de deformación por Carga Axial
%-----

EA=Ey*A;

%-----
%           Cálculo de Momentos por Flexión
%-----
ii=1;
Mr(ii)=0;%Momento Resistente

%Fluencia
ii=ii+1;
Fw(ii)=d/2*fy/2*tww;%Fuerza resistente
brazow(ii)=2/3*(d/2)*2;
Ff(ii)=tf/2*(fy*(1+(d/2-tf)*2/d))*(b-tww);%Fuerza resistente
brazof(ii)=d-tf;

%Endurecimiento
for j=ii+1:endurecimiento
    ii=ii+1;
    xy=epsilon_y/epsilon(ii)*d/2;
    Fw(ii)=(xy*fy/2+(d/2-xy)*fy)*tww;%Fuerza resistente del Alma
    brazow(ii)=2*(xy^2*2/3*fy/2+(d/2-xy)*fy*(d/2+xy)/2)/(Fw(ii)/tww);
    if tf>d/2-xy
        fprintf('error tf>d/2-xy\n')
        break
    end
end
Ff(ii)=tf*fy*(b-tww);%Fuerza resistente del patín

```

```

brazof(ii)=d-tf;
end

%Plastificado
syms epsi
for i=ii+1:length(epsilon)
ii=ii+1;
xy=epsilon_y/epsilon(ii)*d/2;
xsh=epsilon_sh/epsilon(ii)*d/2;
xu=epsilon_u/epsilon(ii)*d/2;
r=(epsi-xsh)/(xu-xsh);
ecf=fy*(1+r*(fu/fy-1)*exp(1-r));%ec de esf después de zon plástica
Aw=vpa(int(ecf,epsi,xsh,d/2));%Área bajo la curva
Fw(ii)=(xy*fy/2+(xsh-xy)*fy+Aw)*tww;%Fuerza resistente
brazow(ii)=2*(xy^2*2/3*fy/2+(xsh-xy)*fy*(xsh+xy)/2+...
(vpa(int(ecf*epsi,epsi,xsh,d/2))+xsh*Aw))/(Fw(ii)/tww);
if tf>d/2-xsh
fprintf('error tf>d/2-xsh\n')
break
end
Af=vpa(int(ecf,epsi,d/2-tf,d/2));%Área bajo la curva
Ff(ii)=Af*(b-tww);%Fuerza resistente
brazof(ii)=d-tf;
end

%Cálculo de Momentos resistentes y EI
EI=0;PEI=zeros(1,length(epsilon)); R=0;
I=(b*d^2/6-(b-tww)*(d-2*tf)^3/6/d)*d/2;
for j=2:length(epsilon)
Mr(j)=Ff(j)*brazof(j)+Fw(j)*brazow(j);%Momento Resistente
PEI(j)=(Mr(j)-Mr(j-1))/(fi(j)-fi(j-1));%Ptos de EI para c/ pto principal
if (Ma>Mr(j-1) && Ma<=Mr(j)) || Ma==0 && PEI(j)>0
EI=PEI(j);
R=EI/(Ey*I);
end
end
PEI(1)=PEI(2);%EI para primer punto

%%Gráficos de Curvas Esfuerzo-Deformación Unitaria y Momento-Curvatura
subplot(1,2,1);plot(epsilon,f,'LineWidth',2);grid minor;title...
('Esfuerzo-Deformación Unitaria');
subplot(1,2,2);plot(fi,Mr,'LineWidth',2);grid minor;title...
('Momento-Curvatura')

%-----
%
%-----
q=0.007;
Afc=b*tf;Awc=d*tww;
Mp=fy*((Afc-tww*tf)*(d-tf)+(Awc*d/4));%Momento plástico
Mbiy=Mp;
fibi_y=Mbiy/(Ey*I);
fibi_u=120*fibi_y;
Mbi_u=(fibi_u-fibi_y)*q*Ey*I+Mbi_y;
fibi=[0,fibi_y,fibi_u];
Mbi=[0,Mbi_y,Mbi_u];

%Cálculo de EI
EIbi=0;PEIbi=zeros(1,length(Mbi)-1);
for jj=2:length(Mbi)
%Puntos de EI para cada punto principal
PEIbi(jj)=(Mbi(jj)-Mbi(jj-1))/(fibi(jj)-fibi(jj-1));
if (Ma>Mbi(jj-1) && Ma<=Mbi(jj)) || Ma==0 && PEIbi(jj)>0
EIbi=PEIbi(jj);
end
end
hold on

```

