

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS

**ANÁLISIS SÍSMICO NO LINEAL DE PÓRTICOS PLANOS CON
AISLADORES SÍSMICOS TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN (TPF)**

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

EVELYN MAGALI TIPANLUISA VALDIVIESO

micaeleve@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ROBERTO RODRIGO AGUIAR FALCONÍ

rraguiar@espe.edu.ec

QUITO, Enero de 2017

DECLARACIÓN

Yo, Evelyn Magali Tipanluisa Valdivieso, 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 normatividad institucional vigente.

EVELYN MAGALI TIPANLUISA VALDIVIESO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Evelyn Magali Tipanluisa Valdivieso, bajo mi supervisión.

DR. ROBERTO RODRIGO AGUIAR FALCONÍ
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos.

Al Dr. Roberto Rodrigo Aguiar Falconí, que como director de esta tesis, me ha orientado, apoyado e incentivado en mi labor investigativa con un interés y una entrega que han sobrepasado, con mucho, todas las expectativas, que como alumna, deposité en su persona. Exalto su trabajo, su persistencia y su paciencia y le agradezco con creces por ayudarme a lograr esta nueva meta, mi maestría.

A mis padres y esposo, por creer en mis sueños, por su comprensión y por brindarme la confianza y el tiempo necesario cumplir mis metas profesionales.

Al Ing. David Mora y a todas aquellas personas que en forma directa o indirecta, me ayudaron ya sea poniendo a mi disposición el valor incalculable de sus conocimientos, compartiendo mis dudas y ansiedades, o impulsándome para que siguiese adelante.

DEDICATORIA

A *Dios* por ser la casualidad oculta de todos los acontecimientos de mi vida.

A ti *W.E.V.M*, aunque ya no estés más a mi lado, yo sé que en todo momento al desarrollar este trabajo estuviste conmigo, en las investigaciones, en mis desvelos, en mis momentos más difíciles.

Dios se ganó un nuevo ángel, el cielo una estrella y mi vida una guía, por todo lo que fuiste y eres en mi vida te dedico mi esfuerzo hermano querido donde quiera que te encuentres.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTADO DE TABLAS	X
LISTADO DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
PRESENTACIÓN	XIX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN A LA AISLACIÓN SÍSMICA DE LA BASE	1
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. PRINCIPIOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO DE LA BASE	4
1.3. TEORÍA LINEAL DEL AISLAMIENTO SÍSMICO	8
1.3.1. CONCLUSIONES OBTENIDAS A PARTIR DE LA TEORÍA LINEAL ..	16
1.4. TEORÍA NO LINEAL DEL AISLAMIENTO SÍSMICO	17
CAPÍTULO 2	19
ANÁLISIS NO LINEAL EN AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN....	19
2.1. INTRODUCCIÓN	19
2.2. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y FRICCIONALES	21
2.3. MODELO MATEMÁTICO.....	23
2.3.1. RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO	27
2.3.1.1. Relación Fuerza - Desplazamiento basada en el Modelo de Coulomb	29

2.3.1.2. Relación Fuerza - Desplazamiento basada en el Modelo Viscoplastico Modificado de Constantinou	30
2.4. COMPORTAMIENTO DINÁMICO HORIZONTAL - MODELOS DE HISTÉRESIS SIMPLIFICADOS PARA AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN.....	33
2.4.1. MODELO DE HISTERÉISIS LAS CINCO FASES	35
2.4.2. MODELO DE HISTÉRESIS DE LAS TRES FASES	49
2.5. PROPIEDADES NOMINALES	51
2.5.1. PROPIEDADES NOMINALES A PARTIR DE ENSAYOS	52
2.5.2. PROPIEDADES NOMINALES A PARTIR DE EXPRESIONES SIMPLIFICADAS.....	53
2.6. PROPIEDADES LÍMITE.....	55
2.6.1. FACTORES DE MODIFICACIÓN	56
2.6.2. LÍMITE SUPERIOR E INFERIOR EN EL COMPORTAMIENTO FUERZA-DESPLAZAMIENTO	56
2.7. MODELO DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO VERTICAL.....	57
CAPÍTULO 3	59
MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISIS DE AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN.....	59
3.1. INTRODUCCIÓN	59
3.2. LINEALIZACIÓN EQUIVALENTE DEL COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO NO LINEAL	59
3.3. PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE DEL ASCE 7-16.....	64
3.3.1. LIMITACIONES DEL PROCEDIMIENTO ELF	72

3.3.2. MODELOS DE CURVA DE HISTÉRESIS UTILIZADOS PARA PROCEDIMIENTO ELF	75
3.3.3. ALGORITMO PARA PROCEDIMIENTO ELF	77
CAPÍTULO 4	79
MÉTODO DEL ESPECTRO CAPACIDAD EN PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN	79
4.1. INTRODUCCIÓN	79
4.2. GENERALIDADES DEL MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD.....	80
4.2.1. CAPACIDAD	81
4.2.1.1. Modelos Constitutivos del acero	81
4.2.1.2. Diagrama Momento-Curvatura para secciones de acero.....	85
4.2.1.3. Análisis Pushover.....	89
4.2.1.4. Espectro de Capacidad.....	93
4.2.2. DEMANDA	95
4.2.2.1. Espectro de Demanda	96
4.2.3. DESEMPEÑO	96
4.2.3.1. Punto de Desempeño	100
4.2.3.2. Interpretación de los resultados	102
4.3. PARTICULARIDADES DEL MÉTODO ESPECTRO-CAPACIDAD CUANDO SE EMPLEAN AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN	103
4.4. ALGORITMO PUSHOVER PARA PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN	107
CAPÍTULO 5	117
ANÁLISIS NO LINEAL DE PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN.....	117
5.1. INTRODUCCIÓN	117

5.2. MARCO TEÓRICO	117
5.3. ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS NO LINEAL DE PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN	120
CAPÍTULO 6	127
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	127
6.1. INTRODUCCIÓN	127
6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	128
6.3. DESCRIPCIÓN DE LA CARGA SÍSMICA	137
6.4. RESULTADOS DE LOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISIS DE AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN	138
6.5. RESULTADOS DEL MÉTODO DEL ESPECTRO CAPACIDAD.....	140
6.6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO	155
6.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	179
6.7.1. PERÍODOS.....	180
6.7.2. CORTANTE BASAL.....	180
6.7.3. DESPLAZAMIENTOS EN EL SISTEMA DE AISLACIÓN.....	182
6.7.4. DESPLAZAMIENTO DE PISO EN EL TOPE DE LOS PÓRTICOS...	183
CAPÍTULO 7	184
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	184
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	190
ANEXOS	193
REPORTE FOTOGRÁFICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL BLOQUE ESTRUCTURAL Nº 1 DEL NUEVO CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DE LA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS ESPE	193

LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1: Resumen del Modelo de Histéresis de las cinco fases de Constantinou	48
TABLA 2.2: Expresiones para el modelo de las tres fases de Constantinou.....	49
TABLA 3.1: Coeficiente de amortiguamiento B	71
TABLA 4.1: Ecuaciones que definen la curva esfuerzo-deformación para elementos de acero	83
TABLA 4.2: Obtención de diagramas Momento-Curvatura en secciones de acero estructural.....	86
TABLA 4.3: Zonas de comportamiento de elementos de acero	87
TABLA 4.4: Períodos de retorno y niveles de desempeño exigidos	98
TABLA 4.5: Niveles de daño asociado a un giro o curvatura	99
TABLA 4.6: Códigos de material y perfiles tipo	112
TABLA 4.7: Datos para describir una sección de una viga o columna de acero	113
TABLA 4.8: Datos para describir una sección de hormigón	113
TABLA 4.9: Datos para describir un aislador triple péndulo de fricción.....	114
TABLA 4.10: "Table 1"	114
TABLA 4.11: Datos para generar los elementos de un pórtico plano.....	115
TABLA 4.12: Datos para generar las coordenadas de los nudos.....	115
TABLA 4.13: Asignación de carga vertical.	115
TABLA 6.1: Pesos que llegan a cada aislador	136
TABLA 6.2: Resultados del método simplificado del ASCE 7-16 modelo bilineal	139
TABLA 6.3: Resultados del método simplificado del ASCE 7-16 modelo de las 3 fases.....	140
TABLA 6.4: Datos para definición del Modelo Bilineal para Método del Espectro Capacidad	141

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 0.1: Mapa mundial de peligro sísmico.....	XIX
FIGURA 1.1: Partes de una edificación con aislamiento sísmico.....	3
FIGURA 1.2: Tipos de sistemas de aislación de la base.....	4
FIGURA 1.3: Principios del aislamiento sísmico de la base.....	5
FIGURA 1.4: Criterio de la selección del períodos para sistemas aislados.....	7
FIGURA 1.5: a) Esquema del sistema considerado; b) Modelo Dinámico	8
FIGURA 1.6: Modos de vibración de sistemas aislados.....	12
FIGURA 2.1: Péndulo de fricción simple	19
FIGURA 2.2 Evolución de los aisladores de péndulo friccionales.....	20
FIGURA 2.3 Geometría de una aislador triple péndulo de fricción.....	21
FIGURA 2.4: Parámetros de definición de un aislador triple péndulo de fricción .	22
FIGURA 2.5 Diagrama de cuerpo libre en la posición deformada para el péndulo friccional simple.....	24
FIGURA 2.6: Anillo “tope” en un péndulo de fricción simple	26
FIGURA 2.7: Movimiento vertical	27
FIGURA 2.8: Variación del coeficiente de fricción (μ), con la velocidad de deslizamiento (\dot{u}) y de la presión ejercida	28
FIGURA 2.9 Función Signo.....	29
FIGURA 2.10: Relación Fuerza-Desplazamiento basada en el Modelo de Coulomb	30
FIGURA 2.11: Coeficiente de fricción (μ) vs. velocidad de deslizamiento (\dot{u}).....	31
FIGURA 2.12: Curva de Histéresis Real para un péndulo de fricción simple.....	31
FIGURA 2.13: Variable histerética $Z(t)$	32
FIGURA 2.14: Relación Fuerza-Desplazamiento basada en el Modelo Viscoplastico Modificado de Constantinuo	33
FIGURA 2.15: Comportamiento dinámico horizontal para un aislador péndulo de fricción simple.....	33
FIGURA 2.16: Curva de histéresis real para un aislador triple péndulo	35
FIGURA 2.17: Deformada y cuerpo libre para régimen I.....	38
FIGURA 2.18: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase I.....	40

FIGURA 2.19: Deformada para la Fase II	41
FIGURA 2.20: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase II.....	42
FIGURA 2.21: Deformada para Fase III	43
FIGURA 2.22: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase III.....	43
FIGURA 2.23 Deformada para Fase IV.....	45
FIGURA 2.24: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase IV.....	45
FIGURA 2.25 Deformada para Fase V.....	46
FIGURA 2.26: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase V.....	47
FIGURA 2.27: Relación fuerza-desplazamiento de las tres fases de Constantino	50
FIGURA 2.28: Modelo Tri-lineal	51
FIGURA 2.29: Desplazamiento teórico y real del comportamiento fuerza- desplazamiento de un aislador triple péndulo de fricción	54
FIGURA 2.30: Propiedades nominales y límite	57
FIGURA 2.31: Comportamiento dinámico vertical de los aisladores friccionales .	58
FIGURA 3.1 Linealización equivalente del comportamiento histerético no lineal .	60
FIGURA 3.2: Rigidez Equivalente	61
FIGURA 3.3: Energía disipada	62
FIGURA 3.4: Estimación de energía histerética, E_H	62
FIGURA 3.5: Estimación de la energía de deformación elástica, E_D	63
FIGURA 3.6: Parámetros del modelo aislado de dos grados de libertad para el sistema aislado.....	65
FIGURA 3.7: Esquematización del Procedimiento de la Fuerza Lateral Equivalente	70
FIGURA 3.8: Criterio de la rigidez efectiva.....	73
FIGURA 3.9: Criterio de la fuerza restitutiva	74
FIGURA 3.10 Modelo de histéresis rígido-lineal o bilineal	75
FIGURA 3.11: Modelo de las 3 Fases de Constantino.....	76
FIGURA 4.1: Modelos Constitutivos del acero	82
FIGURA 4.2 Curva esfuerzo-deformación para el acero	82

FIGURA 4.3 Propiedades Mecánicas según ASTM A-36	84
FIGURA 4.4: Diagrama momento-rotación para secciones de acero.....	87
FIGURA 4.5: Diagrama momento-curvatura con endurecimiento y resistencia residual.....	88
FIGURA 4.6: Parámetros para el modelamiento del diagrama momento-rotación de elementos de acero según el ASCE 41-13.....	89
FIGURA 4.7: Curva de Capacidad	90
FIGURA 4.8: Pushover Monótonico Simples.....	91
FIGURA 4.9: Espectro de respuesta elástico definido en la NEC_SE_DS	96
FIGURA 4.10: Niveles de Desempeño.....	97
FIGURA 4.11: Niveles de daño en la curva de capacidad	99
FIGURA 4.12: Punto de Desempeño	100
FIGURA 4.13: Lazo de histéresis para hallar el amortiguamiento.....	101
FIGURA 4.14: Efecto de la aislación sísmica en los espectros de capacidad y demanda	103
FIGURA 4.15: Prediseño de estructura aislada mediante el Método Espectro Capacidad	104
FIGURA 4.16: Determinación de rigidez y resistencia requerida para estructuras aisladas	106
FIGURA 4.17: Algoritmo Pushover_3.....	107
FIGURA 4.18: Grados de libertad de un elemento aislador FPS en coordenadas locales y globales	108
FIGURA 4.19: Parámetros para el cálculo de k_v y del modelo de histéresis del aislador triple péndulo “convencional” ($R_1=R_4 \gg R_2=R_3$, $\mu_2= \mu_3 < \mu_1= \mu_4$, $d_1=d_4$ y $d_2=d_3$ y $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$)	109
FIGURA 4.20: Modelo Tri-lineal_Modificado	110
FIGURA 4.21: Modelo constitutivo bilineal para el comportamiento del aislador FPS	111
FIGURA 4.22: Secciones transversales consideradas, para elementos de acero	113

FIGURA 4.23: Nomenclatura de vigas (izquierda) y columnas (derecha) de hormigón armado.	114
FIGURA 5.1: Modelo de masas concentradas de un pórtico plano.....	118
FIGURA 5.2: Sistema de coordenadas locales y globales	123
FIGURA 5.3: Modelo constitutivo para los elementos de acero	124
FIGURA 5.4: Modelo Constitutivo para los aisladores triple péndulo de fricción	124
FIGURA 6.1: Métodos de análisis de pórticos planos aislados con FPS	127
FIGURA 6.2: Nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	128
FIGURA 6.3: Bloque Estructural N° 1	129
FIGURA 6.4: Imagen 3D del Bloque Estructural N° 1 y de las secciones de vigas y columnas típicas.....	130
FIGURA 6.5: Geometría de aislador de triple péndulo de fricción. ftp8833/12-12/8-6	131
FIGURA 6.6: Bloque 1 – Pórtico H	132
FIGURA 6.7: Bloque 1 – Pórtico E	132
FIGURA 6.8: Bloque 1 – Pórtico C	133
FIGURA 6.9: Bloque 1 – Pórtico B	133
FIGURA 6.10: Bloque 1 – Pórtico 8.....	134
FIGURA 6.11: Bloque 1 – Pórtico 7.....	134
FIGURA 6.12: Bloque 1 – Pórtico 6.....	135
FIGURA 6.13: Bloque 1 – Pórtico 5.....	135
FIGURA 6.14: Bloque 1 – Pórtico 4.....	136
FIGURA 6.15: Espectros usados para el análisis.....	137
FIGURA 6.16: Código usado en MATLAB para la aplicación de los métodos simplificados.....	138
FIGURA 6.17: Numeración de nudos y elementos.....	142
FIGURA 6.18: Grados de libertad	143
FIGURA 6.19: Código usado en MATLAB para la aplicación del método del espectro capacidad	143

FIGURA 6.20: Resultados Pórtico H	145
FIGURA 6.21: Resultados Pórtico E	146
FIGURA 6.22: Resultados Pórtico C	147
FIGURA 6.23 Resultados Pórtico B sin aislación en la base	148
FIGURA 6.24: Deriva de piso Pórtico B sin aislación en la base.....	149
FIGURA 6.25: Resultados Pórtico B con aislamiento.....	149
FIGURA 6.26: Deriva de piso Pórtico B con aislación.....	150
FIGURA 6.27: Resultados Pórtico 8.....	151
FIGURA 6.28: Resultados Pórtico 7	152
FIGURA 6.29: Resultados Pórtico 6.....	153
FIGURA 6.30: Resultados Pórtico 5.....	154
FIGURA 6.31: Resultados Pórtico 4.....	155
FIGURA 6.32: Distribución espacial de las estaciones de acelerógrafos para terremoto del 16 Abril de 2016_ PGA (Peak Ground Aceleration)	156
FIGURA 6.33: Acelerogramas del terremoto del 16 de abril del 2016. Se han considerado las componentes con la máxima aceleración (PGA).....	157
FIGURA 6.34: Registro sismo de Portoviejo componente Este.....	158
FIGURA 6.35: Código usado en MATLAB para la aplicación del análisis no lineal dinámico	159
FIGURA 6.36: Respuesta en el tiempo del Pórtico B	161
FIGURA 6.37: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico B.....	161
FIGURA 6.38: Respuesta en el tiempo del Pórtico H.....	162
FIGURA 6.39: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico H.....	163
FIGURA 6.40: Respuesta en el tiempo del Pórtico E	164
FIGURA 6.41: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico E.....	165
FIGURA 6.42: Respuesta en el tiempo del Pórtico C.....	166

FIGURA 6.43: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico C.....	167
FIGURA 6.44: Respuesta en el tiempo del Pórtico 8	168
FIGURA 6.45: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 8	169
FIGURA 6.46: Respuesta en el tiempo del Pórtico 7	170
FIGURA 6.47: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 7	171
FIGURA 6.48: Respuesta en el tiempo del Pórtico 6	172
FIGURA 6.49: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 6	173
FIGURA 6.50: Respuesta en el tiempo del Pórtico 5	174
FIGURA 6.51: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 5	175
FIGURA 6.52: Respuesta en el tiempo del Pórtico 4	176
FIGURA 6.53: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 4	177
FIGURA 6.54: Desplazamientos máximos de los pórticos en sentido X	177
FIGURA 6.55: Desplazamientos máximos de los pórticos en sentido Y	178
FIGURA 6.56: Períodos de sistemas aislados y sin aislar	180
FIGURA 6.57: Resultados de cortante basal.....	181
FIGURA 6.58: Cortante basal en sistemas aislados y sin aislar.....	181
FIGURA 6.59: Desplazamientos en el sistema de aislación	182
FIGURA 6.60: Desplazamientos en el tope de la superestructura	183
FIGURA 7.1: Desplazamientos en sistemas aislados y sin aislar	186
FIGURA 7.2: Derivas en sistemas aislados y sin aislar.....	186
FIGURA 7.3: Posibilidad de reparación de una edificación basada en la deriva	189

RESUMEN

En este trabajo inicialmente se describen las características, propiedades y funcionamiento de los aisladores de base triple péndulo de fricción (TPF), de sus siglas en inglés FPS, *Friction pendulum systems*.

Posteriormente, se presentan diferentes métodos de análisis de pórticos planos con aisladores FPS, en los cuales se incluye métodos estáticos y dinámicos, lineales y no lineales. Dichos métodos se desarrollan en la plataforma *MATLAB* para el sistema de computación **CEINCI-LAB**.

Por último, como caso práctico, se selecciona varios pórticos del nuevo Centro de Investigaciones de la ESPE. Los pórticos son modelados y analizados mediante los métodos antes mencionados, se realizan observaciones sobre la influencia de los aisladores FPS en el comportamiento de la estructura (desplazamientos, cortante basal, etc.) y se compararán resultados con el fin de llegar a pautas simples que permitan entender el comportamiento estructural y determinar la factibilidad de la aplicación de uno u otro método.

ABSTRACT

Initially, in this work, the characteristics, properties and operation of the triple pendulum base isolators, FPS, are described.

Subsequent different methods of frame analysis with FPS are presented. The methods include static and dynamic, linear and nonlinear analyses. The previous mentioned methods are development in *MATLAB* platform for the computer system ***CEINCI-LAB***.

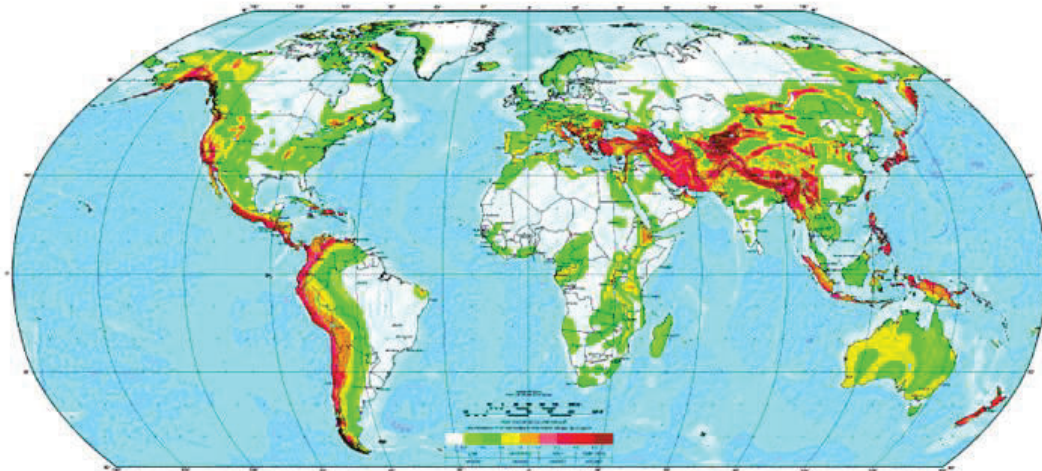
Finally, as a practical case, some frames of the New Scientific Research and Postgraduate Center of ESPE University are selected. The frames are modeled and analyzed by each one of methods addressed here. Observations of the influence of the FPS in the structural behavior are carried out (lateral displacements, base shear, etc.). The results from the analysis are compared to understand the structural behavior of base isolated frames and assess the feasibility of applying one or other method.

PRESENTACIÓN

De acuerdo a la información proporcionada por el “Programa de Evaluación Global de Riesgos Sísmicos” (GSHAP), gran parte de la población mundial está ubicada en zonas de riesgo sísmico alto, en las cuales los movimientos del terreno pueden causar grandes pérdidas tanto humanas como materiales. Por ello, en las últimas décadas se han venido desarrollando diversos procedimientos que mitiguen los efectos del sismo sobre las estructuras; uno es estos procedimientos es el aislamiento de la base.

FIGURA 0.1: Mapa mundial de peligro sísmico

GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP



Fuente: Programa de Evaluación Global de Riesgos Sísmicos” (GSHAP)
Elaborado por: GSHAP

Varios países como Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda y Chile han sido pioneros en la investigación y creación de recomendaciones y reglamentos para el diseño de estructuras con aislamiento de la base. Sin embargo, en nuestro país a pesar de encontrarse en una región de riesgo sísmico alto, no se han desarrollado y menos aún implementado procedimientos de aislación sísmica. Los efectos catastróficos sufridos en el último terremoto, Pedernales Abril-2016, nos

hace concientizarnos de la necesidad de simplificar y conceptualizar el análisis de estructuras con asilamiento sísmico.

Dentro de los procedimientos de aislamiento de la base se encuentra el empleo de aisladores triple péndulo de fricción. Dicho sistema constituye una nueva técnica en diseño de estructuras aisladas sísmicamente, que está siendo empleada desde hace ya algunos años, en varios países por las grandes ventajas que presenta.

Por lo anterior, se hace necesario el conocimiento y la divulgación en nuestro medio, de métodos y procedimientos que permitan el análisis de estructuras asiladas en la base, en particular aquellas que utilizan aisladores tipo triple péndulo de fricción.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA AISLACIÓN SÍSMICA DE LA BASE

1.1. GENERALIDADES

El objetivo fundamental del diseño de estructuras frente a acciones sísmicas es lograr que la respuesta de la estructura frente a un sismo se encuentre dentro de parámetros que garanticen la seguridad y servicio de la misma. El diseño convencional de estructuras sismorresistentes parte de la idea de que el movimiento del terreno producido por un sismo, se transmite a la estructura a través de su base considerada como fija. Con el fin de evitar aceleraciones y desplazamiento excesivos debidos a la acción sísmica, se emplean conceptos de ductilidad y redundancia estructural, dichos conceptos permiten reducir de forma significativa las fuerzas inducidas por sismos, teniendo en cuenta la capacidad de disipación de energía en los elementos de la estructura y en sus nudos mediante la plastificación de los mismos. Sin embargo, el diseño convencional presenta los siguientes inconvenientes: se obtienen estructuras más rígidas y de mayor peso, y por tanto de mayor coste y debido a la incertidumbre en las cargas sísmicas, que pueden tener otras características que las de diseño, la estructura puede presentar daños importantes e incluso se puede producir el colapso de la misma.

Por dichos motivos, como alternativa al diseño sísmico convencional se han venido desarrollando sistemas de aislamiento de la base, estos sistemas se fundamentan principalmente en la instalación de dispositivos mecánicos que desacoplan parcialmente la estructura del terreno. Estos dispositivos incrementan la flexibilidad del sistema estructura-base y proporcionan un amortiguamiento adecuado; lo que hace que el período fundamental de la estructura aumente más allá del período predominante del sismo, alejando a la estructura de entrar en resonancia.

La diferencia básica entre diseño convencional y el uso de aislamiento sísmico, radica en que en la estructura diseñada de manera convencional, la disipación de energía se obtiene a consecuencia de daños estructurales mientras que en la estructura aislada es suministrada por comportamiento histérico friccional o viscoso de los dispositivos de aislamiento.

Como ventajas del uso de sistemas de aislación de la base se pueden citar las siguientes:

- Limita las deformaciones estructurales y las demandas de ductilidad
- Se presentan niveles de daño muy bajos en elementos estructurales como en los no estructurales, limitando la acción de la fuerza sísmica sin incrementar la capacidad de resistencia de la estructura.

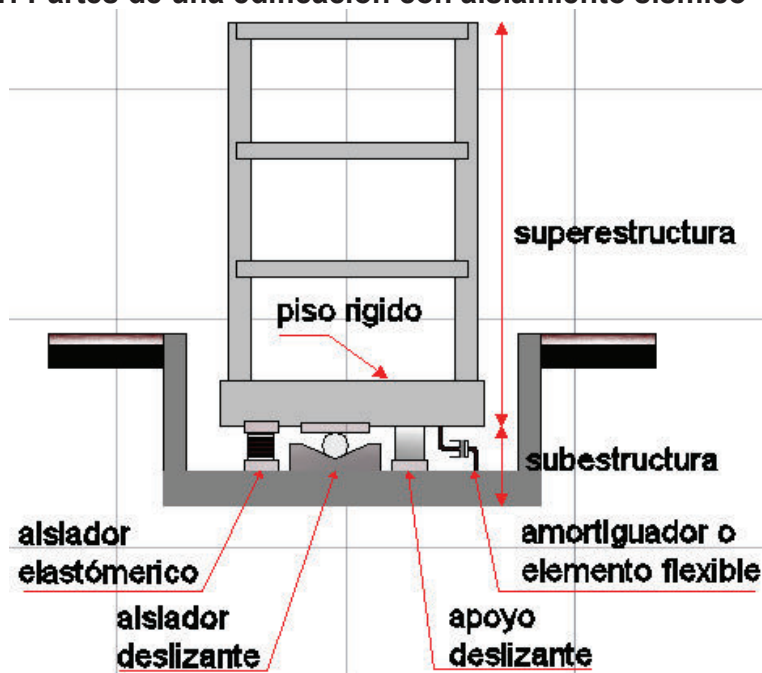
En cuanto al coste que implica el uso de los sistemas de aislación, se puede decir que es del orden del 3% al 5% mayor que sistemas sin aislamiento, lo cual aparentemente es una desventaja. Sin embargo hay que tener en cuenta lo siguiente:

- El ahorro en un edificio con un sistema de aislamiento no puede ser medido objetivamente en su construcción, sino después de haber ocurrido el sismo. La reducción en los costos por daño y reparación de la estructura después de un sismo, es debida a que la estructura aislada tendrá un comportamiento que generará menos daño, debido a que los esfuerzos sobre la estructura aislada son menores que en la convencional y además el factor de reducción R utilizado en el diseño de la estructura convencional es del orden de 7 que significa un comportamiento inelástico importante durante un sismo severo lo cual es sinónimo de daños. Por tanto el costo adicional que supone el uso de un sistema de aislación, se compensa varias veces si en el análisis económico se considera que en la alternativa sin aislación la estructura, los elementos no estructurales (las terminaciones), y los contenidos, afrontarán elevados costos de reparación o sustitución.

- El aislamiento de base comúnmente reduce el coste que se requiere para dotar a la estructura de un nivel requerido de resistencia sísmica, dado que los esfuerzos que soportará la estructura son del orden de 10 veces menores, lo que permitiría un ahorro en costos directos de construcción, debido a que:
 - Las dimensiones de los elementos estructurales serán menores
 - Se podrían reducir los tiempos de construcción pues al requerir la estructura menos nivel de ductilidad se simplifican los detalles constructivos.

En la FIGURA 1.1 se representan las partes en que se divide una edificación con aislamiento sísmico de la base. La *superestructura* está formada por los elementos estructurales de la edificación situados por encima del sistema de aislamiento y la *subestructura* está formada por los dispositivos de aislamiento sísmica (aisladores elastoméricos, aisladores deslizantes, amortiguadores, etc.). Con el fin de dotar de continuidad sobre el sistema de aislamiento y permitir la transferencia de fuerzas de la superestructura a la subestructura se debe proveer de un *diafragma horizontal* o *piso rígido* con una adecuada resistencia y ductilidad.

FIGURA 1.1: Partes de una edificación con aislamiento sísmico



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En la FIGURA 1.2 se indican los dispositivos de aislación más utilizados en la actualidad.

FIGURA 1.2: Tipos de sistemas de aislación de la base



Aisladores elastoméricos



Aisladores de péndulo friccional

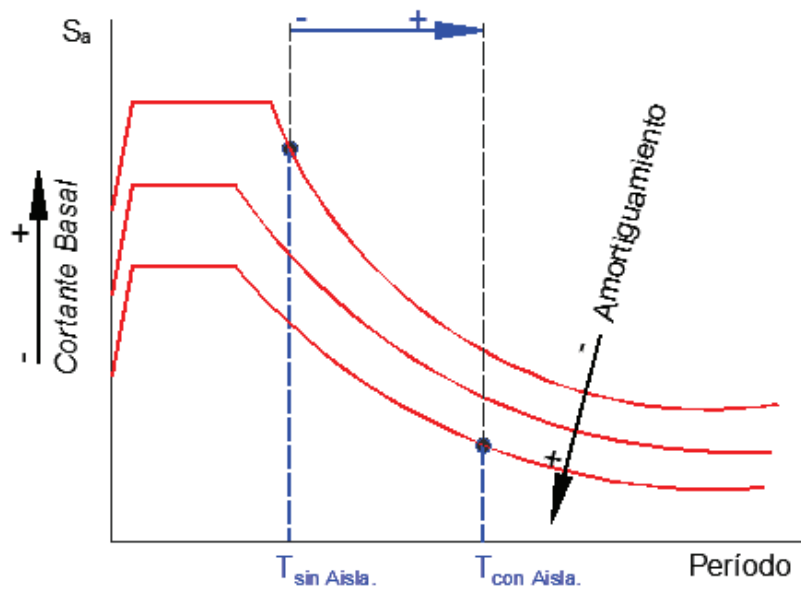
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Este trabajo se centrará en el estudio de los sistemas de aislamiento de péndulo friccional, dado que es la tendencia actual de uso y para los cuales existe un importante desarrollo teórico y experimental.

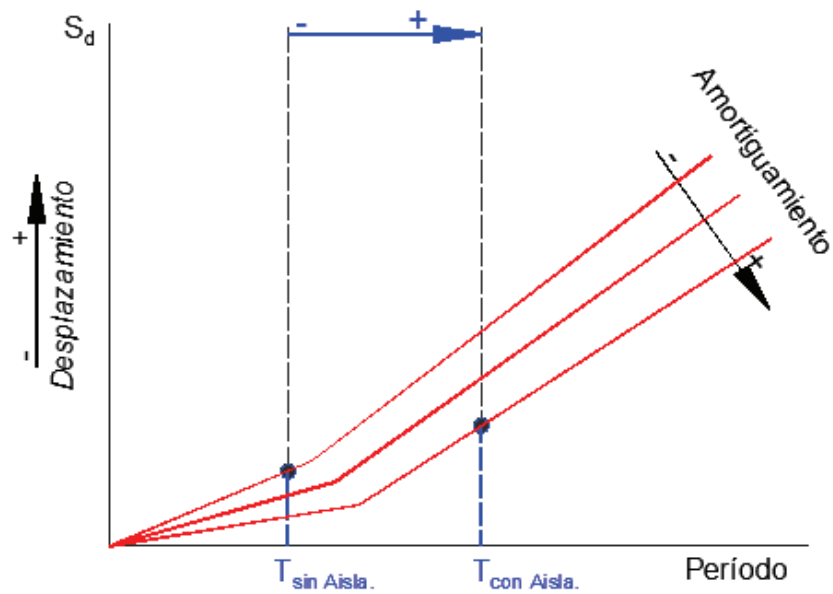
1.2. PRINCIPIOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO DE LA BASE

El principio fundamental del aislamiento sísmico es proveer de flexibilidad en la base de estructura, con el fin de asegurar que el período de la estructura este por encima de los períodos predominantes del sismo. La flexibilidad adicional requerida para alargar el periodo de la estructura incrementa los desplazamientos relativos, por tanto es necesario incrementar el amortiguamiento de forma que los desplazamientos disminuyan, como se esquematiza en la FIGURA 1.3.

FIGURA 1.3: Principios del aislamiento sísmico de la base



a) Espectro de aceleraciones



b) Espectro de desplazamientos

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En base a lo explicado anteriormente se puede resumir la filosofía del asilamiento sísmico en tres aspectos:

- *Desacoplar (horizontalmente) la estructura del suelo*, mediante un incremento de la flexibilidad, a través de un alargamiento de período.
- *Disponer de un mecanismo de restitución*, para devolver la estructura a su posición original.
- *Disponer de amortiguamiento*, para controlar los desplazamientos.

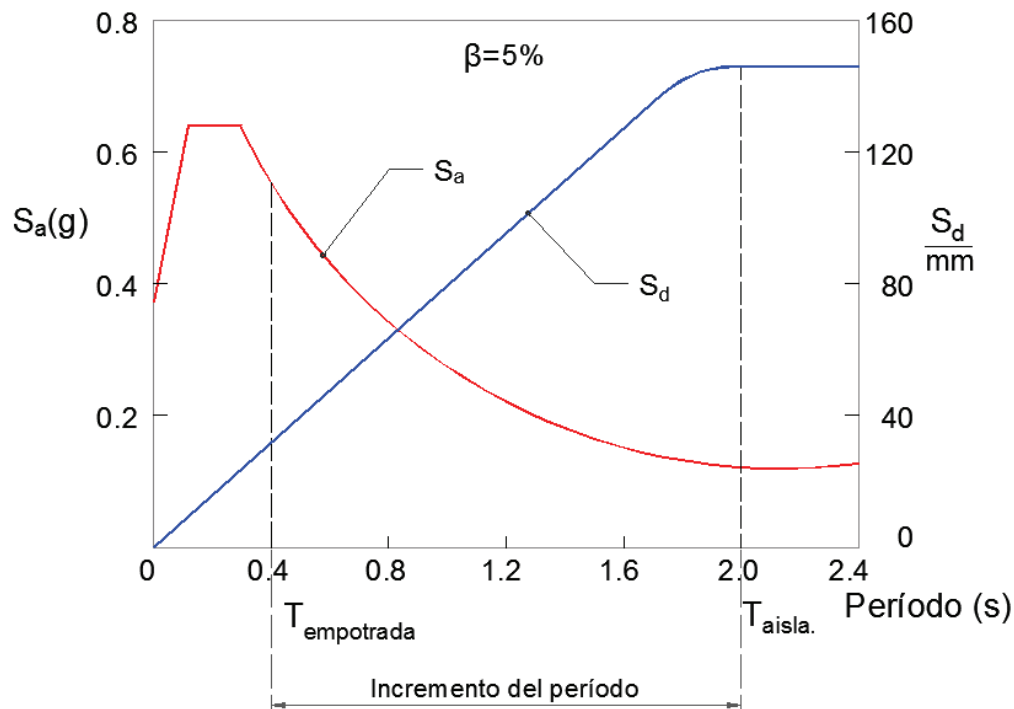
Para el diseño de una estructura con aislamiento sísmico de la base hay que tener en cuenta los siguientes criterios (Aguiar, Almazán, Dechent, & Suárez, 2008):

Criterios para la elección del período efectivo, T_{eff} , del sistema de aislación

- El periodo escogido deberá ser mayor que el periodo del edificio sin aislamiento (base empotrada).
- Se busca lograr una reducción substancial de las fuerzas, es decir una reducción de las aceleraciones espectrales por tanto un buen comienzo puede ser el escoger T_{eff} igual a 2s. Con un periodo de esta magnitud se logrará una reducción sustancial de las fuerzas de diseño
- Hay que tomar en cuenta que aunque alargar el periodo reduce las fuerzas, también incrementa la demanda de desplazamiento. Un periodo demasiado largo podría generar desplazamientos que no pueden ser fácilmente acomodados en el sistema de aislamiento.

En la FIGURA 1.4., se pueden apreciar los criterios de elección del período efectivo.

FIGURA 1.4: Criterio de la selección del períodos para sistemas aislados



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Criterios para la elección del amortiguamiento efectivo del sistema de aislación

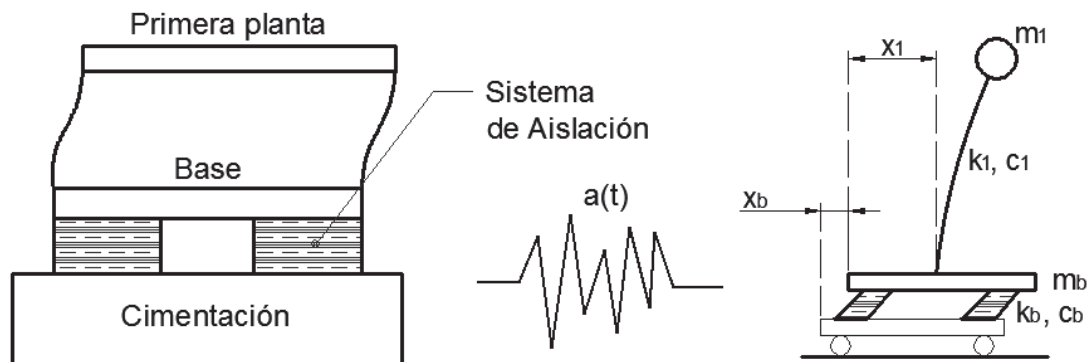
- Mientras mayor sea el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , menor será la demanda de desplazamiento sísmica, por lo tanto conviene seleccionar el valor máximo posible. Dispositivos los aisladores elastoméricos y de péndulo friccional pueden alcanzar niveles de β_{eff} superiores a 30%, sin embargo ASCE 7-16 y otros códigos admiten amortiguamientos hasta de 30% en el diseño como se verá en el Capítulo 3.
- Además de tener un alto amortiguamiento, es necesario que los dispositivos de aislamiento tengan la capacidad de restaurar su posición inicial luego del sismo. Entre más alto es el amortiguamiento, β_{eff} , se reduce su capacidad de auto-restauración ya que su rigidez post-fluencia es baja.

1.3. TEORÍA LINEAL DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

En este apartado se realiza una descripción breve de la teoría lineal del aislamiento sísmico desarrollada (Naemin & Kelly, 1999) y (Molinares & Barbat, 1994), como un paso previo al estudio del comportamiento no lineal de los sistemas con aislamiento en la base.

La teoría lineal se basa en un modelo con dos masas estructurales, la masa m_1 representa a la superestructura de la edificación y la masa m_b que representa al piso sobre el sistema de aislación, como se indica en la FIGURA 1.5. La rigidez y amortiguamiento de la estructura están representados por k_1 y c_1 respectivamente; la rigidez del sistema de aislación viene dada por k_b y el amortiguamiento del sistema de aislación por c_b . El desplazamiento de la masa m_1 respecto a la base es $x_1(t)$ mientras que $x_b(t)$ es el desplazamiento de la masa m_b respecto de la cimentación. El movimiento sísmico viene caracterizado por su desplazamiento $d(t)$, su velocidad $v(t)$ y su aceleración $a(t)$.

FIGURA 1.5: a) Esquema del sistema considerado; b) Modelo Dinámico



Fuente: (Molinares & Barbat, 1994)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Para el modelo presentado en la figura anterior las ecuaciones del movimiento vienen dadas por:

$$m_1 [\ddot{x}_1(t) + \ddot{x}_b(t) + a(t)] + k_1 x_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) = 0 \quad (1.1)$$

$$m_b [\ddot{x}_b(t) + a(t)] + m_1 [\ddot{x}_1(t) + \ddot{x}_b(t) + a(t)] + k_b x_b(t) + c_b \dot{x}_b(t) = 0 \quad (1.2)$$

Escritas de forma matricial se tiene:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{J}a(t) \quad (1.3)$$

Donde:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1 + m_b & m_1 \\ m_1 & m_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}_y \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_b \\ x_1 \end{bmatrix}$$

Para la ecuación se supone que el sistema no está amortiguado ($c_b = c_1 = 0$) y que oscila libremente ($a(t)=0$), entonces:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (1.4)$$

Como es sabido este sistema de ecuaciones diferenciales tiene soluciones particulares del tipo:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}e^{i\omega t} \quad (1.5)$$

Donde el vector \mathbf{A} contiene las amplitudes de los desplazamientos y ω es la frecuencia circular del modelo. Sustituyendo (1.5) en (1.4) se tiene:

$$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (1.6)$$

El sistema de ecuaciones lineales y homogéneas tiene soluciones de \mathbf{A} distintas de la trivial si el determinante de la matriz de coeficientes es nulo:

$$|\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}| = \begin{vmatrix} k_b - \omega^2(m_b + m_1) & -\omega^2 m_1 \\ -\omega^2 m_1 & k_1 - \omega^2 m_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (1.7)$$

Desarrollando el determinante y simplificando se obtiene:

$$w^4(1-\gamma) - w^2 \left(\frac{k_b}{m_1 + m_b} + \frac{k_1}{m_1} \right) + \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_b}{m_1 + m_b} = 0 \quad (1.8)$$

Donde $\gamma = \frac{m_1}{m_1 + m_b}$ es la relación de masas superestructura y sistema de aislación.

Se define la frecuencia fundamental de vibración de la estructura w_s y la frecuencia natural del dispositivo de aislación w_b como:

$$w_s = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad (1.9)$$

$$w_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_b + m_1}} \quad (1.10)$$

Rescribiendo la ecuación (1.8) se tiene:

$$w^4(1-\gamma) - w^2(w_b^2 + w_s^2) + w_b^2 w_s^2 = 0 \quad (1.11)$$

Si se denota

$$\varepsilon = \frac{w_b^2}{w_s^2} \quad (1.12)$$

Dado que la rigidez k_1 del modelo es mucho mayor que la rigidez k_b del dispositivo de aislación se puede estimar que ε es despreciable siendo del orden del 1%. Resolviendo la ecuación (1.11) se tiene que:

$$w^2 = \frac{w_b^2 + w_s^2}{2(1-\gamma)} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1-\gamma)\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2}} \right) \quad (1.13)$$

Simplificando y teniendo que ε es muy pequeño se tiene que los valores propios son aproximadamente:

$$w_1^2 \approx w_b^2(1 + \varepsilon) \approx w_b^2 \quad (1.14)$$

$$w_2^2 \approx \frac{w_b^2 + w_s^2}{1 - \gamma} \approx \frac{w_s^2(1 + \varepsilon)}{1 - \gamma} \approx \frac{w_s^2}{1 - \gamma} \quad (1.15)$$

Donde w_1 es la frecuencia natural modificada del dispositivo de aislación y w_2 es la frecuencia fundamental de la estructura, modificada por la presencia de los dispositivos de aislación. Estas frecuencias tienen asociados vectores propios φ_1 y φ_2 estos se hallan a partir de la ecuación (1.6) y son los siguientes:

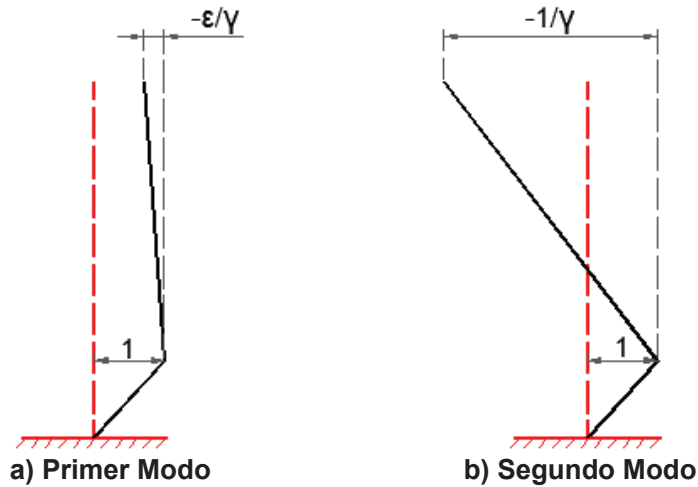
$$\varphi_1^T = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-\varepsilon}{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

$$\varphi_2^T = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

En la FIGURA 1.6 se representan los vectores propios o modos de vibración. El primer modo es aproximadamente el de una estructura rígida, mientras que el segundo modo involucra deformaciones tanto de la superestructura como del sistema de aislación; y el desplazamiento del tope es del mismo orden que el desplazamiento de la base pero en sentido contrario. Teniendo en cuenta las ecuaciones (1.16) y (1.17) el movimiento del modelo en estudio queda expresado por:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_b(t) \\ x_1(t) \end{bmatrix} = y_1(t)\varphi_1^T + y_2(t)\varphi_2^T \quad (1.18)$$

FIGURA 1.6: Modos de vibración de sistemas aislados



Fuente: (Molinares & Barbat, 1994)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

A continuación se presenta un resumen de las ecuaciones obtenidas si se considera el amortiguamiento como expresión de la disipación de energía en la estructura:

$$\mathbf{M}(\ddot{y}_1(t)\varphi_1 + \ddot{y}_2(t)\varphi_2) + \mathbf{c}(\dot{y}_1(t)\varphi_1 + \dot{y}_2(t)\varphi_2) + \mathbf{k}(y_1(t)\varphi_1 + y_2(t)\varphi_2) = -\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}(t) \quad (1.19)$$

Los vectores φ_1 y φ_2 pueden organizarse en la matriz modal $\phi = [\varphi_1 \quad \varphi_2]$

Dado que los vectores propios son ortogonales respecto a las matrices de masa y rigidez, se tiene:

$$\phi^T \mathbf{M} \phi = \mathbf{M}^* \quad (1.20)$$

$$\phi^T \mathbf{K} \phi = \mathbf{K}^* \quad (1.21)$$

Donde \mathbf{M}^* y \mathbf{K}^* son matrices diagonales. Si se multiplica (1.19) por φ_1^T se obtiene:

$$\ddot{y}_1(t)\varphi_1^T \mathbf{M} \varphi_1 + \dot{y}_1(t)\varphi_1^T \mathbf{C} \varphi_1 + y_2(t)\varphi_1^T \mathbf{C} \varphi_2 + y_1(t)\varphi_1^T \mathbf{K} \varphi_1 = -\varphi_1^T \mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}(t) \quad (1.22)$$

Si se multiplica **(1.19)** por φ_2^T se obtiene:

$$\ddot{y}_2(t)\varphi_2^T\mathbf{M}\varphi_2 + \dot{y}_1(t)\varphi_2^T\mathbf{C}\varphi_1 + \dot{y}_2(t)\varphi_2^T\mathbf{C}\varphi_2 + y_1(t)\varphi_2^T\mathbf{K}\varphi_2 = -\varphi_2^T\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}(t) \quad (1.23)$$

Se supone que el amortiguamiento es proporcional, con la cual la matriz \mathbf{C} es ortogonal:

$$\varphi_1^T\mathbf{C}\varphi_2 = \varphi_2^T\mathbf{C}\varphi_1 = 0$$

De acuerdo con lo anterior y dividiendo $\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1$, la ecuación **(1.22)** queda expresada de la siguiente manera:

$$\ddot{y}_1(t) + \frac{\varphi_1^T\mathbf{C}\varphi_1}{\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1}\dot{y}_1(t) + \frac{\varphi_1^T\mathbf{K}\varphi_1}{\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1}y_1(t) = -\frac{\varphi_1^T\mathbf{M}\mathbf{J}}{\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1}\mathbf{a}(t) \quad (1.24)$$

Se definen los siguientes valores:

$$\mathbf{L}_1 = \frac{\varphi_1^T\mathbf{M}\mathbf{J}}{\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1} \quad (1.25)$$

$$2w_1v_1 = \frac{\varphi_1^T\mathbf{C}\varphi_1}{\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1} \quad (1.26)$$

Teniendo en cuenta los resultados de las ecuaciones **(1.14)** y **(1.16)** y las formulaciones de las matrices \mathbf{M} y \mathbf{C} , se obtiene la ecuación **(1.26)** que permite determinar un valor aproximado para la fracción de amortiguamiento crítico v_1

$$\varphi_1^T\mathbf{C}\varphi_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon \\ & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\varepsilon \\ \gamma \end{bmatrix} = c_b + \frac{c_1\varepsilon^2}{\gamma^2} \quad (1.27)$$

$$\varphi_1^T\mathbf{M}\varphi_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon \\ & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_b + m_1 & m_1 \\ & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\varepsilon \\ \gamma \end{bmatrix} = m_b + m_1 - \frac{2\varepsilon m_1}{\gamma} + \frac{m_1\varepsilon^2}{\gamma^2} \quad (1.28)$$

De donde se deduce que:

$$v_1 = \frac{c_b}{2w_1(m_b + m_1)} \frac{1 + \frac{c_1 \varepsilon^2}{c_b \gamma^2}}{1 - 2\varepsilon + \frac{\varepsilon^2}{\gamma}} \quad (1.29)$$

Despreciando los términos de orden ε^2 y aplicando desarrollos de series de Taylor se tiene que:

$$v_1 \approx \frac{c_b}{2w_1(m_b + m_1)} \quad (1.30)$$

Por tanto se define v_b como el amortiguamiento crítico de los dispositivos de aislamiento, del orden del 10%:

$$v_b = \frac{c_b}{2w_b(m_b + m_1)} \quad (1.31)$$

En base al valor aproximado de la ecuación (1.14) se puede decir que v_1 es del mismo orden de magnitud que v_b , por otra parte:

$$(\mathbf{K} - w_1^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\varphi}_1 = \mathbf{0} \quad (1.32)$$

Desarrollando y simplificando se obtiene:

$$w_1^2 = \frac{\boldsymbol{\varphi}_1^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}_1}{\boldsymbol{\varphi}_1^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_1} \quad (1.33)$$

Utilizando las ecuaciones (1.24), (1.25) y (1.33) queda:

$$\ddot{y}_1(t) + 2w_1 v_1 \dot{y}_1(t) + w_1^2 y_1(t) = -L_1 a(t) \quad (1.34)$$

Procediendo de forma análoga en la ecuación **(1.23)** se obtiene:

$$v_2 = \frac{1}{2w_2 m_1} \frac{c_b \gamma^2 + c_1}{1 - \gamma} \quad (1.35)$$

Utilizando el valor de w_2 definido en la ecuación **(1.15)**, el valor aproximado de v_2 viene dado por:

$$v_2 \approx \frac{1}{2w_s m_1} \frac{c_b \gamma^2 + c_1}{\sqrt{1 - \gamma}} \quad (1.36)$$

Si se define la fracción de amortiguamiento crítico de la estructura como, v_s del orden del 2%:

$$v_s = \frac{c_1}{2w_s m_1} \quad (1.37)$$

Reemplazando la ecuación **(1.37)** en **(1.36)** y simplificando se tiene:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma}} \left[v_s + \gamma v_b \sqrt{\varepsilon} \right] \quad (1.38)$$

Mediante un procedimiento análogo al realizado a través de las ecuaciones **(1.20)** a **(1.38)** se pueden hallar los factores de participación modal L_1 y L_2 , los cuales vienen dados por:

$$L_1 = \frac{1 - \varepsilon}{1 - 2\varepsilon + \frac{\varepsilon^2}{\gamma}} \approx 1 \quad (1.39)$$

$$L_2 \approx \gamma \varepsilon \quad (1.40)$$

1.3.1. CONCLUSIONES OBTENIDAS A PARTIR DE LA TEORÍA LINEAL

Los resultados obtenidos de la Teoría Lineal permiten hacer las siguientes consideraciones:

- El primer modo de vibración indica que los desplazamientos se concentran mayoritariamente en el sistema de aislación y por tanto la superestructura tiene un movimiento que se puede asimilar a la de un sólido rígido. Son los modos superiores los que contribuyen a la deformación lateral y movimiento de la superestructura y por tanto al daño.
- La relación de masas puede afectar levemente la participación del primer modo de vibración, por ejemplo al incrementarse la masa de la superestructura se incrementa relación de masas y el factor de participación modal.
- Un incremento en la relación período del sistema de aislación/ período de la superestructura resulta en una disminución de la participación de los modos superiores en la deformación lateral
- La eficacia de los sistemas de aislación radica en el factor de participación modal del segundo modo, el cual implica deformaciones en la superestructura, es del orden ε y si las frecuencias w_b y w_s están bien separadas, ε resultaría muy pequeño.
- Dado que el factor de participación modal del segundo modo es muy pequeño, este modo es ortogonal al terremoto, lo que significa que aunque el terremoto si tenga energía en esta frecuencia, el movimiento no será transmitido a la superestructura. Por tanto, la eficacia real del sistema de aislación radica no en la absorción de energía sino en el desvío de la misma a través de la ortogonalidad antes mencionada.
- La estructura con un grado de libertad con la base fija tiene una frecuencia w_s , el sistema con asilamiento en la base tiene dos frecuencias propias w_1 y w_2 . Como se vio la frecuencia w_1 es similar a w_b y por tanto menor a w_s y a la frecuencia predominante del sismo, esto permite que primer modo de vibración de la estructura se aleje de la frecuencia predominante del terremoto y por tanto se evita que la estructura entre en resonancia.

1.4. TEORÍA NO LINEAL DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

En este apartado se presenta un resumen de la formulación desarrollada por (Molinares & Barbat, 1994) para modelar la respuesta no lineal de sistemas aislados en la base. Partiendo de la teoría lineal y de la FIGURA 1.5 se asume que debido al uso de dispositivos de asilamiento, la estructura se comporta elásticamente, además se considera que el aparato de apoyo tiene propiedades no lineales.

La ecuación del movimiento para el modelo asumido viene dada por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{D}} + \mathbf{K}\mathbf{D} = -\mathbf{M}\mathbf{J}[\ddot{d}_b + a(t)] \quad (1.41)$$

Donde \mathbf{D} es vector de desplazamiento relativo a la base, \mathbf{M} es la matriz de masa, \mathbf{C} es la matriz de amortiguamiento, \mathbf{K} es la matriz de rigidez, \ddot{d}_b es la aceleración de la base relativa al terreno y \mathbf{J} vector que indica el movimiento del sólido rígido según los grados de libertad asumidos para el modelo.

Para las condiciones iniciales, $t = 0 \Rightarrow \mathbf{D} = 0, \dot{\mathbf{D}} = 0$, la ecuación que gobierna el movimiento de la base se puede expresar como:

$$m_b (\ddot{d}_b + a(t)) + \mathbf{J}^T \mathbf{M} [\ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{J}(\ddot{d}_b + a(t))] + f = 0 \quad (1.42)$$

Donde f es la fuerza ejercida por el aislamiento de la base sobre la masa de la base m_b . El comportamiento de la fuerza f dependerá del tipo sistema de aislación, en este trabajo se desarrollará el estudio de f para sistemas friccionales. La solución general de la ecuación (1.41) puede simplificarse si se realiza un desacoplamiento modal previo del sistema. Utilizando los q primeros modos de vibración, el vector de desplazamientos queda expresado como:

$$\mathbf{D}(t) = \sum_{i=1}^q \varphi_i y_i(t) \quad (1.43)$$

Donde φ_i es el vector propio y la función $y_i(t)$ es una coordenada generalizada correspondiente al modo de vibración i . El vector modal φ_i viene dado por:

$$\ddot{y}_j(t) + 2v_j w_j \dot{y}_j(t) + w_j^2 y_j(t) = -\frac{\varphi_j^T \mathbf{M} \mathbf{J}}{\varphi_j^T \mathbf{M} \varphi_j} [\ddot{d}_b + a(t)] \quad (1.44)$$

Siendo w_j y v_j , las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento crítico de la estructura respectivamente. Reemplazando la ecuación (1.43) en (1.42) la ecuación del movimiento se puede expresar de la siguiente manera:

$$m_b (\ddot{d}_b + a(t)) + \mathbf{J}^T \mathbf{M} \left[\sum_{i=1}^q \varphi_i \ddot{y}_i(t) + \mathbf{J} (\ddot{d}_b + a(t)) \right] + f = 0 \quad (1.45)$$

La fuerza restitutiva, f , de un sistema histerético no lineal puede ser descompuesta de la siguiente manera:

- Una componente no histerética, g , función de la velocidad y de los desplazamientos instantáneos.
- Una componente histerética, z , función de la evolución del desplazamiento en el tiempo, propiedades del material, de la amplitud de la respuesta y de las características estructurales.

$$f = g(x, \dot{x}) + z(x) \quad (1.46)$$

g viene dada por un polinomio de la forma:

$$g(x, \dot{x}) = j(x) + h(\dot{x}) \quad (1.47)$$

En la ecuación (1.47) se han utilizado las siguientes definiciones, donde a y b son constantes:

$$j(x) = b_0 \text{sign}(x) + b_1 x + b_2 |x| x + b_3 x^3 + \dots \quad (1.48)$$

$$h(\dot{x}) = a_0 \text{sign}(\dot{x}) + a_1 \dot{x} + a_2 |\dot{x}| \dot{x} + a_3 \dot{x}^3 + \dots \quad (1.49)$$

En los últimos años se han venido desarrollando numerosos estudios acerca de los modelos de comportamiento no lineal aplicables a sistemas de aislación, en el CAPITULO 2 se realizará un resumen de estos modelos aplicados a aisladores triple péndulo de fricción.

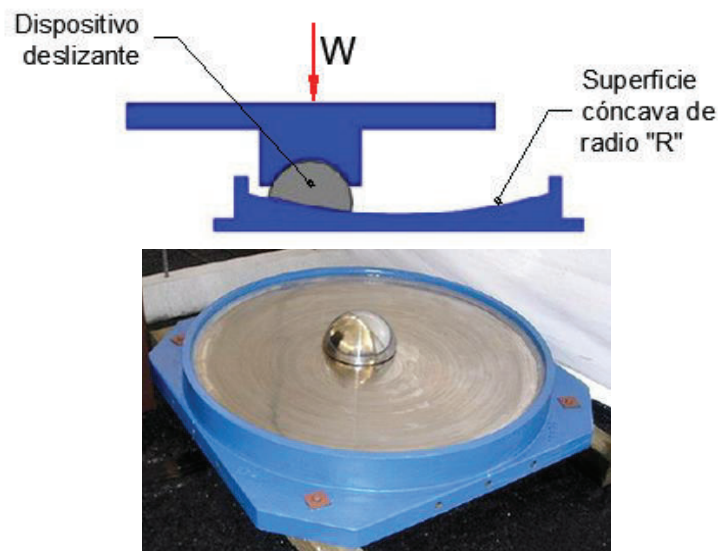
CAPÍTULO 2

ANÁLISIS NO LINEAL EN AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

Entre los sistemas de aislación de la base se tienen los sistemas de péndulo friccional de sus siglas en inglés FPS (*Friction Pendulum System*). Este tipo de apoyos se basan en las características de un péndulo físico que permite alargar el período natural de la estructura aislada y reducir las fuerzas sísmicas que llegan a la estructura. El primer sistema de asilamiento tipo péndulo friccional, el PÉNDULO DE FRICCIÓN SIMPLE, fue estudiado por Víctor Zayas en 1987. Consistía en un dispositivo deslizante sobre una superficie cóncava, donde el radio del movimiento del péndulo es igual al radio de la superficie esférica, R .

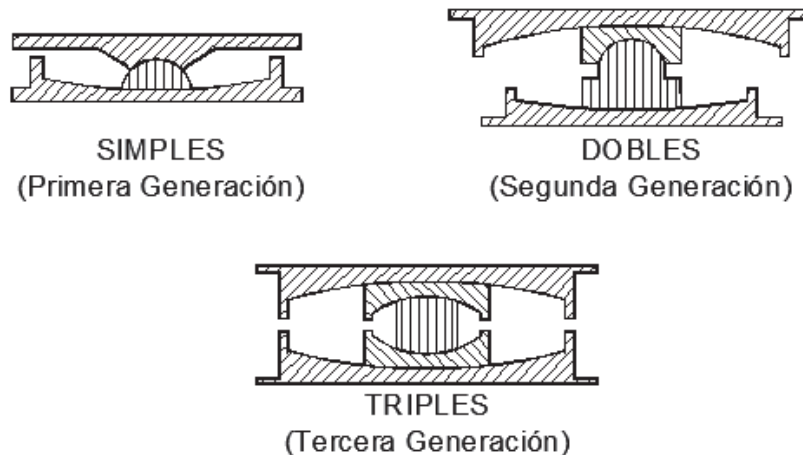
FIGURA 2.1: Péndulo de fricción simple



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Durante los últimos años se han venido desarrollando varios tipos de aisladores de péndulo friccionales: simples, dobles y triples; en la FIGURA 2.2 se indica un esquema de diferentes aisladores de péndulo friccionales antes mencionados. En la actualidad uno de los más usados son los dispositivos TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN.

FIGURA 2.2 Evolución de los aisladores de péndulo friccionales



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

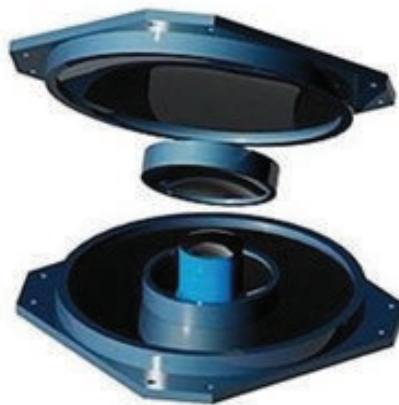
Los sistemas de aislación de péndulo friccionales combinan dos mecanismos fundamentales: el deslizamiento friccional de las superficies de acero y el movimiento pendular del dispositivo deslizante sobre las superficies esféricas. A través de estos mecanismos el dispositivo es capaz de reorientarse por sí mismo y disipar una gran cantidad de energía a través del deslizamiento sobre la superficie curva. Otra propiedad importante es que los movimientos torsionales de la superestructura son minimizados, esto se debe al hecho de la rigidez lateral y la fuerza de fricción en cada aislador son directamente proporcionales a la fuerza normal actuando en cada uno de ellos. De esta forma el centro de rigidez de estos dispositivos coincide constantemente con el centro de masa de la estructura, compensando la excentricidad de masa de la superestructura.

2.2. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y FRICCIONALES

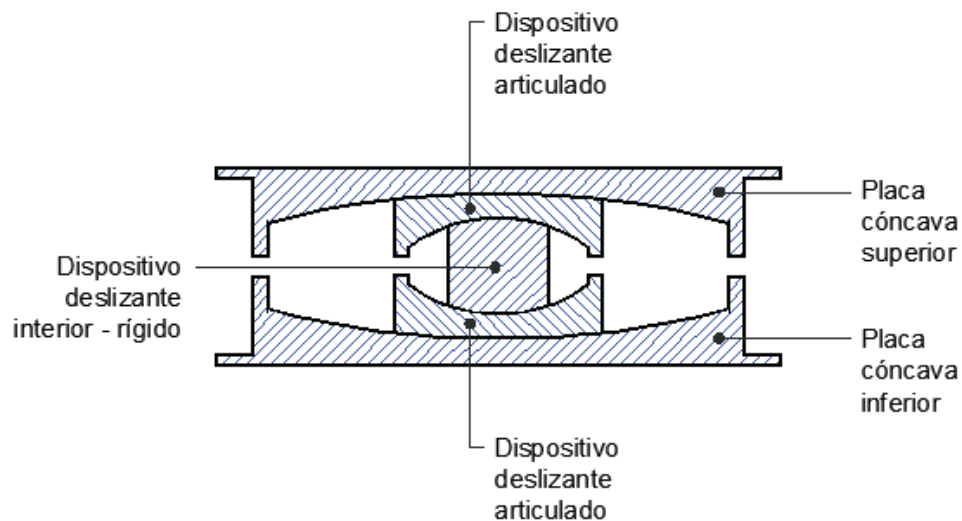
Como se puede observar en la FIGURA 2.3 un aislador triple péndulo de fricción es un dispositivo mecánico en el que se distinguen tres partes principales:

- Dos **superficies o placas cóncavas deslizantes** de acero inoxidable y separadas por **dispositivo deslizante articulado**
- El dispositivo deslizante articulado consiste en dos placas cóncavas separadas por un dispositivo **deslizante rígido**.

FIGURA 2.3 Geometría de una aislador triple péndulo de fricción
Vista 3D



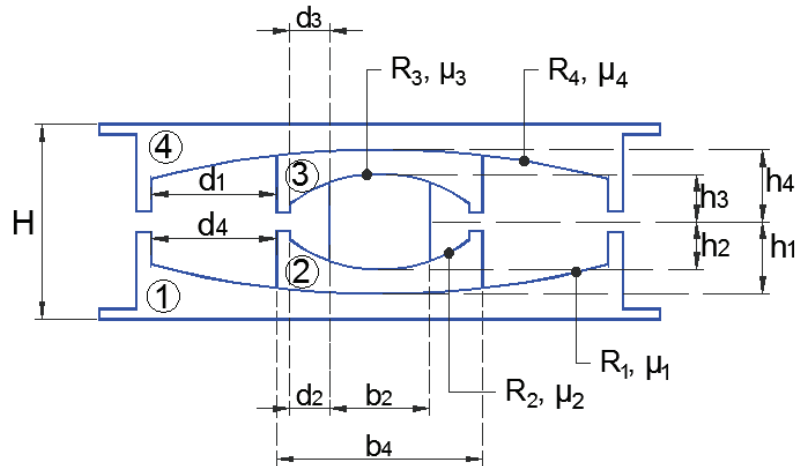
Sección



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Existen 12 parámetros geométricos y 4 parámetros friccionales, los cuales definen el comportamiento fuerza-desplazamiento de un aislador triple péndulo de fricción.

FIGURA 2.4: Parámetros de definición de un aislador triple péndulo de fricción



Fuente: (McVitty & Constantinou, 2015)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

- R_i , que representa el radio de curvatura de las superficies cóncavas i
- h_i , es la distancia radial entre el punto pivote y la superficie i
- μ_i , es el coeficiente de fricción en la superficie deslizante i
- d_i , distancia relacionada con la capacidad de desplazamiento
- $R_{i,eff}$, es el radio efectivo y viene dado por:

$$R_{i,eff} = R_i - h_i \quad (2.1)$$

- d_i^* , es la capacidad de desplazamiento efectiva y viene dada por:

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} d_i \quad (2.2)$$

Para los **aisladores triple péndulo de fricción convencionales** se tiene que:

$$R_1=R_4 \gg R_2=R_3$$

$$\mu_2= \mu_3 < \mu_1= \mu_4$$

$$d_1=d_4 \text{ y } d_2=d_3$$

$$h_1=h_4 \text{ y } h_2=h_3$$

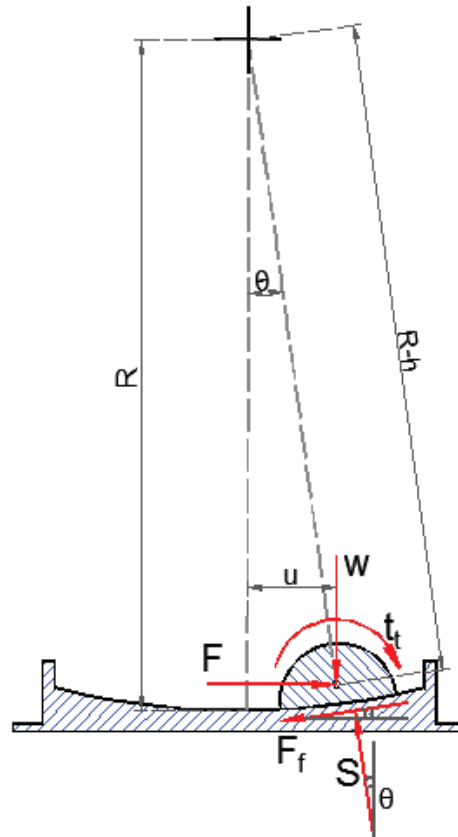
De esta forma las propiedades geométricas se reducen a seis y las friccionales a dos.

2.3. MODELO MATEMÁTICO

Antes de formular la teoría mecánica del deslizamiento sobre superficies cóncavas, es importante entender el mecanismo de deslizamiento sobre una superficie cóncava simple, las fuerzas que actúan y las hipótesis asumidas. El comportamiento de un péndulo de fricción simple fue descrito originalmente por (Zayas, Stanley, & Stephen, 1990). Lo que se presenta a continuación resume su trabajo original, con el fin de dar a conocer conceptos básicos sobre estos dispositivos de aislación y que servirán para el desarrollo de los capítulos posteriores.

Los apoyos friccionales son dispositivos que soportan cargas verticales y transmiten cargas horizontales de una forma específica. Cuando la fuerza horizontal es menor que la fuerza de fricción no se produce movimiento. Esta fuerza de fricción previene el deslizamiento del apoyo bajo cargas de servicio. Cuando la fuerza horizontal aplicada excede la fuerza de fricción, el deslizamiento se inicia y el diagrama de cuerpo libre para esta situación se indica en la FIGURA 2.5

FIGURA 2.5 Diagrama de cuerpo libre en la posición deformada para el péndulo friccional simple.



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La relación fuerza desplazamiento es determinada a partir del equilibrio y geometría del dispositivo deslizante en su posición desplazada. En esta posición las fuerzas que actúan sobre el dispositivo deslizante son:

- La carga vertical, W , actuando en el punto pivote.
- La fuerza horizontal, F , trasferida a través del apoyo
- La fuerza de fricción. F_f , actuando a lo largo de la superficie de deslizamiento, que es función el coeficiente de fricción μ , el cual depende de varios parámetros variables con el tiempo como la velocidad de deslizamiento y la presión.
- La fuerza normal, S
- La fuerza de fricción traccional t_f a lo largo de la superficie esférica del dispositivo deslizante articulado. Se asume que el efecto de esta fuerza es

parte de la fuerza de fricción y por tanto no aparece de forma explícita en las ecuaciones de equilibrio.

Considerando el equilibrio en las direcciones horizontal y vertical, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$F - S \sin(\theta) - F_f \cos(\theta) = 0 \quad (2.3)$$

$$W - S \cos(\theta) + F_f \sin(\theta) = 0 \quad (2.4)$$

De la geometría se define el desplazamiento horizontal del punto pivote, u como:

$$u = (R - h) \sin(\theta) = R_{\text{eff}} \sin(\theta) \quad (2.5)$$

Donde el radio efectivo de curvatura, R_{eff} , es la distancia radial desde el centro de la superficie esférica hasta en punto pivote de dispositivo deslizante articulado.

Combinando las ecuaciones (2.3), (2.4) y (2.5), la relación fuerza-desplazamiento que gobierna el movimiento de una apoyo friccional simple es:

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}} \cos(\theta)} u + \frac{F_f}{\cos(\theta)} \quad (2.6)$$

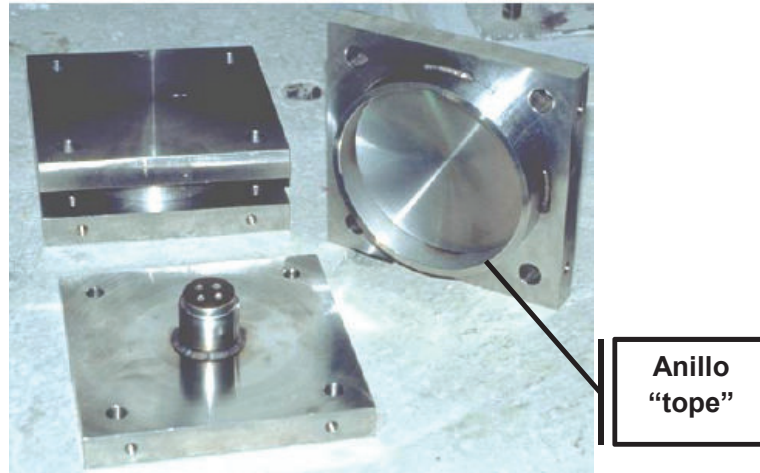
En la mayoría de casos, el radio de curvatura es grande en comparación con el desplazamiento horizontal y por tanto el $\cos(\theta) \sim 1$ y por tanto la ecuación (2.6) queda simplificada de la siguiente manera:

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}}} u + F_f \quad (2.7)$$

Los aisladores friccionales pendulares simples fabricados por la compañía de Víctor Zayas, EPS (Earthquake Protection Systems), poseen un anillo en el borde exterior de la superficie esférica de deslizamiento como se indica en la FIGURA

2.6, el cual tiene como función hacer de “tope” con el fin de limitar el desplazamiento del dispositivo deslizante.

FIGURA 2.6: Anillo “tope” en un péndulo de fricción simple



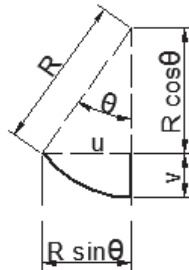
Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En los péndulos de fricción simples, el dispositivo deslizante alcanzará el anillo “tope” solamente para circunstancias extraordinarias. Sin embargo, en los aisladores multiesféricos como los dispositivos triple péndulo de fricción, se alcanzarán los diferentes “topes” para operaciones normales de funcionamiento y además de limitar el desplazamiento permitirán que el movimiento se detenga en una superficie y se inicie en otra, lo que se traducirá en fuerzas como se explica en las secciones siguientes.

La formulación presentada a través de las ecuaciones (2.3) a (2.7), se puede extender a apoyos deslizantes multiesféricos, en los cuales el comportamiento resulta de la combinación de deslizamientos que pueden ocurrir en varias superficies cóncavas. El comportamiento de un aislador triple péndulo de fricción se basará en esta analogía, permitiendo clasificar el movimiento en varios regímenes o fases de deslizamiento, cada una correspondiente a distintas combinaciones de superficies en las cuales el deslizamiento ocurra; el estudio de las distintas fases de deslizamiento se realizará en las secciones siguientes de este trabajo.

Debido a la forma de la superficie de deslizamiento, el desplazamiento lateral del aislador va acompañado de un movimiento vertical como se puede apreciar en la FIGURA 2.7.

FIGURA 2.7: Movimiento vertical



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

$$v = R(1 - \cos \theta) = R \left[1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{u}{R} \right) \right) \right] \quad (2.8)$$

$$v = \frac{R\theta^2}{2} \approx \frac{u^2}{2R} \quad (2.9)$$

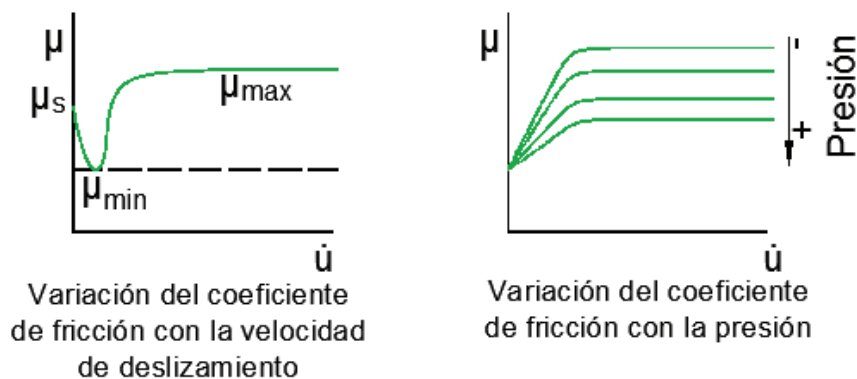
De las ecuaciones (2.8) y (2.9) se puede concluir que el movimiento vertical es aproximadamente proporcional al cuadrado de desplazamiento lateral e inversamente proporcional al radio de curvatura. Por tanto, el movimiento vertical es despreciable en comparación con el desplazamiento lateral.

2.3.1. RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO

El comportamiento horizontal de los aisladores friccionales viene dado por la fuerza lateral definida en la ecuación (2.7), en la que se pueden distinguir dos componentes: una componente geométrica pendular (primer sumando, F_r) que determina la rigidez del aislador y una componente friccional (segundo sumando, F_f) que determina la resistencia y amortiguamiento del aislador y que por tanto es la responsable del comportamiento histerético.

La fricción es un fenómeno extremadamente complejo, que no puede ser explicado de forma exacta, y que se ve afectado por un sin número de factores. Dentro de dichos factores los más importantes son: la velocidad de deslizamiento, la presión y la temperatura. A la derecha de la FIGURA 2.8, se observa que el coeficiente de fricción se incrementa rápidamente con el aumento de la velocidad de deslizamiento hasta un determinado valor para el cual permanece constante, mientras que el calentamiento friccional que se produce durante el deslizamiento provoca una disminución de dicho coeficiente. A la izquierda de FIGURA 2.8, se muestra que el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la presión y la tasa de reducción depende a su vez de la velocidad de deslizamiento, siendo mayor para velocidades de deslizamiento altas.

FIGURA 2.8: Variación del coeficiente de fricción (μ), con la velocidad de deslizamiento (\dot{u}) y de la presión ejercida



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

De acuerdo a la teoría asumida para la componente friccional, se tienen los siguientes modelos para la relación fuerza-desplazamiento:

- Relación Fuerza - Desplazamiento basada en el Modelo de Coulomb
- Relación Fuerza - Desplazamiento basada en el Modelo Viscoplastico Modificado de Constantinuo

En las siguientes líneas se presentan los modelos antes mencionados, aplicados a péndulos friccionales simples y cuya analogía servirá de base para entender el comportamiento de los aisladores triple péndulo de fricción.

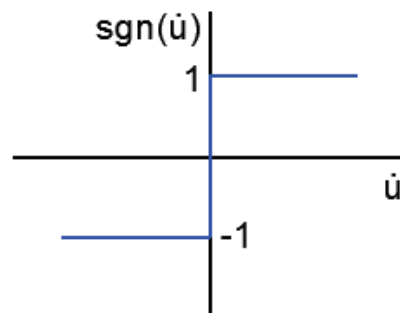
2.3.1.1. Relación Fuerza - Desplazamiento basada en el Modelo de Coulomb

La fuerza friccional del Coulomb, viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_f = \mu \operatorname{sgn}(\dot{u}_b)W \quad (2.10)$$

De acuerdo a la ecuación (2.10), la fuerza de fricción depende de la fuerza normal (peso W), del coeficiente de fricción, μ , que es constante y de la velocidad de deslizamiento, \dot{u}_b . La relación coeficiente de fricción-velocidad se representa mediante la función signo de la velocidad, $\operatorname{sgn}(\dot{u}_b)$, mostrada en la FIGURA 2.9.

FIGURA 2.9 Función Signo



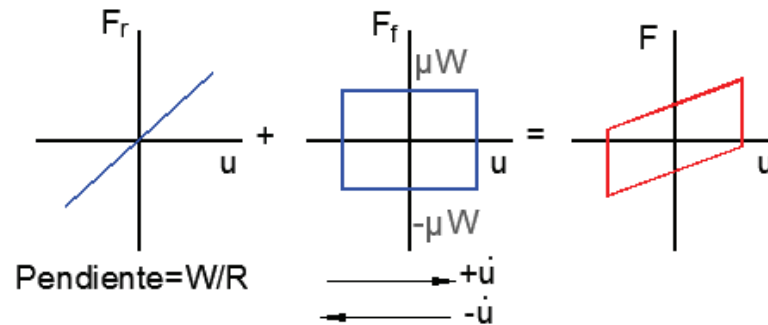
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Reemplazando (2.10) en (2.7) se tiene:

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}}} u_b(t) + W\mu \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) \quad (2.11)$$

Como se definió anteriormente W es el peso que gravita sobre el aislador, R_{eff} es el radio efectivo de curvatura de la superficie esférica, u_b es la deformación de deslizamiento, \dot{u}_b es la velocidad de deslizamiento, μ es el coeficiente de fricción en la interface teflón-acero y $\operatorname{sgn}(\dot{u}_b)$ es la función signo de la velocidad de deslizamiento. Si representamos cada uno de los miembros de la ecuación (2.11) la relación fuerza-desplazamiento quedaría esquematizada según la FIGURA 2.10

FIGURA 2.10: Relación Fuerza-Desplazamiento basada en el Modelo de Coulomb



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

2.3.1.2. Relación Fuerza - Desplazamiento basada en el Modelo Viscoplastico Modificado de Constantinou

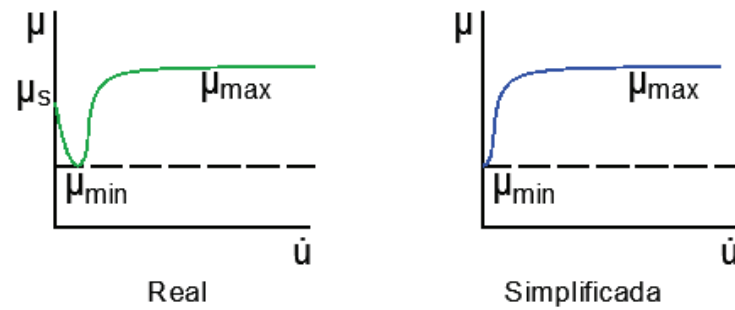
De acuerdo a varios ensayos se ha demostrado que el comportamiento de la fuerza de fricción en la interfaces de los aisladores friccionales no cumple la teoría de Coulomb. Como se indicó en la FIGURA 2.8, la dependencia del coeficiente de fricción de la velocidad de deslizamiento y de la presión, es suficientemente significativa en el comportamiento dinámico de los aisladores de péndulo de fricción, por lo que dichos factores deben ser considerados. (Mokha, Constantinou, & Reinhorn, 1988).

La relación coeficiente de fricción-velocidad de deslizamiento simplificada se puede expresar mediante la ecuación (2.12) definida por (Constantinou, Mokha, & Reinhorn, 1990), a partir de varios estudios experimentales:

$$\mu_{\text{simp}} = \mu_{\text{max}} - (\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}})e^{-a|u_b|} \quad (2.12)$$

Donde μ_{max} y μ_{min} son los coeficientes de fricción a velocidades de deslizamiento máxima y cercana a cero respectivamente, "a" un parámetro que caracteriza la transición entre μ_{max} y μ_{min} . La diferencia entre la variación del coeficiente de fricción y la velocidad real y la simplificada, se puede apreciar en la FIGURA 2.11.

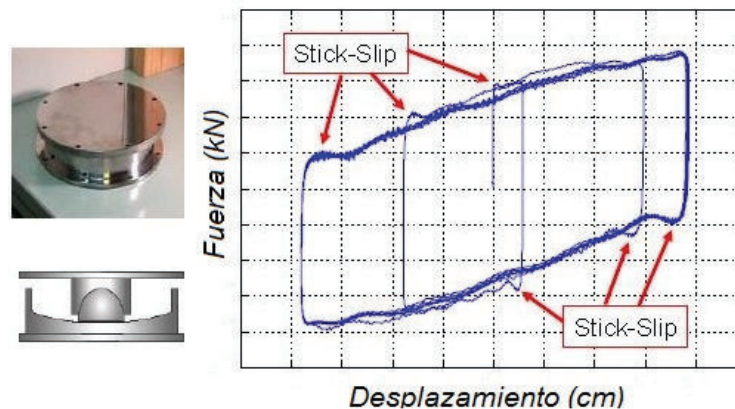
FIGURA 2.11: Coeficiente de fricción (μ) vs. velocidad de deslizamiento (\dot{u})



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Durante los ensayos experimentales realizados por (Constantinou, Mokha, & Reinhorn, 1990) se observó que durante movimiento en las superficies de los aisladores, se producen fenómenos de fricción por adherencia y por deslizamiento, del inglés “stick-slip”. Dichos fenómenos se pueden observar en la FIGURA 2.12.

FIGURA 2.12: Curva de Histéresis Real para un péndulo de fricción simple



Fuente: (Constantinou, Mokha, & Reinhorn, 1990)

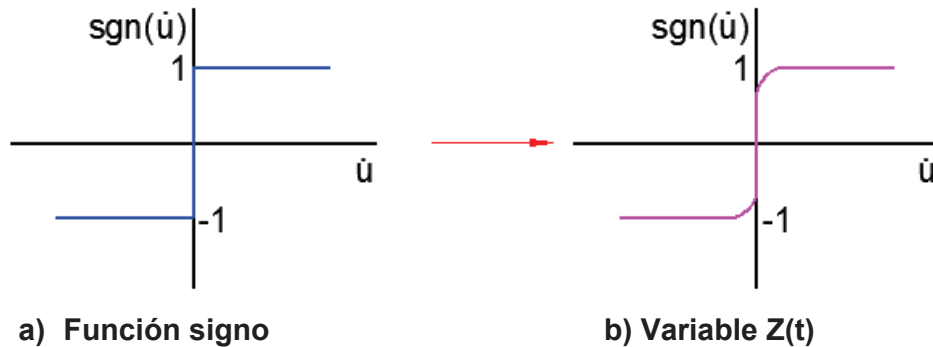
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La fuerza friccional de Coulomb indicada en la ecuación (2.10) no tiene en cuenta la fricción por adherencia y solo es válida para deslizamiento, lo que hace sea necesario redefinirla mediante una ecuación modificada como la que se indica a continuación:

$$F_f = \mu_{\text{simp}} Z(t) W \quad (2.13)$$

Donde $Z(t)$ es una variable histerética gobernada por un comportamiento viscoplástico que permite tener en cuenta los efectos friccionales de adherencia y deslizamiento y que toma valores de +1 y -1, como se puede apreciar en la FIGURA 2.13.

FIGURA 2.13: Variable histerética $Z(t)$



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La variable $Z(t)$ se basa en la ecuación originalmente propuesta por Bouc indicada en la ecuación (2.14).

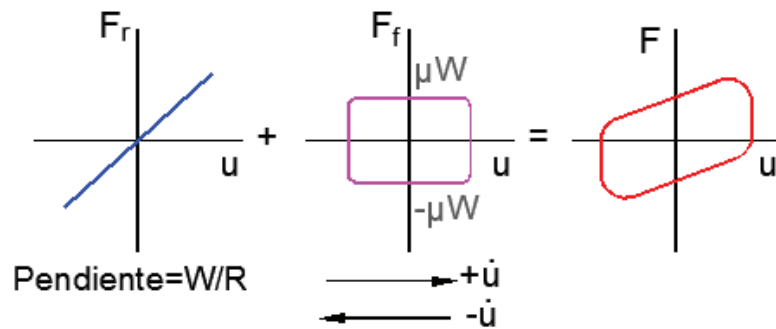
$$\frac{dZ}{dt} = \frac{1}{v_y} \left\{ A - |Z|^\eta \left[\gamma \text{sgn}(\dot{u}_b Z) + \beta \right] \dot{u}_b \right\} \quad (2.14)$$

Donde v_y es el desplazamiento de fluencia, \dot{u}_b es la velocidad de deslizamiento y γ, β, η y A son variables adimensionales que controlan la forma de lazo histerético y que pueden ser definidas de acuerdo a lo sugerido por (Constantinou, Mokha, & Reinhorn, 1990).

La ecuación (2.15) define relación fuerza-desplazamiento para las condiciones antes mencionadas y se conoce como Modelo Viscoplastico Modificado de Constantino, representado en la FIGURA 2.14.

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}}} u_b(t) + \mu_{\text{simp}} W Z(t) \quad (2.15)$$

FIGURA 2.14: Relación Fuerza-Desplazamiento basada en el Modelo Viscoplastico Modificado de Constantinuo

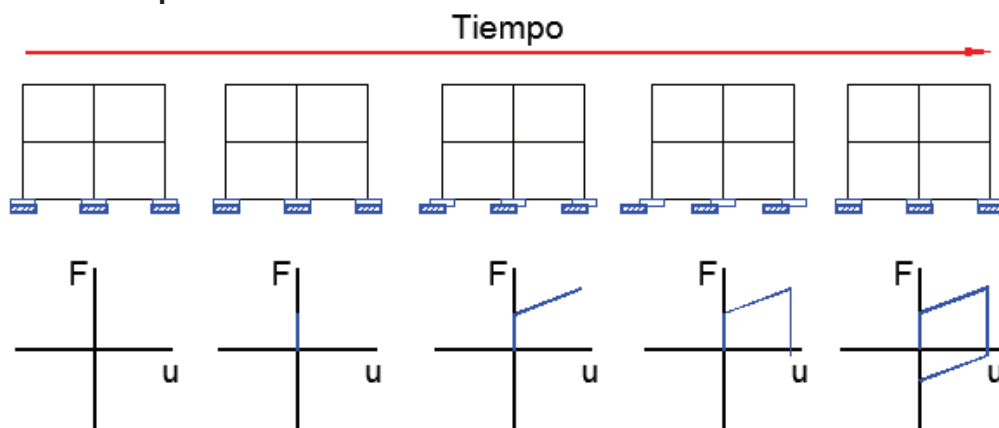


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

2.4. COMPORTAMIENTO DINÁMICO HORIZONTAL - MODELOS DE HISTÉRESIS SIMPLIFICADOS PARA AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

La relación fuerza-desplazamiento a lo largo del tiempo o curva de histéresis, depende de los parámetros geométricos y friccionales de las superficies de deslizamiento y varía de acuerdo al desplazamiento que sufre el aislador en cada etapa del movimiento, como se observa en la FIGURA 2.15.

FIGURA 2.15: Comportamiento dinámico horizontal para un aislador péndulo de fricción simple



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

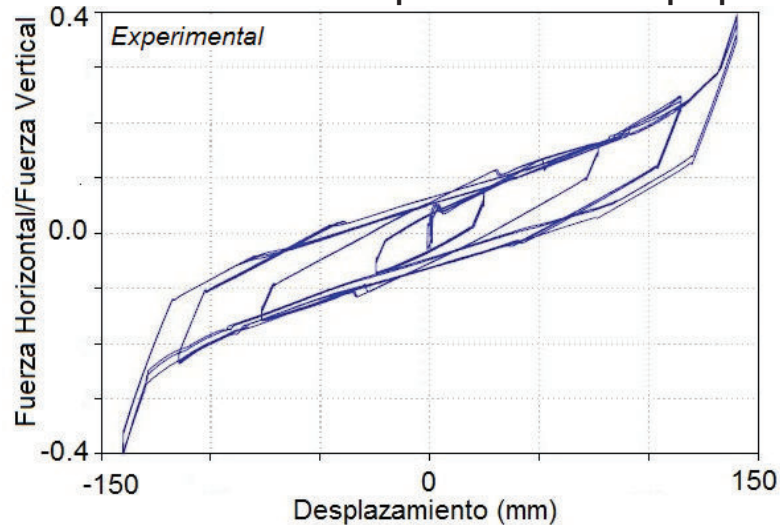
La curva de histéresis para un aislador triple péndulo de fricción, es compleja, dado que durante el movimiento el aislador experimenta múltiples cambios en la combinación de superficies que deslizan y cada una de dichas superficies presenta diferentes parámetros geométricos y friccionales, por ello se han desarrollado expresiones simplificadas validadas a partir de numerosos ensayos realizados por (Fenz & Constantinou, 2008). Las formulaciones que se presentan a continuación son un breve resumen de dichas investigaciones, cuyos resultados sirvieron para la definición del comportamiento histerético simplificado de los aisladores triple péndulo de fricción. Las hipótesis asumidas para la definición del comportamiento histerético simplificado son las siguientes:

- El comportamiento es determinado mediante un análisis basado en “eventos”, en el cual el movimiento es descrito mediante las ecuaciones de equilibrio obtenidas tras la aplicación de cada “evento”.
- Se consideran propiedades friccionales independientes de la presión ejercida y ángulos pequeños, lo que da como resultado un comportamiento lineal.
- El cambio de comportamiento ocurre cuando se alcanza la capacidad de desplazamiento o la resistencia a fricción, lo que resulta en diferentes regímenes o fases de deslizamiento.
- Las ecuaciones del movimiento en cada fase de deslizamiento son halladas mediante las ecuaciones del equilibrio aplicadas al aislador usando un planteamiento idéntico al usado para un aislador friccional simple.

2.4.1. MODELO DE HISTÉRESIS LAS CINCO FASES

El comportamiento histerético real de un aislador triple péndulo de fricción, obtenido a partir de ensayos, se representa en la FIGURA 2.16.

FIGURA 2.16: Curva de histéresis real para un aislador triple péndulo



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Refiriéndose a la nomenclatura establecida en la FIGURA 2.4, para establecer el comportamiento histerético completo de un aislador triple péndulo de fricción se adoptan las siguientes condiciones:

- Se considera $Reff1=Reff4 \gg \gg Reff2=Reff3$. Esta condición combinada con una adecuada especificación de los coeficientes de fricción, resulta en una adecuada transición de rigidez durante las diferentes etapas del movimiento.
- Los coeficientes de fricción son seleccionados de tal manera que el aislador presenta inicialmente una alta rigidez y baja fricción y posteriormente mientras la amplitud de los desplazamientos se incrementa, el aislador presenta decrementos en la rigidez e incrementos en la fricción efectiva. Esto se logra usando materiales que presenten una fricción dada por $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$

- c) Cuando el dispositivo deslizante entra en contacto el anillo “tope”, el origen de la fuerza que se opone al movimiento cambia de ser una fuerza friccional-gravitatoria a ser una reacción de apoyo, F_{dr} . Para el instante en que se alcanza el tope, el desplazamiento horizontal es $u = d$ y la fuerza horizontal transmitida viene dada por:

$$F = F_{dr} = \frac{W}{R_{eff}}d + F_f \quad (2.16)$$

La fuerza adicional resistente proporcionada por el anillo “tope” al ser alcanzado, se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$F_r = k_{dr}(u - d) \quad (2.17)$$

Donde k_{dr} es la rigidez horizontal de anillo “tope” y la fuerza máxima alcanzada, F_{max} , será la suma de $F_r + F_{dr}$.

Para placas cóncavas y anillos “tope” fundidos monolíticamente $k_{dr} \rightarrow \infty$ y se puede asumir un modelo rígido-elástico. Para anillos “tope” soldados a las placas cóncavas se deberá asumir una deformación inelástica del anillo.

- d) La capacidad de desplazamiento de cada superficie es elegida de la forma que exista un endurecimiento gradual para grandes desplazamientos. El dispositivo deslizante debe alcanzar los toques de desplazamiento de las superficies 1 y 4 antes que los de las superficies 2 y 3. La condición de que el movimiento se inicie en las superficies 2 y 3 antes que en la 1 y la 4, se garantiza siempre y cuando $F_{f1} < F_{dr2}$ y $F_{f4} < F_{dr3}$, en términos de desplazamiento esta condición se puede expresar como $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$ y $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$.
- e) El deslizamiento se debe iniciar en la superficie que tenga mayor fricción antes de la aparición de cualquier endurecimiento, esto se expresa mediante $F_{f4} < F_{dr1}$. En términos de desplazamientos, esta condición se satisface mediante $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{eff1}$. Esta condición se establece para evitar alguna situación en la cual el aislador sufra un ciclo repetido de rigidización-flexibilización, el cual ocurriría si $F_{dr1} < F_{f4}$.

En base a las condiciones anteriores, para cualquier instante del movimiento, el deslizamiento ocurre simultáneamente en dos superficies. De esta manera el movimiento queda definido en cinco fases de deslizamiento, cada una correspondiente a las distintas combinaciones de superficies en las cuales puede ocurrir el deslizamiento.

La relación fuerza-desplazamiento genérica en cada fase es la siguiente:

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff}}}u + F_f \quad (2.18)$$

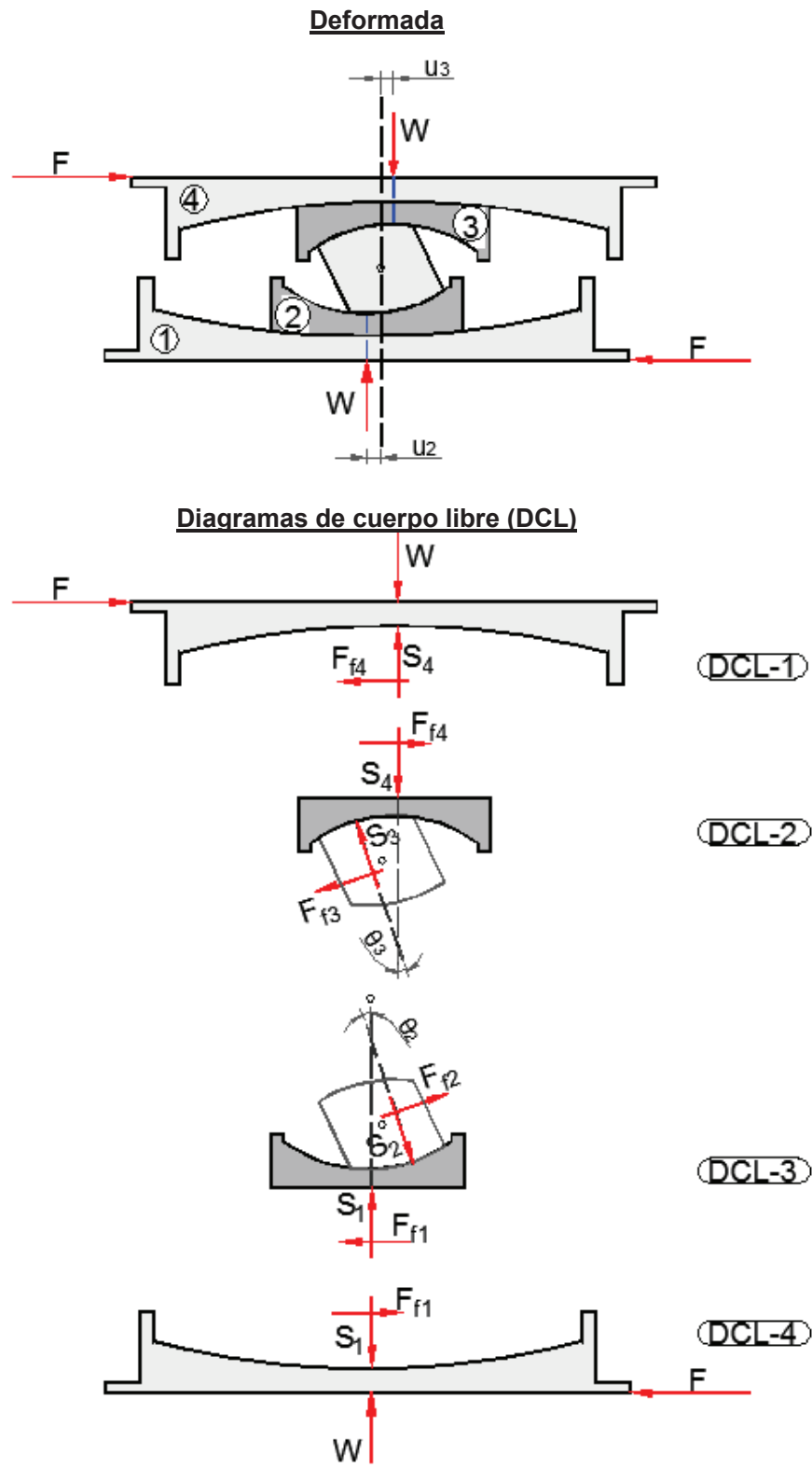
Donde $R_{\text{eff}} = R_{\text{eff},i} + R_{\text{eff},j}$, suma de las rigidez efectiva de las dos superficies i y j en las cuales ocurre el deslizamiento; $R_{\text{eff},i/j} = R_{i/j} + h_{i/j}$, rigidez efectiva en la superficie i/j y F_f la fuerza que marca la transición dentro de cada fase de deslizamiento.