```

plot(fibi,Mbi,'color','red','LineWidth',2);
axis([0,max(max(fi),max(fibi))*1.05,0,max(max(Mr),max(Mbi))*1.1])
legend('Modelo Completo','Modelo Bilineal','Location','SouthEast')
%Fin

```

A3.2 PROGRAMA Diagr_Momento_Curvatura_AceroC

Este programa encuentra el diagrama Momento curvatura para elementos sometidos a flexocompresión.

Diagr_Momento_Curvatura_AceroC

```

function [EI,EA,R]=Diagr_Momento_Curvatura_AceroC(Seccion,Ma,Pa)
%Programa que calcula EI de una sección de acero con un Momento Actuante y
%una carga axial actuante
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.50,.02,.20,.01];Ma=60;Pa=80;%ejemplo
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.77216,.027178,.381,.016637];Ma=300;Pa=80;
%ejemplo W30x173
%clear;Seccion=[25300,40800,20430000,1,.36322,.021844,.37084,.013335];Ma=100;Pa=8
0; %ejemplo W14x109
%-----
% [EI,EA,R]=Momento_Curvatura_Acero2(Seccion,Ma,Pa)
%-----
%NOTA: Se deben usar unidades consistentes.
%Sección: [fy,fu,Ey,Tipo,d,tf,b,tw]
%fy:      Esfuerzo de fluencia del acero
%fu:      Esfuerzo máximo del acero
%Ey:      Módulo de Young del acero
%Tipo:    Tipo de Sección. Escribir uno de los siguientes números:
%         1 :Sección tipo I simétrica
%         2 :Sección tipo Tubo Rectangular hueco simétrico
%d:       Altura de la Sección
%tf:      Espesor del patín
%b:       Ancho del patín
%tw:      Espesor del alma
%
%Ma:      Momento actuante
%Pa:      Fuerza Axial actuante
%EI:      Rigidez por flexión
%EA:      Rigidez Axial
%R:       Relación entre EI actuante y EI en Mp: EI/EIp
fy=Sección(1);fu=Sección(2);Ey=Sección(3);Tipo=Sección(4);
d=Sección(5);tf=Sección(6);b=Sección(7);tw=Sección(8);

%Para acero (ASTM)
epsilon_y=fy/Ey;%Deformación unitaria en fluencia
epsilon_sh=0.02;%Deformación unitaria en luego de zona plástica
epsilon_u=0.14;%Deformación unitaria en esfuerzo máximo
epsilon_r=0.2;%Deformación unitaria en esfuerzo rotura

%Puntos principales de Deformación unitaria
epsilon=[0;
        epsilon_y/10;
        epsilon_y/4;

```



```

    epsilon_y/2;
    epsilon_y/1.1;
    epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/20+epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/10+epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/2+epsilon_y;
    abs((epsilon_sh-epsilon_y))/1.1+epsilon_y;
    epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/20+epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/10+epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/5+epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/2+epsilon_sh;
    abs((epsilon_u-epsilon_sh))/1.1+epsilon_sh;
    epsilon_u;
    abs((epsilon_r-epsilon_u))/20+epsilon_u;
    abs((epsilon_r-epsilon_u))/7+epsilon_u;
    abs((epsilon_r-epsilon_u))/2+epsilon_u;
    abs((epsilon_r-epsilon_u))/1.1+epsilon_u;
    epsilon_r];

%Tipo de Sección
if Tipo==1
    tww=tw;
elseif Tipo==2
    tww=2*tw;
end
A=d*tww+(b-tww)*tf;

endurecimiento=find(epsilon==epsilon_sh);%ubicación de epsilon_sh
%-----
%           Cálculo de curva esfuerzo deformación unitaria
%-----
ii=1;
f(ii)=0;

%Fluencia
ii=ii+1;
while epsilon(ii)<=epsilon_y
    f(ii)=fy;%Esfuerzo
    ii=ii+1;
end