A continuación se presenta un breve resumen de la forma de obtención de las ecuaciones para la Fase I, las demás fases se realizarían de forma idéntica, para más detalle se recomienda revisar (Fenz & Constantinou, 2008).

FASE DE DESLIZAMIENTO I

En la Fase I, el deslizamiento se produce sobre las superficies 2 y 3 y no existe deslizamiento en las superficies 1 y 4. Empezando desde el reposo el movimiento se iniciaría si la fuerza horizontal es mayor que la fuerza de fricción en las superficies con menor coeficiente de fricción. Por tanto, el deslizamiento comienza en las superficies 2 y 3 cuando $F = F_{f2} = F_{f3}$. El diagrama de cuerpo libre durante este régimen es mostrado en la FIGURA 2.17.

FIGURA 2.17: Deformada y cuerpo libre para régimen I



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
 Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Basados en el diagrama de cuerpo libre número 3 (DCL-3) de la figura anterior, las siguientes relaciones son obtenidas mediante el equilibrio de fuerzas en dirección vertical y horizontal:

$$S_1 + F_{f2} \sin \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (2.19)$$

$$F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (2.20)$$

Del DCL IV se tiene:

$$F = F_{f1} \quad (2.21)$$

$$W = S_1 \quad (2.22)$$

De la geometría, el desplazamiento relativo del dispositivo deslizante sobre la superficie 2, u_2 , es:

$$u_2 = R_{\text{eff},2} \sin \theta_2 \quad (2.23)$$

Combinando las ecuaciones (2.19) a (2.23) y asumiendo que el desplazamiento relativo u_2 es suficientemente pequeño en comparación con el radio efectivo $R_{\text{eff},2}$ y por tanto $\cos \theta_2 \approx 1$:

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff},2}} u_2 + F_{f2} \quad (2.24)$$

Las ecuaciones de la (2.19) a (2.24) corresponden a las ecuaciones de equilibrio para un péndulo simple, desarrolladas por (Zayas, Stanley, & Stephen, 1990). Se realiza un análisis de equilibrio análogo para DCL I y DCL II en la superficie 3, obteniéndose:

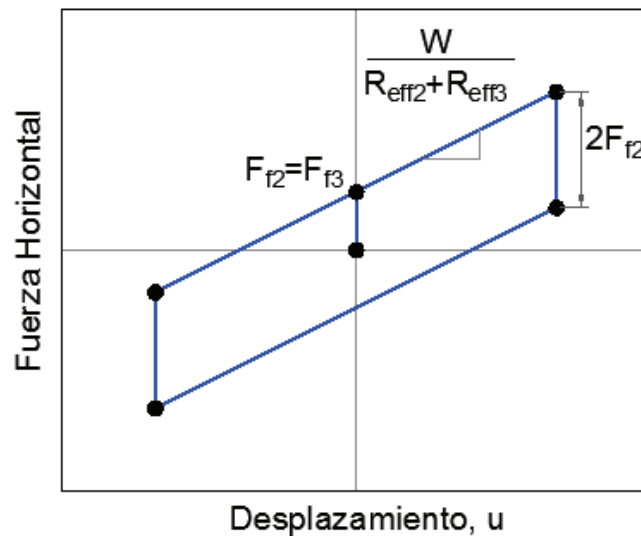
$$F = \frac{W}{R_{\text{eff},3}} u_3 + F_{f3} \quad (2.25)$$

La relación fuerza-desplazamiento durante el régimen de deslizamiento I se determina combinando las ecuaciones (2.23) y (2.24) basados en el hecho de que el desplazamiento total u es la suma de los desplazamientos u_2 y u_3 , mientras $u_1 = u_4 = 0$, resultando:

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},3}} u + \frac{F_{f2} R_{\text{eff},2} + F_{f3} R_{\text{eff},3}}{R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},3}} \quad (2.26)$$

La descarga se realiza mediante $2F_{f2} (= 2F_{f3})$ y el deslizamiento se inicia nuevamente en las superficies 2 y 3. El comportamiento histerético es del tipo rígido-lineal, con una rigidez post-elástica igual a la suma de los radios efectivos de las superficies 2 y 3 y una resistencia igual al promedio de los coeficientes de fricción de estas dos superficies, tal como se observa en la FIGURA 2.18.

FIGURA 2.18: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase I



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

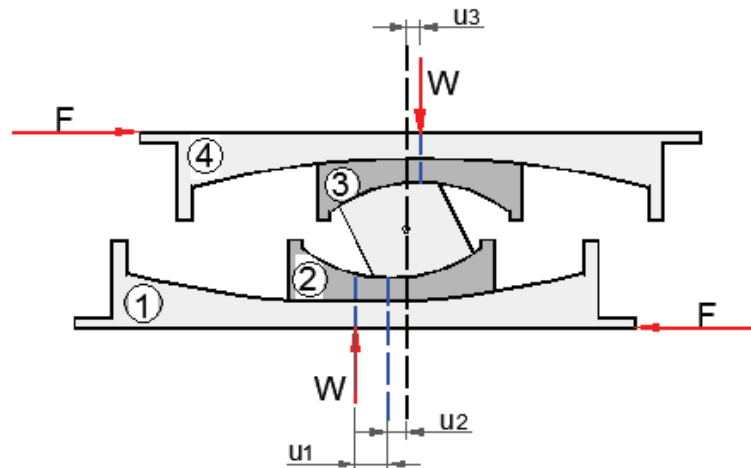
FASE DE DESLIZAMIENTO II

Cuando $F = F_{f1}$, el movimiento comienza en la superficie 1, marcando el inicio de la fase de deslizamiento II. La transición ocurre para el desplazamiento u^* :

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff},2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{\text{eff},3} \quad (2.27)$$

La ecuación (2.27) es obtenida resolviendo la ecuación (2.26) para $F = F_{f1}$. La posición deformada para la fase II se muestra en la FIGURA 2.19.

FIGURA 2.19: Deformada para la Fase II



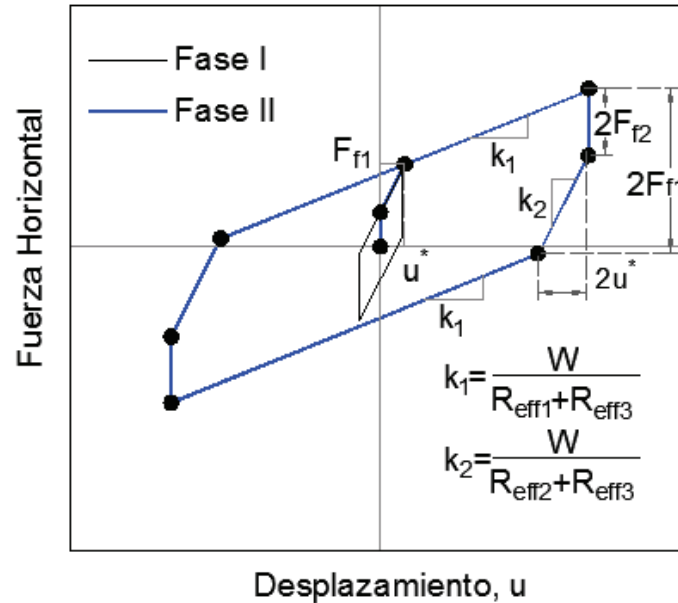
Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La relación fuerza-desplazamiento para la fase II viene dada por ecuación (2.28) y se esquematiza en la FIGURA 2.20 :

$$F = \frac{W}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},3}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff},1} - R_{\text{eff},2}) + F_{f2}R_{\text{eff},2} + F_{f3}R_{\text{eff},3}}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},3}} \quad (2.28)$$

Para el caso de la descarga $2F_{f2}(=2F_{f3})$ el movimiento se reanuda en las superficies 2 y 3. El movimiento continúa en la superficie 2 y 3 para una distancia de $2u^*$ hasta que se produce una descarga de $2F_{f1}$, instante en el cual el deslizamiento comienza nuevamente en la superficie 1 y se detienen en la 2. Posteriormente el deslizamiento continúa en la superficie 1 y 3. En comparación con el la fase de deslizamiento I, la transición a la fase de deslizamiento II es acompañada por una reducción de la rigidez e incremento de la fricción efectiva.

FIGURA 2.20: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase II



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FASE DE DESLIZAMIENTO III

El deslizamiento se inicia en la superficie 4 cuando $F = F_{f4}$, lo cual ocurre para un desplazamiento u^{**} dado por:

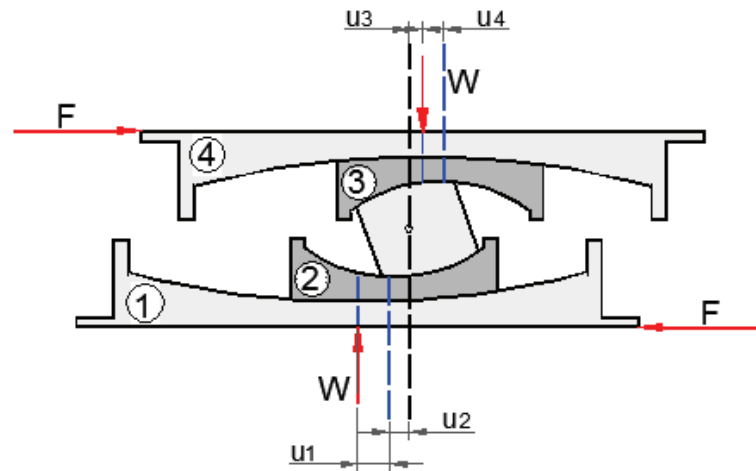
$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},3}) \quad (2.29)$$

La ecuación (2.29) es obtenida resolviendo la ecuación (2.28) para $F = F_{f4}$. La posición deformada para la fase de deslizamiento III se muestra en la FIGURA 2.21.

La relación fuerza-desplazamiento para la Fase III viene dada por ecuación (2.30) y se esquematiza en la FIGURA 2.22:

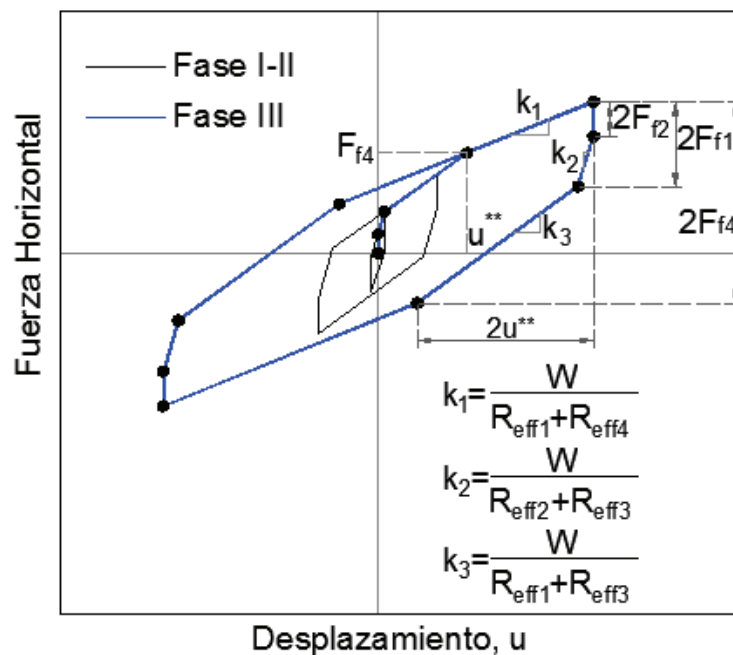
$$F = \frac{W}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},4}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff},1} - R_{\text{eff},2}) + F_{f2}R_{\text{eff},2} + F_{f3}R_{\text{eff},3} + F_{f4}(R_{\text{eff},4} - R_{\text{eff},3})}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},4}} \quad (2.30)$$

FIGURA 2.21: Deformada para Fase III



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 2.22: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase III



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Comparado con las fases I y II, la transición a la fase III va acompañada de una reducción en la rigidez y un incremento en la fricción efectiva. Cuando el movimiento se invierte, se produce una descarga mediante $2F_{f2}(=2F_{f3})$ y el deslizamiento se reanuda en las superficies 2 y 3. El movimiento continúa en las

superficies 2 y 3 para una distancia de $2u^*$ hasta que el aislador se descarga mediante $2F_{f1}$, punto para el cual el deslizamiento se inicia en la superficie 1 y se detiene en la superficie 2. Desde este punto el movimiento continúa en las superficies 1 y 3 para una distancia de $2u^{**} - 2u^*$ hasta que el aislador se descarga mediante $2F_{f4}$, para este instante, el movimiento se reanuda en la superficie 4, se detiene en la superficie 3 y el deslizamiento se produce en las superficies 1 y 4.

FASE DE DESLIZAMIENTO IV

La rigidización en el aislador para desplazamientos grandes, es alcanzada mediante la detención del movimiento en las superficies con radios efectivos grandes y el comienzo del movimiento en las superficies con radios efectivos pequeños. La fase de deslizamiento IV comienza cuando el movimiento pasa de las superficies 1 y 4 a las superficies 2 y 4, lo cual ocurre cuando se alcanza el “tope” en la superficie 1. Para este punto, el desplazamiento en la superficie 1 es $u_1 = d_1^*$ y la fuerza horizontal, F_{dr1} , es igual a:

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff,1}} d_1^* + F_{f1} \quad (2.31)$$

El efecto del contacto con el “tope” en la superficie 1, se traduce en una fuerza adicional, F_{r1} . Asumiendo que el anillo “tope” es rígido, la relación fuerza-desplazamiento que gobierna el movimiento en la superficie 1 está dada por:

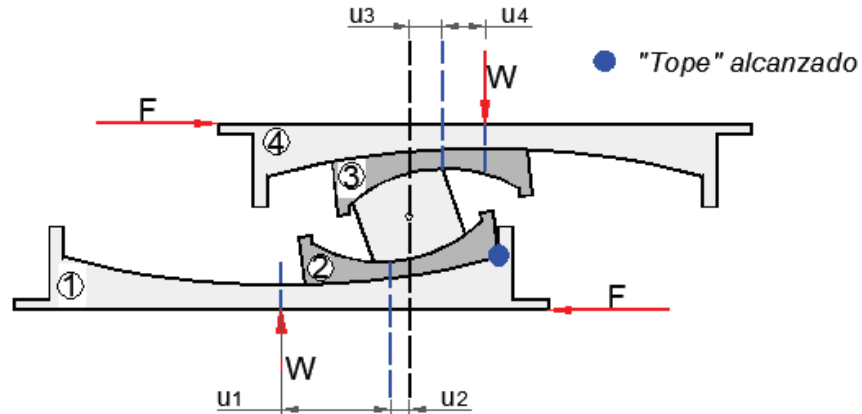
$$F = \frac{W}{R_{eff,1}} d_1^* + F_{f1} + F_{r1} \quad (2.32)$$

La transición entre fases de deslizamiento se produce para un desplazamiento, u_{dr1} , dado por:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1^* \left(1 + \frac{R_{eff,4}}{R_{eff,1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) (R_{eff,1} + R_{eff,4}) \quad (2.33)$$

La ecuación (2.33) es hallada resolviendo la ecuación (2.30) para $F = F_{dr1}$. La deformada para la fase de deslizamiento IV se indica la FIGURA 2.23.

FIGURA 2.23 Deformada para Fase IV

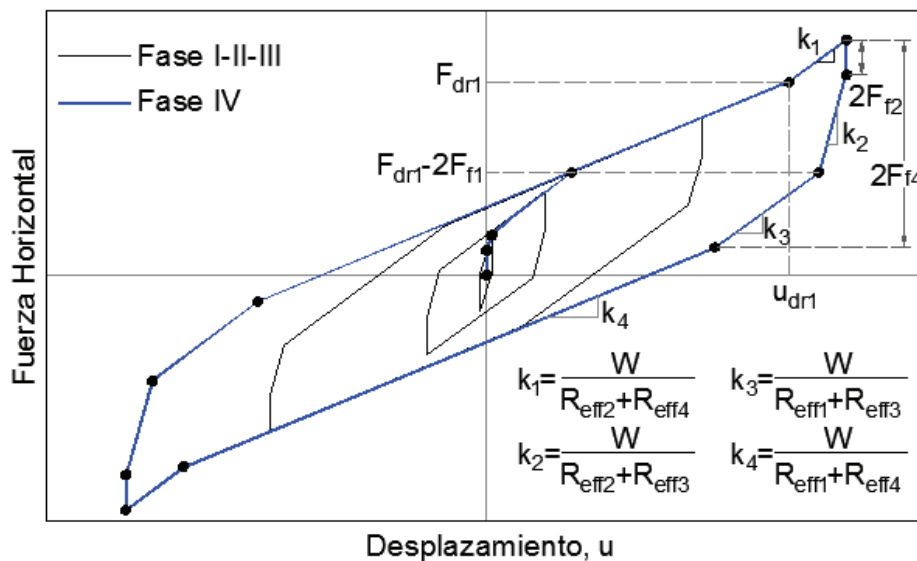


Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
 Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La relación fuerza-desplazamiento para la fase de deslizamiento IV se indica en la ecuación (2.34) y se esquematiza en la FIGURA 2.25 :

$$F = \frac{W}{R_{eff,2} + R_{eff,4}}(u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff,1}}d_1^* + F_{f1} \quad (2.34)$$

FIGURA 2.24: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase IV

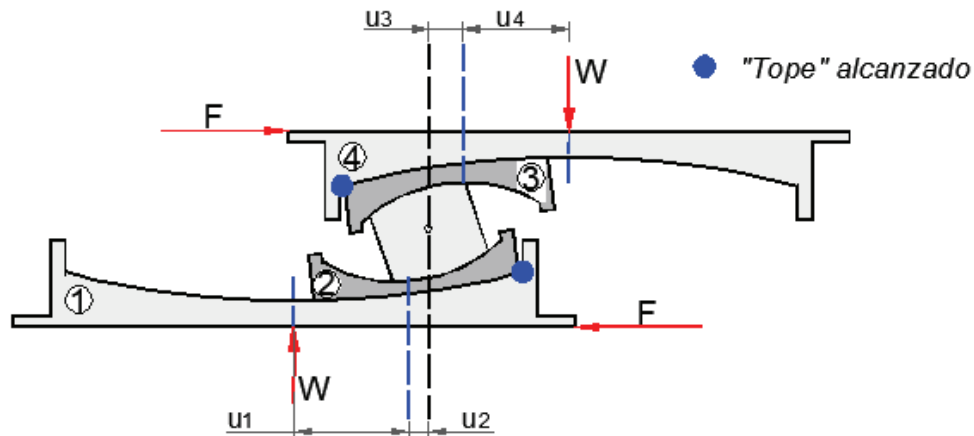


Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
 Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FASE DE DESLIZAMIENTO V

La fase de deslizamiento V comienza cuando el movimiento pasa de las superficies 2 y 4 a las superficies 2 y 3, lo cual ocurre cuando se alcanza el “tope” en la superficie 4. La deformada para la fase V se indica la FIGURA 2.25.

FIGURA 2.25 Deformada para Fase V



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Para el punto de transición, el desplazamiento relativo en la superficie 4 es $u_4 = d_4^*$ y la fuerza horizontal, F_{dr4} , es igual a:

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff,4}} d_4^* + F_{f4} \quad (2.35)$$

El efecto del contacto con el “tope” en la superficie 4, se traduce en una fuerza adicional, F_{r4} . Asumiendo que el anillo “tope” es rígido, la relación fuerza-desplazamiento que gobierna el movimiento en la superficie 4 está dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff,4}} d_4^* + F_{f4} + F_{r4} \quad (2.36)$$

La transición entre fases de deslizamiento se produce para un desplazamiento, u_{dr4} , dado por:

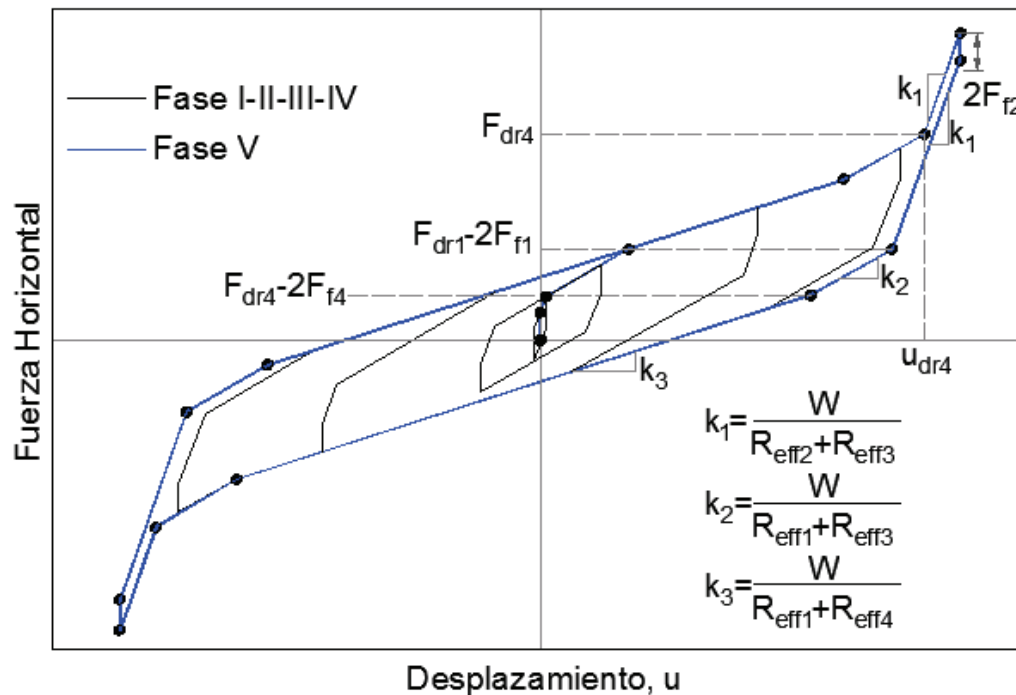
$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4^*}{R_{eff,4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1^*}{R_{eff,1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff,2} + R_{eff,4}) \quad (2.37)$$

La relación fuerza-desplazamiento para el régimen de deslizamiento IV se indica a continuación:

$$F = \frac{W}{R_{eff,2} + R_{eff,3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff,4}} d_4^* + F_{f4} \quad (2.38)$$

En la FIGURA 2.26 se representan la curva de histéresis para las cinco fases de deslizamiento

FIGURA 2.26: Relación fuerza-desplazamiento para la Fase V



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En la **TABLA 2.1** se muestra un resumen de comportamiento histérico de los aisladores triple péndulo de fricción para el modelo de las cinco fases.

TABLA 2.1: Resumen del Modelo de Histéresis de las cinco fases de Constantinou

Fase	Relación fuerza-desplazamiento
I	$F = \frac{W}{R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},3}} u + \frac{F_{f2} R_{\text{eff},2} + F_{f3} R_{\text{eff},3}}{R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},3}}$ <p><i>Válida hasta:</i> $F = F_{f1}$, $u = u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff},2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{\text{eff},3}$</p>
II	$F = \frac{W}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},3}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff},1} - R_{\text{eff},2}) + F_{f2} R_{\text{eff},2} + F_{f3} R_{\text{eff},3}}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},3}}$ <p><i>Válida hasta:</i> $F = F_{f4}$, $u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},3})$</p>
III	$F = \frac{W}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},4}} u + \frac{F_{f1}(R_{\text{eff},1} - R_{\text{eff},2}) + F_{f2} R_{\text{eff},2} + F_{f3} R_{\text{eff},3} + F_{f4}(R_{\text{eff},4} - R_{\text{eff},3})}{R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},4}}$ <p><i>Válida hasta:</i> $F = F_{\text{dr1}} = \frac{W}{R_{\text{eff},1}} d_1^* + F_{f1}$</p> $u = u_{\text{dr1}} = u^{**} + d_1^* \left(1 + \frac{R_{\text{eff},4}}{R_{\text{eff},1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{\text{eff},1} + R_{\text{eff},4})$
IV	$F = \frac{W}{R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},4}} (u - u_{\text{dr1}}) + \frac{W}{R_{\text{eff},1}} d_1^* + F_{f1}$ <p><i>Válida hasta:</i> $F_{\text{dr4}} = \frac{W}{R_{\text{eff},4}} d_4^* + F_{f4}$</p> $u = u_{\text{dr4}} = u_{\text{dr1}} + \left[\left(\frac{d_4^*}{R_{\text{eff},4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1^*}{R_{\text{eff},1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},4})$
V	$F = \frac{W}{R_{\text{eff},2} + R_{\text{eff},3}} (u - u_{\text{dr4}}) + \frac{W}{R_{\text{eff},4}} d_4^* + F_{f4}$
<p>Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008) Elaborado por: Evelyn Tipanluisa</p>	

Donde $F_{fi} = \mu_i W$, es la fuerza que simboliza el inicio del deslizamiento en la




superficie "i" y $d_i^* = d_i \frac{R_{\text{eff},i}}{R_i}$, es la capacidad de desplazamiento efectiva de la

superficie "i".

2.4.2. MODELO DE HISTÉRESIS DE LAS TRES FASES

Para los **aisladores triple péndulo de fricción convencionales** en los cuales: $R_1=R_4 \gg R_2=R_3$, $\mu_2= \mu_3 < \mu_1= \mu_4$, $d_1=d_4$ y $d_2=d_3$ y $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$; el deslizamiento ocurre simultáneamente en las superficies 2 y 3 o 1 y 4 y en consecuencia, el movimiento del aislador viene dado por tres fases de deslizamiento. Las ecuaciones para cada fase se indican en la TABLA 2.2 y fueron obtenidas a partir del equilibrio de fuerzas de forma análoga que el caso de las 5 fases, por tal motivo no se vuelve a realizar el proceso de deducción.

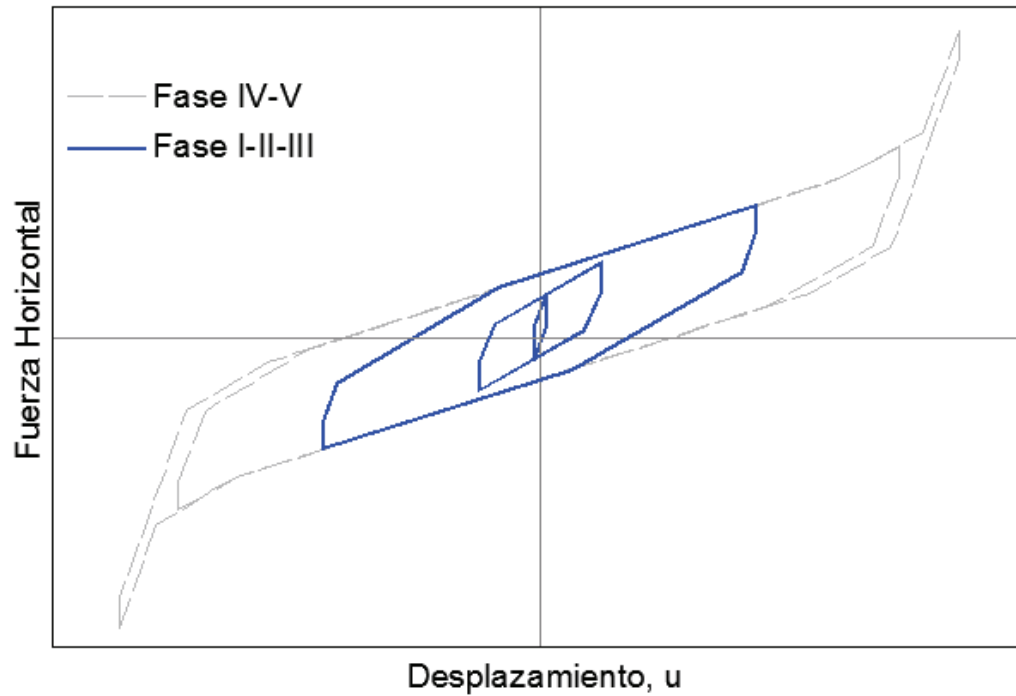
TABLA 2.2: Expresiones para el modelo de las tres fases de Constantinou

Fase	Descripción	Relación Fuerza-Desplazamiento
I	 <p>Deslizamiento se produce únicamente en las superficies 2 y 3. (Sismo de Servicio)</p>	$F = \frac{W}{2R_{\text{eff},2}}u + \mu_2 W$ <p>Válido para:</p> $F = F_{f1}$ $0 < u < u^*$ $u^* = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff},2}$
II	 <p>El movimiento se detiene en las superficies 2 y 3. Deslizamiento en las superficies 1 y 4. (Sismo de Diseño)</p>	$F = \frac{W}{2R_{\text{eff},1}}(u - u^*) + \mu_1 W$ <p>Válido para:</p> $F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{\text{eff},1}}d_1^* + F_{f1}$ $u^* < u < u^{**}$ $u^{**} = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{\text{eff},2} + 2d_1^*$
III	 <p>El dispositivo deslizante articulado alcanza los "topes" en las superficies 1 y 4. El deslizamiento se produce en las superficies 2 y 3. (Sismo Máximo Esperado)</p>	$F = \frac{W}{2R_{\text{eff},2}}(u - u^{**}) + \frac{W}{2R_{\text{eff},1}}(u^{**} - u^*) + \mu_1 W$ <p>Válido por:</p> $u^{**} < u < u_{\text{cap}}$ $u_{\text{cap}} = 2d_1^* + 2d_2^*$

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Un resumen cualitativo de las tres fases de deslizamiento se indica en la FIGURA 2.27.

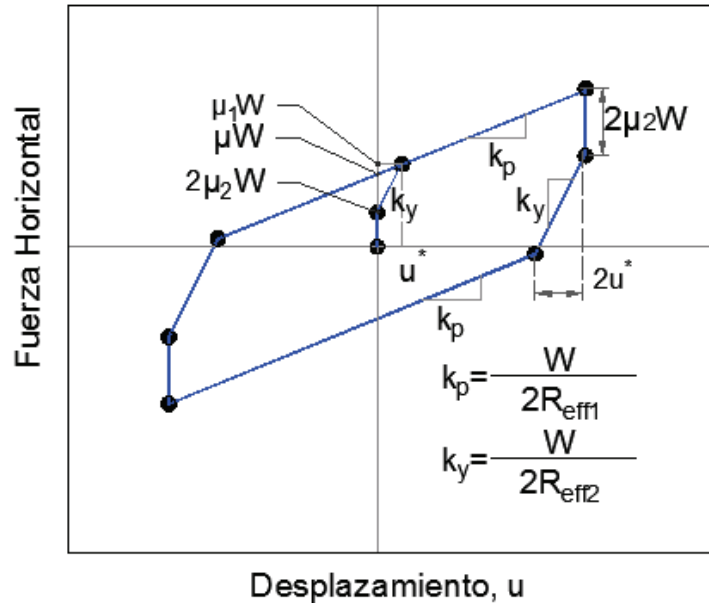
FIGURA 2.27: Relación fuerza-desplazamiento de las tres fases de Constantino



Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En el diseño de aislamiento sísmico mediante aisladores triple péndulo de fricción, la fase III es normalmente utilizado para sismos que superan los establecidos en las normativas vigentes. Específicamente, la rigidez de éste régimen es empleada como una medida final de prevención para evitar que se exceda la capacidad de desplazamiento del aislador. Bajo condiciones normales (sismo de diseño DBE) el aislador normalmente opera en la fase II, por tanto asumiendo que el aislador no alcanza la fase III para los desplazamientos del sismo máximo esperado (MCE) se obtiene el un modelo simplificado denominado **Modelo Tri-Lineal**, representado en la FIGURA 2.28 .

FIGURA 2.28: Modelo Tri-lineal



Fuente: (McVitty & Constantinou, 2015)
 Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La fuerza para desplazamiento cero viene dado por:

$$\mu W = \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{2,\text{eff}}}{R_{1,\text{eff}}} \right] W \quad (2.39)$$

Este modelo requiere dos coeficientes de fricción determinados a partir de ensayos.

2.5. PROPIEDADES NOMINALES

Para los aisladores triple péndulo de fricción la rigidez en las diferentes fases de deslizamiento está caracterizada por la carga axial y los parámetros geométricos descritos en la FIGURA 2.4, dichos parámetros son provistos por el fabricante del aislador y por tanto la rigidez post-elástica se determina de forma teórica.

Los únicos parámetros a calcular son los coeficientes de fricción. Los coeficientes de fricción nominales se definen como el rango de valores que toman los

coeficientes de fricción para temperaturas normales y sin efectos de envejecimiento, historia de carga y contaminación.

Las propiedades nominales se deben calcular como las propiedades promedio de 3 ciclos de ensayos sobre el dispositivo de aislamiento.

2.5.1. PROPIEDADES NOMINALES A PARTIR DE ENSAYOS

Como se vio en la sección precedentes, los coeficientes de fricción dependen de la presión en el aislador, las condiciones de la superficie de deslizamiento, la velocidad de carga y se ven afectados por el calor producido durante el movimiento. La determinación de las propiedades friccionales se realiza mediante ensayos dinámicos y posterior interpretación gráfica de los resultados obtenidos.

A continuación se explica el proceso de obtención de las propiedades nominales partiendo de la suposición de contar con información de los resultados de ensayos.

- El primer paso consiste en estimar el valor del coeficiente de fricción para las superficies internas (μ_2). Esta se puede estimar gráficamente a partir de la amplitud hasta la descarga en el primer ciclo de la prueba 1. Teóricamente el valor de dicha amplitud viene dado por $2 \mu_2$
- Una vez se ha hallado μ_2 , se puede determinar a partir de la medición de la energía disipada por ciclo, el valor del coeficiente de fricción en las superficies externas 1 y 4 así como también del desplazamiento u^* para el cual se inicia el desplazamiento sobre dichas superficies. La energía disipada por ciclo E_{loop} se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$E_{loop}^* = \frac{E_{loop}}{W} = 4\mu_B(D - u^*) \quad (2.40)$$

Donde D es la amplitud de movimiento en un ciclo, el coeficiente de fricción μ_B es la fuerza normalizada para desplazamiento cero.

El cálculo del coeficiente de fricción μ_B resulta complejo dado que se necesita conocer previamente el valor de u^* . Como simplificación se puede obtener el valor del coeficiente μ_A , el cual se obtiene haciendo cero el valor de u^* en la ecuación (2.40), este coeficiente es menor que μ_B y por tanto se obtendrán valores de desplazamiento más grandes, con lo que se estaría del lado de la seguridad.

El coeficiente μ_B y el desplazamiento u^* también se pueden obtener a partir del comportamiento fuerza-desplazamiento teórico como:

$$\mu_B = \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{\text{eff},2}}{R_{\text{eff},1}} \quad (2.41)$$

$$u^* = 2(\mu_1 - \mu_2) R_{\text{eff},2} \quad (2.42)$$

Combinando ambas ecuaciones se tiene que μ_1 es igual a:

$$\mu_1 = \mu_B + \frac{u^*}{2R_{\text{eff},1}} \quad (2.43)$$

2.5.2. PROPIEDADES NOMINALES A PARTIR DE EXPRESIONES SIMPLIFICADAS

En esta sección se presentan expresiones simplificadas para el cálculo de las propiedades friccionales nominales, obtenidas a partir de varios ensayos realizados (McVitty & Constantinou, 2015).

Las expresiones simplificadas para el cálculo de los valores nominales de los coeficientes de fricción dependen de la presión media (carga axial dividida para el área de contacto del dispositivo deslizante), las condiciones de la superficie de deslizamiento y el del tamaño del dispositivo deslizante. Considerando que no existe lubricación en las superficies, el rango de valores recomendados para usar en análisis son los siguientes:

- El valor promedio del coeficiente de fricción durante los tres primeros ciclos de carga viene dado por:

$$\mu_{3c} = 0.122 - 0.01p \quad (2.44)$$

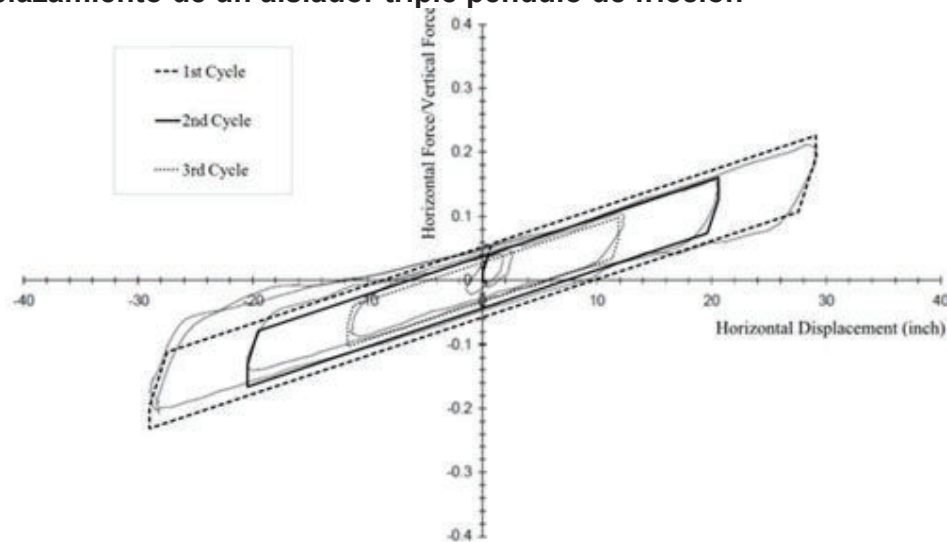
Donde p es la presión en ksi (la ecuación (2.43) es válida para valores de p entre 2 y 8 ksi)

- El valor del coeficiente de fricción durante el primer ciclo de movimiento se puede obtener mediante:

$$\mu_{1c} = 1.2\mu_{3c} \quad (2.45)$$

A continuación se indica la gráfica típica obtenida de ensayos realizados en aisladores triple péndulo de fricción:

FIGURA 2.29: Desplazamiento teórico y real del comportamiento fuerza-desplazamiento de un aislador triple péndulo de fricción



Fuente: (McVitty & Constantinou, 2015)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

2.6. PROPIEDADES LÍMITE

El establecimiento de límites en las propiedades nominales de un dispositivo de aislación es requerido debido a que los modelos usados para el análisis (rígido-lineal o tri-lineal) asumen que las propiedades son constantes y en realidad las propiedades varían instantáneamente como se ha observado en varios ensayos. En la determinación de las propiedades límite se debe tener en cuenta que las variaciones en las propiedades nominales calculadas dependen de:

- Las condiciones de ensayo
 - Velocidad de carga
 - Calentamiento durante los ciclos dinámicos de movimiento
 - Historia de carga/ efectos de los primeros ciclos
 - “scragging” (degradación temporal de las propiedades mecánicas debido a ciclos repetitivos) y cualquier otra fuente de variación que se pueda producir durante los ensayos

- Las condiciones ambientales
 - Temperatura ambiente y temperatura de operación
 - Envejecimiento
 - Desgaste durante la vida útil del producto
 - Contaminación

- Las condiciones de fabricación
 - Variación en las dimensiones dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante

2.6.1. FACTORES DE MODIFICACIÓN

Con el fin de cuantificar la variación de las propiedades nominales debido a los aspectos antes mencionados, se deben usar los siguientes factores de modificación de las propiedades nominales:

$$\lambda_{\max} = (1 + (0.75(\lambda_{ae,\max} - 1)))\lambda_{\text{test},\max}\lambda_{\text{esp},\max} \geq 1.8 \quad (2.46)$$

$$\lambda_{\min} = (1 - (0.75(\lambda_{ae,\min} - 1)))\lambda_{\text{test},\min}\lambda_{\text{esp},\min} \leq 0.8 \quad (2.47)$$

Donde:

$\lambda_{ae,\max}, \lambda_{ae,\min}$ = Factor de modificación para tener en cuenta los efectos de las condiciones ambientales.

$\lambda_{\text{test},\max}, \lambda_{\text{test},\min}$ = Factor de modificación para tener en cuenta los efectos de las condiciones de ensayo

$\lambda_{\text{spec},\max}, \lambda_{\text{spec},\min}$ = Factor de modificación para tener en cuenta las variaciones en las dimensiones.

Los valores de los factores de modificación λ pueden ser tomados de las recomendaciones realizadas por (McVitty & Constantinou, 2015).

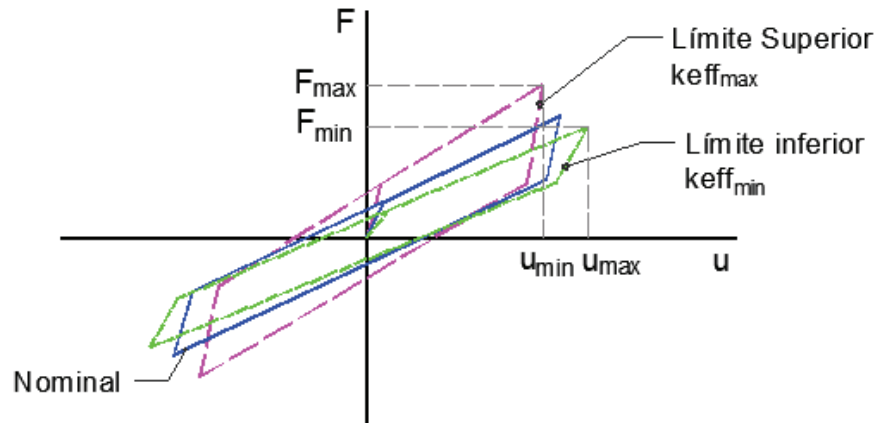
2.6.2. LÍMITE SUPERIOR E INFERIOR EN EL COMPORTAMIENTO FUERZA-DESPLAZAMIENTO

Las propiedades límite para el análisis y diseño vendrán dadas por:

$$\text{propiedad}_{\text{límite_superior}} = \text{propiedad}_{\text{nominal}}\lambda_{\max} \quad (2.48)$$

$$\text{propiedad}_{\text{límite_inferior}} = \text{propiedad}_{\text{nominal}}\lambda_{\min} \quad (2.49)$$

FIGURA 2.30: Propiedades nominales y límite



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

El análisis con las propiedades límites superiores normalmente da como resultado las máximas fuerzas que soportará la estructura (diseño de la superestructura), mientras que el análisis con las propiedades límite inferiores resulta en los máximos desplazamientos (diseño aislador).

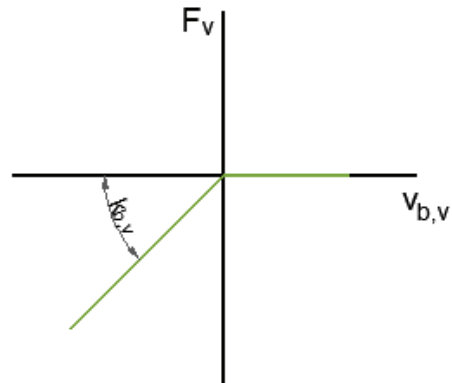
2.7. MODELO DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO VERTICAL

El comportamiento dinámico vertical de los aisladores friccionales viene dado por la no resistencia a cargas de tracción y por su gran resistencia a cargas de compresión por lo que se pueden considerar como infinitamente rígidos a compresión. Este comportamiento se puede definir por las siguientes ecuaciones:

$$F_V = N = \begin{cases} k_{b,v} v_{b,v} + c_v \dot{v}_{b,v} & \text{si } v_{b,v} \leq 0 \\ 0 & \text{si } v_{b,v} > 0 \end{cases} \quad (2.50)$$

Donde $k_{b,v}$ es la rigidez a compresión y $v_{b,v}$ es el desplazamiento vertical del aislador; además es necesario especificar un coeficiente adicional de amortiguamiento c_v para el grado de libertad vertical.

FIGURA 2.31: Comportamiento dinámico vertical de los aisladores friccionales



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En la dirección vertical se puede estimar un coeficiente de amortiguamiento a partir de un cierto radio de amortiguamiento crítico r , a alcanzar, por ejemplo $r=0.05$.

$$r = \frac{c_v}{2\sqrt{k_{b,v}(m+m_b)}} \quad (2.51)$$

CAPÍTULO 3

MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISIS DE AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan dos métodos simplificados de análisis de aisladores triple péndulo de fricción lo que difiere entre ellos es el modelo de curva de histéresis utilizada. Ambos métodos se basan en un análisis estático lineal (LSA de sus siglas en inglés LINEAR STATIC ANALYSIS), estos métodos son comúnmente presentados en normativas, códigos y especificaciones, como el ASCE, AASHTO y el EUROCÓDIGO 8, y se pueden aplicar en casos específicos (estructuras regulares, lejanía a la falla, etc.) o como criterio para los resultados de un análisis no lineal de respuesta en tiempo.

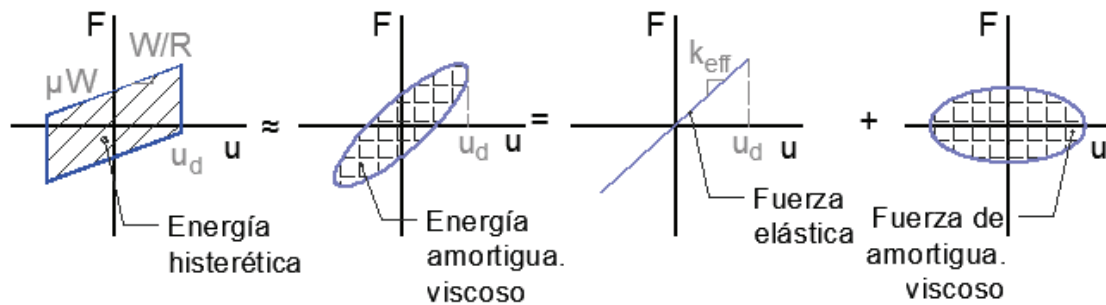
Los métodos LSA se basan en dos hipótesis principales:

- El comportamiento histerético no lineal de los aisladores triple péndulo de fricción se puede aproximar mediante modelos simplificados equivalentes.
- La estructura de base aislada se modela mediante un sistema de un grado de libertad.

3.2. LINEALIZACIÓN EQUIVALENTE DEL COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO NO LINEAL

Basados en modelos de comportamiento dinámico presentados en el CAPITULO 2 y la hipótesis básica de la linealización equivalente de que la respuesta no lineal de un aislador triple péndulo de fricción bajo cargas sísmicas, puede ser simulado mediante un sistema lineal amortiguado como se indica en la FIGURA 3.1.

FIGURA 3.1 Linealización equivalente del comportamiento histerético no lineal



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Considerando un sistema con amortiguamiento lineal viscoso, la ecuación diferencial del movimiento puede ser expresada por:

$$M\ddot{u}_{eq}(t) + c_{eq}\dot{u}_{eq}(t) + k_{eq}u_{eq}(t) = -M\ddot{x}_g(t) \quad (3.1)$$

Donde \ddot{u}_{eq} , \dot{u}_{eq} y u_{eq} son la aceleración, la velocidad y el desplazamiento respectivamente del sistema lineal equivalente relativo al terreno; c_{eq} es el coeficiente de amortiguamiento equivalente; k_{eq} es la rigidez equivalente; M es la masa del sistema y \ddot{x}_g es la aceleración del suelo.

Dividendo para la masa M , la ecuación (3.1) se puede describir como:

$$\ddot{u}_{eq}(t) + \frac{4\pi\xi_{eq}}{T_{eq}}\dot{u}_{eq}(t) + \left(\frac{2\pi}{T_{eq}}\right)^2 u_{eq}(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (3.2)$$

Donde ξ_{eq} es el ratio de amortiguamiento viscoso equivalente:

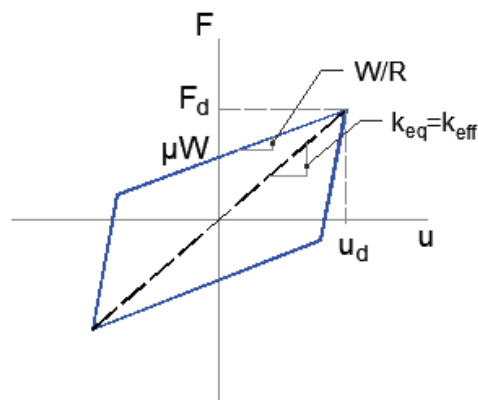
$$\xi_{eq} = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{k_{eq}M}} \quad (3.3)$$

y T_{eq} es el periodo de vibración del sistema equivalente,

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_{eq}}} \quad (3.4)$$

Uno de los usos más comunes de los modelos lineales equivalentes es el propuesto por (Rosenblueth & Herrera, 1964) y que fue adoptado por el UBC-97, ASCE-7-10 y el EUROCODIGO 8. De acuerdo a este modelo la rigidez equivalente k_{eq} puede ser determinada en bases a la rigidez secante como se indica en la FIGURA 3.2.