%Endurecimiento
for j=ii:endurecimiento
    f(ii)=fy;%Esfuerzo
    ii=ii+1;
end

%Plastificado
syms epsi
for i=ii:length(epsilon)
    r=(epsi-epsilon_sh)/(epsilon_u-epsilon_sh);
    ecf=fy*(1+r*(fu/fy-1)*exp(1-r));%ec de esf después de zona plástica
    f(ii)=subs(ecf,epsi,epsilon(ii));%Esfuerzo
    ii=ii+1;
end

%-----
%           Cálculo de deformación por Carga Axial
%-----
f_Pa=Pa/A;epsilon_Pa=0;
if f_Pa>f(length(epsilon))
    fprintf('epsilon_Pa>epsilon_r==> No se tomó en cuenta Pa')
else
    for i=1:length(epsilon)-1
        if f_Pa>f(i) && f_Pa<=f(i+1)
            epsilon_Pa=(f_Pa-f(i))*(epsilon(i+1)-epsilon(i))/(f(i+1)...

```

```

        -f(i))+epsilon(i);
        if epsilon_Pa>epsilon_sh
r=(epsi-epsilon_sh)/(epsilon_u-epsilon_sh);
        %ec de esf después de zona plástica
ecf=fy*(1+r*(fu/fy-1)*exp(1-r))-f_Pa;
        epsilon_Pa=double(solve(ecf,epsi,epsilon_sh,epsilon_r));
        end
    end

end
end
if epsilon_Pa==0
    EA=fy*A;
else
    EA=f_Pa/epsilon_Pa*A;
end

%-----
%Cálculo de Momentos por Flexión y Carga Axial bajo el eje neutro
%-----
ii=1;
Mr(ii)=0;%Momento Resistente
if epsilon_Pa>0
    epsilon_i(1)=0;
    epsilon_s(1)=0;
    epsilon_i(2:length(epsilon),1)=epsilon(1:length(epsilon)-1,1)+epsilon_Pa;
    epsilon_s(2:length(epsilon),1)=epsilon(1:length(epsilon)-1,1)-epsilon_Pa;
else
    epsilon_i=epsilon;
    epsilon_s=epsilon;
end
Xi=zeros(1,length(epsilon_i));Xs=Xi;Fwi=Xi;Ffi=Xi;brazowi=Xi;brazofi=Xi;

%Fluencia
if epsilon_i(ii)<=epsilon_y
while epsilon_i(ii)<epsilon_y
    ii=ii+1;
Xi(ii)=min(d/2*(1+epsilon_Pa/epsilon(ii)),d);
Xs(ii)=max(d-Xi(ii),0);
Xi(1)=Xi(2);Xs(1)=Xs(2);
fs=min(fy*epsilon_i(ii)/epsilon_y,fy);
Fwi(ii)=Xi(ii)*fs/2*tww;%Fuerza resistente
brazowi(ii)=2/3*(Xi(ii))-(Xi(ii)-d/2);
Ffi(ii)=tf/2*(fs*(1+(Xi(ii)-tf)/Xi(ii)))*(b-tww);%Fuerza resistente
brazofi(ii)=d/2-tf/2;
end
end

%Endurecimiento
if epsilon_i(ii)<epsilon_sh
while epsilon_i(ii)<epsilon_sh && ii<=length(epsilon_i)
    ii=ii+1;
Xi(ii)=min(d/2*(1+epsilon_Pa/epsilon(ii)),d);
Xs(ii)=max(d-Xi(ii),0);
xy=epsilon_y/epsilon_i(ii)*Xi(ii);
Fwi(ii)=(xy*fy/2+(Xi(ii)-xy)*fy)*tww;%Fuerza resistente del Alma
brazowi(ii)=(xy^2*2/3*fy/2+(Xi(ii)-xy)*fy*(Xi(ii)+xy)/2)/...
(Fwi(ii)/tww)-(Xi(ii)-d/2);
if tf>Xi(ii)-xy
Ffi(ii)=((Xi(ii)-xy)+(xy^2-(Xi(ii)-tf)^2)/(2*xy))*fy*(b-tww);
else
Ffi(ii)=tf*fy*(b-tww);%Fuerza resistente del patín
end
brazofi(ii)=d/2-tf/2;
end
end
end
end

```

```

%Plastificado
if ii<length(epsilon)
while epsilon(ii)<epsilon_r && ii<length(epsilon)
ii=ii+1;
    Xi(ii)=min(d/2*(1+epsilon_Pa/epsilon(ii)),d);
Xs(ii)=max(d-Xi(ii),0);
xy=epsilon_y/epsilon(ii)*Xi(ii);
xsh=epsilon_sh/epsilon(ii)*Xi(ii);
xu=epsilon_u/epsilon(ii)*Xi(ii);
    r=(epsi-xsh)/(xu-xsh);
    ecf=fy*(1+r*(fu/fy-1)*exp(1-r));%ec de esf después de zon plástica
    Aw=vpa(int(ecf,epsi,xsh,Xi(ii)));%Área bajo la curva
    Fwi(ii)=(xy*fy/2+(xsh-xy)*fy+Aw)*tww;%Fuerza resistente
    brazowi(ii)=(xy^2*2/3*fy/2+(xsh-xy)*fy*(xsh+xy)/2+...
        (vpa(int(ecf*epsi,epsi,xsh,Xi(ii)))+xsh*Aw)/(Fwi(ii)/tww)...
-(Xi(ii)-d/2);
    if tf>Xi(ii)-xsh
        fprintf('error tf>Xi(ii)-xsh\n')
    %
        break
end
    Af=vpa(int(ecf,epsi,Xi(ii)-tf,Xi(ii)));%Área bajo la curva
    Ffi(ii)=Af*(b-tww);%Fuerza resistente
brazofi(ii)=d/2-tf/2;
end
end
Xi=Xi(1:ii);
%-----
%Cálculo de Momentos por Flexión y Carga Axial sobre el eje neutro
%-----
Fws=zeros(1,length(epsilons));Ffs=Fws;brazows=Fws;brazofs=Fws;

ii=0;
while ii<length(Xs)
ii=ii+1;
if Xs(ii)>0
ii=ii-1;

%Fluencia
aux=0;
if ii==0
aux=1;
ii=1;
end
while epsilons(ii)<epsilon_y
if aux==1
ii=0;
aux=0;
end
ii=ii+1;
fs=min(fy*epsilons(ii)/epsilon_y,fy);
Fws(ii)=Xs(ii)*fs/2*tww;%Fuerza resistente
brazows(ii)=2/3*(Xs(ii)-(Xs(ii)-d/2);
Ffs(ii)=tf/2*(fs*(1+(Xs(ii)-tf)/Xs(ii)))*(b-tww);%Fuerza resistente
brazofs(ii)=d/2-tf/2;
if fs<0
Fws(ii)=0;
Ffs(ii)=0;
end
end

%Endurecimiento
if ii<length(Xs)
while epsilons(ii)<epsilon_sh && ii<length(epsilons)
ii=ii+1;
xy=epsilon_y/epsilons(ii)*Xs(ii);
Fws(ii)=(xy*fy/2+(Xs(ii)-xy)*fy)*tww;%Fuerza resistente del Alma
brazows(ii)=(xy^2*2/3*fy/2+(Xs(ii)-xy)*fy*(Xs(ii)+xy)/2)/(Fws(ii)/tww)...

```

```

-(Xs(ii)-d/2);
if tf>Xs(ii)-xy
Ffs(ii)=(Xs(ii)-xy)+(xy^2-(Xs(ii)-tf)^2)/(2*xy))*fy*(b-tww);
else
Ffs(ii)=tf*fy*(b-tww);%Fuerza resistente del patín
end
brazofs(ii)=d/2-tf/2;
end
end

%Plastificado
if ii<length(Xs)
while ii<length(Xs)
ii=ii+1;
xy=epsilon_y/epsilon(ii)*Xs(ii);
xsh=epsilon_sh/epsilon(ii)*Xs(ii);
xu=epsilon_u/epsilon(ii)*Xs(ii);
r=(epsi-xsh)/(xu-xsh);
ecf=fy*(1+r*(fu/fy-1)*exp(1-r));%ec de esfuerzo después de zona plástica
Aw=vpa(int(ecf,epsi,xsh,Xs(ii)));%Área bajo la curva
Fws(ii)=(xy*fy/2+(xsh-xy)*fy+Aw)*tww;%Fuerza resistente
brazows(ii)=(xy^2*2/3*fy/2+(xsh-xy)*fy*(xsh+xy)/2+...
(vpa(int(ecf*epsi,epsi,xsh,Xs(ii)))+xsh*Aw)/(Fws(ii)/tww)...
-(Xs(ii)-d/2);
if tf>Xs(ii)-xsh
fprintf('error tf>Xi(ii)-xsh\n')
break
end
Af=vpa(int(ecf,epsi,Xs(ii)-tf,Xs(ii)));%Área bajo la curva
Ffs(ii)=Af*(b-tww);%Fuerza resistente
brazofs(ii)=d/2-tf/2;
end
end
end
end