FIGURA 3.2: Rigidez Equivalente

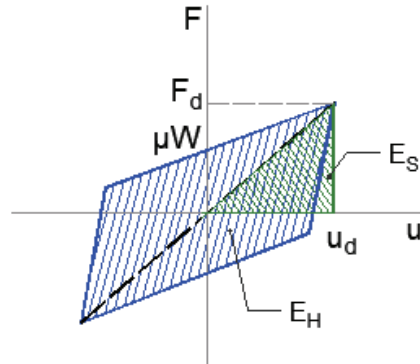


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

A partir de la FIGURA 3.2 se puede estimar la rigidez equivalente k_{eq} como:

$$k_{eq} = \frac{\mu W}{u_d} + \frac{W}{R_{eff}} \quad (3.5)$$

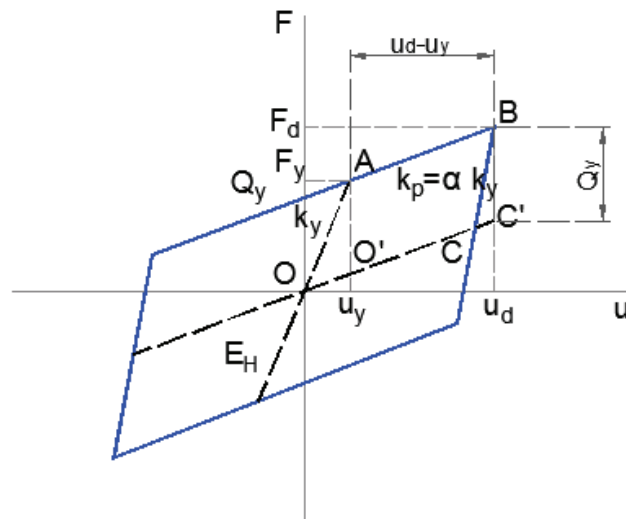
El radio de amortiguamiento histerético del sistema Rígido-Lineal o Bilineal se determina empleando el principio de equilibrio de la energía disipada ($E_H = E_S$) por ciclo representado en la FIGURA 3.3

FIGURA 3.3: Energía disipada

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Donde E_H es la energía histerética disipada, a través de la deformación inelástica, en cada ciclo de movimiento y E_S es la energía de deformación elástica basada en la rigidez secante

E_H se estima a partir de FIGURA 3.4 como:

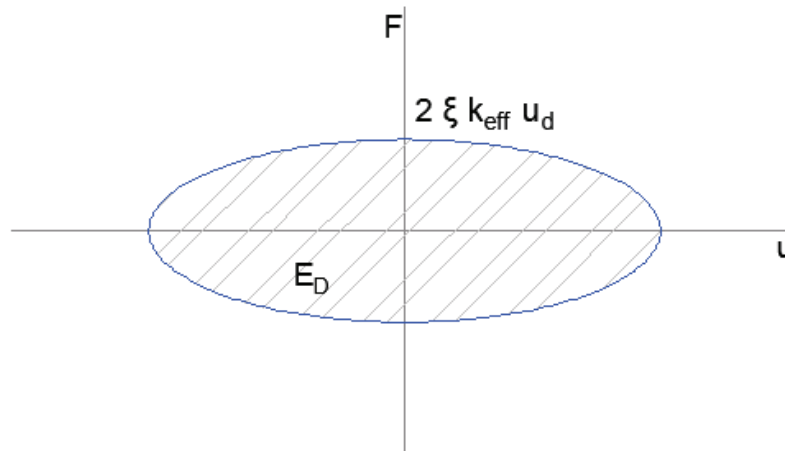
FIGURA 3.4: Estimación de energía histerética, E_H 

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

$$E_H = 4S_{OABC} = 4S_{O'ABC'} = 4\mu W(u_d - u_y) = 4\mu W u_d \quad (3.6)$$

Para sistemas lineales elásticos con un radio de amortiguamiento $\xi_{\text{histeresis}}$ y una rigidez secante k_{eq} , E_S se puede estimar como el área de la elipse mostrada en la FIGURA 3.5

FIGURA 3.5: Estimación de la energía de deformación elástica, E_D



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

$$E_S = \pi u_d (2 \xi_{\text{histeresis}} k_{\text{eq}} u_d) = 2 \pi \xi_{\text{histeresis}} k_{\text{eq}} u_d^2 \quad (3.7)$$

Igualando la ecuación (3.6) y (3.7) se tiene:

$$\xi_{\text{histeresis}} = \frac{2\mu W}{\pi k_{\text{eq}} u_d} = \frac{2\mu}{\pi \left(\mu + \frac{u_d}{R_{\text{eff}}} \right)} \quad (3.8)$$

Reemplazando (3.5) en (3.8) y simplificando se tiene:

$$\xi_{\text{histeresis}} = \frac{2\mu}{\pi \left(\mu + \frac{u_d}{R_{\text{eff}}} \right)} \quad (3.9)$$

Considerando el amortiguamiento viscoso inherente la estructura aislada ξ_0 , el amortiguamiento viscoso equivalente se puede expresar como:

$$\xi_{eq} = \xi_0 + \frac{2\mu}{\pi \left(\mu + \frac{u_d}{R_{eff}} \right)} \quad (3.10)$$

Y el desplazamiento en el sistema de aislación viene dado por:

$$u_{de} = \frac{F}{k_{eq}} = \frac{M \cdot S_e(T_{eq}, \xi_{eq})}{k_{eq}} \quad (3.11)$$

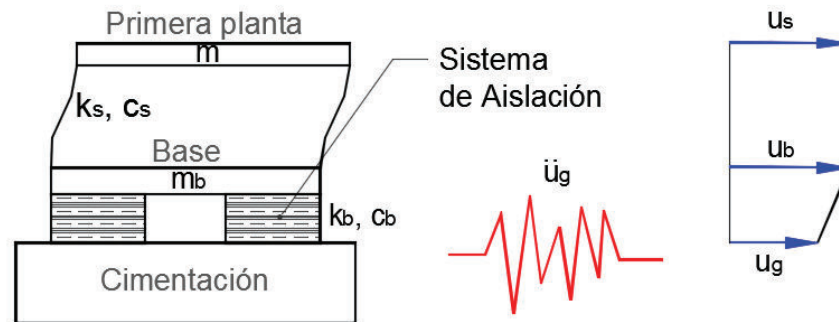
Donde $S_e(T_{eq}, \xi_{eq})$ es la aceleración espectral calculada en base a las propiedades lineales del sistema considerado de un grado de libertad.

3.3. PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE DEL ASCE 7-16

Uno de los métodos LSA más conocidos es el PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE (ELF de sus siglas en inglés EQUIVALENT LATERAL FORCE), dicho procedimiento se basa en la Teoría Lineal del Aislamiento Sísmico presentada en el CAPITULO 1. A continuación se presenta un resumen conciso de lo presentado en el dicho capítulo y que servirá de base para el desarrollo del procedimiento ELF presentando por (Naemin & Kelly, 1999).

La teoría lineal se basa en un modelo de dos masas estructurales, como se muestra en la FIGURA 3.6. La masa de la superestructura viene dada por m y m_b la masa de la losa de aislación sobre el sistema de aislación. La rigidez y amortiguamiento de la superestructura están representados por k_s y c_s respectivamente; la rigidez del sistema de aislación viene dada por k_b y el amortiguamiento del sistema de aislación por c_b . Los desplazamientos absolutos de las dos masas vienen dados por u_s y u_b ; los desplazamientos relativos respecto al movimiento del suelo vienen dados por $v_b = u_b - u_g$ y $v_s = u_s - u_b$ donde u_g es el movimiento del suelo.

FIGURA 3.6: Parámetros del modelo aislado de dos grados de libertad para el sistema aislado



Fuente: Evelyn Tipanluisa
Elaborado por: (Naemin & Kelly, 1999)

Las ecuaciones del movimiento para el modelo de dos grados de libertad de la figura anterior vienen dadas por:

$$(m+m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m+m_b)\ddot{u}_g \quad (3.12)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (3.13)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (3.14)$$

Donde $M=m+m_b$

Se tenía que: $\gamma = \frac{m}{m+m_b} = \frac{m}{M}$ y las frecuencias naturales $\omega_b^2 = \frac{k_b}{m+m_b}$ y $\omega_s^2 = \frac{k_s}{m}$.

Asumiendo que $\epsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$ es pequeño, los factores de amortiguamiento están dados

por: $2\omega_b\beta_b = \frac{c_b}{m+m_b}$ y $2\omega_s\beta_s = \frac{c_s}{m}$.

En términos de los parámetros antes mencionados las ecuaciones (3.12) y (3.13) se pueden reescribir como:

$$\ddot{V}_b + \gamma \ddot{V}_s + 2\omega_b \beta_b \dot{V}_b + \omega_b^2 V_b = -\ddot{u}_g \quad (3.15)$$

$$\ddot{V}_b + \ddot{V}_s + 2\omega_s \beta_s \dot{V}_s + \omega_s^2 V_s = -\ddot{u}_g \quad (3.16)$$

El sistema planteado de dos grados de libertad en la FIGURA 3.6, se puede aplicar al caso de edificación con varios pisos. Dicho sistema estructural tendrá una matriz de masas **M**, una matriz de amortiguamiento **C** y una matriz de rigidez **K**. Si la estructura fuera empotrada en la base, el desplazamiento relativo **u** de cada grado de libertad con respecto al suelo vendría dado por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (3.17)$$

Donde **r** es el vector que acopla cada grado de libertad con el movimiento del suelo. Cuando a este modelo se lo combina con un sistema de aislación en la base de masa m_b , rigidez k_b y amortiguamiento c_b , la ecuación anterior se transforma en:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}\mathbf{v} = -\mathbf{M}\mathbf{r}(\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) \quad (3.18)$$

Donde **v** es el desplazamiento relativo con respecto a la losa de aislación y v_b es el desplazamiento relativo de la losa de aislación con respecto al suelo. La ecuación completa del movimiento para la superestructura y la losa de aislación viene dada por:

$$\mathbf{r}^T \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{r}\ddot{v}_b + \mathbf{r}\ddot{u}_g) + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (3.19)$$

La ecuación anterior se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\mathbf{r}^T \mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + (m + m_b)\ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (3.20)$$

En la ecuación anterior, $\mathbf{r}^T \mathbf{M}\mathbf{r}$, representa la masa tota, m , de la superestructura y por tanto $m + m_b$ es la masa total soportada por el sistema de aislación. La

ecuación anterior se puede expresar en forma matricial como se indica a continuación:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{K}^* \mathbf{v}^* = -\mathbf{M}^* \mathbf{r}^* \ddot{u}_g \quad (3.21)$$

Donde:

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} m + m_b & \mathbf{r}^T \mathbf{M} \\ \mathbf{M} \mathbf{r} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix}$$

y

$$\mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}^* = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

con

$$\mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} v_b \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}$$

Se asume que los modos de vibración de la estructura de base empotrada son conocidos y se denotan por ϕ^i donde i varía entre 1 y N (número de pisos). A partir de esta suposición, el desplazamiento de cada grado de libertad de la estructura se puede escribir como:

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^N q_i \phi^i \quad (3.22)$$

Las frecuencias naturales ω_i^2 están dadas por:

$$\mathbf{M} \phi^i \omega_i^2 = \mathbf{K} \phi^i \quad (3.23)$$

Asumiendo que $\phi^i \mathbf{C} \phi^j = 0$ si $i \neq j$

Las ecuaciones matriciales del movimiento se reducen a $N+1$ ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{r}^T \mathbf{M} \phi^i \ddot{q}_i + (m + m_b) \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b) \ddot{u}_g \quad (3.24)$$

y

$$\ddot{q}_i + 2\omega_i\beta_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = -L_i(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g), i = 1, \dots, N \quad (3.25)$$

Donde L_i son los factores de participación modal para la estructura con base empotrada, dados por:

$$L_i = \frac{\phi_i^T \mathbf{M} \mathbf{r}}{\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i} \quad (3.26)$$

Las masas de participación modal para la estructura con base empotrada vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$M_i = \phi_i^T \mathbf{M} \phi_i \quad (3.27)$$

A partir de las ecuaciones (3.26) y (3.27) se reescriben las ecuaciones (3.24) y (3.25) como se indica a continuación:

$$\sum_{i=1}^N \frac{L_i M_i}{m + m_b} \ddot{q}_i + \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (3.28)$$

$$L_i \ddot{v}_b + \ddot{q}_i + 2\omega_i \beta_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -L_i \ddot{u}_g, i = 1, \dots, N \quad (3.29)$$

El análisis modal completo de las $N+1$ ecuaciones se encuentra detallado en (Kelly, 1993). En mayoría de los casos los modos diferentes al primer modo de vibración juegan un papel importante en el diseño de estructuras con base aislada, por tal motivo solo se considera el primer modo.

Las ecuaciones del movimiento (3.28) y (3.29) se pueden hacer corresponder con las ecuaciones para un grado de libertad (3.15) y (3.16), si se reemplaza v_b en el análisis elemental con $L_1 v_b$; \ddot{u}_g con $L_1 \ddot{u}_g$ y $\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M}$ con $\gamma_1 = \frac{L_1^2 M}{m + m_b}$. Con

lo que resulta:

$$\frac{L_1^2 M}{m + m_b} \ddot{q}_1 + L_1 \ddot{v}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{v}_b (L_1 \dot{v}_b) + \omega_b^2 (L_1 v_b) = -L_1 \ddot{u}_g \quad (3.30)$$

$$L_1 \ddot{v}_b + \ddot{q}_1 + 2\omega_b \beta_b \dot{q}_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad (3.31)$$

En la solución de estas ecuaciones, el resultado de q_1 es el mismo que para v_s en el sistema de un grado de libertad.

El resultado para un sistema de un grado de libertad, a saber, es el siguiente:

$$|v_b|_{\max} = \frac{1}{\omega_b^2} S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (3.32)$$

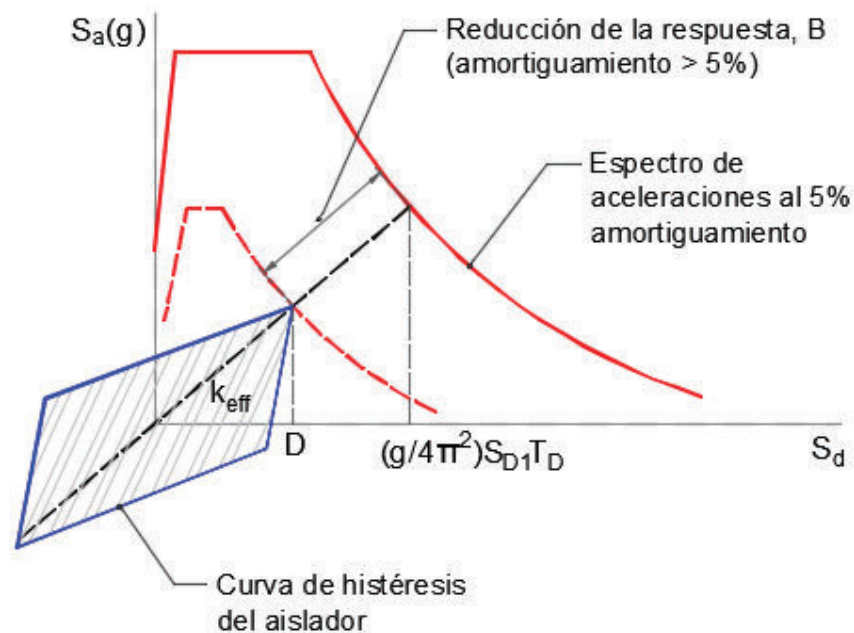
Dicho resultado es reemplazado y el desplazamiento máximo relativo de la base viene dado por:

$$|L_1 v_b|_{\max} = \frac{1}{\omega_b^2} L_1 S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (3.33)$$

Y dado que L_1 aparece en ambos miembros se simplifica y el resultado es el mismo indicado en la ecuación **(3.32)**.

Las formulaciones presentadas son la base del procedimiento EFL del ASCE 7-16, gráficamente se trata de un método basado en desplazamientos que emplea la rigidez secante obtenida a partir de un modelo de histéresis bilineal para el aislador como el indicado en la FIGURA 3.7.

FIGURA 3.7: Esquematación del Procedimiento de la Fuerza Lateral Equivalente



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Como se observa en la figura anterior, el desplazamiento resultante, D , se corresponderá con un espectro reducido a través de un factor B , dicho factor depende del período y amortiguamiento. La ecuación que permite la predicción del desplazamiento lateral mínimo en estructuras aisladas sísmicamente se indica a continuación:

$$D = \frac{gS_1T_{eq}}{4\pi^2B} \quad (3.34)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad, S_1 la aceleración espectral de diseño con 5% de amortiguamiento para un periodo de 1 segundo, T_{eq} el periodo efectivo y B es un factor usado para convertir el espectro de aceleración espectral con el 5% de amortiguamiento a otros valores de amortiguamiento y está relacionado con el amortiguamiento efectivo β_{eff} del sistema de aislación. La relación entre β_{eff} y B se encuentra tabulada en la TABLA 3.1:

TABLA 3.1: Coeficiente de amortiguamiento B

Amortiguamiento efectivo β_{eff} (%)	Coeficiente B
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Fuente: ASCE 7-16

El desplazamiento total máximo, D_T , de los elementos del sistema de aislación deberá incluir un desplazamiento adicional debido a la torsión accidental calculada a partir de la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislación y de la ubicación más desfavorable de la masa excéntrica. D_T se tomará al menos el valor arrojado por la ecuación (3.35) pero no menor que 1.1 veces D

$$D_T = D \left(1 + \frac{y}{P_T^2} \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (3.35)$$

Donde:

y = Distancia entre el centro de rigidez de la sistema de aislación y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de acción del sismo considerado

e = Excentricidad medida en planta entre el centro de masas de la estructura y el centro de rigidez del sistema de aislación, sumada una excentricidad accidental tomada como el 5% de la dimensión más larga en planta de la estructura y perpendicular a la dirección de actuación del sismo

b = Dimensión en planta más pequeña de la estructura medida en perpendicular a d

d = Dimensión en planta más larga de la estructura medida en perpendicular a b

P_T = Cociente entre el período traslacional efectivo del sistema de aislación y el período torsional efectivo del sistema de aislación, dado por la siguiente fórmula:

$$P_T = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \geq 1 \quad (3.36)$$

Donde:

x_i, y_i = distancia medida en horizontal desde el centro de masas hasta el aislador "i" en las dos direcciones horizontales del sistema de aislación

N = número de aisladores

r_i = radio de giro del sistema de aislación, igual a $(b^2 + d^2)^{0.5} / 12$ para un sistema de aislación de planta rectangular de dimensiones b x d.

b = Dimensión en planta más pequeña de la estructura medida en perpendicular a d

d = Dimensión en planta más larga de la estructura medida en perpendicular a b

3.3.1. LIMITACIONES DEL PROCEDIMIENTO ELF

El procedimiento de la fuerza lateral equivalente (ELF) se puede aplicar cuando la estructura aislada cumple con:

- a) La estructura se encuentra localizada en un sitio clase A, B, C o D
- b) El período efectivo de la estructura aislada para el desplazamiento máximo, sea menor o igual que 5.0 s.
- c) El período efectivo de la estructura aislada es mayor o igual que tres veces el período de la estructura con base empotrada determinado a partir de análisis modal.
- d) El amortiguamiento efectivo de la estructura aislada para el desplazamiento máximo, sea menor o igual que 30%. *Esta limitación se establece debido a que en varios estudios se ha demostrado que para períodos mayores a 3s y amortiguamientos mayores a 30%, el valor del factor de amortiguamiento B es muy variable lo cual introduce un alto nivel de incertidumbre y error en el resultado obtenido.*
- e) La superestructura es regular
- f) El sistema de aislación cumple con los siguientes requisitos:

f1) La rigidez efectiva del sistema de aislación para el desplazamiento máximo es mayor o igual que un tercio de la rigidez efectiva al 20% del desplazamiento máximo. *Esto se hace para limitar el desplazamiento en los dispositivos.*

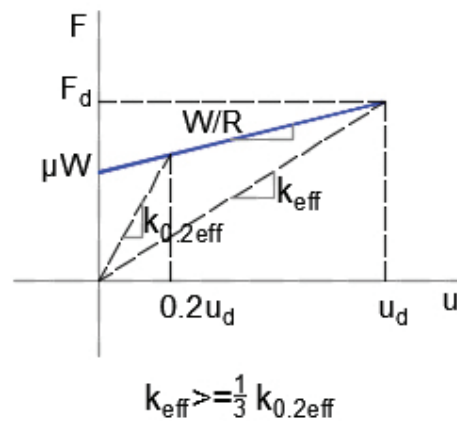
f2) El sistema de aislación es capaz de producir una fuerza restitutiva para el desplazamiento máximo de al menos $0.025W$ mayor que la fuerza lateral al 50% del desplazamiento máximo. *Con esto se logra que los dispositivos tengan una buena capacidad de auto-centrado después del sismo.*

f3) El sistema de aislación no limita el desplazamiento máximo a un valor menor que desplazamiento total.

Las limitaciones expresadas en el literal f) pueden ser traducidos a desplazamientos como se indica a continuación:

Para el literal f1), aplicando la ecuación (3.5) para diferentes niveles de deformación, la relación entre k_{eq} y $k_{0.2eq}$ se puede definir a partir de la FIGURA 3.8

FIGURA 3.8: Criterio de la rigidez efectiva



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

$$\frac{k_{eq}}{k_{0.2eq}} = \frac{\mu W}{u_d} + \frac{W}{R_{eff}} \bigg/ \frac{\mu W}{0.2u_d} + \frac{W}{R_{eff}} = \frac{\mu R_{eff} + u_d}{5\mu R_{eff} + u_d} \geq \frac{1}{3} \quad (3.37)$$

Simplificando la inecuación (3.37), se tiene:

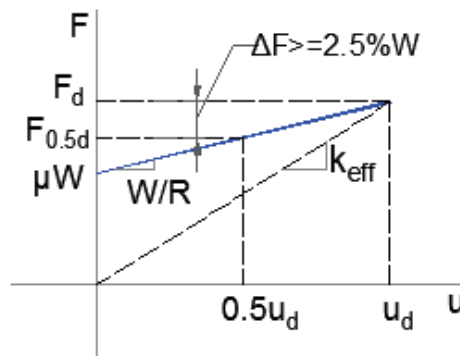
$$u_d \geq \mu R_{\text{eff}} \quad (3.38)$$

Combinando las ecuaciones (3.10) y (3.38), el amortiguamiento equivalente del aislador FPS se limita a:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{eq}} &= \xi_0 + \frac{2\mu}{\pi \left(\mu + \frac{u_d}{R_{\text{eff}}} \right)} \leq \xi_0 + \frac{2\mu}{\pi \left(\mu + \frac{\mu R_{\text{eff}}}{R_{\text{eff}}} \right)} \\ &= \xi_0 + \frac{1}{\pi} \leq 0.30 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Para el literal f2) a partir de FIGURA 3.9 se obtiene el desplazamiento para el sistema de aislación mediante la ecuación (3.40)

FIGURA 3.9: Criterio de la fuerza restitutiva



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

$$0.5u_d \frac{W}{R_{\text{eff}}} \geq 2.5\%W \Rightarrow u_d \geq 0.05R_{\text{eff}} \quad (3.40)$$

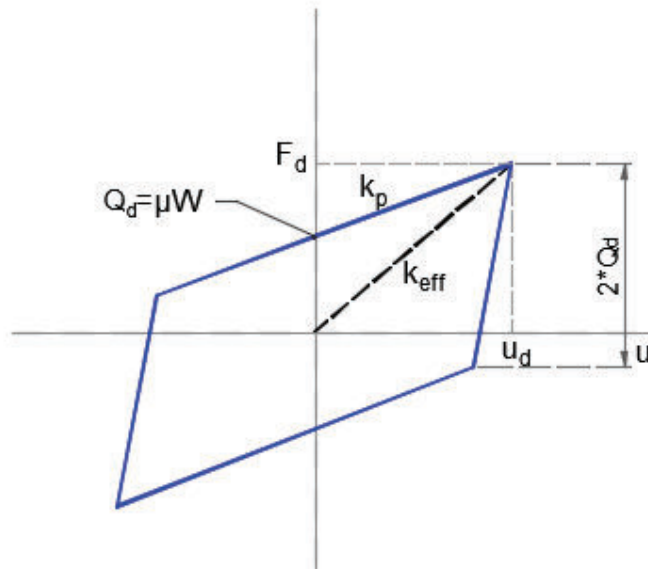
Las limitaciones de rigidez y fuerza, se dan porque un modelo bilineal es muy sensible a la elección del parámetro $k_e = \frac{F_y}{u_y}$, si se selecciona un k_e muy alto para desplazamientos pequeños el amortiguamiento sería alto y la capacidad de auto-centrado se reduce, en cambio sí k_e es bajo los desplazamientos en el sistema de aislación serían muy altos.

3.3.2. MODELOS DE CURVA DE HISTÉRESIS UTILIZADOS PARA PROCEDIMIENTO ELF

Los valores de desplazamiento calculados dependen de la rigidez efectiva k_{eff} y del amortiguamiento efectivo β_{eff} del sistema de aislación, dichos valores se obtienen a partir de la curva de histéresis del aislador. El método EFL se aplicará usando dos modelos de histéresis distintos y que se indican a continuación.

- a) Modelo de comportamiento Rígido-Lineal o Bilineal, representado en la FIGURA 3.10.

FIGURA 3.10 Modelo de histéresis rígido-lineal o bilineal



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

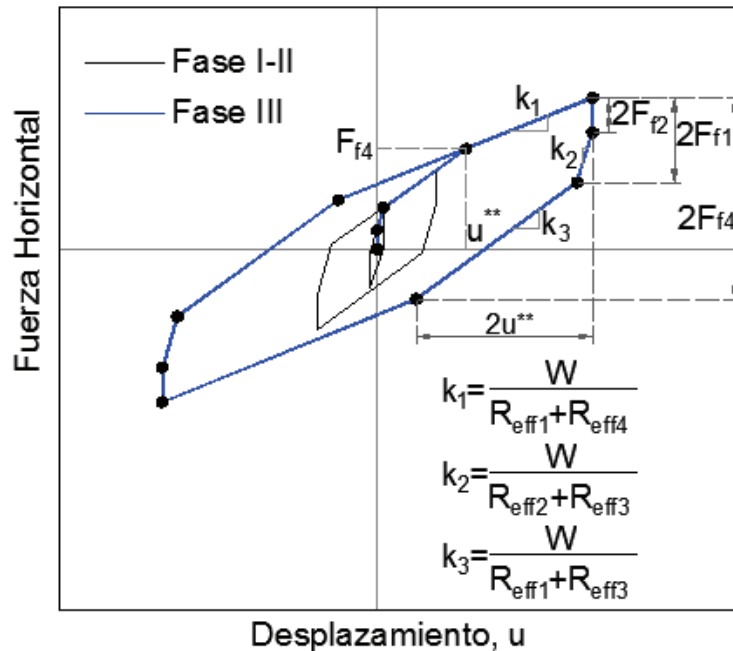
La rigidez efectiva y el amortiguamiento efectivo se hallarán mediante las ecuaciones (3.41) y (3.47), respectivamente:

$$k_{\text{eq}} = \frac{\mu_1 W}{u_d} + \frac{W}{2R_{\text{eff}1}} \quad (3.41)$$

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{2\mu_1}{\pi \left(\mu_1 + \frac{u_d}{R_{\text{eff1}}} \right)} \quad (3.42)$$

b) Modelo de las 3 Fases de Constantinou, indicado en la FIGURA 3.11.

FIGURA 3.11: Modelo de las 3 Fases de Constantinou



Fuente: (McVitty & Constantinou, 2015)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Para el Modelo de las 3 Fases de Constantinou las expresiones que gobiernan la relación fuerza-desplazamiento en cada fase se indican en la **TABLA 2.2**.

La rigidez efectiva vendrá por la relación entre la fuerza y el desplazamiento correspondientes a la fase en que se desarrolle el movimiento, como se indica en la siguiente ecuación:

$$k_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{fase}}}{u} \quad (3.43)$$

El amortiguamiento efectivo vendrá dado por:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{E_D}{k_{\text{eff}} u^2} \right) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu_{\text{fase}} R}{\mu_{\text{fase}} + \frac{u}{R}} \right) \quad (3.44)$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, los parámetros que definen el amortiguamiento dependen de la superficie y fase en la que se desarrolle el movimiento; siendo $R = 2R_{\text{fase,eff}}$ y $R_{\text{fase,eff}} = R_i - h_i$ con "i" superficie en la que se produce el deslizamiento.

Como se explicó en el capítulo anterior, en el diseño de la aislación sísmica mediante triple péndulos de fricción, la fase III es alcanzada normalmente para sismos superiores al de diseño. Específicamente, la rigidización que se produce en la fase III es empleada como una medida final de prevención y con el fin de evitar que se exceda la capacidad de desplazamiento del aislador. Bajo condiciones normales (sismo de diseño) el aislador operará en fase II. La energía disipada por ciclo, E_D , para el modelo Tri-lineal (o de 2 Fases) viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_D = 4uW \left[\mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{2,\text{eff}}}{R_{1,\text{eff}}} \right] - 16WR_{2,\text{eff}} (\mu_1 - \mu_2)^2 \left(1 - \frac{R_{2,\text{eff}}}{R_{1,\text{eff}}} \right) \quad (3.45)$$

3.3.3. ALGORITMO PARA PROCEDIMIENTO ELF

Asumiendo la estructura aislada como un sistema de un grado de libertad, se desarrolla un método iterativo para hallar el desplazamiento lateral en el sistema de aislación. Los pasos a llevar a cabo son:

- a) Determinar el peso soportado por cada aislador triple péndulo de fricción, bajo cargas gravitatorias.

- b) Dado que inicialmente las deformaciones en los aisladores son desconocidas, se asume un desplazamiento inicial para todos los aisladores.
- c) Calcular las propiedades equivalentes lineales k_{eqi} y ξ_{eqi} de cada aislador, usando las ecuaciones presentadas anteriormente para cada modelo..
- d) Calcular las propiedades equivalentes lineales globales para el sistema simplificado de un grado de libertad:

$$K_{eq} = \sum_{i=1}^n k_{eqi} \quad (3.46)$$

$$\xi_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n (k_{eqi} \xi_{eqi})}{\sum_{i=1}^n k_{eqi}} \quad (3.47)$$

- e) Calcular el desplazamiento de diseño en el centro de rigidez, usando la ecuación **(3.11)**
- f) Se establece una tolerancia para comparar el desplazamiento impuesto con el calculado y se continúa hasta lograr una convergencia. Para obtener una convergencia más rápida en este trabajo se aplicó el método de la bisección.

Para el desarrollo del procedimiento EFL, se desarrollan dos programas en MATLAB: **ELF_ASCE7-16** y **ELF_ASCE7-16_3FASES** que usan el modelo rígido- lineal y el modelo Tri-lineal o de la 3 fases, respectivamente.

CAPÍTULO 4

MÉTODO DEL ESPECTRO CAPACIDAD EN PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

La esencia de un procedimiento de evaluación sísmica es la medición un parámetro de demanda con un parámetro de capacidad. En el diseño convencional basado en fuerzas, las solicitaciones sísmicas son reducidas de forma artificial para mantener el proceso de diseño dentro del rango elástico. Cuando se trabaja en el rango inelástico, la generalización de la capacidad como fuerza hace difícil caracterizar el daño actual de partes específicas de la estructura debido a que el daño es progresivo, algunos componentes fluyen, ocurre redistribución y la demanda inelástica varía de componente a componente, en este contexto resulta más conveniente expresar el daño en términos de desplazamientos que calcular fuerzas. En consecuencia, el enfoque basado en fuerzas no es muy favorable para evaluar el desempeño de una estructura para un sismo dado. Por esta razón, en las últimas décadas se han desarrollado varios métodos que permitan estimar los desplazamientos no lineales inelásticos de una estructura, estos métodos son conocidos como PROCEDIMIENTOS ESTÁTICOS NO-LINEALES, los más usados son:

- a) Método del Espectro de Capacidad propuesto por FREEMAN (1975), incluido en el ATC-40 (1996) y mejorado por el FEMA-440.
- b) Método del Coeficiente de Desplazamiento, presentado en el FEMA-273, FEMA-274 y FEMA-356 y mejorado por el FEMA-440 y el ASCE 41-13
- c) Método N2 desarrollado por FAJFAR y adoptado en el EUROCODIGO 8.

Estos procedimientos son similares unos con otros con respecto a la caracterización de la capacidad de la estructura mediante una curva que relaciona la fuerza sísmica con el desplazamiento y se diferencian principalmente en la técnica usada para calcular el desplazamiento demandado para un nivel sísmico dado. El objetivo principal de los procedimientos antes mencionados es caracterizar la respuesta de la estructura ante una acción sísmica en términos de desplazamientos mediante los siguientes pasos fundamentales:

- 1) Conversión a un sistema equivalente de un grado de libertad por medio de la curva de capacidad obtenida en un análisis estático no lineal tipo pushover.
- 2) Caracterización de la demanda sísmica en términos de espectro de respuesta elástica sobreamortiguada o en términos de espectro de diseño inelástico dependiendo del método que este aplicando.

El desplazamiento máximo se determina a través del llamado “punto de desempeño”, como indicador del nivel de daño producido en la estructura.

4.2. GENERALIDADES DEL MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD

El método del Espectro Capacidad fue documentado por primera vez en un proyecto experimental del Comando de las Fuerzas Navales de los EE.UU. (Freeman, Nicoletti, & Tyrell, 1975) y posteriormente se transformó en directrices de diseño (Army, 1986). El procedimiento se actualizó en el año de 1996 por la División de Ingeniería de las Fuerzas Armadas Americanas (WJE, 1996), el manuscrito no publicado fue usado como base para el documento ATC-40 (Freeman, 1998).

El Método del Espectro Capacidad es un procedimiento estático no-lineal que proporciona una representación gráfica de la curva de capacidad fuerza-desplazamiento de una estructura (pushover) y la compara con el espectro de demanda sísmica. Dicha representación gráfica provee de una idea clara de cómo la estructura responde al movimiento sísmico. Los dos elementos básicos de este

procedimiento son la demanda y la capacidad. La demanda es una representación de movimiento sísmico mientras la capacidad es una representación de la habilidad de la estructura para resistir la demanda sísmica. Este método de análisis no lineal simplificado requiere de la determinación de tres elementos primarios: la capacidad, la demanda y el desempeño. Cada uno de estos tres elementos es explicado de forma breve en las siguientes líneas a partir de lo presentado por (Zorita, 2015) y otros autores.

4.2.1. CAPACIDAD

La capacidad global de una estructura se puede definir como el comportamiento de la misma cuando se ve sometida a acciones horizontales más allá del rango elástico. Se representa mediante una gráfica carga-desplazamiento denominada **curva de capacidad**, en la que se compara el desplazamiento de techo con el cortante basal, depende de la resistencia y capacidad de deformación de cada uno de sus componentes estructurales. Para determinar la curva de capacidad de una estructura es necesario describir el comportamiento de cada uno de sus elementos mediante las relaciones de Momento-Curvatura. En el análisis no lineal, es fundamental conocer estas relaciones para encontrar la rigidez de cada una de las ramas del diagrama histerético que se utiliza para definir la no linealidad del material. El diagrama momento curvatura es función de los modelos constitutivos que se utilizan para determinar la relación esfuerzo-deformación del material de los elementos de la estructura.

4.2.1.1. Modelos Constitutivos del acero

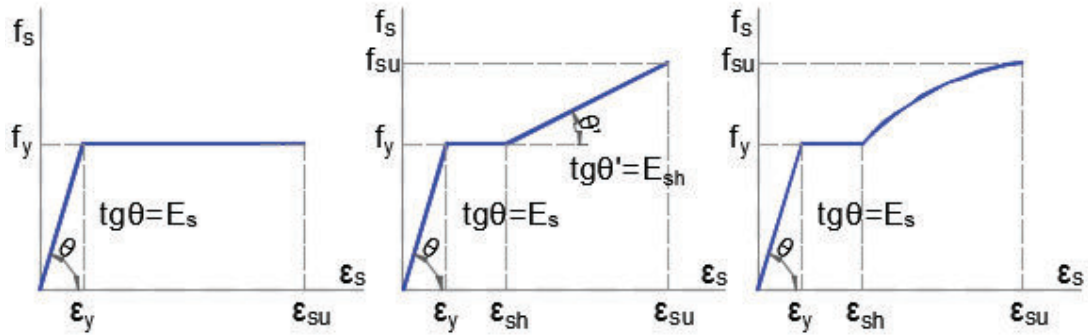
Existen varios modelos constitutivos para definir el comportamiento del acero, entre los más usados se tienen el Elasto-Plasto, el Trilineal y la Curva Completa. (Aguiar & Barbat, 1997), como se indica en la FIGURA 4.1.

Los parámetros que definen el modelo constitutivo del acero son los siguientes: E = Módulo de Elasticidad, f_y = Esfuerzo de fluencia del acero, f_u = Esfuerzo máximo del acero, ϵ_{sh} = deformación unitaria del acero en el inicio de la zona de endurecimiento, ϵ_u = deformación unitaria correspondiente al máximo esfuerzo del

acero, ε_r = deformación unitaria del acero correspondiente al esfuerzo de rotura y

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}$$

FIGURA 4.1: Modelos Constitutivos del acero



a) Modelo Elasto-perfectamente
plástico

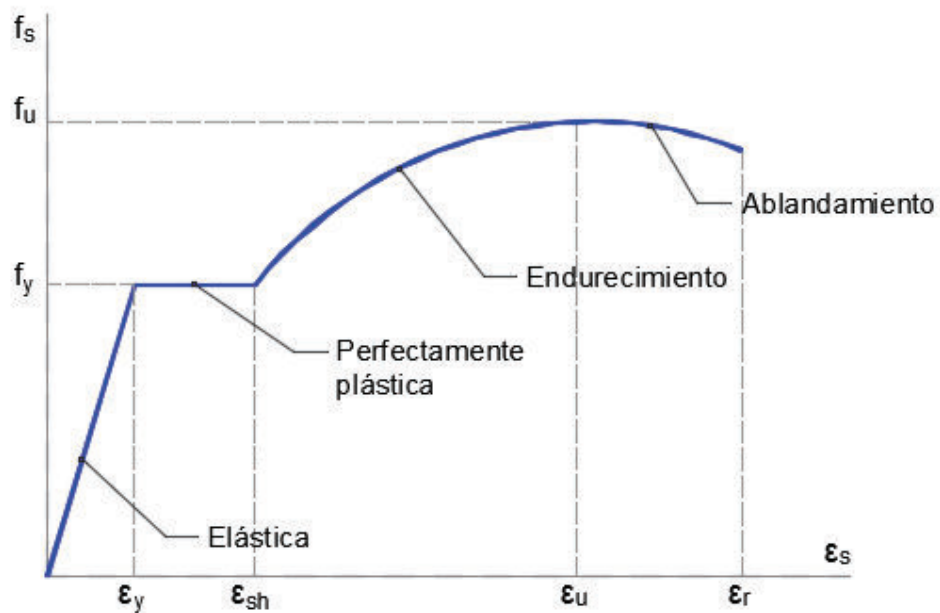
b) Modelo Trilineal

c) Curva Completa

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Un modelo más completo es el definido por (Holzer, 1975) y que se presenta en la FIGURA 4.2

FIGURA 4.2 Curva esfuerzo-deformación para el acero



Fuente: (Holzer, 1975)

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Las ecuaciones que definen cada zona de la curva esfuerzo-deformación se presentan en la **TABLA 4.1**

TABLA 4.1: Ecuaciones que definen la curva esfuerzo-deformación para elementos de acero

Zona	Expresiones
Elástica $\varepsilon \leq \varepsilon_y$	$f = E \varepsilon$
Perfectamente plástica $\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sh}$	$f = f_y$
Endurecimiento y ablandamiento $\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_r$	$f = f_y \left(1 + r \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) e^{(1-r)} \right)$ $r = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}$

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Fuente: Holzer et al (1975)

Para aceros ASTM A- 36 se tiene las siguientes propiedades mecánicas:

FIGURA 4.3 Propiedades Mecánicas según ASTM A-36

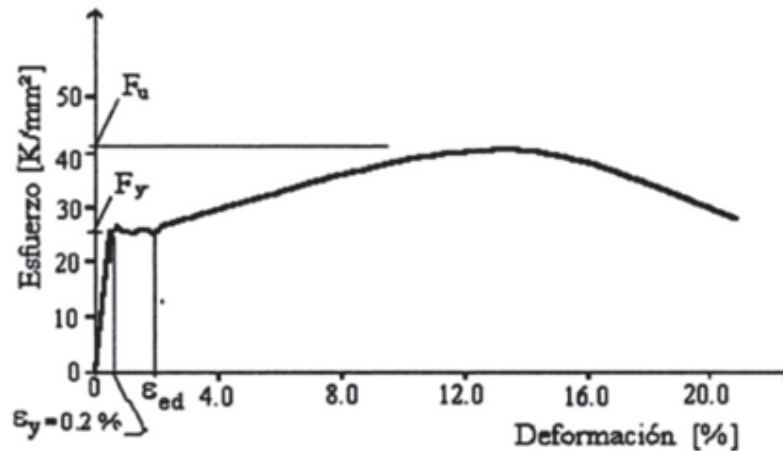


TABLE 2 Tensile Requirements^A

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

^A See the Orientation subsection in the Tension Tests section of Specification A6/A6M.

^B For 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.

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

^D Elongation not required to be determined for floor plate.

^E For 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 A6/A6M.

Fuente: (ASTM, 2014)

Elaborado por: (ASTM, 2014)

De la FIGURA 4.3 se pueden extraer los siguientes datos:

$$f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2, f_u = 4080 \text{ kg/cm}^2, \varepsilon_r = 20\%, E = 2043000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = 0.12\%, \varepsilon_{sh} = 2\%, \varepsilon_u = 14\%$$

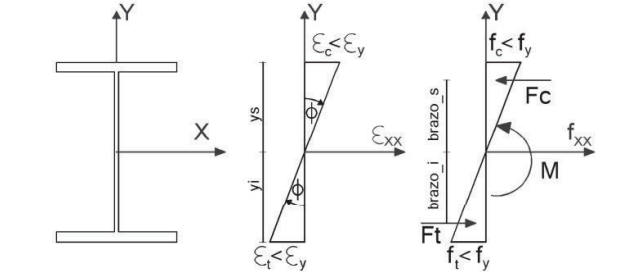
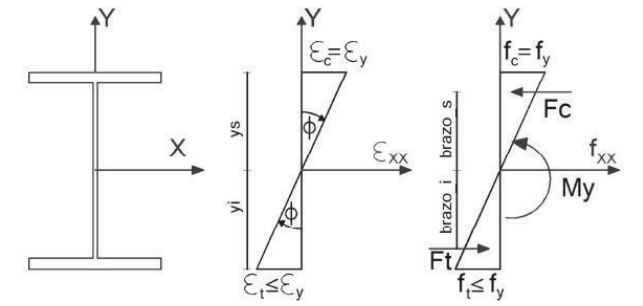
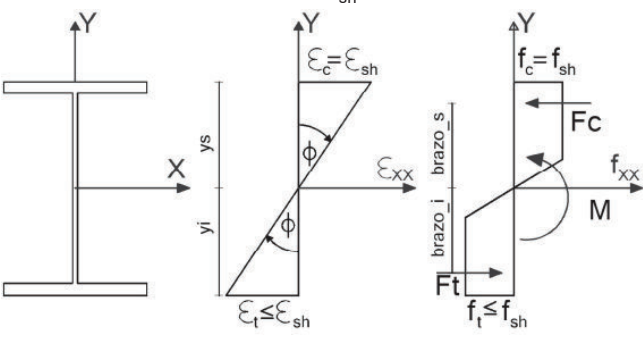
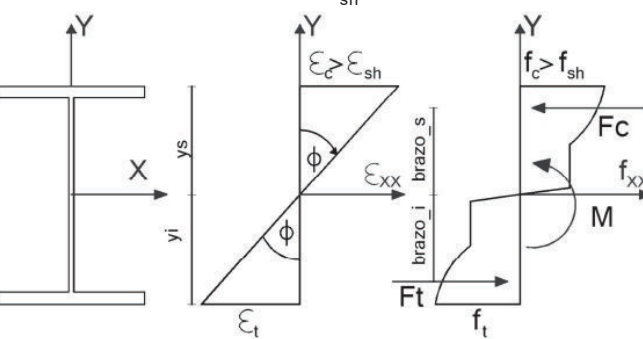
4.2.1.2. Diagrama Momento-Curvatura para secciones de acero

Existen varios métodos para determinar el diagrama Momento-Curvatura de una sección estructural, todos ellos se basan en tres principios:

- Compatibilidad de deformaciones
- Equilibrio de fuerzas
- Equilibrio de momentos

En la **TABLA 4.2** se indica un resumen de las expresiones para la obtención del diagrama Momento-Curvatura en secciones de acero estructural sometidas a flexocompresión (Mora, 2015)

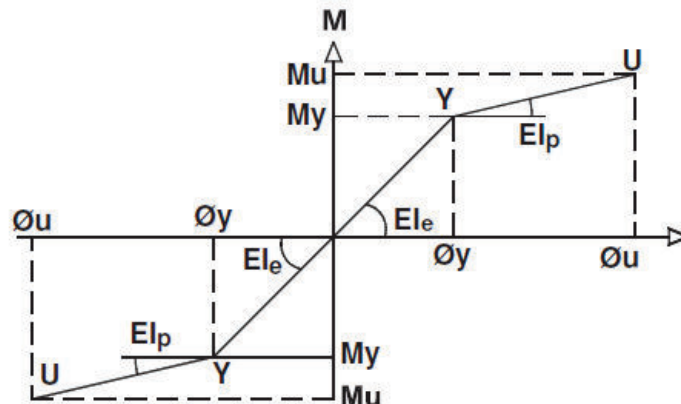
TABLA 4.2: Obtención de diagramas Momento-Curvatura en secciones de acero estructural

Esquema	Expresiones
<p style="text-align: center;">$f \leq f_y$</p> 	$M = S_x f$ $\phi = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_c}{y_s/2}$
<p style="text-align: center;">$f = f_y$</p> 	$M_y = S_x f_y$ $\phi_y = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_y}{y_s/2}$
<p style="text-align: center;">$f = f_{sh}$</p> 	$M_{sh} = S_x f_{sh}$ $\phi_{sh} = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_{sh}}{y_s/2}$
<p style="text-align: center;">$f \geq f_{sh}$</p> 	$M_y = S_x f_{sh}$ $\phi_{sh} = \frac{\epsilon_t}{y_i/2} = \frac{\epsilon_{sh}}{y_s/2}$

Fuente: (Mora, 2015)

Una vez obtenido el diagrama Momento-Curvatura suelen utilizarse aproximaciones simplificadas, como la bilineal que representa un comportamiento elástico-perfectamente plástico.

FIGURA 4.4: Diagrama momento-rotación para secciones de acero



Fuente: (Mora, 2015)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En la **TABLA 4.3** se indican las expresiones que definen cada zona de comportamiento según las recomendaciones dadas por (Chandrasekaran ,2010).

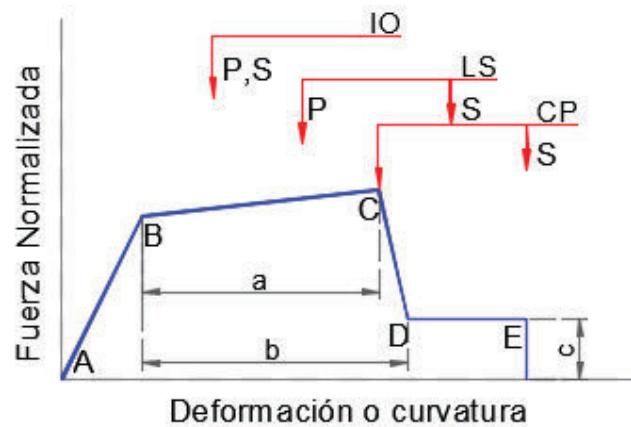
TABLA 4.3: Zonas de comportamiento de elementos de acero

Zona	
Elástica	$EI_e = EI$ E= Módulo de Young del acero I=Momento de inercia de la sección
Fluencia del acero	$M_y = M_p = Z_x f_y$ $Z_x = \text{Módulo plástico} = A_c \text{brazo}_s + A_t \text{brazo}_i$
Curvatura en punto de fluencia	$\phi_y = \frac{M_y}{EI_e}$
Fluencia última	$\phi_u = 10 \phi_y$ $M_u = (\phi_u - \phi_y)EI_p + M_y$ $EI_p = (0.010 \text{ a } 0.030)EI_e$

Fuente: (Mora, 2015)

Para un análisis completo, sin embargo, se suele considerar el endurecimiento por deformación y la resistencia residual después de la curvatura última, según lo indicado en la FIGURA 4.5

FIGURA 4.5: Diagrama momento-curvatura con endurecimiento y resistencia residual



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Los métodos actuales de diseño por desempeño establecidos en el FEMA 356 y ASCE 41 se basan en la evaluación de cada uno de los componentes (vigas, columnas, muros, etc.) mediante la relación normalizada Fuerza/Momento-Deformación/Rotación como la indicada en la FIGURA 4.5, donde el segmento AB indica un comportamiento elástico, el punto C determina el comienzo de la pérdida de capacidad, el segmento DE establece la capacidad residual del elemento y el punto E determina la capacidad inelástica última de rotación del componente. Los componentes son clasificados como primarios (P) o secundarios (S) y se les asigna diferentes límites de deformación correspondientes a varios niveles de desempeño objetivo. El eje vertical en la figura representa la relación entre la fuerza o momento y la fuerza o el momento correspondiente al límite elástico. Los componentes primarios son aquellos cuya falla resulta en una pérdida de capacidad portante de carga vertical y pone en peligro la seguridad de los ocupantes (columnas). Los componentes secundarios son aquellos cuya falla puede ser sustentada por el sistema mediante la redistribución de fuerzas a componentes adyacentes sin poner en peligro a los ocupantes.