%-----
%Cálculo de Momentos Resistentes y EI
%-----
fil=epsilon_i(1:length(Xi))./(Xi)';%Ptos curvatura partiendo de Hip de Navier
%fi(1)=0;
EI=0;PEI=zeros(1,length(epsilon_i));
Fwfi=Fwi(1:length(Xi))+Ffi(1:length(Xi));
Fwfs=Fws(1:length(Xi))+Ffs(1:length(Xi));
brazowfi=(Fwi(1:length(Xi)).*brazowi(1:length(Xi)))+...
Ffi(1:length(Xi)).*brazofi(1:length(Xi))./Fwfi;
brazowfs=(Fws(1:length(Xi)).*brazows(1:length(Xi)))+...
Ffs(1:length(Xi)).*brazofs(1:length(Xi))./Fwfs;
Mr1=(Fwfs).*brazowfs...
+(Fwfi-Pa).*brazowfi;%Momento Resistente
jj=find(Mr1>=0);
Mr(1)=0;fi(1)=0;
Mr(2:length(jj)+1)=Mr1(jj);
fi(2:length(jj)+1)=fil(jj);
R=0;
for j=2:length(Mr)
PEI(j)=(Mr(j)-Mr(j-1))/(fi(j)-fi(j-1));%Ptos de EI para c/pto principal
if (Ma>Mr(j-1) && Ma<=Mr(j)) || Ma==0 && PEI(j)>0
EI=PEI(j);
I=(b*d^2/6-(b-tww)*(d-2*tf)^3/6/d)*d/2;
R=EI/(Ey*I);
end
end
PEI(1)=PEI(2);%EI para primer punto

%%Gráficos de Curvas Esfuerzo-Deformación Unitaria y Momento-Curvatura
subplot(1,2,1);

```

```

plot(epsilon,f);grid minor;title('Esfuerzo-Deformación Unitaria');
subplot(1,2,2);
plot(fi,Mr,'color','black','LineWidth',2);
grid minor;title('Momento-Curvatura')
%Fin

```

A3.3 PROGRAMA K1_EQCORTE2

Este programa es la base para encontrar la matriz del método de las dovelas en **K1_eqcorte4**, usado en los procesos de Pushover y modelación de disipadores.

K1_eqcorte2

```

function [K1]=K1_eqcorte2...
(EIa,EIo,EIb,EAA,EAo,EAb,Lpa,Lo,Lpb,beta_a,beta_o,beta_b)
%EIa,EIo,EIb: Rigidez a flexión en extremo a, en centro y en extremo b
%EA,EAo,EAb: Rigidez axial en extremo a, en centro y en extremo b
%Lpa,Lo,Lpb: Longitud en extremo a, en centro y en extremo b
%beta_a,beta_o,beta_b:factor de deformación por corte beta=6*EIy/(A/f*G*L^2)
%
en extremo a, en centro y en extremo

kva=(2+beta_a)/(1+2*beta_a);
kvo=(2+beta_o)/(1+2*beta_o);
kvb=(2+beta_b)/(1+2*beta_b);
ava=(1-beta_a)/(1+2*beta_a);
avo=(1-beta_o)/(1+2*beta_o);
avb=(1-beta_b)/(1+2*beta_b);

sigma=(2*EIo*avo)/Lo^2+(2*EIo*kvo)/Lo^2;