Las expresiones que definen cada uno de los tramos de la FIGURA 4.5 se encuentran en la Tabla 9.6 del ASCE 41-13 y son resumidos en la siguiente figura:

FIGURA 4.6: Parámetros para el modelamiento del diagrama momento-rotación de elementos de acero según el ASCE 41-13

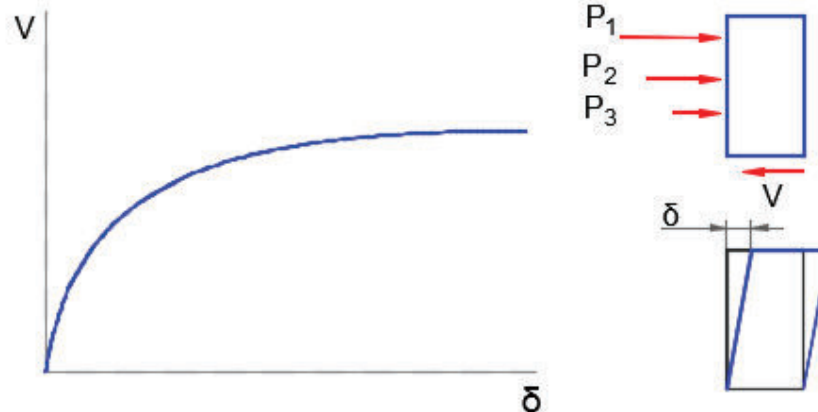
Component or Action	Modeling Parameters		
	Plastic Rotation Angle, Radians		Residual Strength Ratio
	a	b	c
Beams—Flexure			
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	9 θ_y	11 θ_y	0.6
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$	4 θ_y	6 θ_y	0.2
c. Other	Linear interpolation		
Columns—Flexure^{a,b}			
For $P/P_{CL} < 0.2$			
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{F_{ye}}}$	9 θ_y	11 θ_y	0.6
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{F_{ye}}}$	4 θ_y	6 θ_y	0.2
c. Other	Linear interpolation		
For $0.2 \leq P/P_{CL} \leq 0.5$			
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{260}{\sqrt{F_{ye}}}$	— ^c	— ^d	0.2
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{400}{\sqrt{F_{ye}}}$	1 θ_y	1.5 θ_y	0.2
c. Other	Linear interpolation		

Fuente: (ASCE, 2013) Table 9.6
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Donde F_{ye} = fluencia del acero en ksi (36 ksi para aceros A36)
 P = Carga axial que gravita en la columna
 P_{CL} = Carga crítica de pandeo = $F_{cr} A_s$, según AISC 360-10

4.2.1.3. Análisis Pushover

Para la obtención de la curva capacidad (Cortante basal vs desplazamiento de techo) de una estructura se requiere realizar algún procedimiento de análisis no lineal, como el análisis pushover.

FIGURA 4.7: Curva de Capacidad

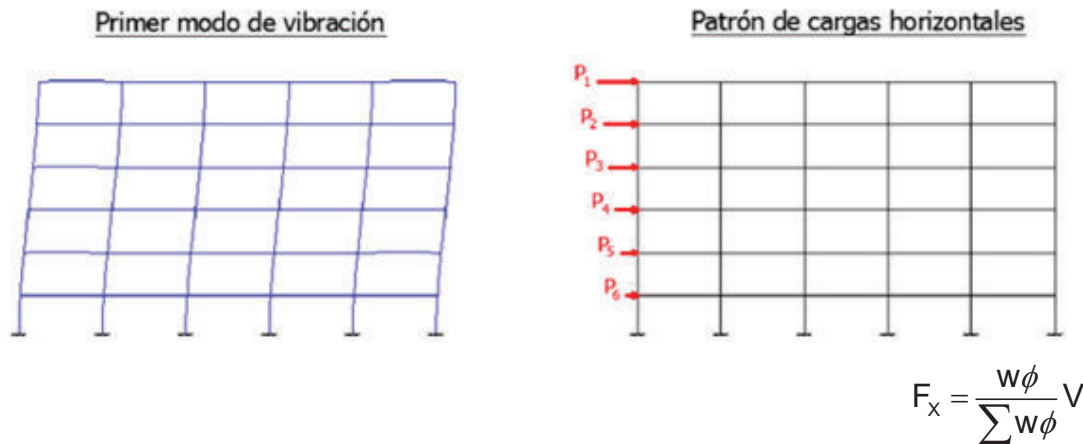
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Como su nombre lo indica el Análisis Pushover, es un proceso en el cual la estructura es empujada horizontalmente y de forma incremental mediante un patrón preestablecido de cargas. La curva de capacidad termina cuando la estructura colapsa ya sea por inestabilidad por efectos de segundo orden, desplazamientos inadmisibles o cuando uno o varios elementos estructurales alcanzan una deformación en la cual sufren una pérdida significativa e capacidad para resistir cargas laterales.

De acuerdo al patrón de cargas aplicado se tienen diferentes tipos de análisis pushover, a continuación se presenta brevemente los tipos considerados en este trabajo:

- PUSHOVER MONÓTONICO SIMPLE

En el Pushover Monotónico Simple para obtener la curva de capacidad se somete a la estructura a un patrón de cargas laterales cuya deformación sea homotética a la del primer modo de vibración y las cargas verticales que sean compatibles con el sismo, generalmente es válido para estructuras con período fundamental de hasta 1 segundo.

FIGURA 4.8: Pushover Monótonico Simple

Fuente: (Zorita, 2015)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

A continuación se determina la curva de capacidad mediante un análisis estático no lineal en el cual se obtienen los desplazamientos para cada incremento de carga. Conforme se van formando rotulas plásticas, la rigidez lateral de la estructura disminuye y los desplazamientos aumentan, al disminuir la rigidez lateral varía el modo de vibración por lo que también hay que ajustar el patrón de cargas en cada incremento, el patrón de cargas viene dado por:

$$F_x = \frac{w\phi}{\sum w\phi} V \quad (4.1)$$

Donde w es la masa en cada piso, ϕ el primer modo fundamental de vibración y V es el cortante basal.

Para estructuras más flexibles con períodos fundamentales mayores de 1 segundo, el análisis debe considerar la participación de modos de vibración más altos.

- PUSHOVER MULTIMODAL

El pushover monótonico simple presenta las siguientes limitaciones:

- Aplicación de cargas siguiendo un patrón invariable
- La no consideración de la influencia de modos de vibración superiores
- Utilización de una relación de amortiguamiento viscoso equivalente

Con el fin de subsanar dichas limitaciones muchos autores han propuesto patrones de carga adaptativos que tengan en cuenta los modos superiores de repuesta, uno de esos patrones fue desarrollado por (Chopra & Goel, 2002), conocido como Pushover Multimodal. En el pushover multimodal, el punto de desempeño de la estructura está dado por la combinación de los puntos de desempeño modales de cada modo relevante de la estructura.

A continuación se realiza un resumen de los pasos a emplear para realizar el análisis Pushover Multimodal desarrollado por (Chopra & Goel, 2002). Dichos pasos constituirán el algoritmo empleado en MATLAB para el desarrollo del Método del Espectro Capacidad aplicado a pórticos con FPS:

- Calcular las frecuencias naturales, ω_n y los modos de vibración ϕ_n mediante un análisis lineal elástico.
- Incrementar el cortante basal en cada ciclo de carga y repartirlo para cada modo de vibración mediante una distribución de fuerzas laterales dada por $S_n^* = m\phi_n$ donde m es la matriz de masas de la estructura y ϕ_n son los autovalores en el modo de vibración "n".
- Repartir la carga lateral por piso de acuerdo a los factores de participación modal dados por $\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}$ donde $L_n = \phi_n^T m J$, $M_n = \phi_n^T m \phi_n$ y J vector unitario para el caso de tener una matriz de masas que sea diagonal ortogonal.
- Aplicar el vector de cargas para cada ciclo y modo de vibración mediante la ecuación:

$$Qa_n = \frac{\text{diag}(M)\phi_n}{\sum_{i=1}^{n\text{pisos}} (M^T \phi_n)} \Gamma_n \Delta V \quad (4.2)$$

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 y ΔV es el incremento del cortante basal.

Para determinar la respuesta total (demanda) se debe emplear algún criterio de combinación; en este trabajo se utilizará el criterio de Combinación Cuadrática Completa de sus siglas en inglés CQC (Complete Quadratic Combination) desarrollado por (Chopra A. , 2014), este criterio realiza una combinación de suma de cuadrados más un término que combina las respuestas con un factor que es función de la frecuencia y del amortiguamiento de cada modo de vibración y que puede tener signo positivo o negativo, la expresión del CQC viene dada por:

$$r^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} r_i r_j \quad (4.3)$$

Donde ρ_{ij} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_j} (\xi_i + a \xi_j) a^{1.5}}{(1-a^2)^2 + 4\xi_i \xi_j a(1+a^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_j^2) a^2} \quad (4.4)$$

Con $a = \frac{\omega_{nj}}{\omega_{ni}}$

Donde i y j corresponden al i -ésimo y j -ésimo modo de vibración; ω_{ni} y ω_{nj} son las frecuencias naturales en los modos de vibración i y j y ξ_i, ξ_j son los factores de amortiguamiento en los modos de vibración i y j .

La expresión para calcular el factor de amortiguamiento en estructuras de acero se lo toma de (Naoki, 2003) y (Aguar R. , 2012) y viene dado por:

$$\xi_i = (1.3 - 1.4)\xi_{i-1} \quad (4.5)$$

4.2.1.4. Espectro de Capacidad

Para el análisis sísmico se requiere expresar la capacidad (curva pushover) en términos de Aceleraciones vs. Desplazamientos espectrales (S_a, S_d), por tanto es necesario transformar la curva de capacidad al formato ADRS (Acceleration-

Displacement Response Spectra en inglés). Esta curva transformada se conoce como espectro de capacidad en la cual a cada punto (S_a , S_d) le corresponde otro (V , δ), la conversión se realiza utilizando las siguientes expresiones:

- PUSHOVER MONÓTONICO SIMPLE

Se realiza la conversión al primer modo vibración:

$$PF_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{1i}) / g}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{1i}^2) / g} \quad (4.6)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{1i}) / g \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N (w_i) / g \right) \left(\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{1i}^2) / g \right)} \quad (4.7)$$

$$S_{a_i} = \frac{V_i / W}{\alpha_1} \quad (4.8)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_r}{PF_1 \phi_{1,r}} \quad (4.9)$$

Donde PF_1 es el factor de participación modal para el primer modo de vibración; α_1 es el coeficiente de masa modal para el primer modo de vibración; w_i/g es la masa en el nivel i ; ϕ_{1i} es la amplitud del modo 1 en el nivel i ; N nivel más alto de la estructura; V cortante basal; W carga muerta más carga viva; δ_r desplazamiento de piso; S_{a_i} aceleración espectral y S_{d_i} desplazamiento espectral.

- PUSHOVER MULTIMODAL

$$PF_1 = \frac{\{\phi\}^T [M] \{1\}}{\{\phi\}^T [M] \{\phi\}} \quad (4.10)$$

$$\alpha_m = \frac{\left(\sum_{j=1}^n (w_j \phi_{ij}) / g \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n (w_i) / g \right) \left(\sum_{j=1}^n (w_j \phi_{ij}^2) / g \right)} \quad (4.11)$$

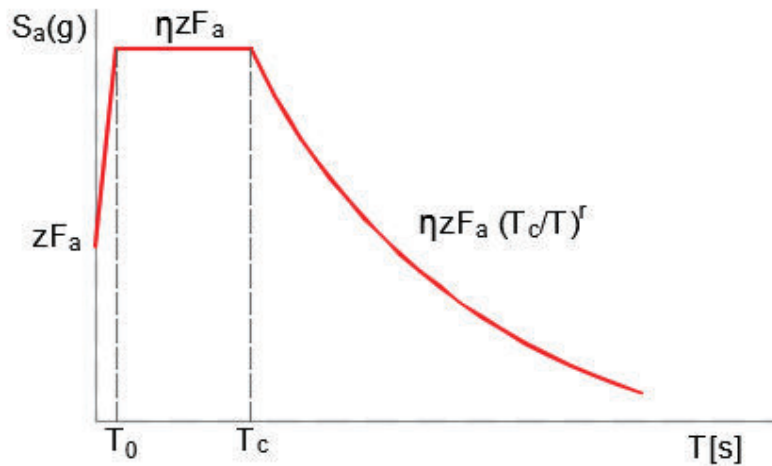
$$Sa = \frac{V}{\alpha_m M} \quad (4.12)$$

$$Sd = \frac{\delta_r}{PF_1 \phi_{ij}} \quad (4.13)$$

Donde M es la masa total de la estructura; ϕ_{ij} es la amplitud modal en el piso “i” para el modo “j”, PF_1 es el factor de participación modal y α_m es el coeficiente de masa modal.

4.2.2. DEMANDA

La demanda en una edificación es una estimación de los desplazamientos máximos que el sismo provocará en la misma y depende del espectro de aceleraciones indicado en la normativa local. Para el caso de nuestro país, el espectro de respuesta elástico se encuentra definido en el apartado 3.3 del Código NEC_SE_DS: Peligro Sísmico-Diseño Sismo Resistente del (NEC, 2014).

FIGURA 4.9: Espectro de respuesta elástico definido en la NEC_SE_DS

Fuente: (NEC, 2014)

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

4.2.2.1. Espectro de Demanda

Para obtener el espectro de demanda es necesario expresar el espectro de respuesta elástico al formato ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra en inglés). Sabiendo que el espectro de pseudoaceleraciones se relaciona con el de desplazamientos mediante la siguiente expresión:

$$PS_a = \omega PS_v = \omega^2 S_d = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d \quad (4.14)$$

De esta forma, a cada punto \$(S_{a_i}, T_i)\$ le corresponde otro \$(S_{a_i}, S_{d_i})\$ mediante la siguiente relación:

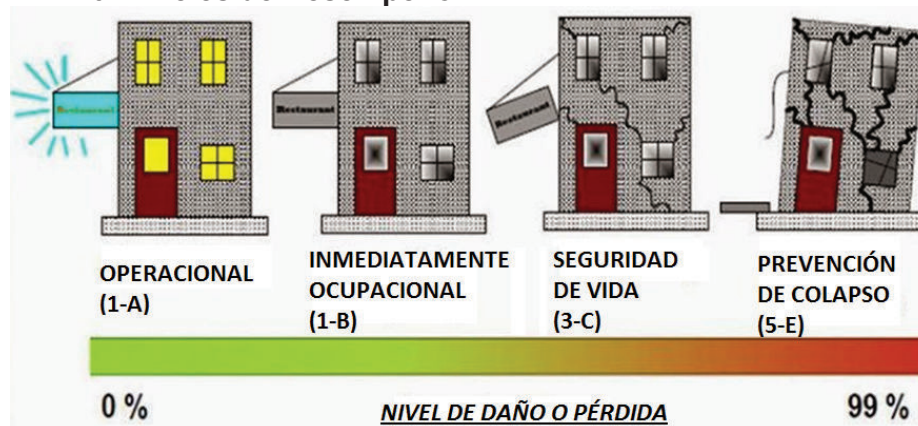
$$S_d = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_a \quad (4.15)$$

4.2.3. DESEMPEÑO

El nivel de desempeño es un indicador del daño que sufre la estructura durante un sismo y viene dado por la combinación del nivel de desempeño de los elementos estructurales y no estructurales de la edificación. Los niveles de desempeño se pueden resumir en cuatro:

- Ocupación inmediata: se producen daños ligeros, pero la resistencia y rigidez de la estructura no se ve afectada. Las reparaciones que puedan ser necesarias no impiden el uso normal de la misma, y pueden ser realizadas con posterioridad. El peligro para la vida humana es mínimo.
- Daño controlado: la estructura sufre un daño limitado que no pone en riesgo la vida de los ocupantes, pero se puede dar una interrupción breve de los servicios.
- Seguridad para la vida humana: se produce un daño importante en la estructura, pero sin riesgo de colapso. Existe posibilidad de heridos entre los ocupantes, pero el peligro para la vida humana es pequeño. Las reparaciones a realizar pueden ser importantes y deberían efectuarse antes de que la estructura vuelva a estar en uso.
- Prevención del colapso: los daños son tales que la estructura se encuentra al límite de sufrir un colapso total o parcial, pues su capacidad de resistir cargas laterales se encuentra disminuida, aunque la resistencia a cargas verticales se mantiene. El riesgo para la vida de los ocupantes es elevado y las reparaciones son significativas.

FIGURA 4.10: Niveles de Desempeño



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

El nivel de desempeño que se exige a una estructura depende de la intensidad del sismo o lo que es lo mismo de su probabilidad de ocurrencia. Los sismos más intensos tienen menor probabilidad de ocurrencia y por ello se admite un daño

mayor a la estructura. La probabilidad de ocurrencia se relaciona con el período de retorno mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{t}{\ln(1-p)} \quad (4.16)$$

Donde t es la vida útil de la estructura en años y p es la probabilidad de excedencia.

De acuerdo a lo antes mencionado se definen cuatro niveles de movimiento sísmico con sus respectivos períodos de retorno. Para cada uno de estos niveles se le exige a la estructura un nivel de desempeño, que dependen de varios factores, como el uso, la importancia o el coste de la estructura.

TABLA 4.4: Períodos de retorno y niveles de desempeño exigidos

Nivel del movimiento sísmico	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno	Nivel de desempeño exigido
Frecuente	50% en 30 años	43,28	Ocupación inmediata
Ocasional	50% en 50 años	72,13	Daño controlado
Raro	10% en 50 años	474,56	Seguridad para la vida humana
Muy Raro	10% en 100 años	949,12	Prevención del colapso

Fuente: (ATC, 1996)

Cada nivel de daño se asocia a un giro o curvatura determinada en las rótulas. Para los distintos elementos se pueden adoptar las siguientes expresiones en radianes indicadas en la **TABLA 4.5**.

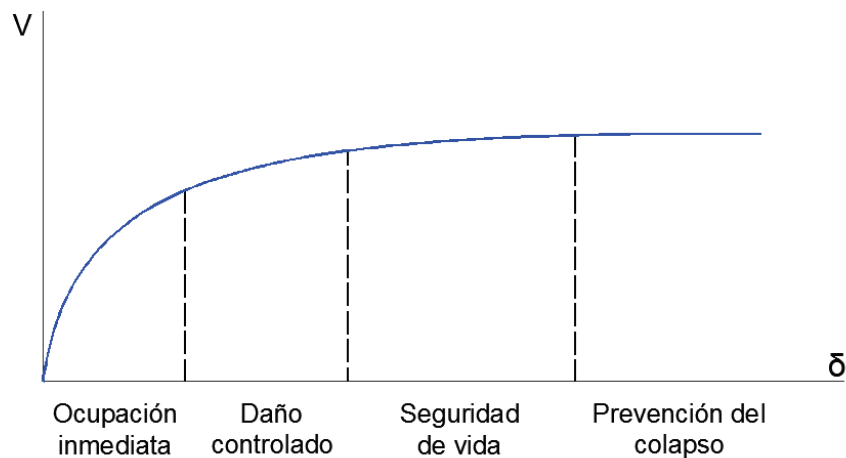
TABLA 4.5: Niveles de daño asociado a un giro o curvatura

Component or Action	Plastic Rotation Angle, Radians		Residual Strength Ratio	Acceptance Criteria		
	a	b		c	IO	LS
Beams—Flexure						
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0.6	$1\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0.2	$0.25\theta_y$	$3\theta_y$	$4\theta_y$
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lower resulting value shall be used					
Columns—Flexure^{a,b}						
For $P/P_{cr} < 0.2$						
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0.6	$1\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{F_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0.2	$0.25\theta_y$	$3\theta_y$	$4\theta_y$
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lower resulting value shall be used					
For $0.2 \leq P/P_{cr} \leq 0.5$						
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{260}{\sqrt{F_{ye}}}$	$1\theta_y$	$1.5\theta_y$	0.2	$0.25\theta_y$	$1.2\theta_y$	$1.2\theta_y$
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{400}{\sqrt{F_{ye}}}$	$12\theta_y$	$12\theta_y$	1.0	$1\theta_y$	$12\theta_y$	$12\theta_y$
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lower resulting value shall be used					

Fuente: (ASCE, 2013) Table 9.6

Conociendo los giros de las rótulas en cada incremento de carga utilizado en la obtención de la curva de capacidad, se pueden representar sobre ésta los niveles de daño:

FIGURA 4.11: Niveles de daño en la curva de capacidad

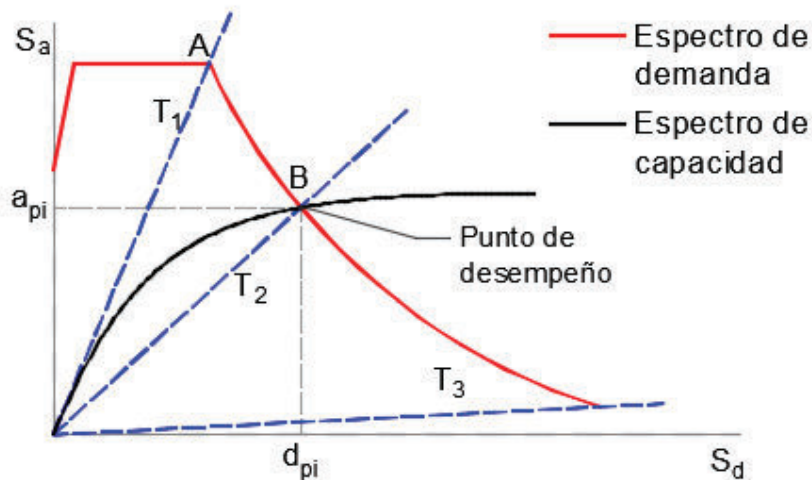


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

4.2.3.1. Punto de Desempeño

El punto de desempeño (a_p , d_p) es aquel en el que se igualan la capacidad y la demanda y se obtiene por superposición de ambos espectros (capacidad y demanda) como se indica en la FIGURA 4.12.

FIGURA 4.12: Punto de Desempeño



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

De esta forma se obtiene la respuesta de la estructura frente al sismo teniendo en cuenta el comportamiento no elástico de la misma.

De la FIGURA 4.12 se pueden obtener las siguientes conclusiones: si la estructura tuviera un comportamiento indefinidamente elástico, el espectro de capacidad sería una línea recta, que corresponde al período inicial T_1 . Sin embargo, la degradación de la rigidez lateral al irse formando rótulas plásticas disminuye sucesivamente el período de la de la estructura T_2 , T_3 ..., reduciendo la demanda sísmica del punto A al B.

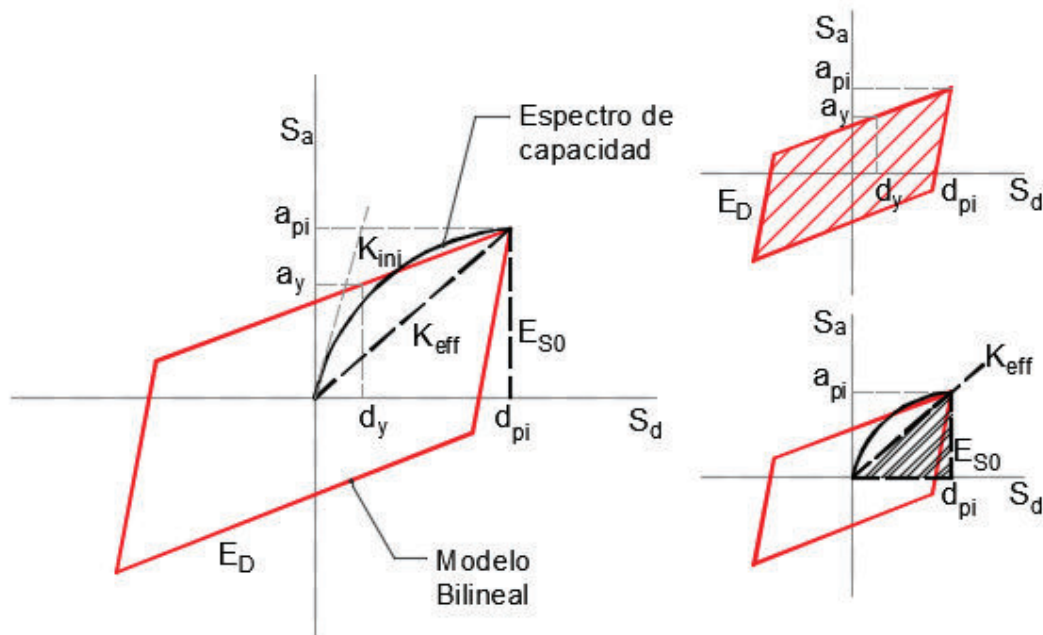
El amortiguamiento que se produce cuando un sismo lleva a la estructura al rango inelástico es una combinación del amortiguamiento viscoso, que depende del material, y del el de histéresis, representado por el área encerrada en ciclo carga-desplazamiento.

El amortiguamiento de histéresis se puede representar como un amortiguamiento viscoso equivalente mediante la siguiente ecuación:

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{s0}} \quad (4.17)$$

Donde E_D es la energía disipada por el amortiguamiento en un ciclo, representada por el área encerrada en un ciclo de histéresis; E_{s0} es la energía asociada a la máxima deformación, representada por el área bajo la línea de rigidez efectiva como se indica en la FIGURA 4.13.

FIGURA 4.13: Lazo de histéresis para hallar el amortiguamiento



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

El área E_D se obtiene como cuatro veces el área del paralelogramo sombreado, indicado a continuación:

$$E_D = 4(a_{pi}d_{pi} - 2A_1 - 2A_2 - 2A_3) = 4[a_y d_{pi} - 2d_y(a_{pi} - a_y) - a_y d_y - (d_{pi} - d_y)(a_{pi} - a_y)]$$

$$E_D = 4(a_{pi}d_{pi} - d_y a_{pi})$$

El área E_{s0} viene dada por:

$$E_{s0} = \frac{1}{2} a_{pi} d_{pi}$$

Por lo tanto, el amortiguamiento viscoso equivalente se puede expresar como:

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{4(a_{pi}d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi}d_{pi}/2}$$

El amortiguamiento equivalente total será el de la estructura ξ más el de histéresis β_0 , ambos expresados como porcentaje del crítico:

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{4(a_{pi}d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi}d_{pi}/2} + \xi \quad (4.18)$$

De la ecuación (4.18) se deduce que la determinación del punto de desempeño (a_{pi} , d_{pi}) es un proceso iterativo. Se parte de un valor inicial a partir del cual se obtiene el amortiguamiento equivalente y el espectro demanda reducido. Si éste interseca con el espectro de capacidad en los alrededores del punto (a_{pi} , d_{pi}) entonces éste se convierte en el punto de desempeño, de lo contrario hay que elegir un nuevo punto (a_{pi} , d_{pi}) y repetir el proceso.

4.2.3.2. Interpretación de los resultados

El punto de desempeño proporciona el desplazamiento espectral esperado en la estructura y la aceleración a que se verá sometida. Para obtener el cortante basal y el desplazamiento se debe deshacer la transformación ADRS y pasar al formato tradicional carga-desplazamiento:

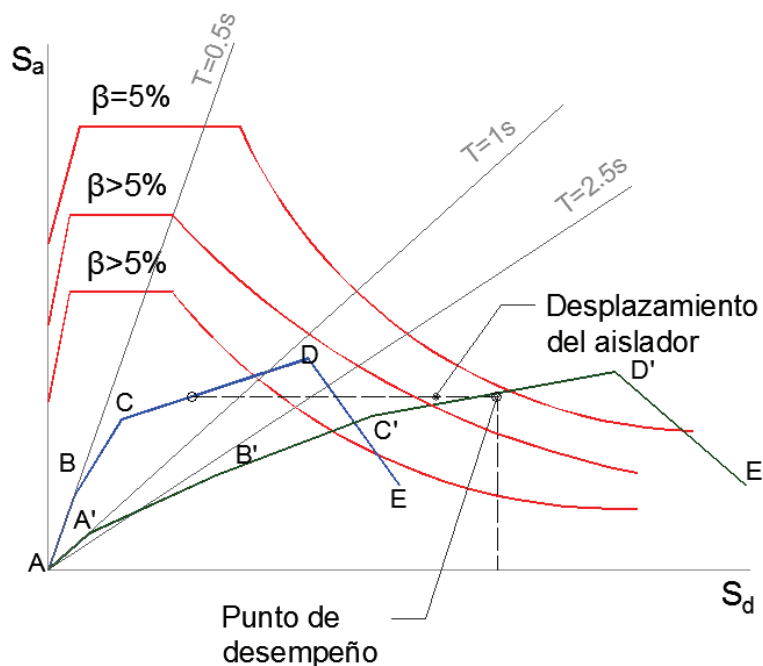
$$\begin{aligned} V &= S_a \alpha W \\ \delta &= S_d \psi a \end{aligned} \quad (4.19)$$

Donde: α es el coeficiente de masa efectiva modal, W es la carga vertical aplicada a la estructura, ψ es el factor de participación modal, a es la amplitud en la parte superior de la estructura.

4.3. PARTICULARIDADES DEL MÉTODO ESPECTRO-CAPACIDAD CUANDO SE EMPLEAN AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

Como se vio en el Capítulo 1, la instalación de aisladores sísmicos resulta en un incremento sustancial del período de la estructura y el amortiguamiento efectivo, lo cual permite una reducción importante de la demanda en la superestructura. En la FIGURA 4.14 se ilustra el efecto del uso de aisladores sísmicos en los espectros de capacidad y demanda.

FIGURA 4.14: Efecto de la aislación sísmica en los espectros de capacidad y demanda



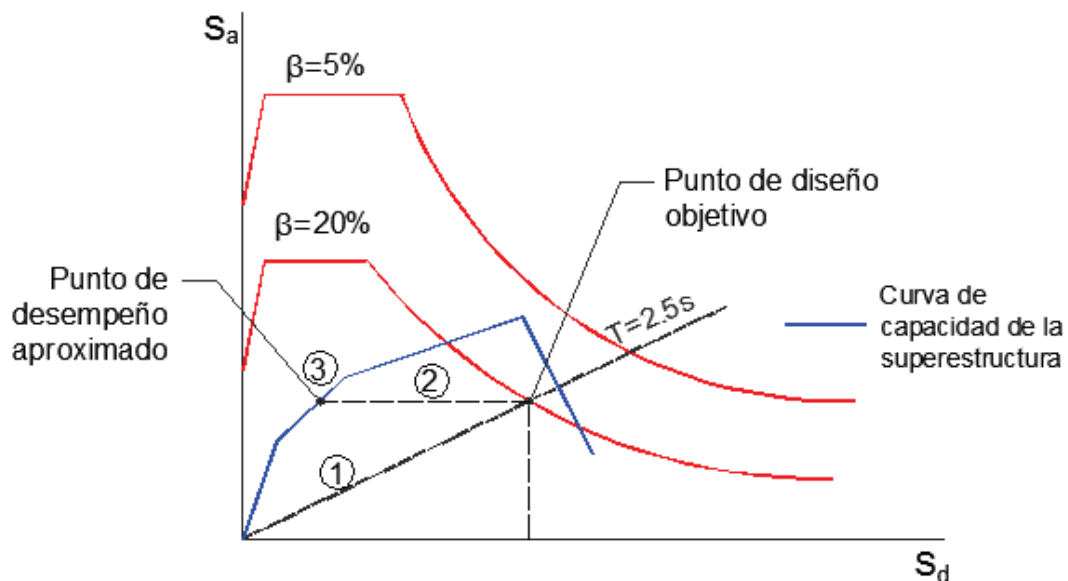
Fuente: Evelyn Tipanluisa

En la figura anterior, la curva ABCDE representa el espectro de capacidad de la estructura original sin aislamiento sísmico mientras la curva AA'B'C'D'E' representa la curva de capacidad de la estructura aislada. Las resistencias de fluencia y última de la estructura permanecen sin cambios (punto B-B' y D-D'); sin embargo, los desplazamientos para dichas resistencias se ven incrementados debido a la contribución del sistema de aislación. La distancia entre el punto de

desempeño y punto intersección sobre la curva de ABCDE, representa el desplazamiento sufrido por el aislador.

La mayoría de edificaciones asiladas sísmicamente tienen un período efectivo que varía entre 2s y 3s y ratio de amortiguamiento efectivo que varía entre 15% y 25%. Por tanto, para realizar un diseño preliminar de la aislación de la base es conveniente asumir que la estructura asilada en la base tendrá un período efectivo de 2.5s y un amortiguamiento efectivo del 20%. Superponiendo el espectro de capacidad de la estructura sin aislamiento con la curva de demanda para el 20% de amortiguamiento efectivo, es posible evaluar la factibilidad y requerimientos de diseño del sistema de aislación. Esto se ilustra en la siguiente figura:

FIGURA 4.15: Prediseño de estructura aislada mediante el Método Espectro Capacidad



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

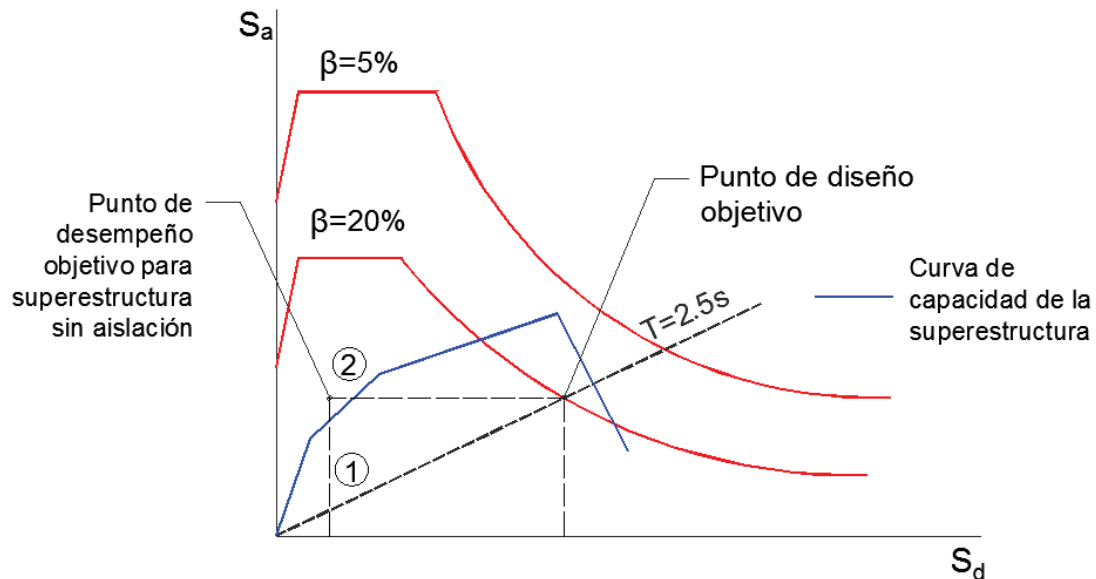
Según la figura anterior el prediseño de una estructura aislada mediante el método del espectro-capacidad, se puede resumir en los siguientes pasos:

- Superponer el espectro de capacidad de la estructura sin aislar con espectro de demanda al 20% de amortiguamiento.

- Dibujar la línea radial que representa el período de 2.5s. Esta línea tendrá una pendiente igual a 0.0164 g/in. La intersección de la línea $T=2.5s$ con el espectro de demanda al 20% de amortiguamiento, nos da un el punto de desempeño objetivo para el diseño preliminar de la estructura aislada.
- Una vez el punto de desempeño objetivo es conocido, se puede hallar el punto de desempeño estructural para la superestructura. Éste se obtiene dibujando una línea horizontal por el punto de desempeño objetivo hasta intersectar el eje “y”. La intersección de esta línea con la curva de capacidad de la estructura determina el punto de desempeño estructural para la estructura aislada. El resultado puede ser aceptable para el nivel de desempeño requerido para el proyecto o no. Si no cumple con un nivel de desempeño aceptable, entonces el sistema de aislación puede ser una estrategia no apropiada y por tanto es necesario realizar una mejora adicional de rigidez y resistencia en la estructura.

Para determinar la cantidad de rigidez y resistencia requerida, es necesario analizar la curva de capacidad de la estructura sin aislar para determinar el desplazamiento espectral máximo, asociado con un nivel de desempeño estructural aceptable. Para ello se traza un línea vertical por desplazamiento espectral requerido, la intersección de ésta con la horizontal trazada por el punto de desempeño objetivo para $T=2.5s$ y $\beta=20\%$, definen el punto de desempeño objetivo para la estructura aislada, independientemente del sistema de aislación. La FIGURA 4.16 ilustra el procedimiento descrito anteriormente y se puede apreciar que se asume que el sistema de aislación no permitirá que la superestructura experimente fluencia en ninguno de sus elementos.

FIGURA 4.16: Determinación de rigidez y resistencia requerida para estructuras aisladas



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Hallado el punto de desempeño objetivo para la superestructura se tiene información de la rigidez y resistencia adicional que necesita la estructura independientemente del sistema de aislación. La línea radial trazada desde el origen hasta el punto de desempeño objetivo de la superestructura representa el período de la estructura aislada.

- El desplazamiento de diseño para los aisladores se obtiene como la diferencia entre de desplazamientos espectrales en el punto de desempeño objetivo y punto de desempeño estructural, revertiendo la transformación ADRS. Las estructuras aisladas en la base se comportan casi como sistemas ideales de un grado de libertad. Por tanto, el factor de participación modal y la contribución de la masa modal para estructuras aisladas en la base es muy cercana al uno; como resultado de esta característica para una primera aproximación, los desplazamientos espectrales pueden ser tomados como desplazamientos sin necesidad de deshacer la transformación ADRS.
- El cortante basal estimado se obtiene de la siguiente ecuación:

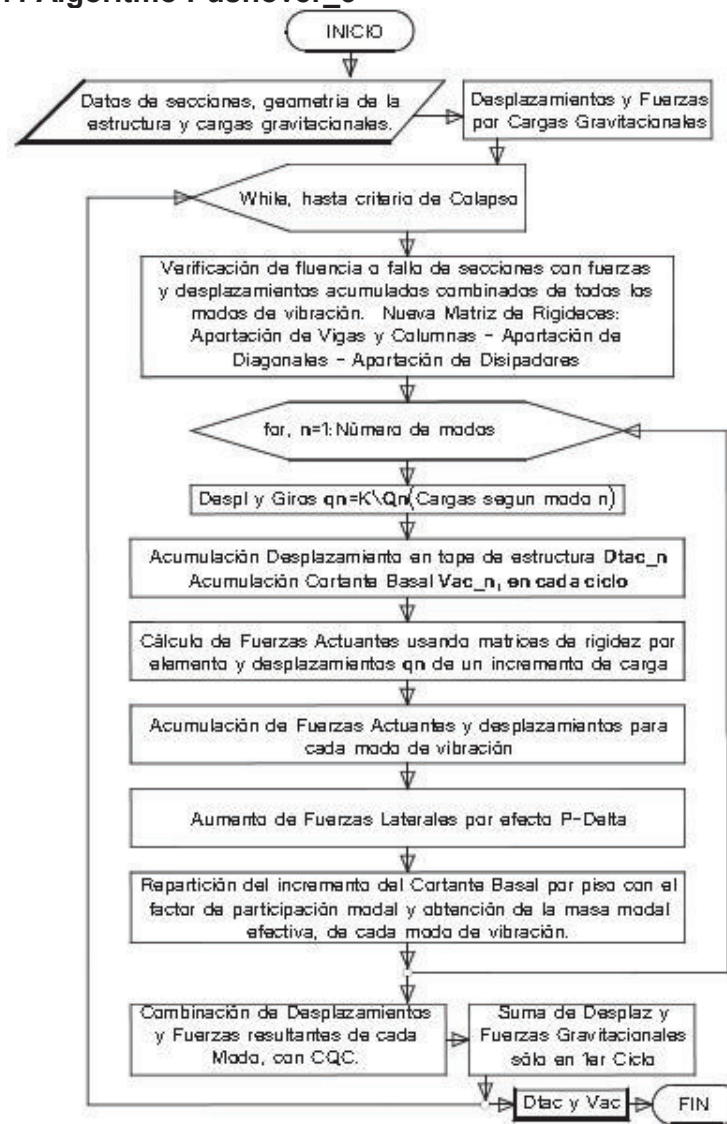
$$V = S_{a20\%} W \quad (4.20)$$

Donde W es el peso sísmico efectivo de la estructura

4.4. ALGORITMO PUSHOVER PARA PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

A continuación se indica el algoritmo desarrollado en MATLAB para el análisis de pórticos planos mediante el Método del Espectro Capacidad. A diferencia del Pushover Multimodal de Chopra, en el cual se evalúa cada modo de vibración por separado, en el algoritmo "Pushover_3" se combinaba el aporte de cada modo en cada intervalo; para más detalles se recomienda revisar (Mora, 2015).

FIGURA 4.17: Algoritmo Pushover_3

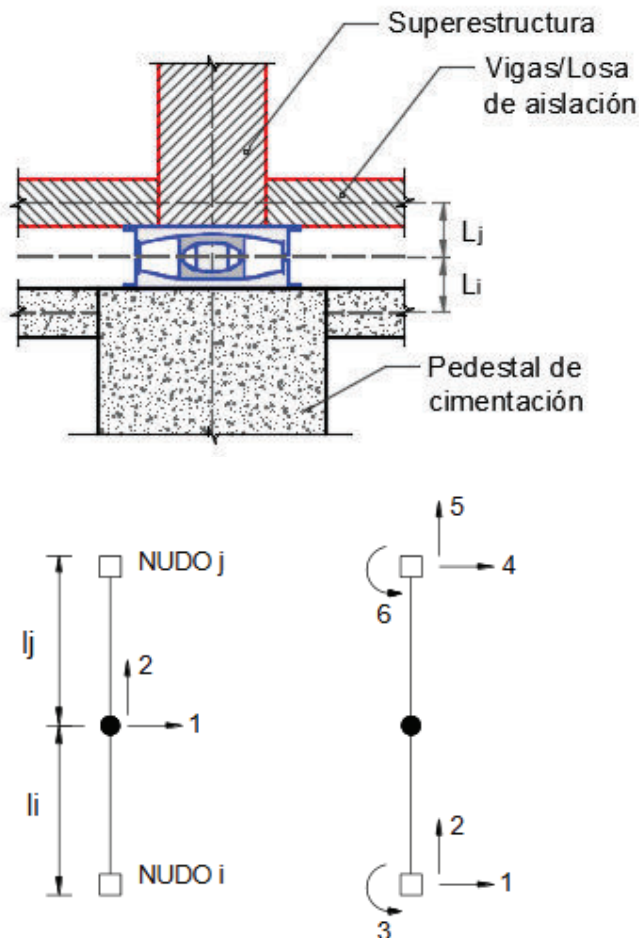


Fuente: (Mora, 2015)

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

El algoritmo indicado en la FIGURA 4.17 fue modificado para tener en cuenta los elementos aisladores cuya modelización se realizó de acuerdo a la FIGURA 4.18, en la cual se observa: las coordenadas en el centro de gravedad del aislador denominadas coordenadas locales (a) y las coordenadas globales (b).

FIGURA 4.18: Grados de libertad de un elemento aislador FPS en coordenadas locales y globales



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Donde "1" y "2" son los grados de libertad horizontal y vertical respectivamente; L_i, L_j son las distancias verticales entre el centro de gravedad del aislador y los nodos i y j (i = centro de gravedad de la cimentación y j = centro de gravedad de la viga de cimentación del sistema de aislamiento).

Las distancias L_i, L_j , sirven para hallar la matriz cinemática o matriz de paso T y con ella encontrar la matriz de rigidez en coordenadas globales. (Almazán, 2001).

Sea la matriz T:

$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & L_i & 1 & 0 & L_j \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Sea k_0 la matriz de rigidez del elemento aislador dada por:

$$k_0 = \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_v \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Donde:

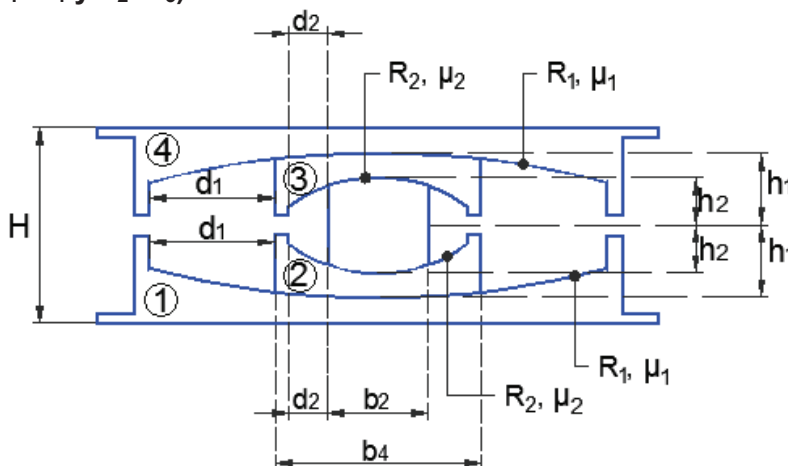
- k_v es la rigidez vertical que se halla mediante:

$$k_v = \frac{EA}{H} \quad (4.23)$$

Donde $A = \frac{\pi b_4^2}{4}$ siendo b_4 el diámetro exterior del dispositivo deslizante articulado,

H es la altura total del aislador y E es módulo de elasticidad del material del dispositivo deslizante rígido, como se indica en la FIGURA 4.19.

FIGURA 4.19: Parámetros para el cálculo de k_v y del modelo de histéresis del aislador triple péndulo “convencional” ($R_1=R_4 \gg R_2=R_3$, $\mu_2= \mu_3 < \mu_1= \mu_4$, $d_1=d_4$ y $d_2=d_3$ y $h_1=h_4$ y $h_2=h_3$)

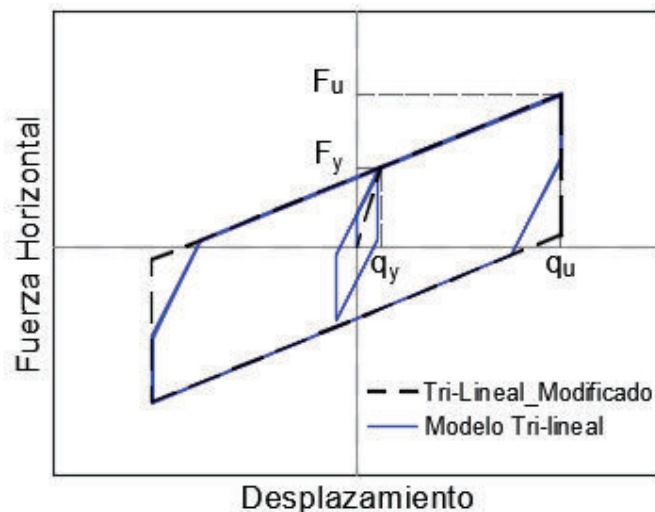


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

- k_h es la rigidez horizontal obtenida del modelo de histéresis del aislador. En el programa desarrollado, se considera el diagrama de histéresis indicado

la FIGURA 4.20, como se puede observar se trata del Modelo Tri-lineal pero como que fuera bilineal.

FIGURA 4.20: Modelo Tri-lineal_Modificado



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Donde el punto de fluencia F_y está definido por la fuerza máxima y desplazamiento máximo de la fase 1 y el punto de máxima fuerza F_u por la máxima fuerza y desplazamiento de la fase 2. De tal manera que las ecuaciones que definen el modelo bilineal son:

$$q_y = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{2,eff} \quad (4.24)$$

$$F_y = \frac{W}{2R_{2,eff}}q + \mu_2 W \quad (4.25)$$

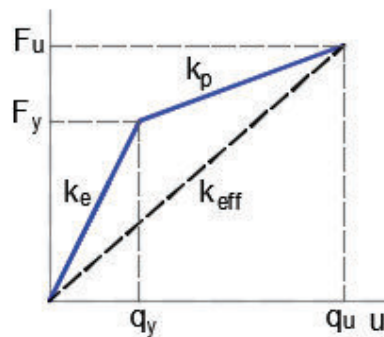
$$q_u = q_y + 2d_1^* \quad (4.26)$$

$$F_u = \frac{W}{2R_{1,eff}}(q - q_y) + \mu_1 W \quad (4.27)$$

Con $R_{i,eff} = R_i - h_i$ y $q_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i}$. Es importante destacar que la fase 3 no se considera en el estudio y que corresponde al caso de que el aislador interior llega a los topes exteriores, con un mayor desplazamiento lateral; de tal manera que se está trabajando con un modelo conservador debido a que el desplazamiento último se considera el desplazamiento máximo de la fase 2 y no el de la fase 3. Falta indicar que W es el peso total que llega al aislador y q es el desplazamiento.

Para el análisis no lineal estático se ha considerado el modelo de la rigidez tangente, es decir se usará la rigidez elástica k_e y la rigidez plástica k_p , como se indican en la FIGURA 4.21.

FIGURA 4.21: Modelo constitutivo bilineal para el comportamiento del aislador FPS



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

$$k_e = \frac{F_y}{q_y} \quad (4.28)$$

$$k_p = \frac{F_u - F_y}{q_u - q_y} \quad (4.29)$$

También se podría trabajar con el modelo de la rigidez secante, dado por la rigidez efectiva, k_{eff} , dada por la ecuación que se indica a continuación:

$$k_{\text{eff}} = \frac{F_u}{q_u} \quad (4.30)$$

La matriz de rigidez del elemento aislador en coordenadas globales, k_3 , se halla de la siguiente manera:

$$k_3 = T^T k_0 T \quad (4.31)$$

Donde T y k_0 se definieron en las ecuaciones (4.21) y (4.22), respectivamente.

A continuación se indica la forma de trabajar con el programa desarrollado en MATLAB para **CEINCI-LAB**. En primer lugar se halla la curva de capacidad sísmica resistente del pórtico plano con y sin aisladores FPT, mediante un pushover multimodal y luego se obtiene la respuesta sísmica empleando el Método del Espectro de Capacidad. Las unidades de trabajo, tienen que ser consistentes, se recomienda trabajar en toneladas y metros.

a) Definición de las secciones de los elementos: vigas, columnas y aisladores FPT

Como primer paso se deben definir las secciones de los elementos estructurales: vigas, columnas y aisladores sísmicos 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 4.6 .

TABLA 4.6: Códigos de material y perfiles tipo

	TIPO DE MATERIAL	SECCIÓN TRANSVERSAL					
		Perfil tipo I	Perfil tipo H	Perfil Tubular Rectangular	Maciza rectangular	Maciza tipo L	Maciza tipo T
HORMIGÓN	2	-	-	-	1	1	1
ACERO	1	1	2	3	-	-	-
AISLADORES SÍSMICOS FPS	1.3	1					

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

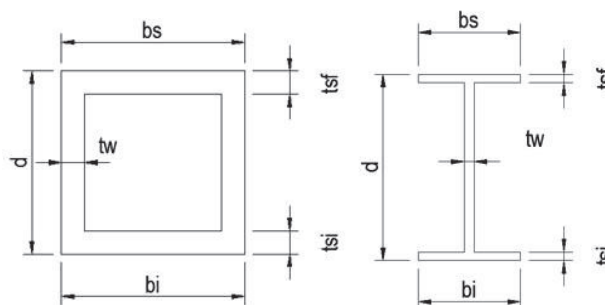
Para definir una **sección de acero**, sea una viga o columna, se utilizarán los campos indicados en la TABLA 4.7. En la FIGURA 4.22 se indica las secciones transversales consideradas, con su respectiva nomenclatura.

TABLA 4.7: Datos para describir una sección de una viga o columna de acero

Nombre de la sección	=	Tipo de material	f_y	f_u	E_y	Tipo de sección	d	t_w	b_s	b_i	t_{fs}	t_{fi}
A definir por el usuario	=	Según TABLA 4.6	Límite elástico del acero	Límite de fluencia del acero	Módulo de Young	Según TABLA 4.6	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

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

FIGURA 4.22: Secciones transversales consideradas, para elementos de acero



Elaborado por Evelyn Tipanluisa

La información para definir las secciones de las vigas y columnas de los **elementos de hormigón armado**, se indican en la TABLA 4.8 y en la FIGURA 4.23

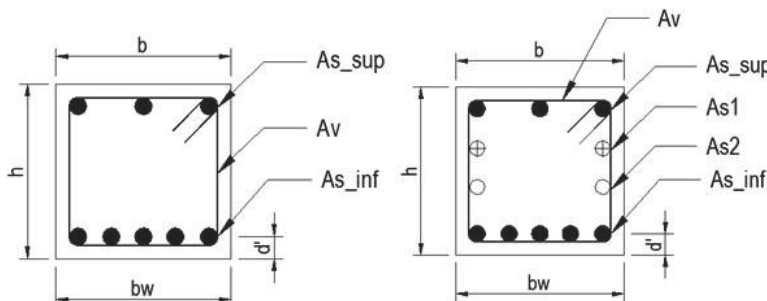
TABLA 4.8: Datos para describir una sección de hormigón

Nombre de la sección	=	Tipo de material	f'_c	E_y	f_y	Tipo de sección	h	b	b_w	t_f
A definir por el usuario	=	Según TABLA 4.6	Resistencia del hormigón	Módulo de Young del acero de refuerzo	Resistencia del acero de refuerzo	Según TABLA 4.6	Alto de la sección	Ancho de la sección	Espesor del alma	Espesor de la alas

d'	A_{s_sup}	A_{s_inf}	Stirrup separation	A_v	A_{s1}
Recubrimiento o alto efectivo a compresión	Área de acero superior	Área de acero inferior	Separación de estribos	Área de las ramas de estribos	Área de acero en el medio de la sección en el caso de columnas

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

FIGURA 4.23: Nomenclatura de vigas (izquierda) y columnas (derecha) de hormigón armado.



Elaborado por Evelyn Tipanluisa

Los programas de **CEINCI-LAB** fueron desarrollados en esta fase de estudio únicamente para aisladores sísmicos tipo Triple Péndulo de Fricción FTP. El **aislador sísmico vendrá definido** por la información indicada en la TABLA 4.9.

TABLA 4.9: Datos para describir un aislador triple péndulo de fricción

Nombre de la sección	=	Tipo de material	Tipo de sección	F_y	q_y	F_u	q_u	L_i	L_j	k_v
A definir por el usuario	=	Según TABLA 4.6	Según TABLA 4.6	Límite elástico. Ecuación (4.25)	Desplaz. elástico. Ecuación (4.24)	Límite plástico. Ecuación (4.27)	Desplaz. asociado al límite plástico. Ecuación (4.26)	FIGURA 4.20	FIGURA 4.20	Rigidez vertical del aislador. Ecuación (4.23)

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

b) Asignación de las secciones a los elementos de la estructura

Una vez asignada la numeración a vigas y columnas 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:

TABLA 4.10: “Table 1”

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

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

c) Generación de los elementos de la estructura

Para la generación de la matriz de rigidez y del vector de cargas generalizadas los datos que se deben ingresar, se resumen a continuación. Primero se debe indicar el número de pisos np y el número de nudos restringidos nr . Luego para generar los elementos se debe crear una matriz con la información indicada en la TABLA 4.11.

TABLA 4.11: Datos para generar los elementos de un pórtico plano

<i>GEN</i>	=	<i>Nº del elemento</i>	<i>Nudo inicial</i>	<i>Nudo final</i>	<i>Nº de elementos a generar</i>	<i>Incremento en la numeración</i>	<i>Incremento de la numeración en el nudo inicial</i>	<i>Incremento de la numeración en el nudo final</i>
------------	---	------------------------	---------------------	-------------------	----------------------------------	------------------------------------	---	---

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

Para la creación de las coordenadas de los nudos, la información solicitada se indica en la TABLA 4.12.

TABLA 4.12: Datos para generar las coordenadas de los nudos

<i>NODE</i>	=	<i>Nº del nudo</i>	<i>Coord. X del nudo inicial</i>	<i>Coord. X del nudo final</i>	<i>Nudo final</i>	<i>Nº de nudos a generar</i>	<i>Incremento en la numeración</i>	<i>Incremento de la longitud en X</i>	<i>Incremento de la longitud en Y</i>
-------------	---	--------------------	----------------------------------	--------------------------------	-------------------	------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

d) Asignación de carga

Se identifica al elemento cargado y se coloca la carga uniforme distribuida, como se indica en la **TABLA 4.13**

TABLA 4.13: Asignación de carga vertical.

<i>Fm</i>	=	<i>Nº del elemento cargado</i>	<i>Carga distribuida existente actuando sobre el elemento</i>
-----------	---	--------------------------------	---

Elaborado por Evelyn Tipanluisa

En la subrutina Pushover_3, es importante definir las variables:

- **DeltaV**, que es el incremento de cortante que se va a aplicar en cada ciclo de carga. Si es un valor muy bajo demandará demasiado tiempo de cálculo y si es un valor muy alto el cálculo será muy rápido pero no es preciso.

- **maxderg**, es otra variable a controlar, ya que es un valor que el usuario se impone, dependiendo del criterio de colapso adoptado. Un valor adecuado es 2 % para estructuras sin aisladores. Para estructuras con aisladores depende de la capacidad de desplazamiento de los aisladores, esta cantidad se divide para la altura del elemento aislador y se multiplica por 100, debido a que se está trabajando en porcentaje.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS NO LINEAL DE PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

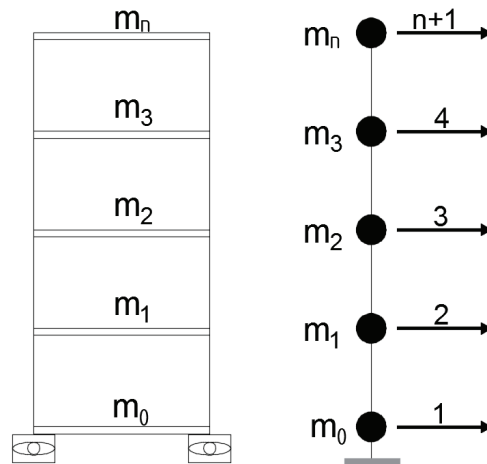
5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará el estudio de pórticos planos con aisladores FPS, mediante un procedimiento dinámico no lineal. Los principios, criterios de modelización y validación son similares a los expuestos para el método del espectro capacidad presentado en CAPITULO 4. La principal excepción es que el cálculo de la respuesta es llevado a cabo usando un análisis tiempo-historia a través del uso de registros de acelerogramas.

5.2. MARCO TEÓRICO

Para el análisis no lineal del pórtico plano de “n” pisos indicado a la izquierda de la FIGURA 5.1, se considera un modelo de masas concentradas. Como se puede observar a la derecha de la FIGURA 5.1, este modelo considera: que las vigas son axialmente rígidas y el resto de elementos son flexibles, por tanto se tiene un grado de libertad horizontal por piso y dos grados de libertad en cada uno de los nudos (desplazamiento vertical y rotación); y que las masas son puntuales y se concentran a nivel de cada piso.

FIGURA 5.1: Modelo de masas concentradas de un pórtico plano



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

El sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de sistemas de múltiples grados de libertad, como el representado en FIGURA 5.1, es el siguiente:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (5.1)$$

Donde:

\mathbf{M} = Matriz de masas ($n \times n$)

\mathbf{K} = Matriz de rigidez dependiente del tiempo ($n \times n$)

\mathbf{C} = Matriz de amortiguamiento ($n \times n$)

\mathbf{Q} = es el vector de cargas generalizadas

$\ddot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}$ son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente.

La solución de la ecuación (5.1) puede ser obtenida usando el Método iterativo de la β -Newmark o cualquier otro procedimiento numérico, para resolver las ecuaciones incrementales del movimiento. En este documento se resolverá el sistema de ecuaciones diferenciales del movimiento mediante el planteamiento espacio-estado (Aguilar R. , 2007). A continuación se indica un breve resumen del procedimiento:

Si se multiplica la ecuación (5.1) por la inversa de la matriz de masas, \mathbf{M}^{-1} , por la izquierda, se tiene:

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q} \quad (5.2)$$

Se define el vector de estado \mathbf{X} , como:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Reemplazando $\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}} = 0$ y (5.3) en (5.2) se tiene:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{r} \quad (5.4)$$

Donde:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

La solución del sistema representado por la ecuación (5.4) viene dada por la ecuación (5.7):

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_k + \mathbf{P}_1\mathbf{r}_{k+1} + \mathbf{P}_2(\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k) \quad (5.7)$$

Donde: el subíndice k , corresponde al instante de tiempo k y el subíndice $k+1$ al instante de tiempo $k+1$. Los valores de $\mathbf{A}, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ se indican en las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}^{\Delta t \mathbf{F}} \quad (5.8)$$

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{I}) \quad (5.9)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{F}^{-1} \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{P}_1 - \mathbf{A} \right) \quad (5.10)$$

En las ecuaciones (5.8) y (5.10), Δt es el incremento de tiempo con el cual se halla la respuesta en tiempo y que coincide con el incremento de tiempo con el cual se obtuvo el acelerograma.

Para hallar el vector de estado \mathbf{X} en el instante $k+1$, mediante la ecuación (5.7) se debe conocer el valor de \mathbf{X} en el instante k , el valor de la excitación en los instantes k y $k+1$.

5.3. ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS NO LINEAL DE PÓRTICOS PLANOS CON AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

Sea la ecuación (5.11) la solución de la ecuación (5.4):

$$\mathbf{X}(t) = \exp(\mathbf{F}t) \mathbf{X}_0 + \int_0^t \exp[\mathbf{F}(t-\tau)] * \mathbf{r}(\tau) * d(\tau) \quad (5.11)$$

Al discretizar la respuesta y considerando un incremento constante de tiempo, Δt , se puede encontrar la respuesta en un instante $t = (k+1)\Delta t$ en función del valor anterior para $t_0 = k\Delta t$. Con lo cual la ecuación (5.11) se reescribe como:

$$\mathbf{X}(k\Delta t + \Delta t) = \exp(\mathbf{F}\Delta t) \mathbf{X}(k\Delta t) + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \exp\{[(k+1)\Delta t - \tau] \mathbf{F}\} [\mathbf{r}(\tau)] d(\tau) \quad (5.12)$$

Se considera que la variación de la excitación \mathbf{r} entre el instante de tiempo $k\Delta t$ y el instante de tiempo $(k+1)\Delta t$ es lineal y el cambio de variable $\mu = (k+1)\Delta t - \tau \Rightarrow d\mu = -d\tau$, la ecuación (5.12) se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k\Delta t + \Delta t) = & \exp(\mathbf{F}\Delta t)\mathbf{X}(k\Delta t) + \\ & + \int_0^{\Delta t} \exp(\mu\mathbf{F}) \left[(\Delta t - \mu) \frac{\mathbf{r}(k\Delta t + \Delta t) - \mathbf{r}(k\Delta t)}{\Delta t} + \mathbf{r}(k\Delta t) \right] d\mu \end{aligned} \quad (5.13)$$

La expresión anterior se puede expresar de forma condensada como:

$$\mathbf{X}(k + 1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{P}_1\mathbf{r}(k + 1) + \mathbf{P}_2 [\mathbf{r}(k + 1) - \mathbf{r}(k)] \quad (5.14)$$

Donde los valores de $\mathbf{A}, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ fueron definidos anteriormente.

Como se puede observar en el desarrollo de la respuesta en el tiempo, el algoritmo de Espacio de Estado puede ser considerado como la generalización de la integral de Duhamel para varios grados de libertad. Dicho algoritmo fue programado en MATLAB (*rutina pse_n/2*) para encontrar la respuesta No lineal en el tiempo de un sistema de n grados de libertad ante una acción sísmica definida por el acelerograma.

El procedimiento paso a paso para la obtención de la respuesta en el tiempo de un sistema de múltiples grados de libertad sometida a un registro de aceleraciones sísmicas, se describe a continuación:

Paso 1:

Se define la geometría de la estructura y los grados de libertad. *Subrutina: Structure_Geom_2D_v2%Define structure geometry*

Paso 2:

Se definen las cargas gravitatorias sobre los elementos. *Subrutina: cg_data4*

Paso 3:

Se genera la matriz masas de acuerdo al modelo de masas concentradas indicado en la FIGURA 5.1. La matriz de masas, \mathbf{M} , tendrá una dimensión n x n, donde “n” es el número de pisos o número de grados de libertad horizontales. *Subrutina: masas*

Paso 4:

Se genera la matriz de rigidez global de la estructura teniendo en cuenta todos los grados de libertad (horizontales, verticales y giros) y la matriz del aislador TPF mediante las *subrutinas*: *krigidez_ASCE41_21* y *krigidez_isolator2*, respectivamente. Se ensamblan las matrices mencionadas y se obtiene la matriz de rigidez total.

Paso 5:

Se condensa la matriz de rigidez total a coordenadas laterales y se calcula los valores propios y los modos de vibración. *Subrutina*: *K_Modos*.

Paso 6:

Se genera la matriz de amortiguamiento, C, empleando el algoritmo de Wilson y Penzien (1972) de la siguiente forma:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (5.15)$$

$$C_i = \frac{2\xi_i W_{ni}}{M_i^*} (M\phi_i)(\phi_i^2 M) \quad (5.16)$$

$$M_i^* = \phi_i^2 M \phi_i \quad (5.17)$$

Siendo ϕ_i el modo de vibración i ; W_{ni} es la frecuencia natural del modo i ; ξ_i es el factor de amortiguamiento del modo i .

Subrutinas: *amortiguamiento2* y *Calc_zeta*.

Paso 7:

Para cada instante de tiempo, se encuentra el vector de cargas Q a partir de los datos del acelerograma para el cual se desea realizar el análisis sísmico.

Subrutina: *Mcargas*

Paso 8:

Se halla el vector de estado \mathbf{X}_{k+1} que contiene los desplazamientos laterales y las velocidades, q_a, \dot{q}_a respectivamente. Se halla el vector de desplazamientos y giros

q_b mediante $q_b = -K_{bb}^{-1}K_{ba}q_a$ y por último el vector $q = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix}$. *Subrutina: psnl2.*

Paso 9:

Se encuentran las fuerzas y momentos en cada uno de los elementos. Para ello, una vez se tienen las deformaciones en coordenadas globales \mathbf{p} se obtienen las acciones en los elementos en coordenadas globales \mathbf{PG} multiplicando la matriz de rigidez de miembro \mathbf{k} (matriz en coordenadas globales) por las deformaciones \mathbf{p} .

$$\mathbf{PG}^{(i)} = \mathbf{k}^{(i)}\mathbf{p}^{(i)} \quad (5.18)$$

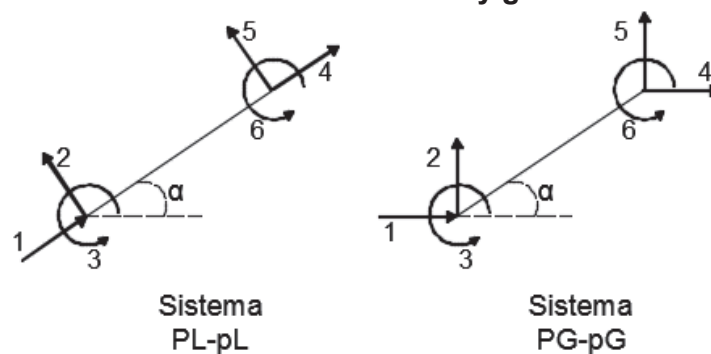
Se obtiene los las acciones de los elementos en coordenadas locales, por medio de la matriz de paso, T_{2-3} , mediante la siguiente expresión:

$$\text{Donde: } T_{2-3} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \text{ con } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ siendo } \alpha \text{ el ángulo indicado en}$$

$$\mathbf{PL} = T_{2-3}\mathbf{PG} \quad (5.19)$$

la FIGURA 5.2.

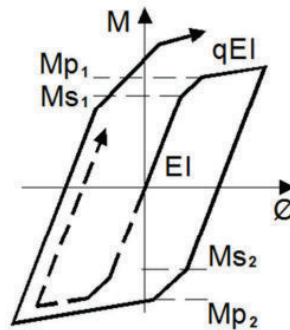
FIGURA 5.2: Sistema de coordenadas locales y globales



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

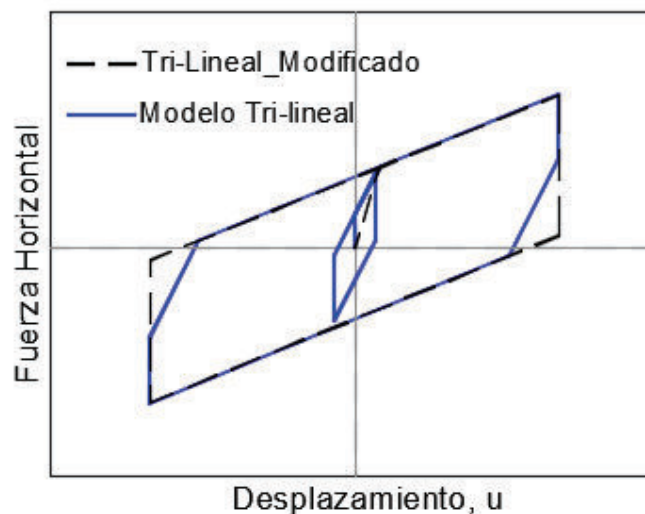
Paso 10:

Se comparan las acciones de los elementos obtenidos, **PL**, con las curvas de histéresis de los elementos. En la FIGURA 5.3 se indica el modelo constitutivo usado para la superestructura (elementos de acero), el cual contempla el efecto Bauschinger y el efecto de endurecimiento por deformación; para más detalles del modelo se recomienda revisar (Mora, 2015).

FIGURA 5.3: Modelo constitutivo para los elementos de acero

Fuente: (Mora, 2015)
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En la FIGURA 5.4 se indica el modelo constitutivo usado para los aisladores triple péndulo de fricción, se trata de una modificación al Modelo Tri-Lineal presentado por (McVitty & Constantinou, 2015)

FIGURA 5.4: Modelo Constitutivo para los aisladores triple péndulo de fricción

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Para el modelo Tri-lineal_Modificado el punto de fluencia F_y está definido por la fuerza máxima y desplazamiento máximo de la fase 1 y el punto de máxima fuerza F_u por la máxima fuerza y desplazamiento de la fase 2. De tal manera que las ecuaciones que definen el modelo bilineal son:

$$q_y = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{2,eff} \quad (5.20)$$

$$F_y = \frac{W}{2R_{2,eff}}q + \mu_2 W \quad (5.21)$$

$$q_u = q_y + 2d_1^* \quad (5.22)$$

$$F_u = \frac{W}{2R_{1,eff}}(q - q_y) + \mu_1 W \quad (5.23)$$

Con $R_{i,eff} = R_i - h_i$ y $d_1^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i}$. Es importante destacar que la fase 3 no se considera en el estudio y que corresponde al caso de que el aislador interior llega a los topes exteriores, con un mayor desplazamiento lateral; de tal manera que se está trabajando con un modelo conservador debido a que el desplazamiento último se considera el desplazamiento máximo de la fase 2 y no el de la fase 3. Falta indicar que W es el peso total que llega al aislador y q es el desplazamiento. Las rigideces elástica k_e y la rigidez plástica k_p , vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$k_e = \frac{F_y}{q_y} \quad (5.24)$$

$$k_p = \frac{F_u - F_y}{q_u - q_y} \quad (5.25)$$

Paso 11:

Como se puede observar el análisis no lineal de una estructura de múltiple grados de libertad, es mucho más complejo y emplea más tiempo que un análisis lineal pues para cada intervalo de tiempo es necesario resolver un problema estático equivalente: $K(t)\Delta X(t) = \Delta PL(t)$, lo que lo vuelve un proceso iterativo, para el cual se repetirán los pasos del 4 al 10.

La forma de usar el programa es la misma que la indicada para el método del Espectro de Capacidad del apartado 4.4, la única diferencia es que se debe cargar el acelerograma debidamente escalado.

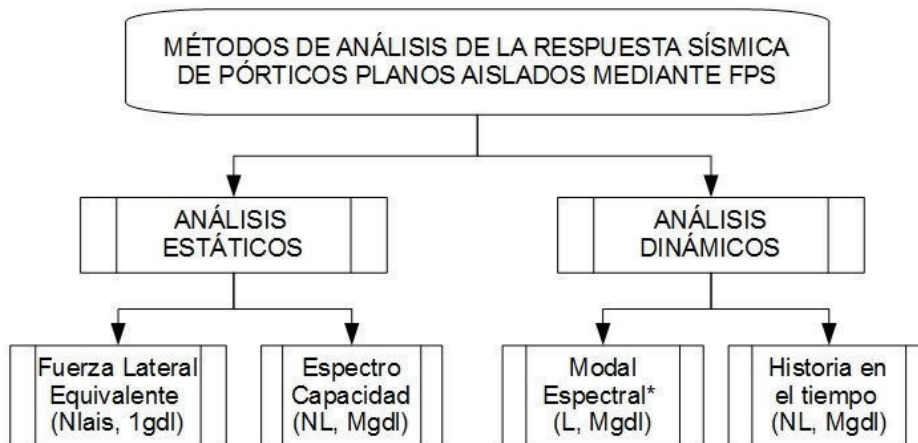
CAPÍTULO 6

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará el análisis de los desplazamientos que se producen en el sistema de aislación de una serie de pórticos planos, mediante los diferentes métodos explicados en los capítulos del 3 al 6. En la FIGURA 6.1, a manera de resumen general, se indican los diferentes métodos que se usarán para la obtención y posterior comparación de resultados.

FIGURA 6.1: Métodos de análisis de pórticos planos aislados con FPS



*No es alcance de este trabajo de titulación

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El Nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, indicado en la FIGURA 6.2, estará formado por ocho bloques estructurales, cada uno de los cuales contará con aisladores de tercera generación-triple péndulo de fricción.

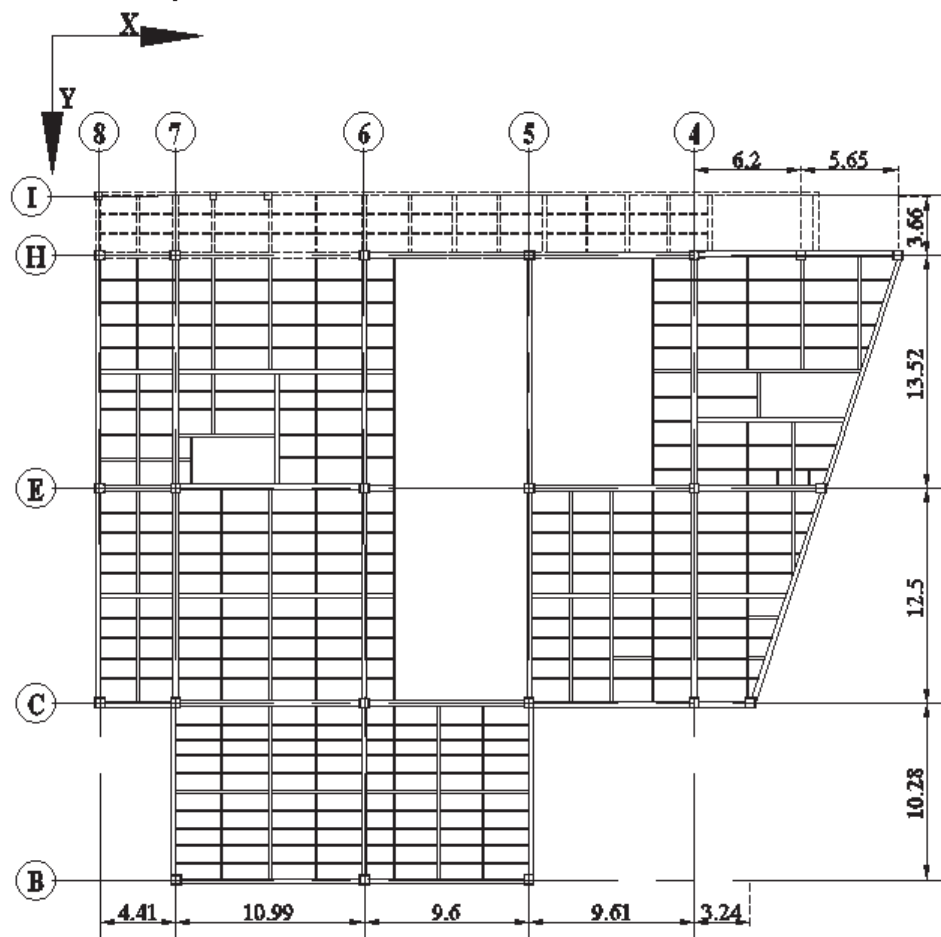
FIGURA 6.2: Nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En este trabajo de titulación se estudiará los pórticos que forman el bloque estructural N°1. El bloque estructural N°1 está conformado por 5 pórticos en sentido "X" y 4 pórticos en sentido "Y" como se indica en la FIGURA 6.3 y FIGURA 6.4.

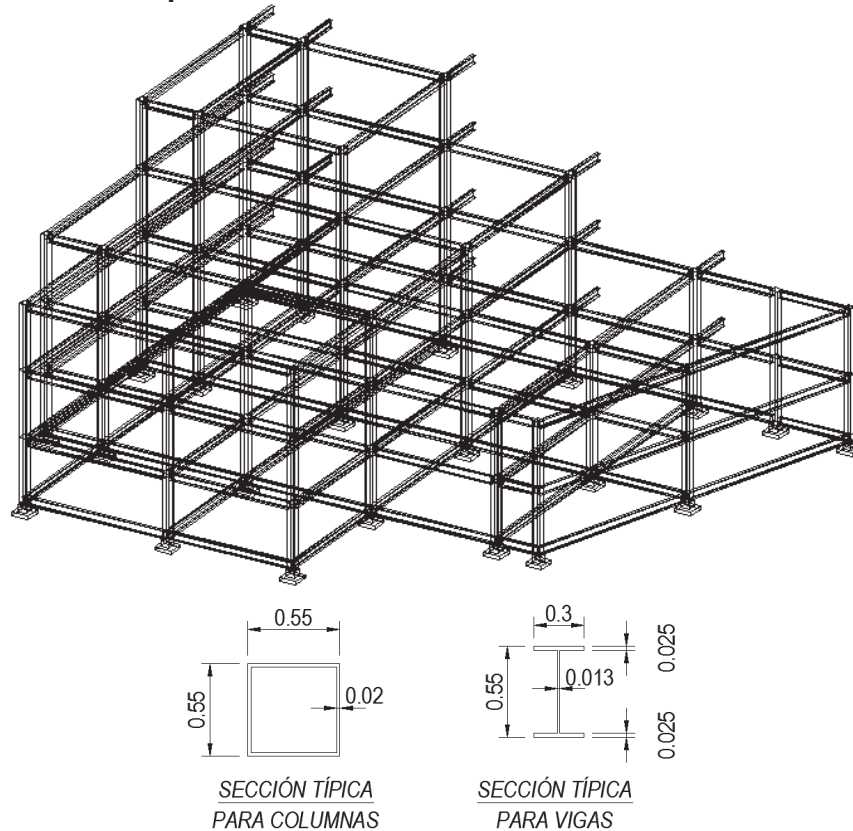
FIGURA 6.3: Bloque Estructural N° 1



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La superestructura está formada por vigas y columnas de acero. Las columnas son tubulares cuadradas de 550 mm de lado y un espesor de 20 mm. Las vigas son tipo 'I' de 550/300/25/12.5 (d, bs=bi, ts=ti, tw). El acero utilizado es A572. El modelo 3d de la superestructura y las características de las secciones de sus elementos se indican en la FIGURA 6.4.

FIGURA 6.4: Imagen 3D del Bloque Estructural N° 1 y de las secciones de vigas y columnas típicas.

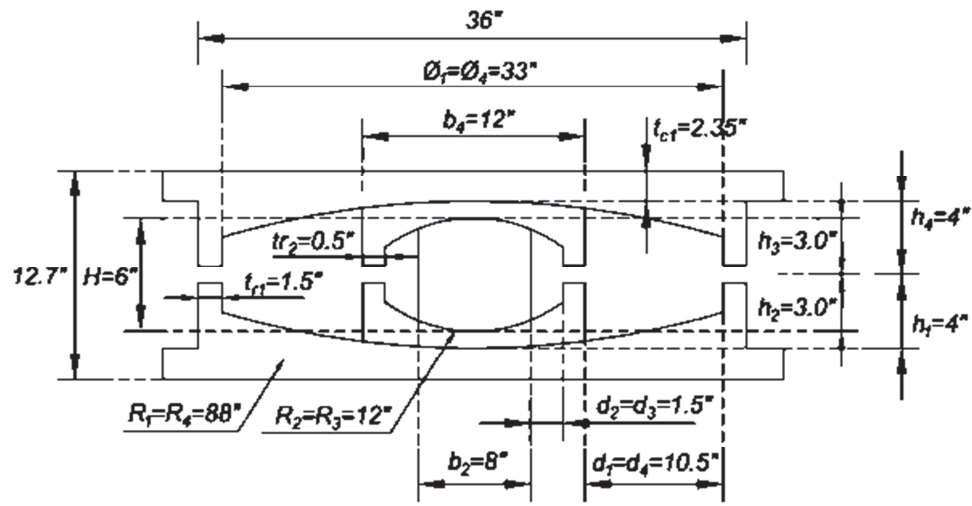


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La carga muerta considerada para el análisis es $D = 0.8 \frac{T}{m^2}$ y la carga viva $L = 0.25 \frac{T}{m^2}$. Para el análisis sísmico se considera una carga de $D + 0.25L$. La carga vertical actuante se considerará uniformemente distribuida y del mismo valor en cada piso.

En el Bloque N°1, se van a colocar sobre los pedestales de los plintos el aislador de triple péndulo de fricción indicado en la FIGURA 6.5.

FIGURA 6.5: Geometría de aislador de triple péndulo de fricción. ftp8833/12-12/8-6



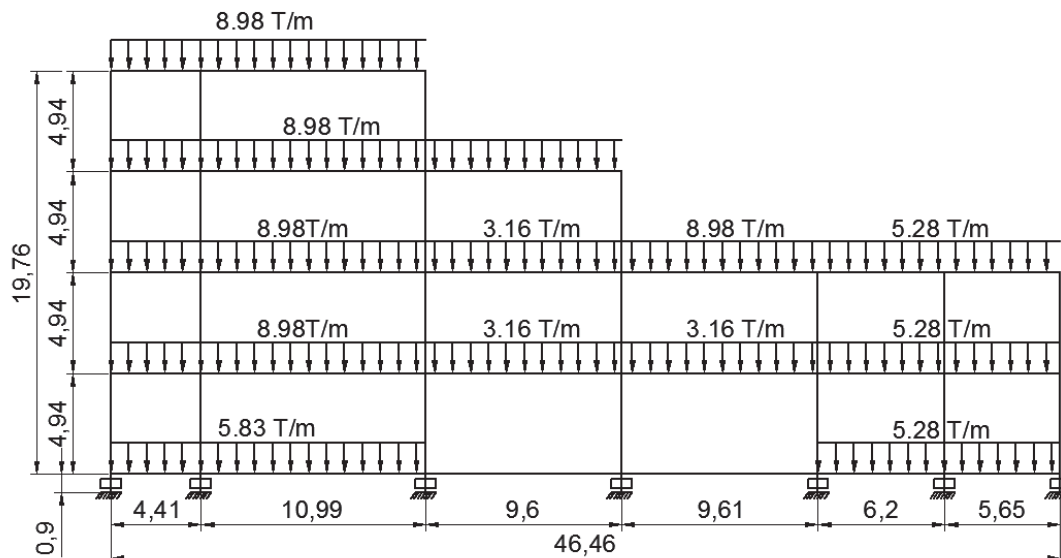
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Los coeficientes fricción utilizados, son: $\mu_1 = \mu_4 = 0.07$; $\mu_2 = \mu_3 = 0.01$, para propiedades nominales. En la estructura con aisladores sísmicos se va a construir sobre los aisladores una losa de aislación de las mismas características de la losa del primer piso, tal como se indica en la FIGURA 6.4.

Según las características antes mencionadas, los diferentes pórticos que formarán parte del análisis se indican a continuación:

FIGURA 6.6: Bloque 1 – Pórtico H

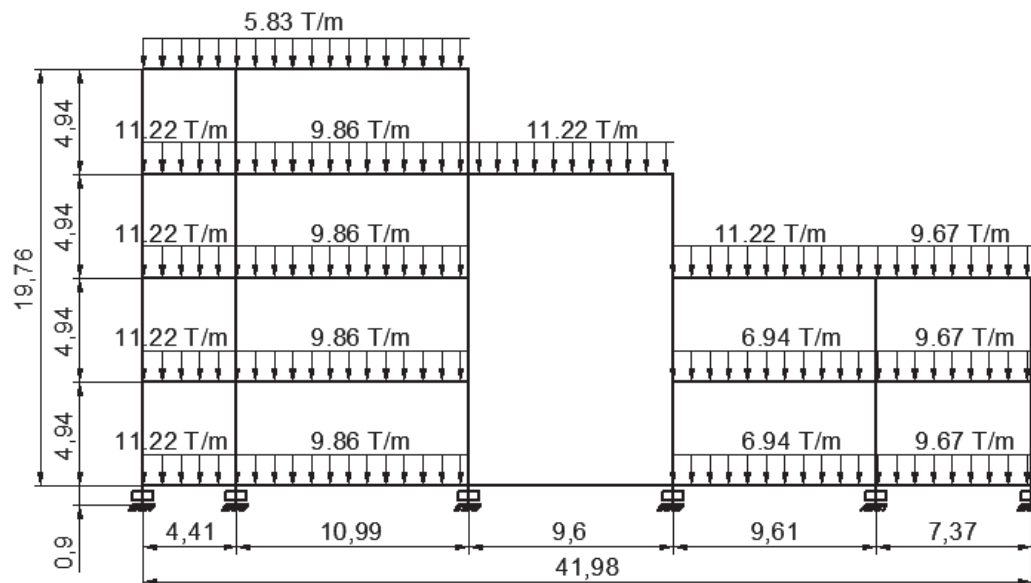
BLOQUE 1 - PÓRTICO H



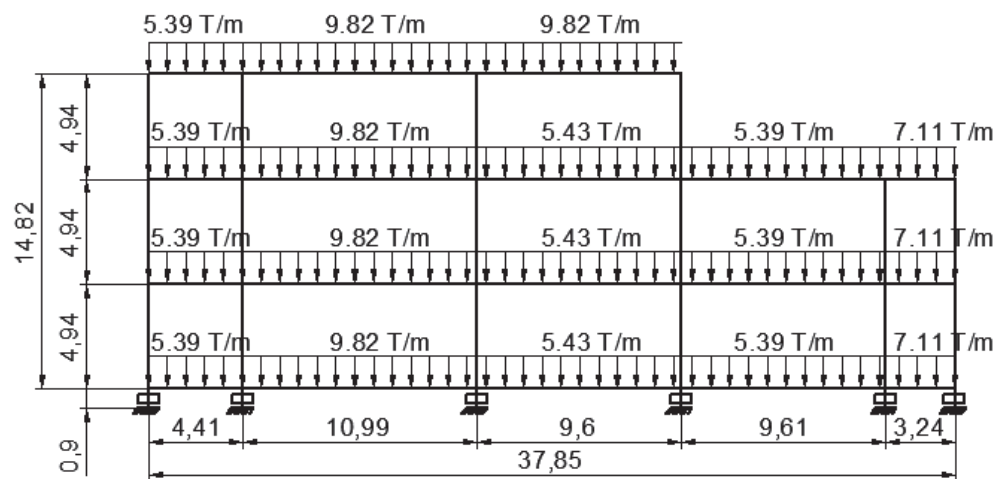
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.7: Bloque 1 – Pórtico E

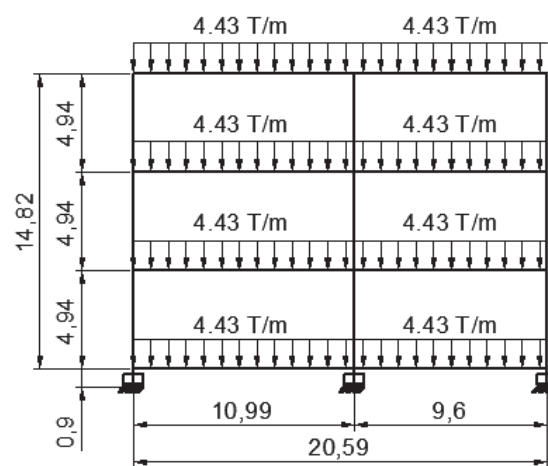
BLOQUE 1 - PÓRTICO E



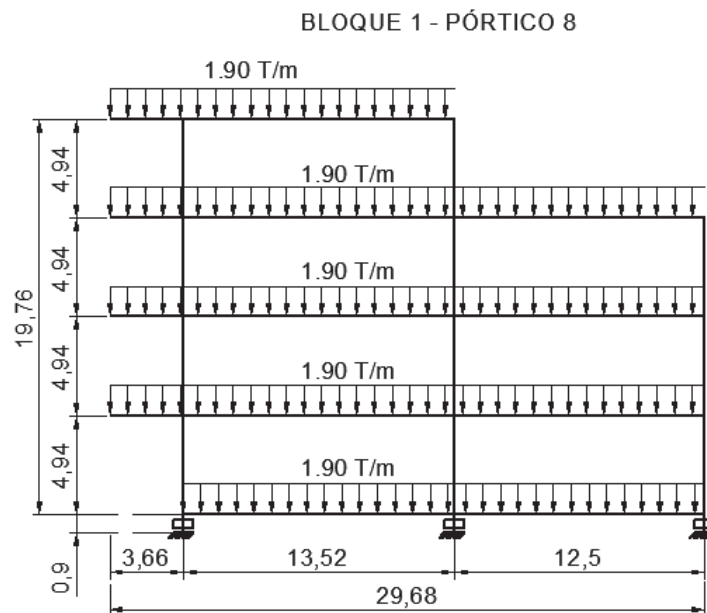
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.8: Bloque 1 – Pórtico C**BLOQUE 1 - PÓRTICO C**

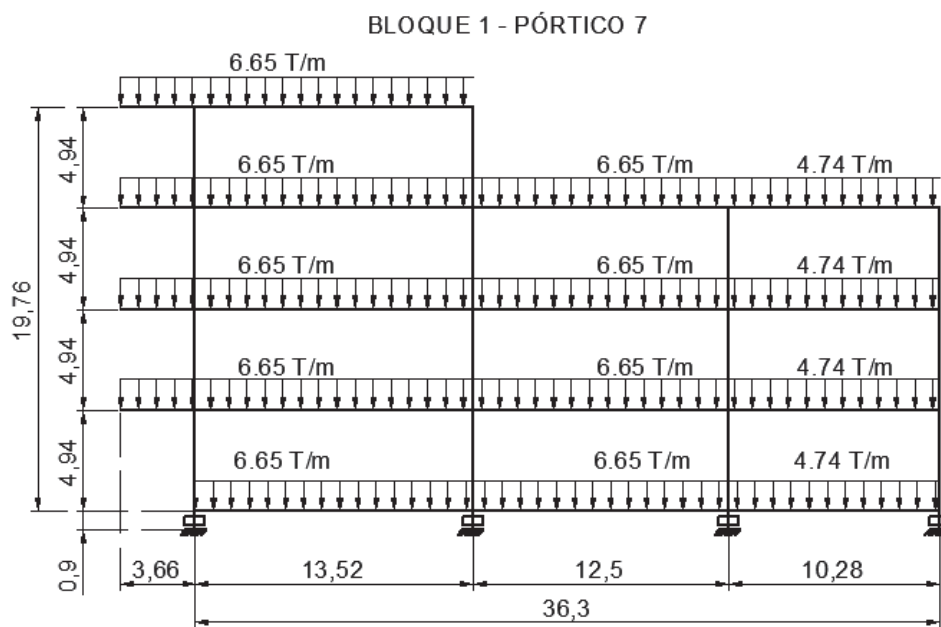
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.9: Bloque 1 – Pórtico B**BLOQUE 1 - PÓRTICO B**

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.10: Bloque 1 – Pórtico 8

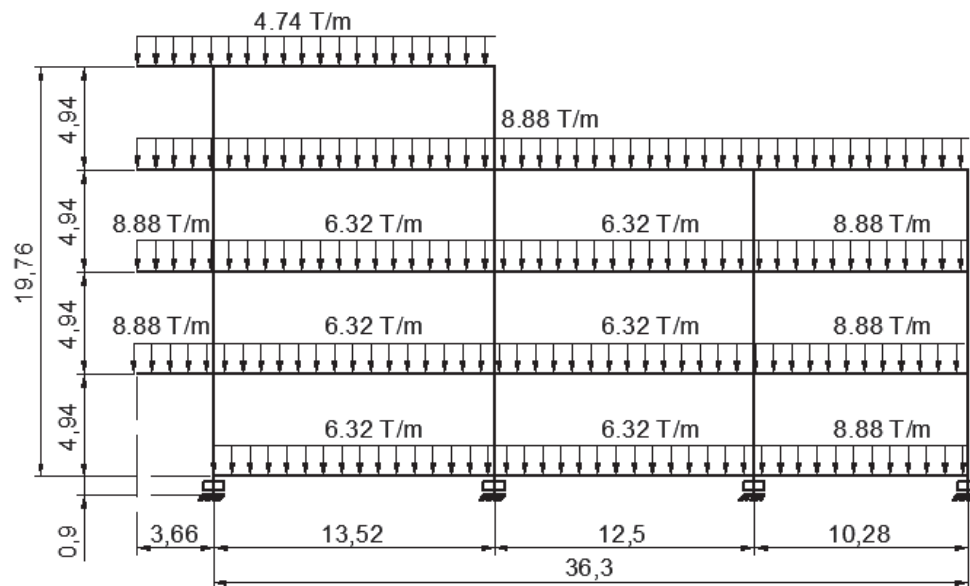
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.11: Bloque 1 – Pórtico 7

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.12: Bloque 1 – Pórtico 6

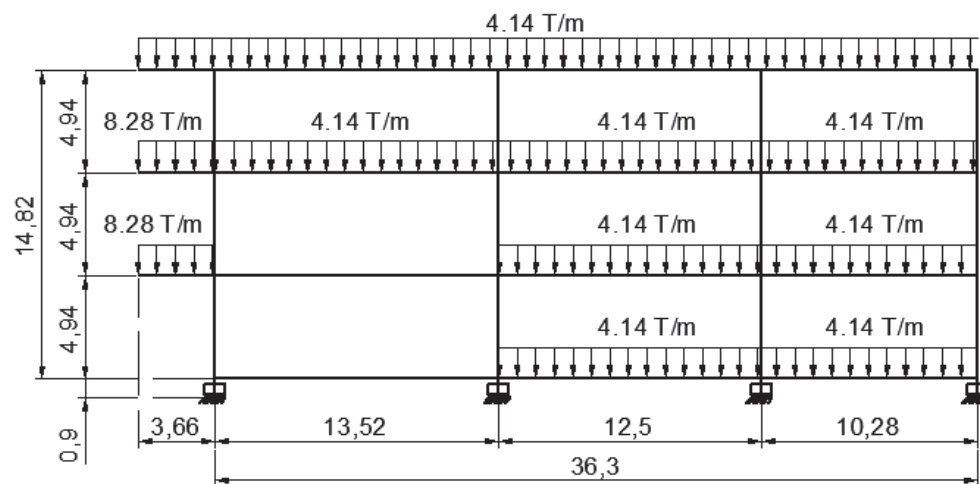
BLOQUE 1 - PÓRTICO 6



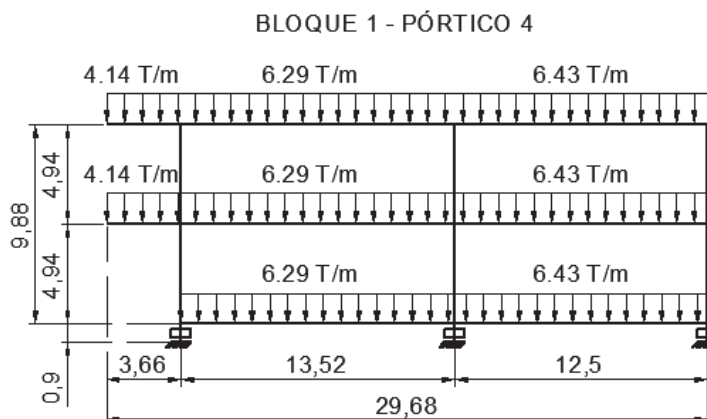
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.13: Bloque 1 – Pórtico 5

BLOQUE 1 - PÓRTICO 5



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.14: Bloque 1 – Pórtico 4

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Los pesos que llegan a cada aislador se resumen en la **TABLA 6.1**.

TABLA 6.1: Pesos que llegan a cada aislador

COLUMNA	Peso (T)
H8	91.04
H7	304.77
H6	309.02
H5	150.06
H4	106.85
H2	84.46
H1	54.67
E8	110.23
E7	330.39
E6	351.31
E5	169.15
E4	255.63
E2a	93.71
C8	47.55
C7	263.47
C6	341.90
C5	195.51
C4	112.25
C3	34.57
B7	97.42
B6	182.50
B5	86.76

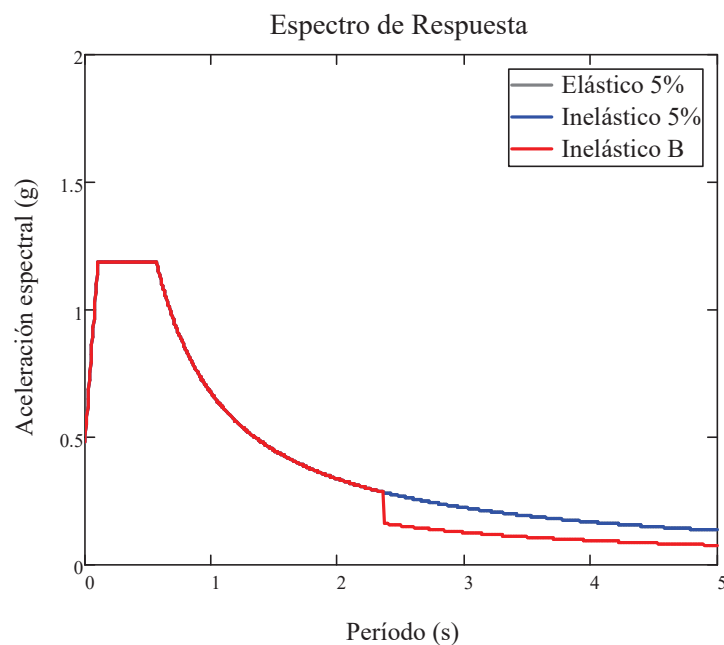
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

6.3. DESCRIPCIÓN DE LA CARGA SÍSMICA

En el diseño del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, se considerará el espectro de diseño denominado DBE (de sus siglas en inglés Design Basis Earthquake), que corresponde al prescrito en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC_SE_DS, para San Rafael ($z=0.4 \rightarrow$ zona 5) en un perfil de suelo "C" (Bonifaz 2015). Para realizar el análisis para el sismo máximo considerado MCE, bastaría con multiplicar el espectro DBE por 1.4 (Constantinou et al. 2016).

Se considera para la estructura un factor de importancia $I=1$, un factor de reducción $R=1$ ($3/8R$ con un valor mínimo de 1 y máximo de 2 de acuerdo a lo especificado en el ASCE 7-16). Dado que el análisis es plano y los pórticos son regulares se tomará unos coeficiente de configuración en planta y elevación de $\phi_p = 1, \phi_e = 1$ respectivamente. A partir de estos datos se obtiene el espectro de diseño mostrado en la FIGURA 6.15 como Inelástico B, el cual fue usado para el análisis Modal-Espectral, mientras que el Inelástico 5% fue reducido según el factor B correspondiente, para los demás métodos.