Ke=[EAo/Lo+EAA/Lpa,0,0,-EAo/Lo,0,0;
0,(2*sigma)/Lo+(2*(2*EIa*ava)/Lpa^2+(2*EIa*kva)/Lpa^2)/...
Lpa,(2*EIo*avo)/Lo^2-(2*EIa*ava)/Lpa^2+(2*EIo*kvo)/Lo^2-(2*EIa*kva)/...
Lpa^2,0,-(2*sigma)/Lo,sigma;
0,(2*EIo*avo)/Lo^2-(2*EIa*ava)/Lpa^2+(2*EIo*kvo)/Lo^2-(2*EIa*kva)/...
Lpa^2,(2*EIo*kvo)/Lo+(2*EIa*kva)/Lpa,0,-(2*EIo*avo)/Lo^2-(2*EIo*kvo)/...
Lo^2,(2*EIo*avo)/Lo;
-EAo/Lo,0,0,EAo/Lo+EAb/Lpb,0,0;
0,-(2*sigma)/Lo,-(2*EIo*avo)/Lo^2-(2*EIo*kvo)/Lo^2,0,(2*sigma)...
/Lo+(2*((2*EIb*avb)/Lpb^2+(2*EIb*kvb)/Lpb^2))/Lpb,(2*EIb*avb)/...
Lpb^2-(2*EIo*avo)/Lo^2-(2*EIo*kvo)/Lo^2+(2*EIb*kvb)/Lpb^2;
0,sigma,(2*EIo*avo)/Lo,0,(2*EIb*avb)/Lpb^2-(2*EIo*avo)/Lo^2-(2*EIo*kvo)...
/Lo^2+(2*EIb*kvb)/Lpb^2,(2*EIo*kvo)/Lo+(2*EIb*kvb)/Lpb];

Bnt=[
0,0,0
-(2*EIa*ava)/Lpa^2-(2*EIa*kva)/Lpa^2,0,0
(2*EIa*ava)/Lpa,0,0
0,0,-EAb/Lpb
0,(2*EIb*avb)/Lpb^2+(2*EIb*kvb)/Lpb^2,0
0,(2*EIb*avb)/Lpb,(2*EIb*kvb)/Lpb,0];

Kn=[(2*EIa*kva)/Lpa,0,0;

```

```

0, (2*Eib*kvb)/Lpb, 0;
0, 0, EAb/Lpb];
K1 =Kn-Bnt'*Ke^-1*Bnt;
%fin

```

A3.4 PROGRAMA K1_ESCALONADO

Este programa puede reemplazar a **K1_eqcorte4** en el programa **krigidez_ASCE41_2** y en **krigidez_ASCE41_21** vistos en el Anexo No2, en A2.1 y A2.2, y A2.3 respectivamente.

K1_escalonado

```

function [K1]=K1_escalonado(EIa,EIo,EIb,EAa,EAo,EAb,Lpa,Lo,Lpb)
% Programa para encontrar la matriz de rigidez de un elemento
%-----
% [K1]=K1_escalonado(EIa,EIo,EIb,EAa,EAo,EAb,Lpa,Lo,Lpb)
%-----
%EIa,EIo,EIb: Rigidez a flexión en extremo a, en centro y en extremo b
%EA,EAo,EAb: Rigidez axial en extremo a, en centro y en extremo b
%Lpa,Lo,Lpb: Longitud en extremo a, en centro y en extremo b

n=4;
A=zeros(1,2*n+1);
X=zeros(1,2*n+1);
for i=1:n
    A(i)=1/EIa-(i-1)*(1/EIa-1/EIo)/n;X(i)=i*Lpa/n;
    A(i+n+1)=1/EIb-(i-1)*(1/EIb-1/EIo)/n;X(i+n+1)=Lpa+Lo+i*Lpb/n;
end
A(n+1)=1/EIo;X(n+1)=Lpa+Lo;
L=Lpa+Lo+Lpb;

W=A(1)*X(1);
Iy=A(1)*X(1)^3/3;
Iyp=A(1)*(L^3-(L-X(1))^3)/3;
for j=2:2*n+1
    W=W+A(j)*(X(j)-X(j-1));
    Iy=Iy+A(j)*(X(j)^3-X(j-1)^3)/3;
    Iyp=Iyp+A(j)*((L-X(j-1))^3-(L-X(j))^3)/3;
end

f=[    Iyp/L^2      (-W+Iy/L^2+Iyp/L^2)/2
      (-W+Iy/L^2+Iyp/L^2)/2      Iy/L^2];
K1=f^-1;
K1(3,3)=(EAa*EAb*EAo)/(EAa*EAb*Lo + EAa*EAo*Lpb + EAb*EAo*Lpa);
%fin

```