FIGURA 6.15: Espectros usados para el análisis



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Como se puede observar en la figura anterior el espectro de diseño se reduce a partir del período efectivo del sistema de aislación (0.8 Teff) y de acuerdo al amortiguamiento efectivo del sistema de aislación. Del espectro de diseño (Inelástico B), se obtiene la aceleración espectral para el período de 1 segundo, $SD1=0.672$, dato necesario para el uso de los métodos simplificados expuestos en el CAPITULO 4.

6.4. RESULTADOS DE LOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISIS DE AISLADORES TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

Para aplicación de los métodos simplificados es necesario ingresar las propiedades geométricas y friccionales de los aisladores, el peso que llega al aislador y la aceleración espectral para 1 segundo (SD1) y se obtiene como resultado el desplazamiento en el sistema de aislación, el período efectivo y el factor de amortiguamiento. En la FIGURA 6.16 se presenta el código del programa utilizado para la obtención de los datos mencionados anteriormente y en la **TABLA 6.2** el resumen de resultados obtenidos.

FIGURA 6.16: Código usado en MATLAB para la aplicación de los métodos simplificados

```

                                Método EFL Modelo Bilineal del ASCE 7-16
1      %APLICACIÓN PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE (ELF) con el
2      %MODELO BILINEAL DEL ASCE 7-16
3
4 -    clear
5 -    clc
6      % Datos de aislador
7 -    R1=223.5; % Radio de curvatura de placa 1 en cm
8 -    h1=10.16; % Altura del aislador a placa 1 en cm
9 -    u1=0.07; % Coeficiente de friccion de placa 1
10     %Pesos que llegan a los aisladores
11 -    W=[1100.86;1310.43;995.26;366.69;248.82;996.05;
12         1184.74;601.49;474.73]; % Peso en Ton. que llega al aislador
13     %Espectro de respuesta elástico
14 -    SD1=0.672; %Aceleración espectral para 1 segundo
15 -    [Resultados_ASCE_BIL]=ELF_ASCE716_BILINEAL_I(R1,h1,u1,W,SD1)

```

Método EFL Modelo de las 3 Fases ASCE 7-16

```

1  %APLICACIÓN PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE (ELF) con el
2  %MODELO DE LAS 3 FASES DE CONSTANTINUIO ASCE 7-16
3  % Datos de aislador
4  - clear
5  - clc
6  - R1=223.5; % Radio de curvatura de placa 1 en cm
7  - R2=30.5; % Radio de curvatura de placa 2 en cm
8  - h1=10.16; % Altura del aislador a placa 1 en cm
9  - h2=7.62; % Altura de aislador a placa 2 en cm
10 - u1=0.07; % Coeficiente de fricción de placa 1
11 - u2=0.01; % Coeficiente de fricción de placa 2
12 - d1=26.67; %capacidad de desplazamiento de placa 1 en cm
13 - d2=3.81; %capacidad de desplazamiento de placa 2 en cm
14 - %Pesos que llegan a los aisladores
15 - W=[1100.86;1310.43;995.26;366.69;248.82;996.05;
16 -     1184.74;601.49;474.73]; % Peso en Ton. que llega al aislador
17 - %Espectro de respuesta elástico
18 - SD1=0.672; %Aceleración espectral para 1 segundo
19 - [Resultados_ELF_3FASES]=EFL_ASCE716_3FASES_i2(R1,R2,h1,h2,u1,u2,d1,d2,W,SD1)

```

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

TABLA 6.2: Resultados del método simplificado del ASCE 7-16 modelo bilineal

RESULTADOS ELF_BILINEAL					
Pórtico	Wtotal (t)	Desplazamiento en el sistema de aislación (m)	Keff (t/m)	Beta (%)	Período (s)
H	1100.86	0.268224108	546.318169	33.5967643	2.84911549
E	1310.43	0.268224108	650.320402	33.5967643	2.84911549
C	995.26	0.268224108	493.912596	33.5967643	2.84911549
B	366.69	0.268224108	181.975373	33.5967643	2.84911549
8	248.82	0.268224108	123.48063	33.5967643	2.84911549
7	996.05	0.268224108	494.304645	33.5967643	2.84911549
6	1184.74	0.268224108	587.944868	33.5967643	2.84911549
5	601.49	0.268224108	298.49837	33.5967643	2.84911549
4	474.73	0.268224108	235.591832	33.5967643	2.84911549

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

TABLA 6.3: Resultados del método simplificado del ASCE 7-16 modelo de las 3 fases

RESULTADOS ELF_3Fases					
Pórtico	Wtotal (t)	Desplazamiento en el sistema de aislación (m)	Keff (t/m)	Beta (%)	Período (s)
H	1100.86	0.31670703	479.432182	25.0971747	3.04137019
E	1310.43	0.31670703	570.701374	25.0971747	3.04137019
C	995.26	0.31670703	433.442648	25.0971747	3.04137019
B	366.69	0.31670703	159.696044	25.0971747	3.04137019
8	248.82	0.31670703	108.36284	25.0971747	3.04137019
7	996.05	0.31670703	433.786699	25.0971747	3.04137019
6	1184.74	0.31670703	515.962505	25.0971747	3.04137019
5	601.49	0.31670703	261.953076	25.0971747	3.04137019
4	474.73	0.31670703	206.748215	25.0971747	3.04137019

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Las diferencias entre los valores calculados para cada uno de los modelos, rígido-lineal o bilineal y el modelo de la 3 Fases se debe a que el modelo rígido-lineal o bilineal es una representación precisa del comportamiento para aisladores y simples y dobles en los cuales las placas superiores e inferiores tienen el mismo radio de curvatura y el mismo coeficiente de fricción. Para aisladores triple péndulo de fricción el modelo rígido-lineal subestima el coeficiente de fricción para desplazamiento cero, lo que se hace que exista diferencia con el modelo de las 3 Fases aunque esta diferencia se podría considerar despreciable en comparación con la respuesta global de estructura.

6.5. RESULTADOS DEL MÉTODO DEL ESPECTRO CAPACIDAD

Para la aplicación del método de espectro capacidad se necesita definir el modelo constitutivo bilineal, representado en la FIGURA 4.21, de cada uno de los aisladores, para lo cual se necesita conocer el punto de fluencia F_y definido por la fuerza máxima y desplazamiento máximo de la fase 1 y el punto de máxima fuerza F_u por la máxima fuerza y desplazamiento de la fase 2. En la **TABLA 6.4** se indican dichos datos:

TABLA 6.4: Datos para definición del Modelo Bilineal para Método del Espectro Capacidad

Col.	W (t)	Desplaz. sistema de aislación (m)	Keff (t/m)	Beta (%)	Período (s)	Fy (t)	qy (m)	Fu (t)	qu (m)
H8	91.040	0.317	39.649	25.097	3.041	6.373	0.027	17.236	0.537
H7	304.770	0.317	132.729	25.097	3.041	21.334	0.027	57.702	0.537
H6	309.020	0.317	134.580	25.097	3.041	21.631	0.027	58.506	0.537
H5	150.060	0.317	65.352	25.097	3.041	10.504	0.027	28.411	0.537
H4	106.850	0.317	46.534	25.097	3.041	7.480	0.027	20.230	0.537
H2	84.460	0.317	36.783	25.097	3.041	5.912	0.027	15.991	0.537
H1	54.670	0.317	23.809	25.097	3.041	3.827	0.027	10.351	0.537
E8	110.230	0.317	48.006	25.097	3.041	7.716	0.027	20.870	0.537
E7	330.390	0.317	143.887	25.097	3.041	23.127	0.027	62.552	0.537
E6	351.310	0.317	152.998	25.097	3.041	24.592	0.027	66.513	0.537
E5	169.150	0.317	73.666	25.097	3.041	11.841	0.027	32.025	0.537
E4	255.630	0.317	111.329	25.097	3.041	17.894	0.027	48.398	0.537
E2a	93.710	0.317	40.811	25.097	3.041	6.560	0.027	17.742	0.537
C8	47.550	0.317	20.708	25.097	3.041	3.329	0.027	9.003	0.537
C7	263.470	0.317	114.743	25.097	3.041	18.443	0.027	49.882	0.537
C6	341.900	0.317	148.900	25.097	3.041	23.933	0.027	64.732	0.537
C5	195.510	0.317	85.146	25.097	3.041	13.686	0.027	37.016	0.537
C4	112.250	0.317	48.886	25.097	3.041	7.858	0.027	21.252	0.537
C3	34.570	0.317	15.055	25.097	3.041	2.420	0.027	6.545	0.537
B7	97.420	0.317	42.427	25.097	3.041	6.819	0.027	18.444	0.537
B6	182.500	0.317	79.480	25.097	3.041	12.775	0.027	34.553	0.537
B5	86.760	0.317	37.785	25.097	3.041	6.073	0.027	16.426	0.537

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

El espectro sísmico utilizado es el indicado en el apartado 6.3 de este capítulo.

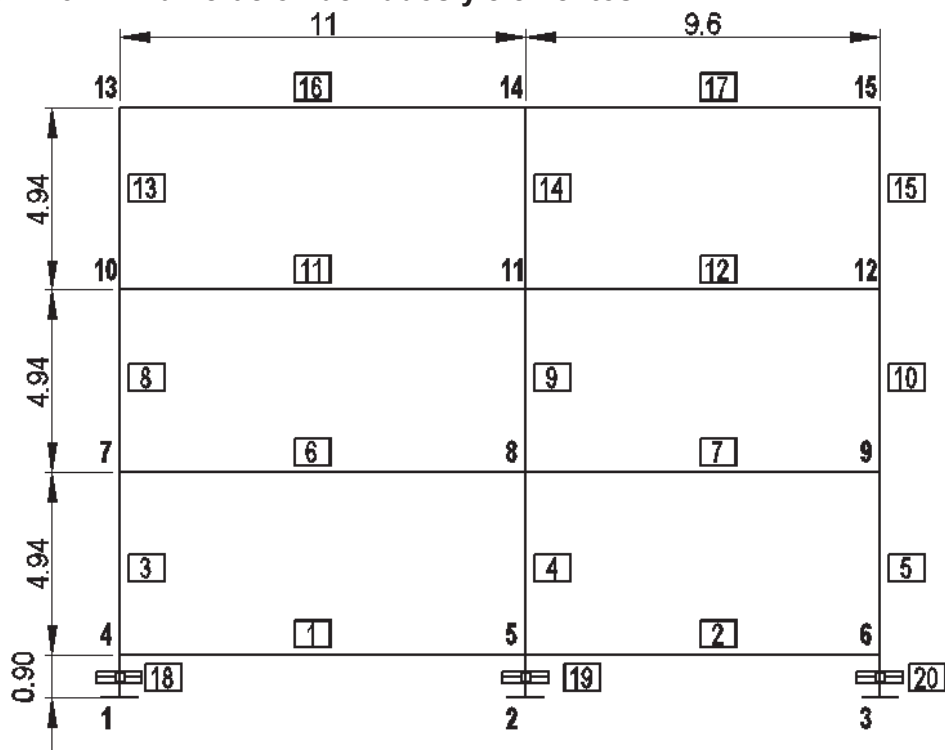
A manera de ejemplo, se indica para uno de los pórticos en estudio, la forma de ingresar la información para el ejecutar el método Espectro Capacidad. Para cada uno de los pórticos restantes se realizará el mismo procedimiento.

En la FIGURA 6.19 se presenta el código del programa, con el cual se halla la curva de capacidad y la respuesta del pórtico B y en FIGURA 6.17 se indica la numeración de nudos y elementos. Para los nudos se debe numerar primero los restringidos y para los elementos es conveniente que el elemento aislador se numere al final.

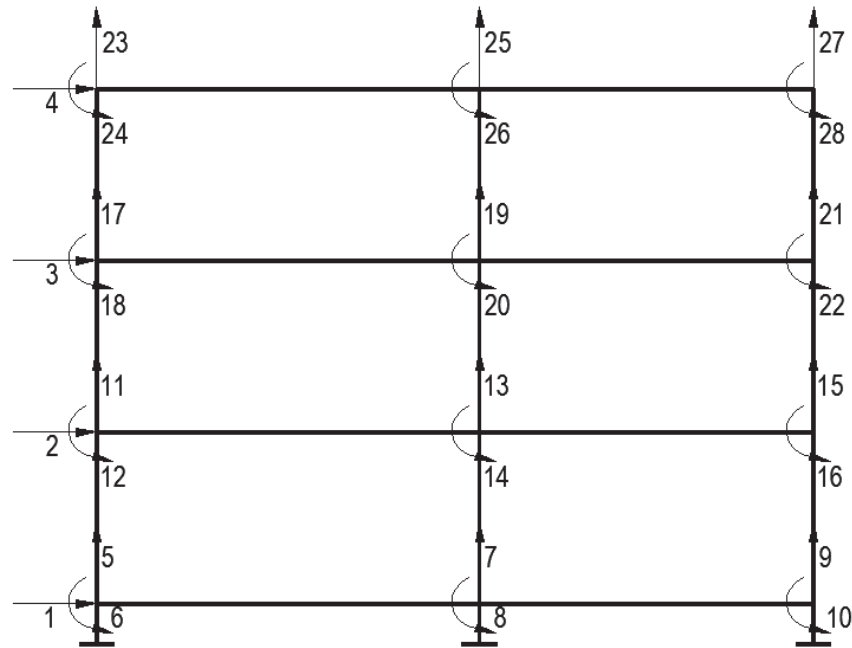
Para el análisis sísmico se considera que las vigas son axialmente rígidas, con lo que se tiene un grado de libertad horizontal por piso, los mismos que se numeran primero, como se observa en la FIGURA 6.18; luego se numeran los restantes grados de libertad. Se halla la matriz de rigidez de la estructura con todos los grados de libertad y se condensa a las coordenadas laterales.

La máxima deriva global, es una variable a controlar y cuyo valor lo impone el calculista dependiendo del criterio de colapso adoptado. Un valor adecuado es 2% para estructuras sin aisladores. Para estructuras con aisladores depende de la capacidad de desplazamiento de los aisladores, esta cantidad se divide para la altura del elemento aislador y se multiplica por 100, debido a que se está trabajando en porcentaje.

FIGURA 6.17: Numeración de nudos y elementos



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.18: Grados de libertad

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.19: Código usado en MATLAB para la aplicación del método del espectro capacidad

```
%METODO DEL ESPECTRO CAPACIDAD
% BLOQUE 1 PORTICO B (B1PB)

%NOTA: TODOS LOS VECTORES DE SECCIONES DEBEN SER DE LA MISMA DIMENSIÓN
% PARA COMPLETAR LA DIMENSIÓN SE PUEDE COMPLETAR CON CEROS
% Unidades: toneladas y metros

clear
set(gcf, 'color', 'w');
Ey=20430000;%Modulo de elasticidad del acero

%-----DEFINICIÓN DE LAS SECCIONES-----

SecC=[1,35150,0,Ey,3,.55,.02,.55,.55,.02,.02]; %columnas rectangulares
tubulares de acero
SecV=[1,35150,0,Ey,1,.55,.0125,.3,.3,.025,.025]; %vigas tipo I de acero
SecIs1=[1.3,1,6.819,0.0275,18.444,0.5366,.45,.45,4750000,0,0];%aisladores
FTP
SecIs2=[1.3,1,12.775,0.0275,34.553,0.5366,.45,.45,4750000,0,0];
SecIs3=[1.3,1,6.073,0.0275,16.426,0.5366,.45,.45,4750000,0,0];

%-----ASIGNACIÓN DE LAS SECCIONES A LOS ELEMENTOS DE LA
ESTR.-----

Table1=[SecC SecC SecC %Elem1
        SecC SecC SecC %Elem2
        SecC SecC SecC %Elem3
```

```

SecC SecC SecC %Elem4
SecC SecC SecC %Elem5
SecC SecC SecC %Elem6
SecC SecC SecC %Elem7
SecC SecC SecC %Elem8
SecC SecC SecC %Elem9
SecV SecV SecV %Elem10
SecV SecV SecV %Elem11
SecV SecV SecV %Elem12
SecV SecV SecV %Elem13
SecV SecV SecV %Elem14
SecV SecV SecV %Elem15
SecV SecV SecV %Elem16
SecV SecV SecV %Elem17
SecIs1 SecIs1 SecIs1 %Elem18
SecIs2 SecIs2 SecIs2 %Elem19
SecIs3 SecIs3 SecIs3];%Elem20

%-----GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCT.-----
-----
np=4;%número de pisos
nr=3;%número de nudos restringidos

%Generación de los elementos de la estructura
GEN=[1 4 7 2 3 3 3;2 5 8 2 3 3 3;3 6 9 2 3 3 3;
     10 4 5 3 2 3 3;11 5 6 3 2 3 3;
     18 1 4 2 1 1 1];

%Generación de los nudos de la estructura

NODE=[1 0 0 1 1 10.99 0;3 20.59 0 0 0 0 0;%[NUDO, X, Y, NUDOS A CREAR,
INCREMENTO # DE NUDO,dX,dY]
      4 0 0.9 3 3 0 4.94;5 10.99 0.9 3 3 0 4.94;6 20.59 0.9 3 3 0 4.94];

%-----ASIGNACION DE CARGAS-----
-----
Fm=[10 4.43
     11 4.43
     12 4.43
     13 4.43
     14 4.43
     15 4.43
     16 4.43
     17 4.43];

%-----SUBROUTINAS USADAS-----
--
Structure_Geom_2D_v2%Define la geometría de la estructura
Pushover_3%Calcula la curva de capacidad
MEC_NEC14_22%Determina el punto de desempeño
ResultsMEC_B22%Mostrar resultados

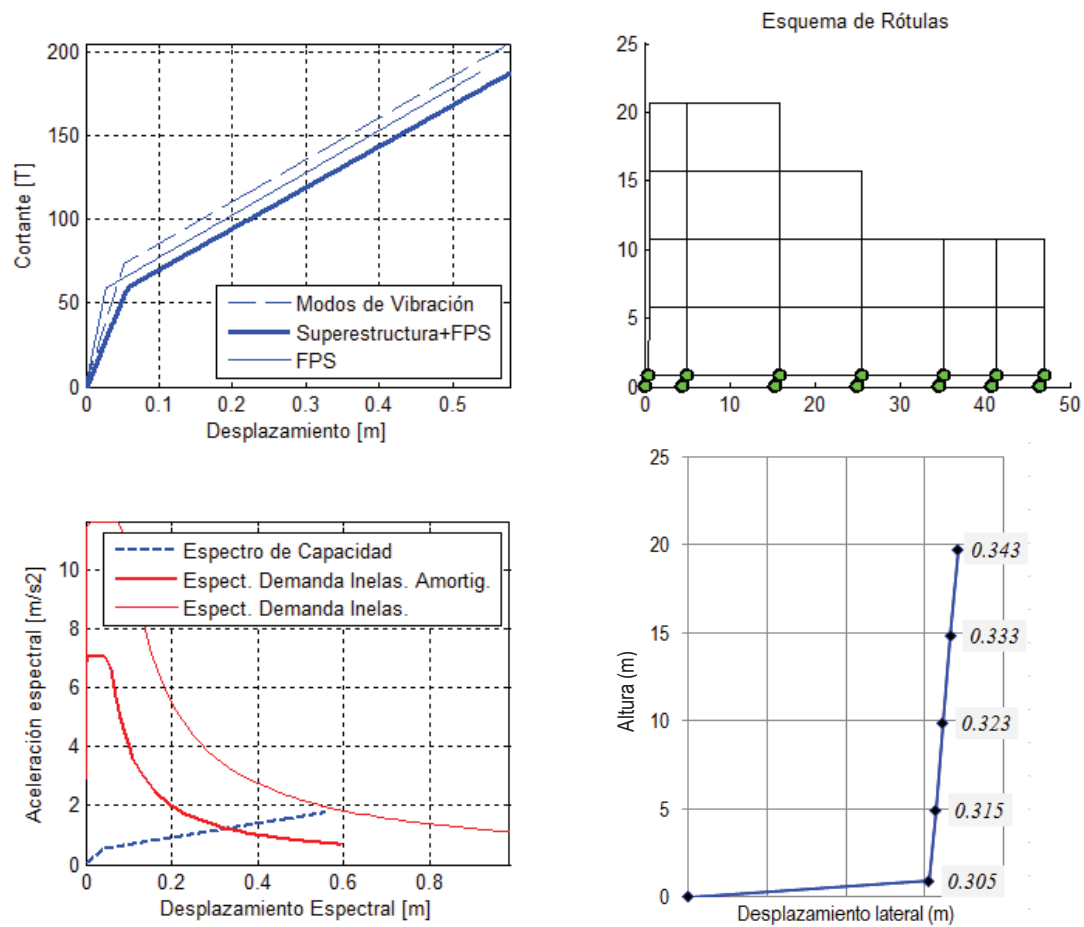
```

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

En las figuras siguientes se indica, para cada uno de los pórticos analizados:

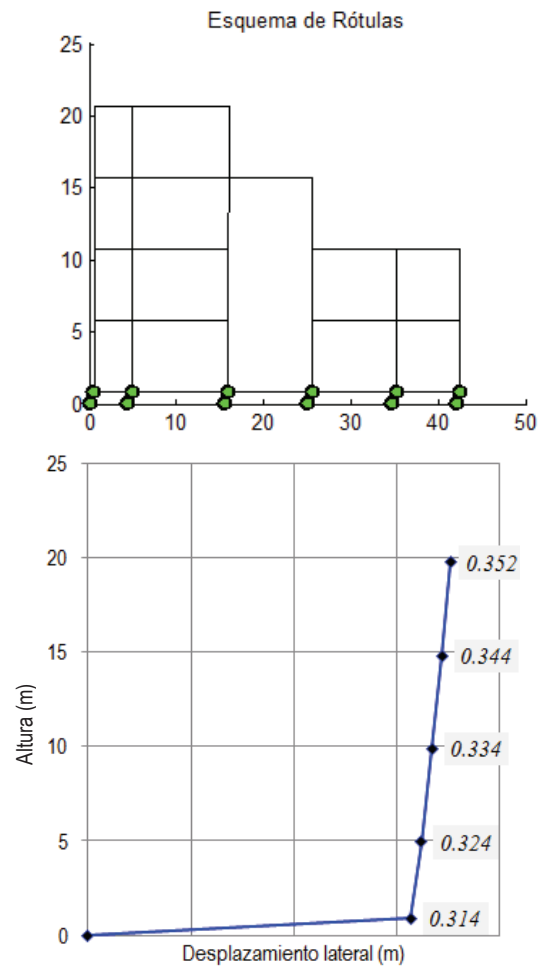
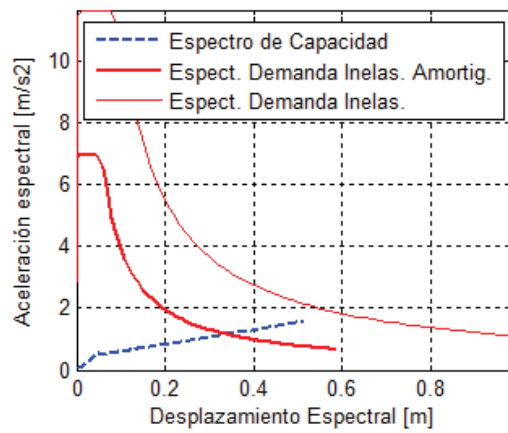
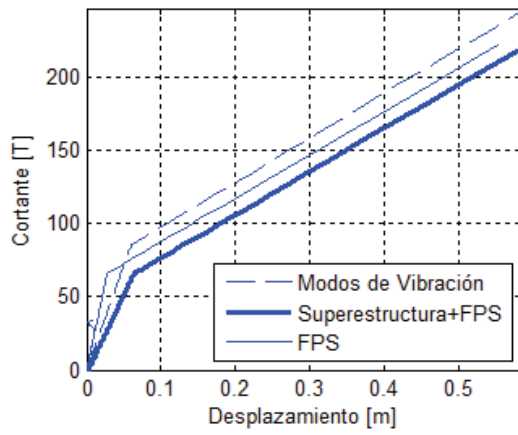
- Zona superior izquierda: Curva de capacidad
- Zona superior derecha: Esquema de Rótulas (elementos que trabajan en el rango no lineal)
- Zona inferior izquierda: Punto de Desempeño (intersección espectro de capacidad y espectro de demanda)
- Zona inferior derecha: Desplazamientos laterales

FIGURA 6.20: Resultados Pórtico H



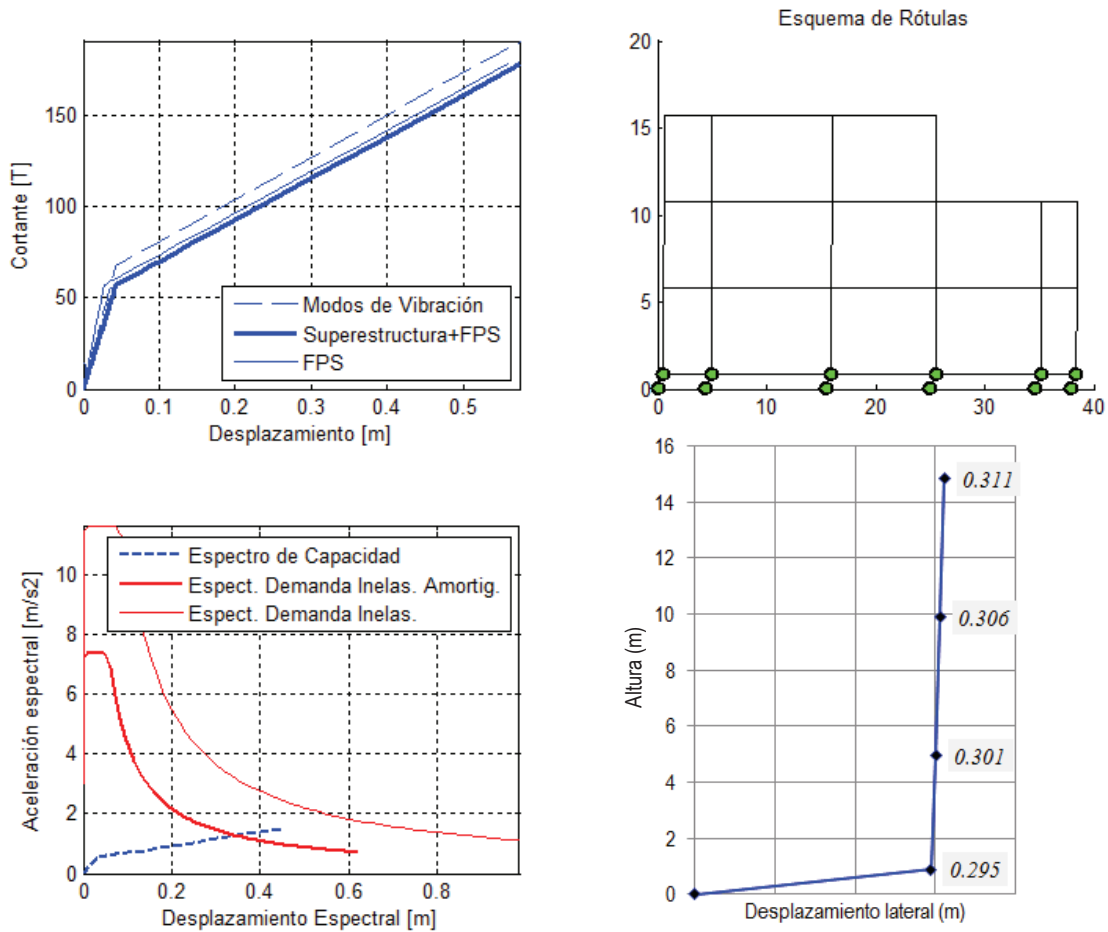
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.21: Resultados Pórtico E



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

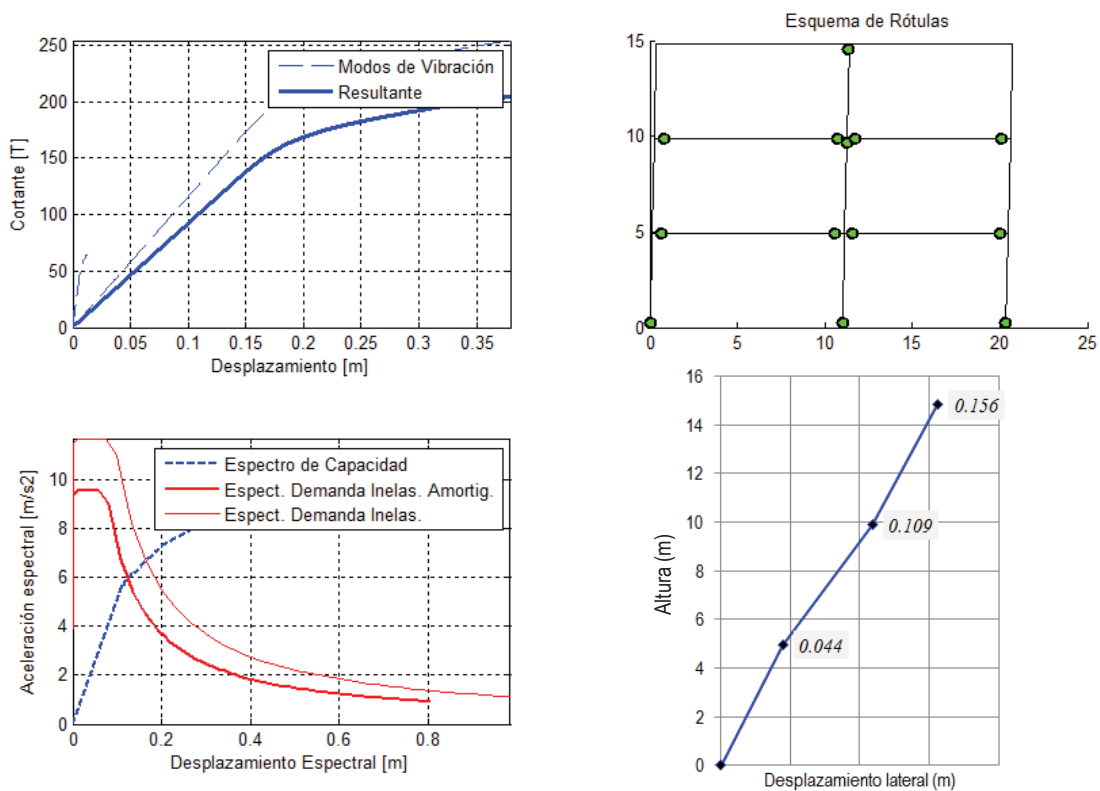
FIGURA 6.22: Resultados Pórtico C



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

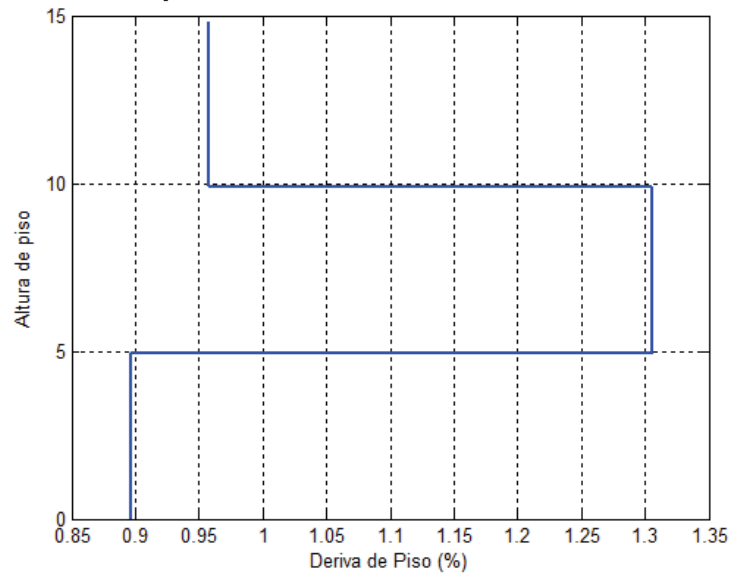
Para el pórtico B se realiza la comparativa de la estructura con y sin sistema de aislación. Para la estructura sin aislación se obtienen los resultados mostrados en la FIGURA 6.23 en la cual se observa que el punto de desempeño es 12.5 cm, esto es en un sistema de un grado de libertad, con este valor se halla que el desplazamiento lateral máximo en el tercer piso es 15.6 cm, y las derivas de piso resultantes son las indicadas en la FIGURA 6.24, en la cual se aprecia que la deriva de piso máxima es 1.31%, valor que se considera un poco alto para un Centro de Investigaciones Científicas, por los contenidos (equipos) de los mismos.

FIGURA 6.23 Resultados Pórtico B sin aislación en la base



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

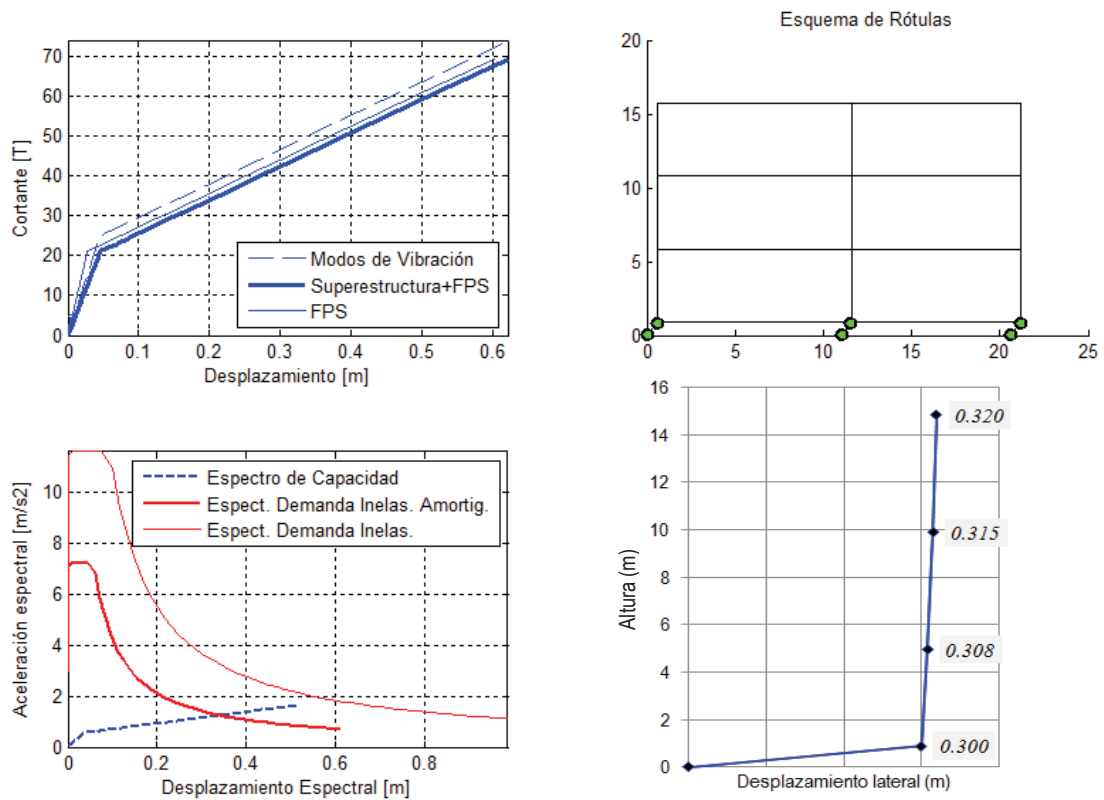
FIGURA 6.24: Deriva de piso Pórtico B sin aislación en la base



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Para el sistema aislado se muestran los resultados en la FIGURA 6.25.

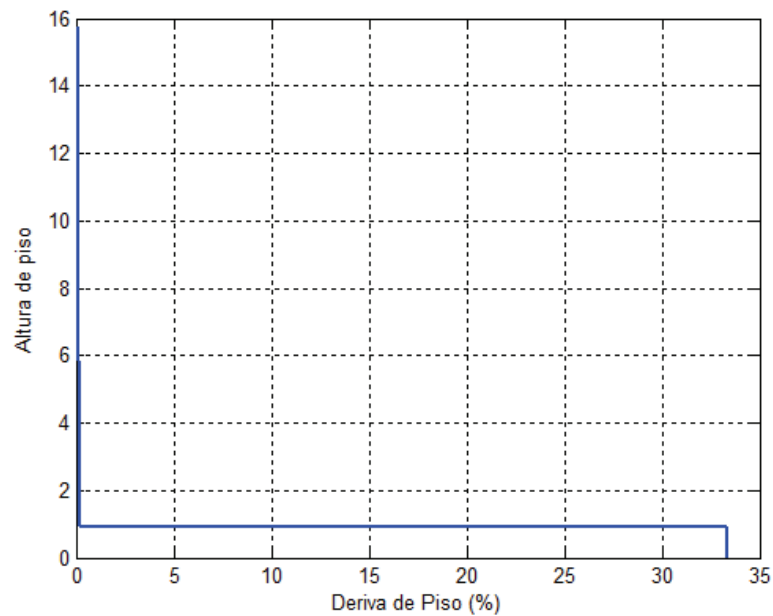
FIGURA 6.25: Resultados Pórtico B con aislamiento



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

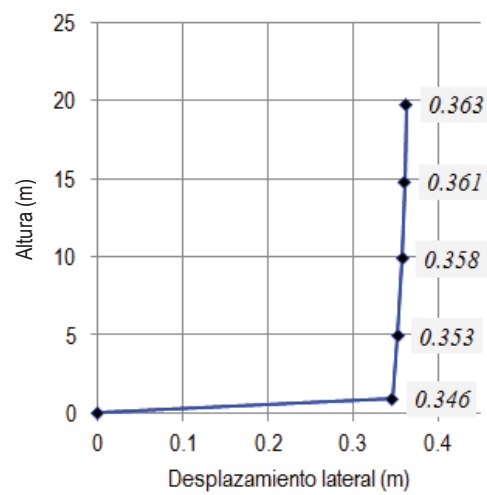
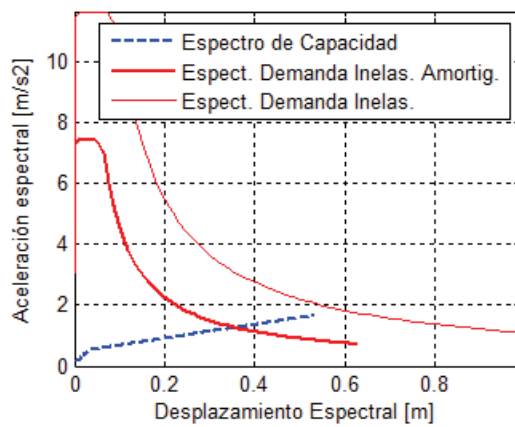
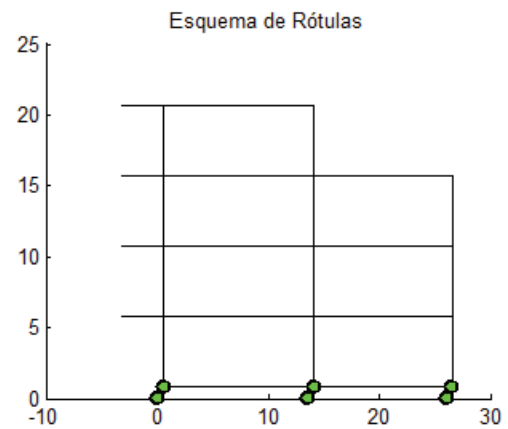
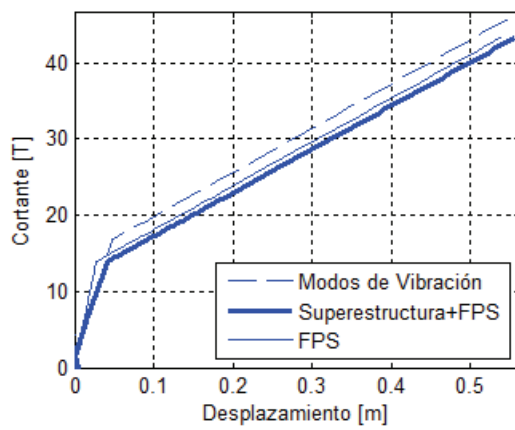
En la figura anterior se puede apreciar que el punto de desempeño tiene un desplazamiento lateral de 30 cm. En la FIGURA 6.26 se muestra la deriva de piso, en la estructura con aisladores sísmicos se aprecia que existe un valor únicamente en los aisladores y que la deriva es nula en todos los pisos.

FIGURA 6.26: Deriva de piso Pórtico B con aislación



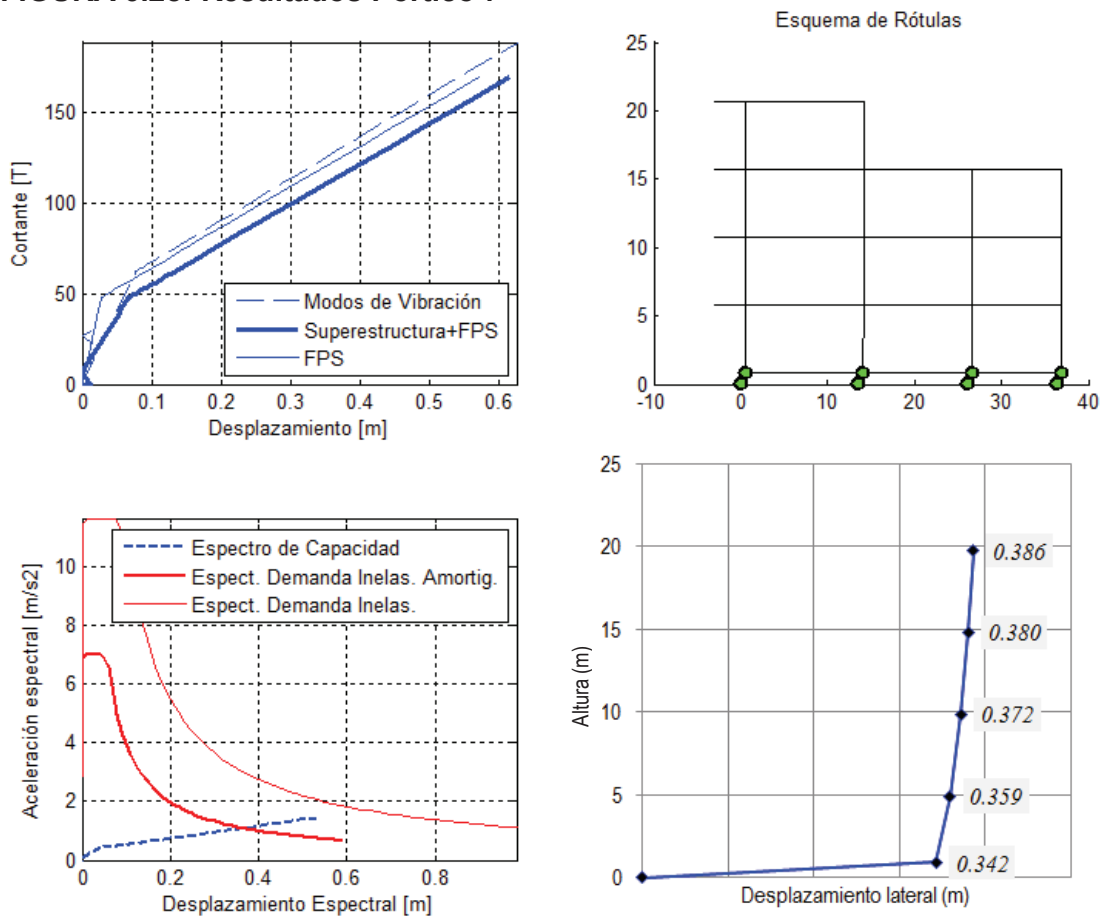
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.27: Resultados Pórtico 8



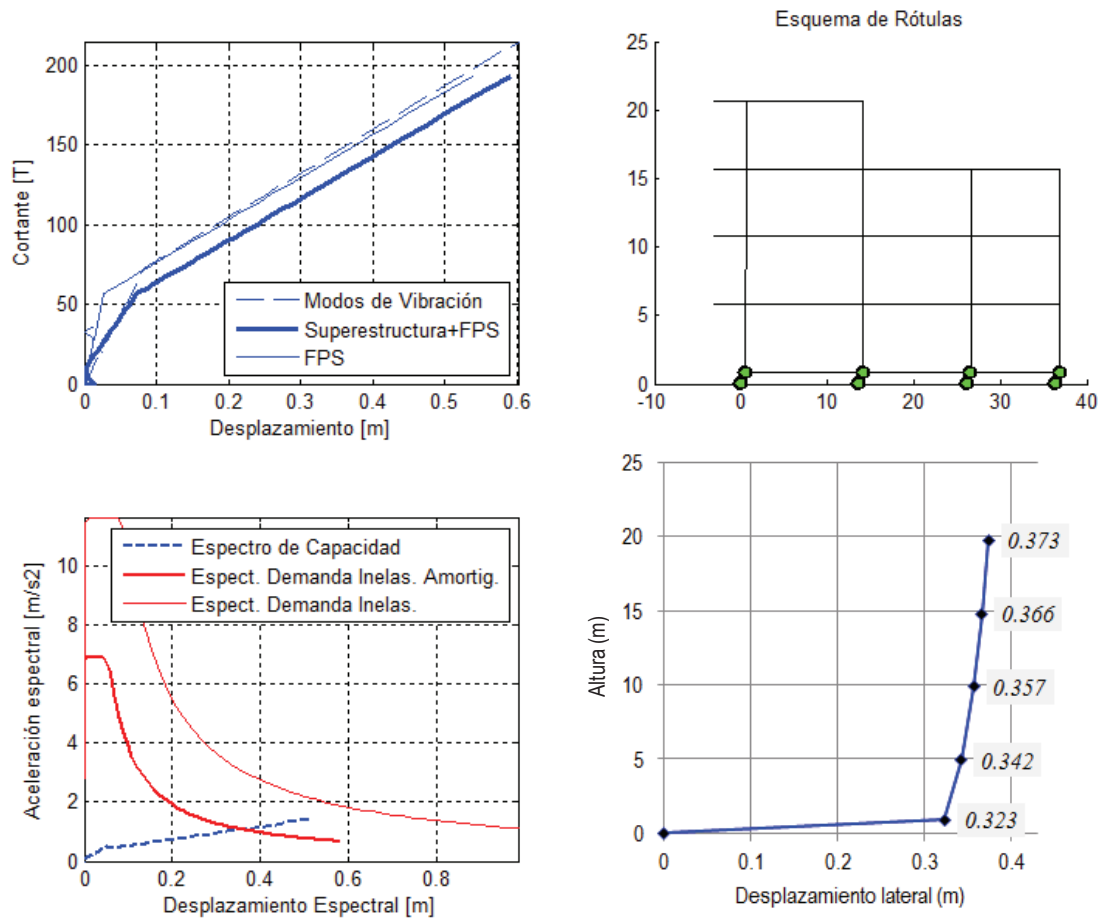
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.28: Resultados Pórtico 7



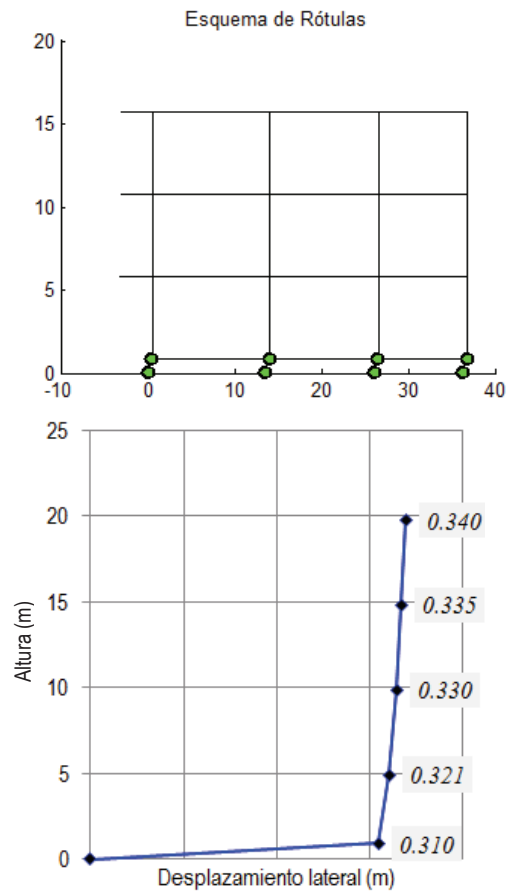
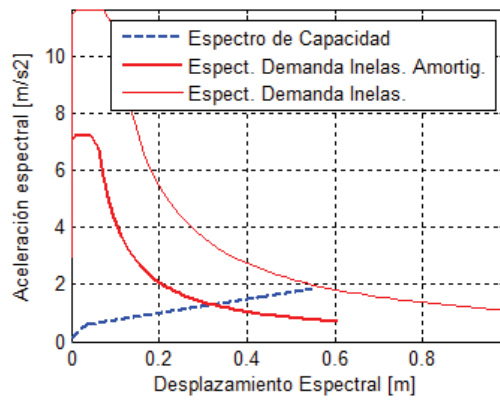
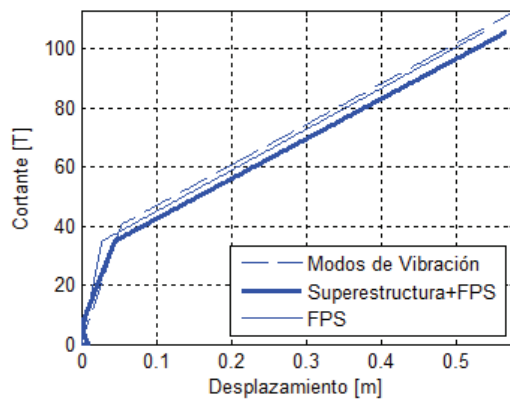
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.29: Resultados Pórtico 6

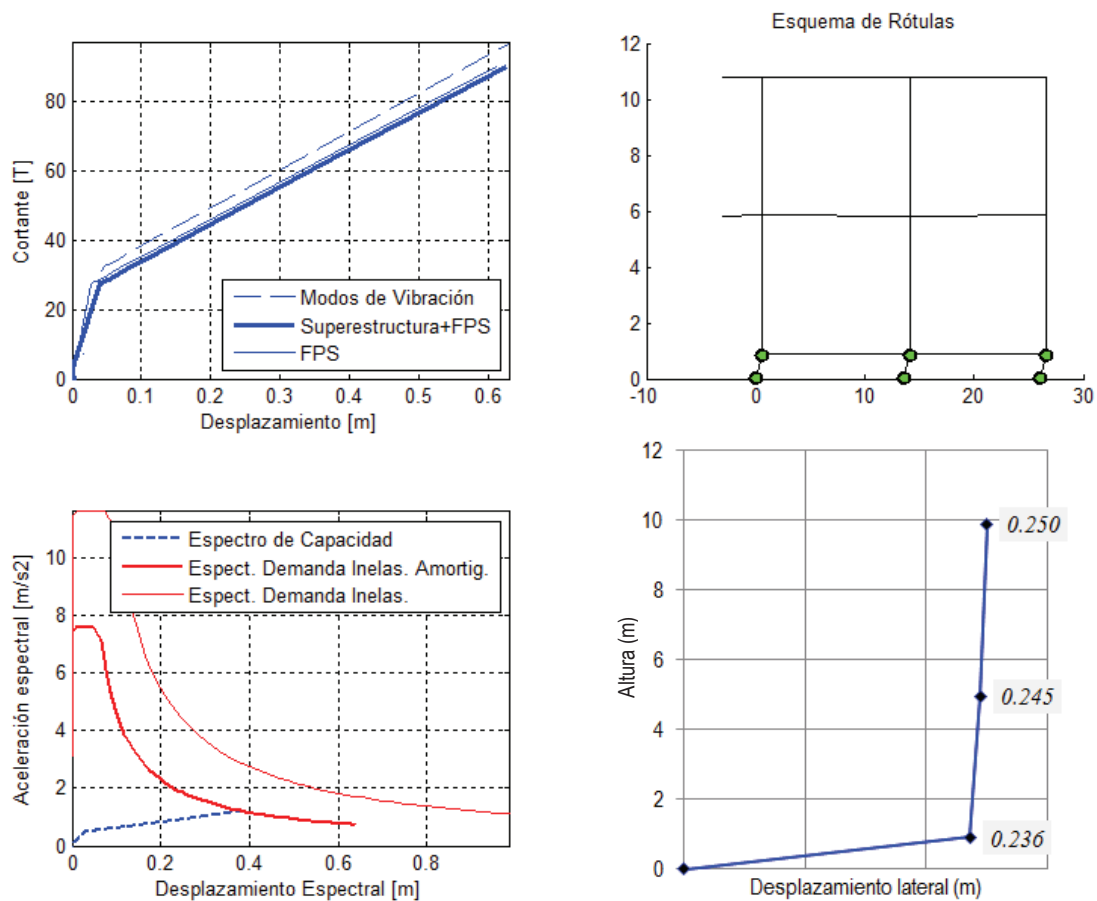


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.30: Resultados Pórtico 5



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.31: Resultados Pórtico 4

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

6.6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO

Las consideraciones que se tuvieron en cuenta para la realización del análisis dinámico no lineal son las siguientes:

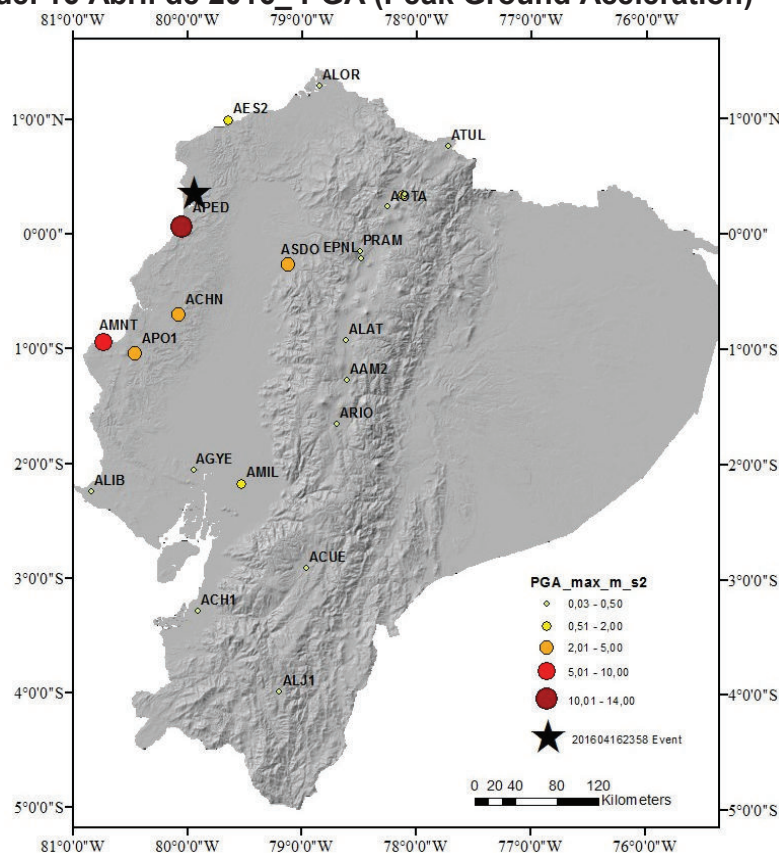
- El comportamiento histerético de los aisladores será modelado de forma explícita (en vez de usar la rigidez y amortiguamiento equivalente presentados en el apartado 3.2), mediante el modelo Tri-Lineal modificado.
- El desplazamiento máximo de cada piso, las fuerzas de diseño y los desplazamientos de los elementos de la superestructura se calcularán usando un modelo elástico lineal, considerando que el comportamiento de

todos los elementos de la superestructura sobre el sistema de aislación permanece en el rango elástico.

Para el análisis no lineal de la respuesta en el tiempo se trabajará con el terremoto que se produjo en Ecuador el 16 Abril de 2016, que tuvo una magnitud mayor a 7. Los sismos de esta magnitud se caracterizan por: ser sismos de gran duración, generan daño a grandes distancias del epicentro, tienen varias fases de movimiento intenso y sus espectros en la zona descendente tienen varios picos característicos, en los que se incrementa la aceleración espectral.

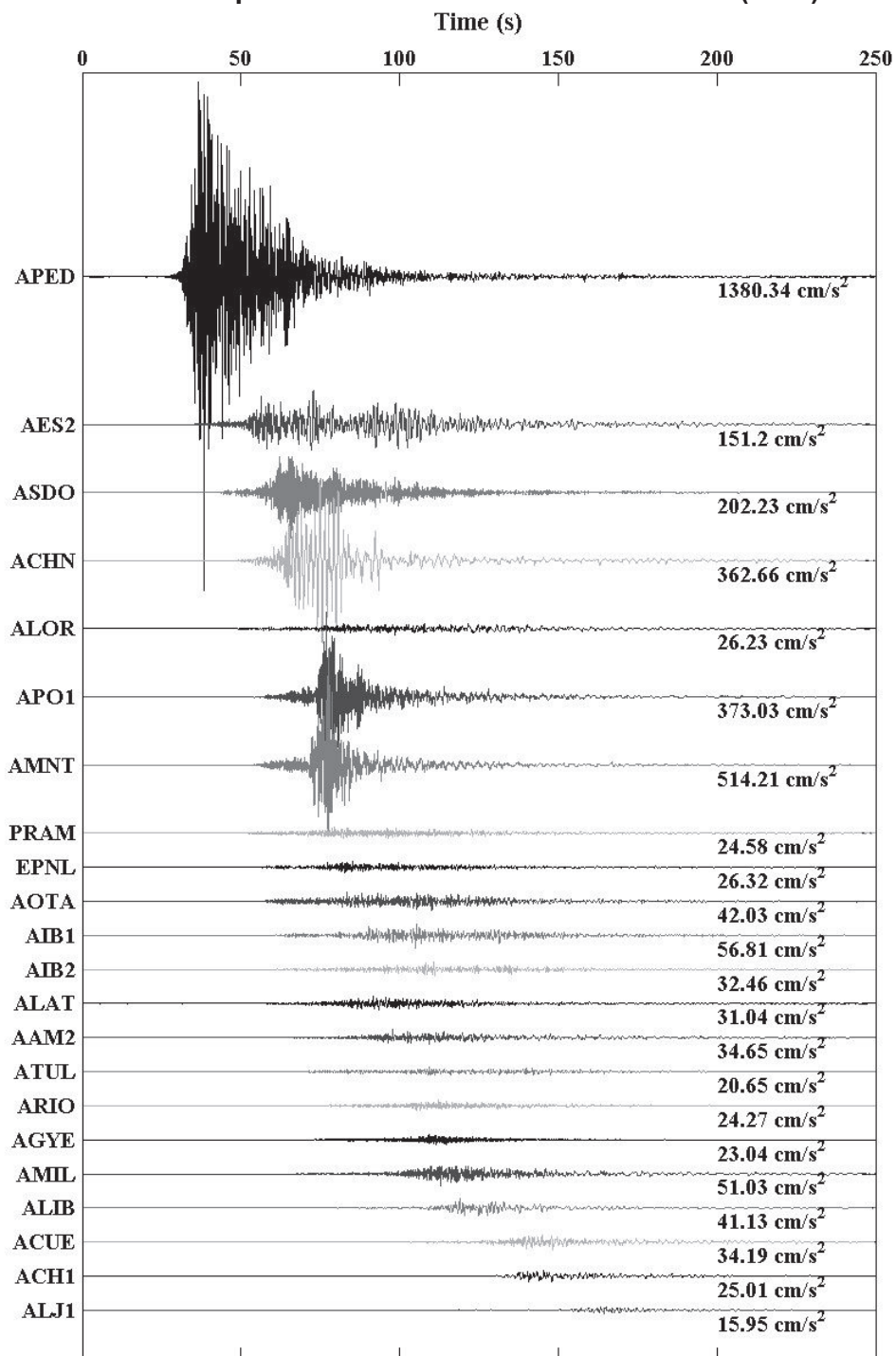
En la FIGURA 6.32 se indica la distribución espacial de estaciones que monitorearon el terremoto del 16 de Abril y en la FIGURA 6.33 muestran los PGA (Peak Ground Acceleration) máximos.

FIGURA 6.32: Distribución espacial de las estaciones de acelerógrafos para terremoto del 16 Abril de 2016_ PGA (Peak Ground Aceleración)



Fuente: Instituto Geofísico de la EPN
Elaborado por: Instituto Geofísico de la EPN

FIGURA 6.33: Acelerogramas del terremoto del 16 de abril del 2016. Se han considerado las componentes con la máxima aceleración (PGA).



Fuente: Instituto Geofísico de la EPN

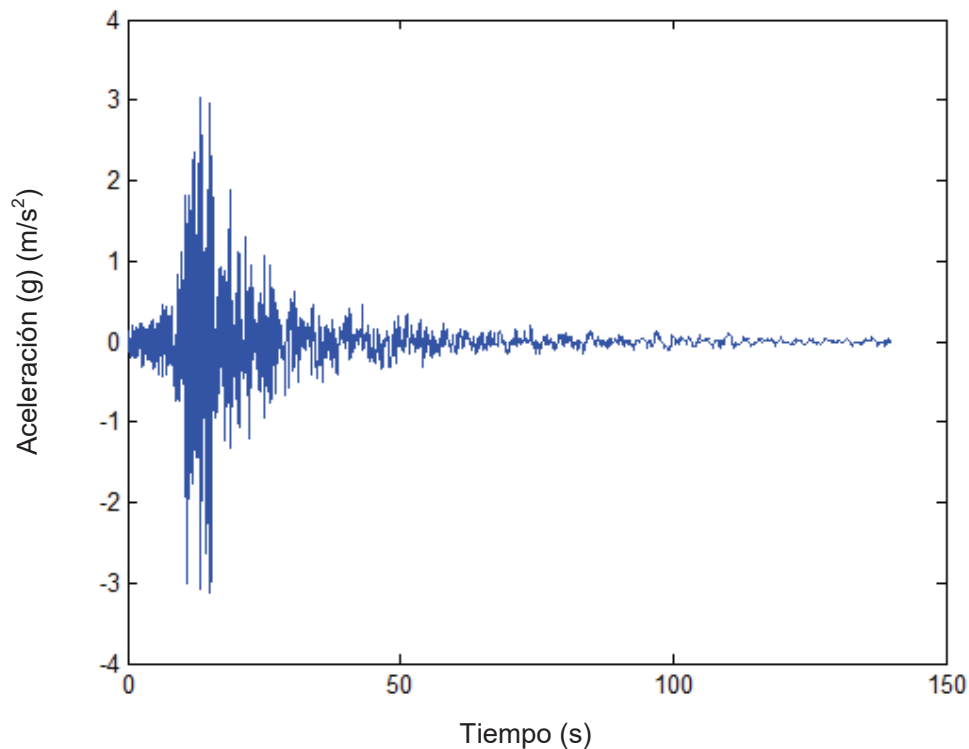
Elaborado por: Instituto Geofísico de la EPN

Como se puede observar en la figura anterior, en Pedernales (estación APED) se registró un valor de 13.803 m/s^2 ($\text{PGA}=1.407 \text{ g}$) siendo “g” la aceleración de la gravedad, el cual es un valor extremadamente alto.

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014), para Sangolquí, lugar donde se ubica el Nuevo Centro de Investigaciones Científicas, se indica un PGA mayor o igual a 0.4g . Por tal motivo, se elige el registro de Portoviejo donde el PGA fue de 0.42g , y solo a efectos de observar el comportamiento de la estructura para un registro de estas características.

En la FIGURA 6.34 se presenta el registro sísmico utilizado, correspondiente a la componente Este de la señal captada en Portoviejo.

FIGURA 6.34: Registro sismo de Portoviejo componente Este



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

La definición de la geometría, numeración de nudos y elementos, numeración de grados de libertad y definición de secciones para el análisis no lineal dinámico es idéntico que el empleado para el Método Espectro Capacidad por tal motivo solo se presenta el código usado en MATLAB para el pórtico B, según lo indicado en la FIGURA 6.35.

FIGURA 6.35: Código usado en MATLAB para la aplicación del análisis no lineal dinámico

```

%ANÁLISIS NO LINEAL DE HISTORIA EN EL TIEMPO DE PORTICO CON AISLADORES
%TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN

% BLOQUE 1 PORTICO B (B1PB)

%NOTA: TODOS LOS VECTORES DE SECCIONES DEBEN SER DE LA MISMA DIMENSIÓN
% PARA COMPLETAR LA DIMENSIÓN SE PUEDE COMPLETAR CON CEROS
% Unidades: toneladas y metros

clear
set(gcf, 'color', 'w');
Ey=20430000;%Modulo de elasticidad del acero

%-----DEFINICIÓN DE LAS SECCIONES-----

SecC=[1,35150,0,Ey,3,.55,.02,.55,.55,.02,.02]; %columnas rectangulares
tubulares de acero
SecV=[1,35150,0,Ey,1,.55,.0125,.3,.3,.025,.025]; %vigas tipo I de acero
SecIs1=[1.3,1,6.819,0.0275,18.444,0.5366,.45,.45,4750000,0,0];%aisladores
FTP
SecIs2=[1.3,1,12.775,0.0275,34.553,0.5366,.45,.45,4750000,0,0];
SecIs3=[1.3,1,6.073,0.0275,16.426,0.5366,.45,.45,4750000,0,0];

%-----ASIGNACIÓN DE LAS SECCIONES A LOS ELEMENTOS DE LA
ESTR.-----

Table1=[SecC SecC SecC %Elem1
        SecC SecC SecC %Elem2
        SecC SecC SecC %Elem3
        SecC SecC SecC %Elem4
        SecC SecC SecC %Elem5
        SecC SecC SecC %Elem6
        SecC SecC SecC %Elem7
        SecC SecC SecC %Elem8
        SecC SecC SecC %Elem9
        SecV SecV SecV %Elem10
        SecV SecV SecV %Elem11
        SecV SecV SecV %Elem12
        SecV SecV SecV %Elem13
        SecV SecV SecV %Elem14
        SecV SecV SecV %Elem15
        SecV SecV SecV %Elem16
        SecV SecV SecV %Elem17
        SecIs1 SecIs1 SecIs1 %Elem18
        SecIs2 SecIs2 SecIs2 %Elem19
        SecIs3 SecIs3 SecIs3];%Elem20

%-----GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCT.-----
-----
np=4;%número de pisos
nr=[1 1 1 1
    2 1 1 1
    3 1 1 1];%número de nudos restringidos

%Generación de los elementos de la estructura

```

```

GEN=[1 4 7 2 3 3 3;2 5 8 2 3 3 3;3 6 9 2 3 3 3;
     10 4 5 3 2 3 3;11 5 6 3 2 3 3;
     18 1 4 2 1 1 1];

%Generación de los nudos de la estructura

NODE=[1 0 0 1 1 10.99 0;3 20.59 0 0 0 0 0;%[NUDO, X, Y, NUDOS A CREAR,
INCREMENTO # DE NUDO,dX,dY]
      4 0 0.9 3 3 0 4.94;5 10.99 0.9 3 3 0 4.94;6 20.59 0.9 3 3 0 4.94];

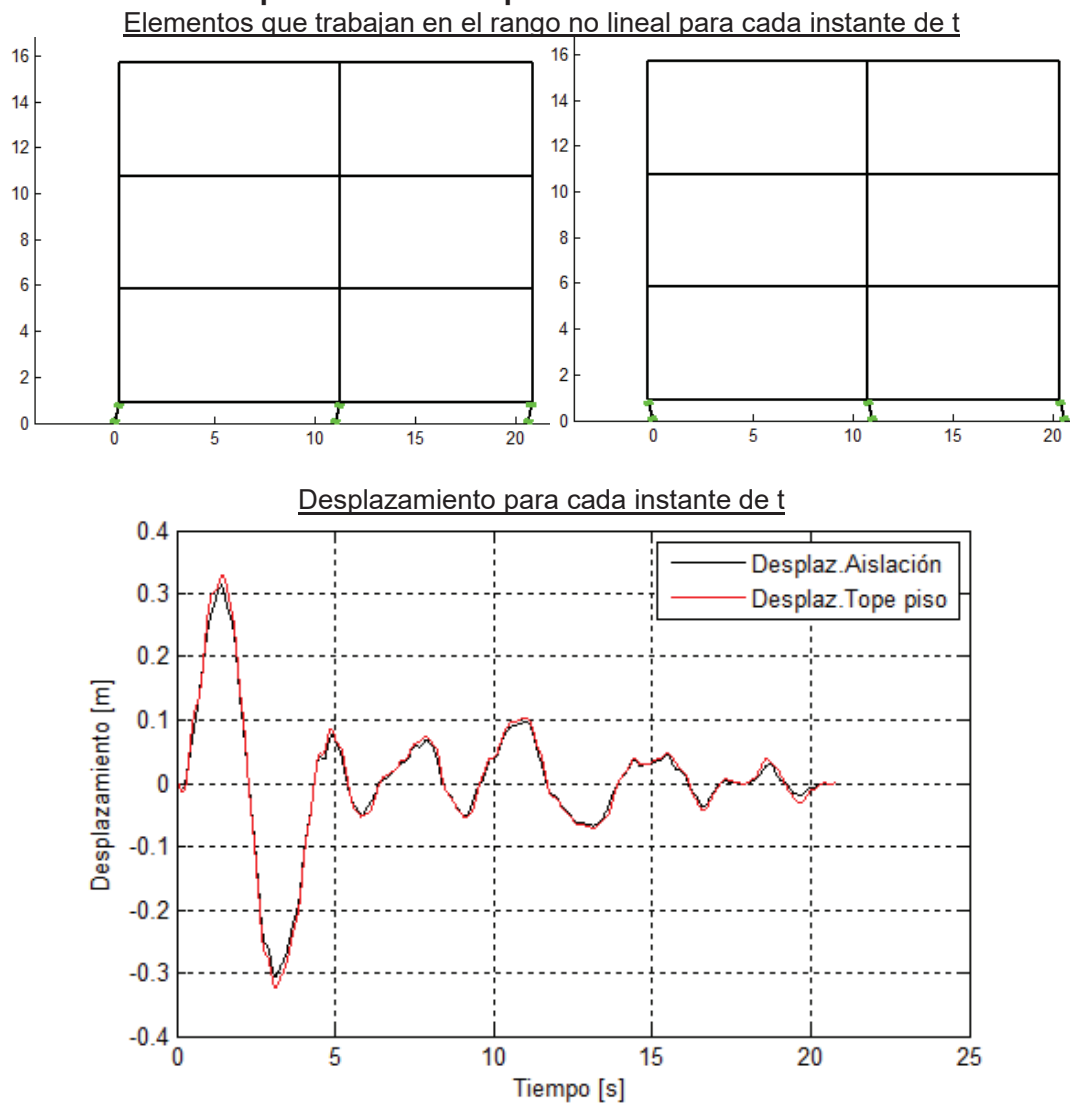
%-----ASIGNACION DE CARGAS-----
-----
Fm=[10 4.43
    11 4.43
    12 4.43
    13 4.43
    14 4.43
    15 4.43
    16 4.43
    17 4.43];

%-----CARGAS SÍSMICAS-----
-----
load('a_POE')%Registro de acelerograma
p=a_POE*9.81;%m/s2
dt=0.01;%intervalo de tiempo de acelerograma
plot((1:length(p))*dt,p),input('enter'),close(gcf)
p=p;
maxzeta=0.35;%precision=7;

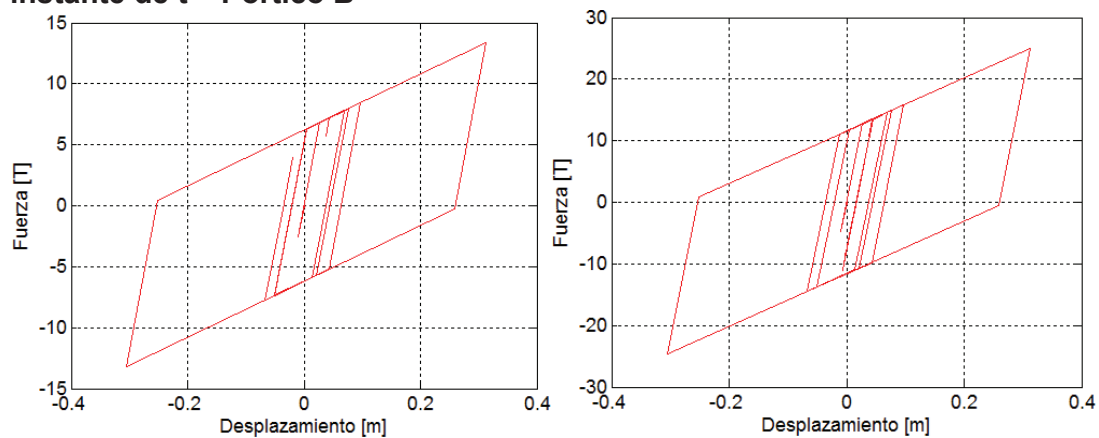
%-----SUBROUTINAS USADAS-----
-----
Structure_Geom_2D_v2%Define geometría de la estructura
pse_nl2%Análisis no lineal planteamiento espacio-estado
ResultsNOLINEAL_1
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

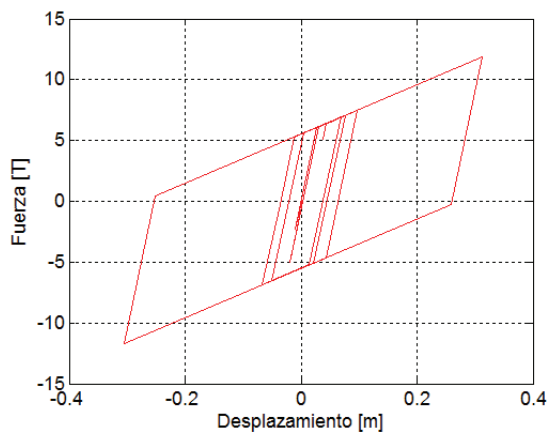
```

En las figuras siguientes se indica, los resultados obtenidos del análisis no lineal:

FIGURA 6.36: Respuesta en el tiempo del Pórtico B

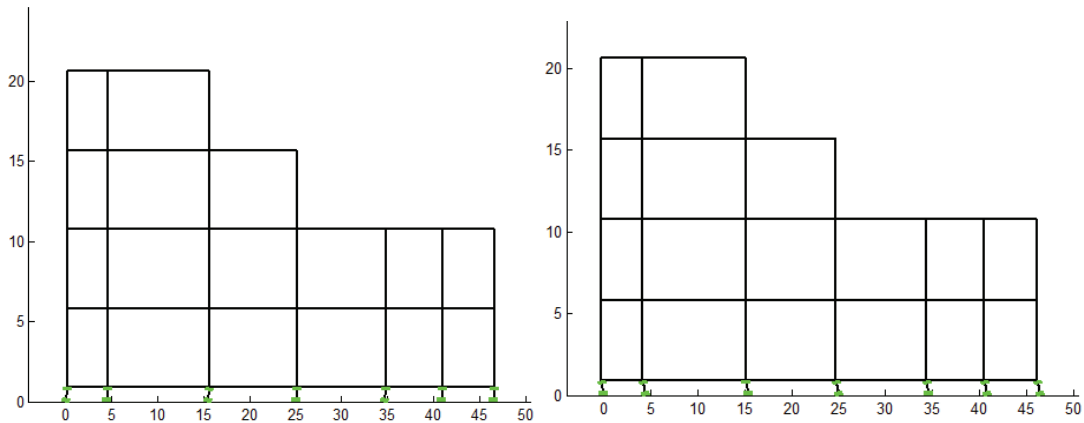
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.37: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico B

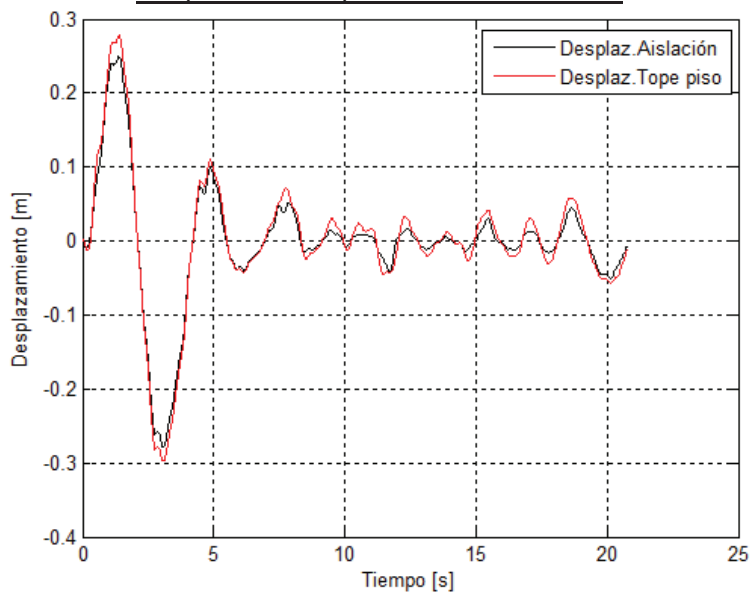


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.38: Respuesta en el tiempo del Pórtico H
Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

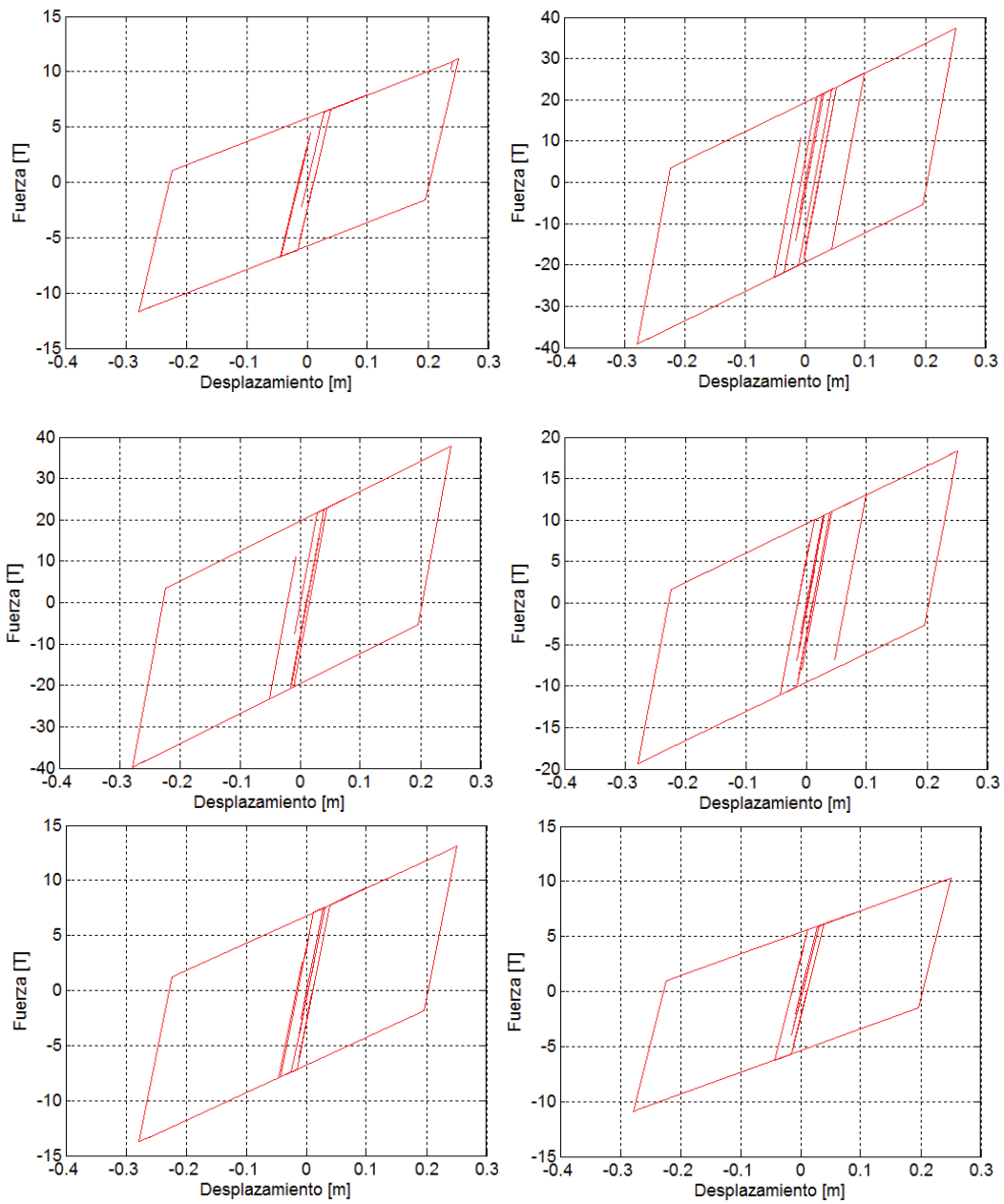


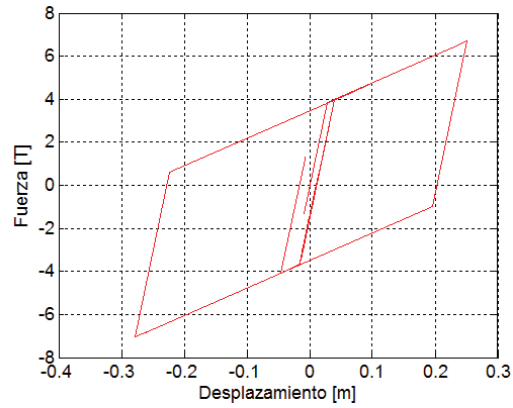
Desplazamiento para cada instante de t



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

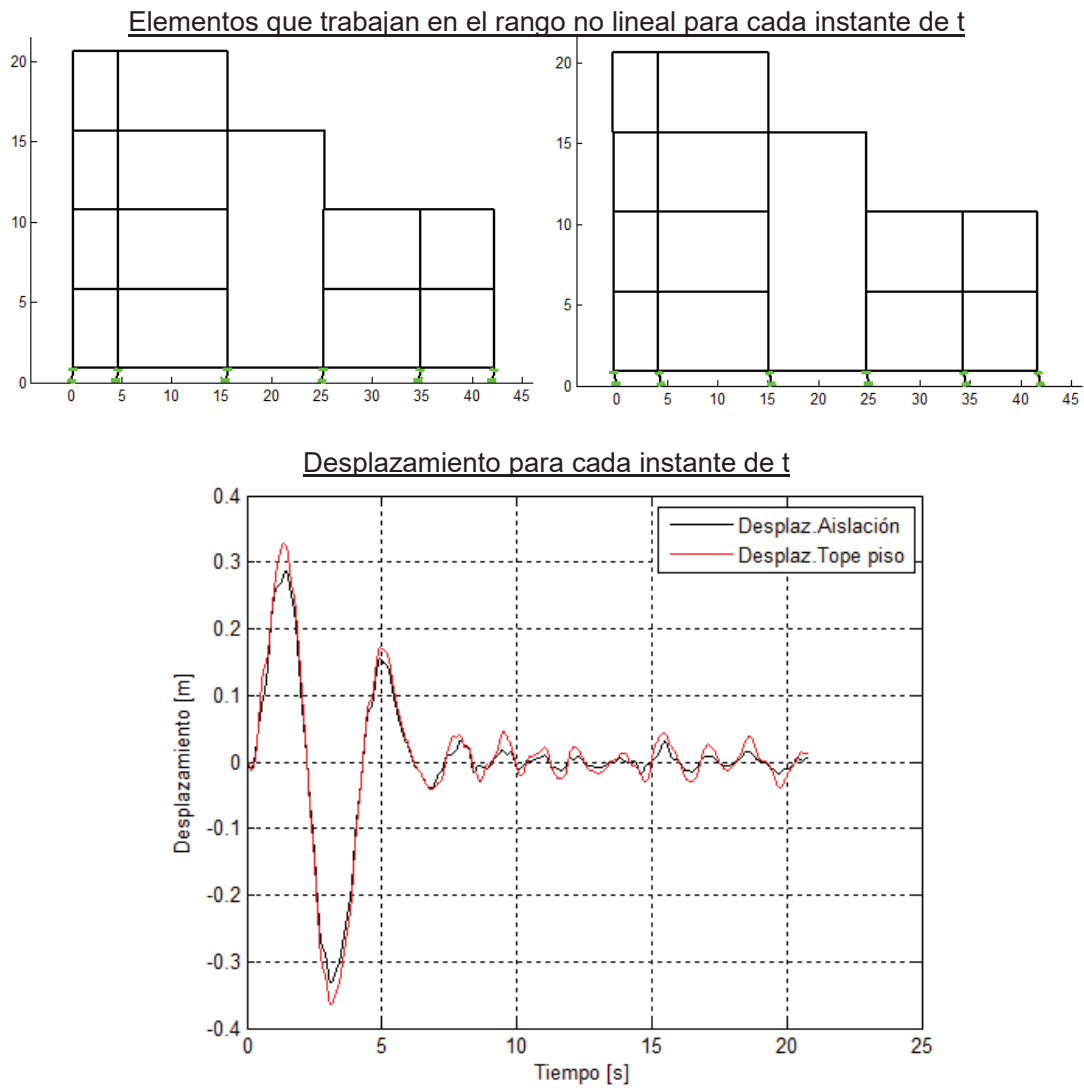
FIGURA 6.39: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico H





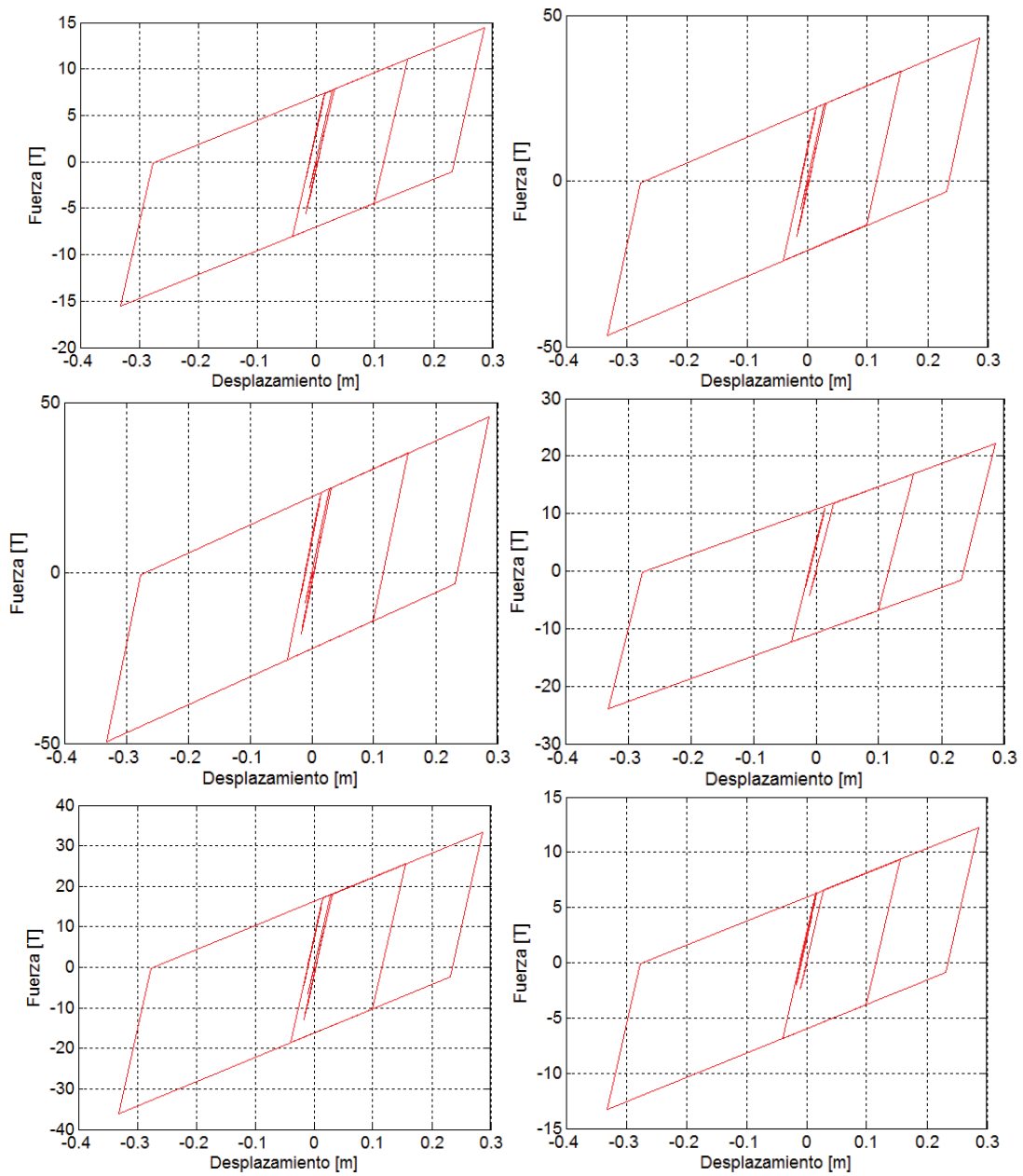
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.40: Respuesta en el tiempo del Pórtico E



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

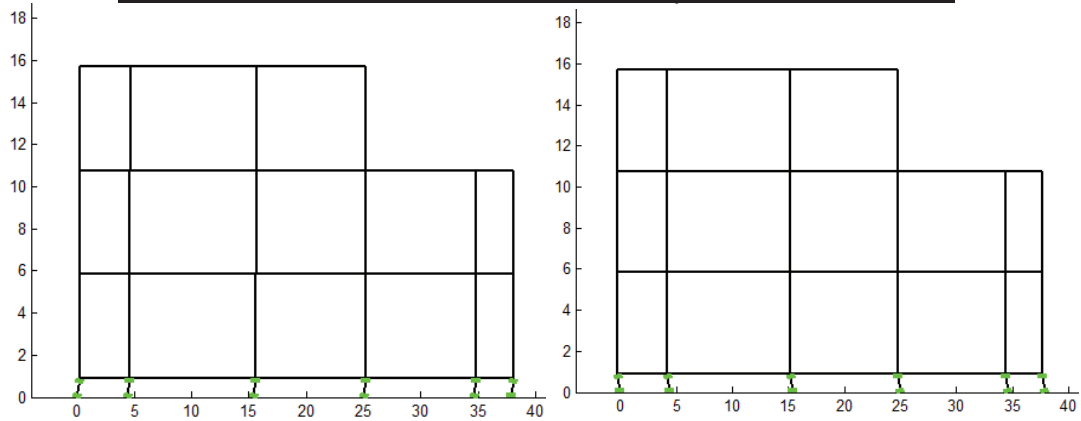
FIGURA 6.41: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico E



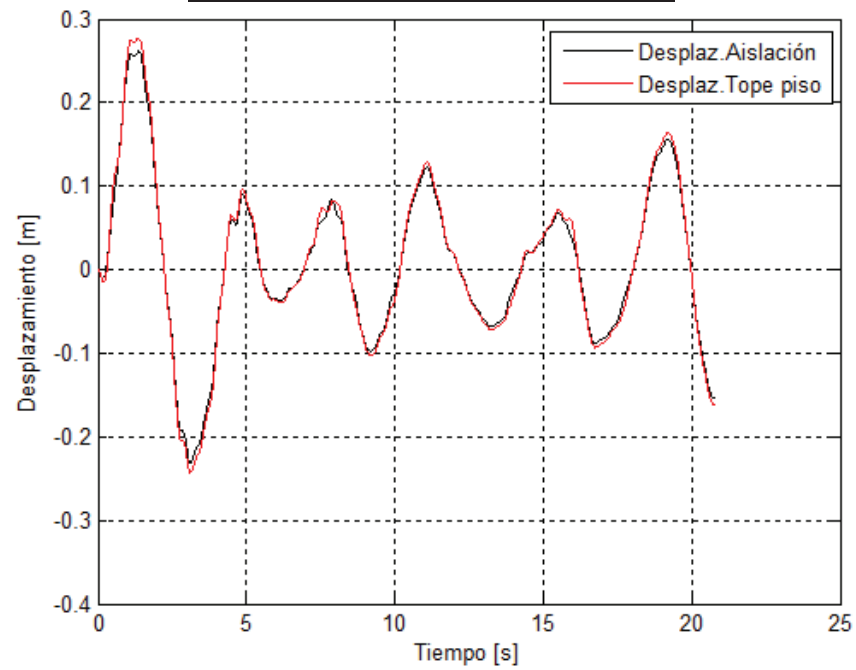
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.42: Respuesta en el tiempo del Pórtico C

Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

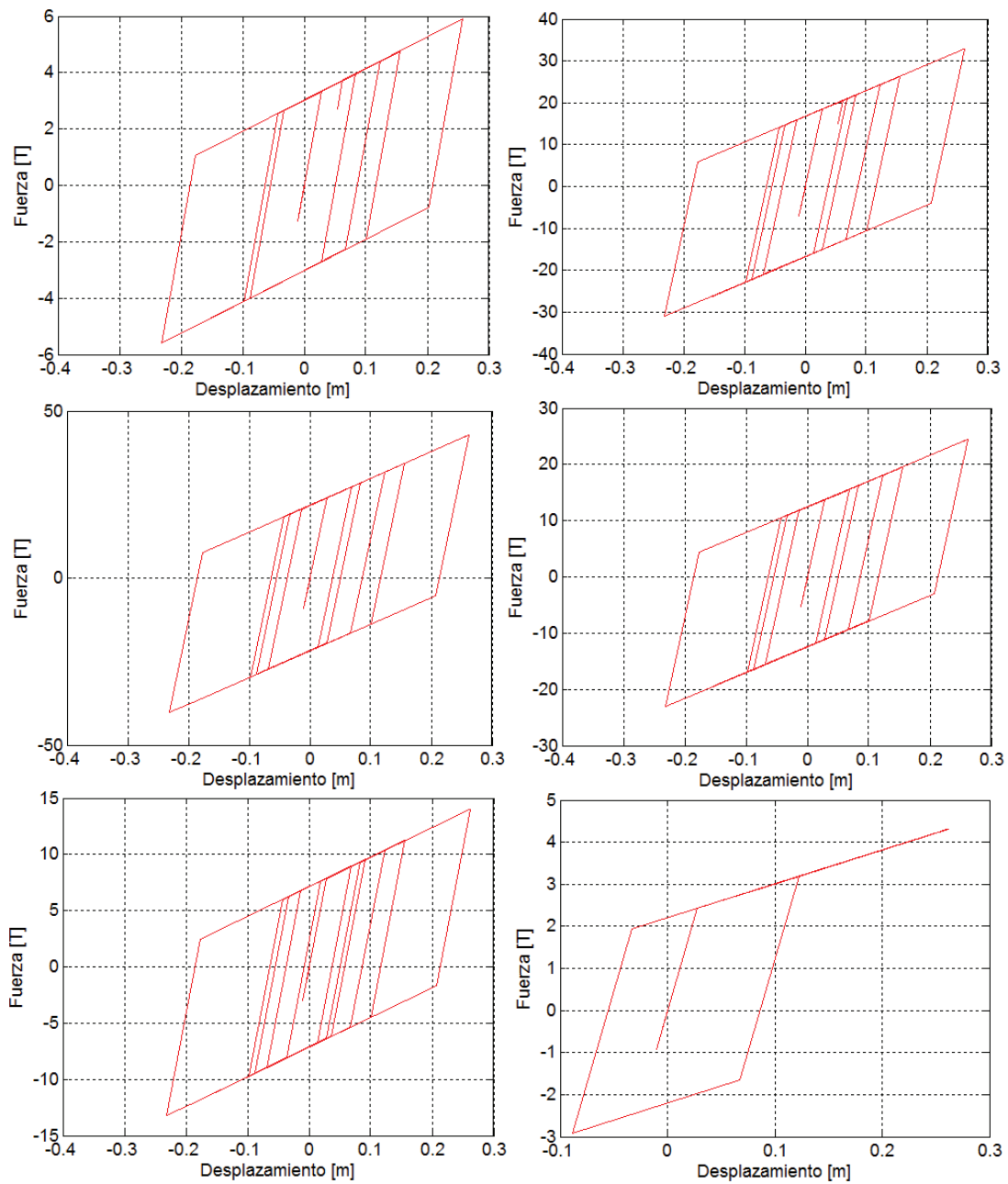


Desplazamiento para cada instante de t



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

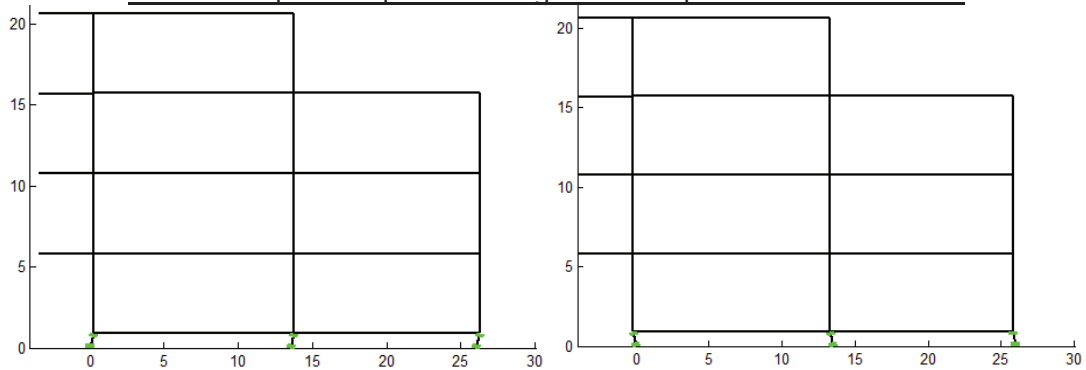
FIGURA 6.43: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico C



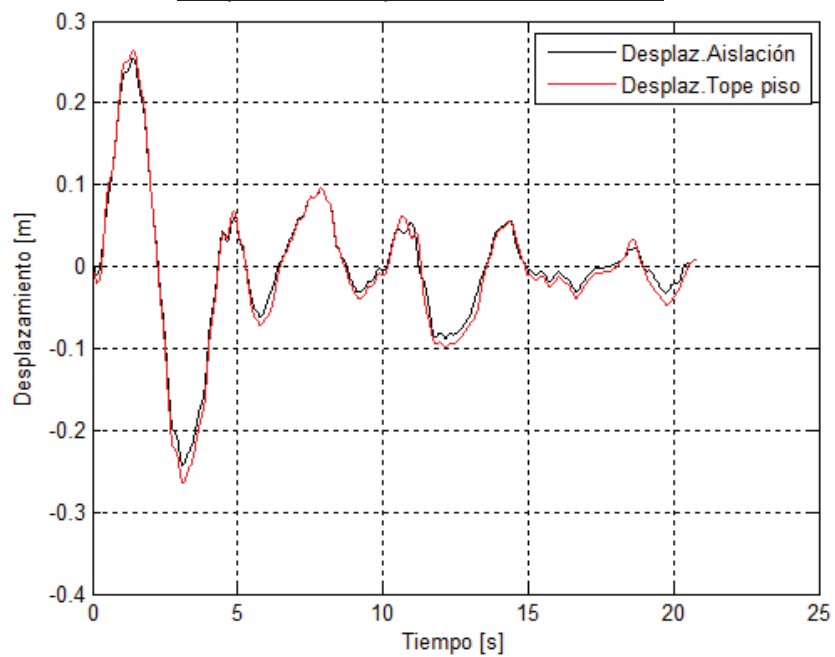
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.44: Respuesta en el tiempo del Pórtico 8

Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

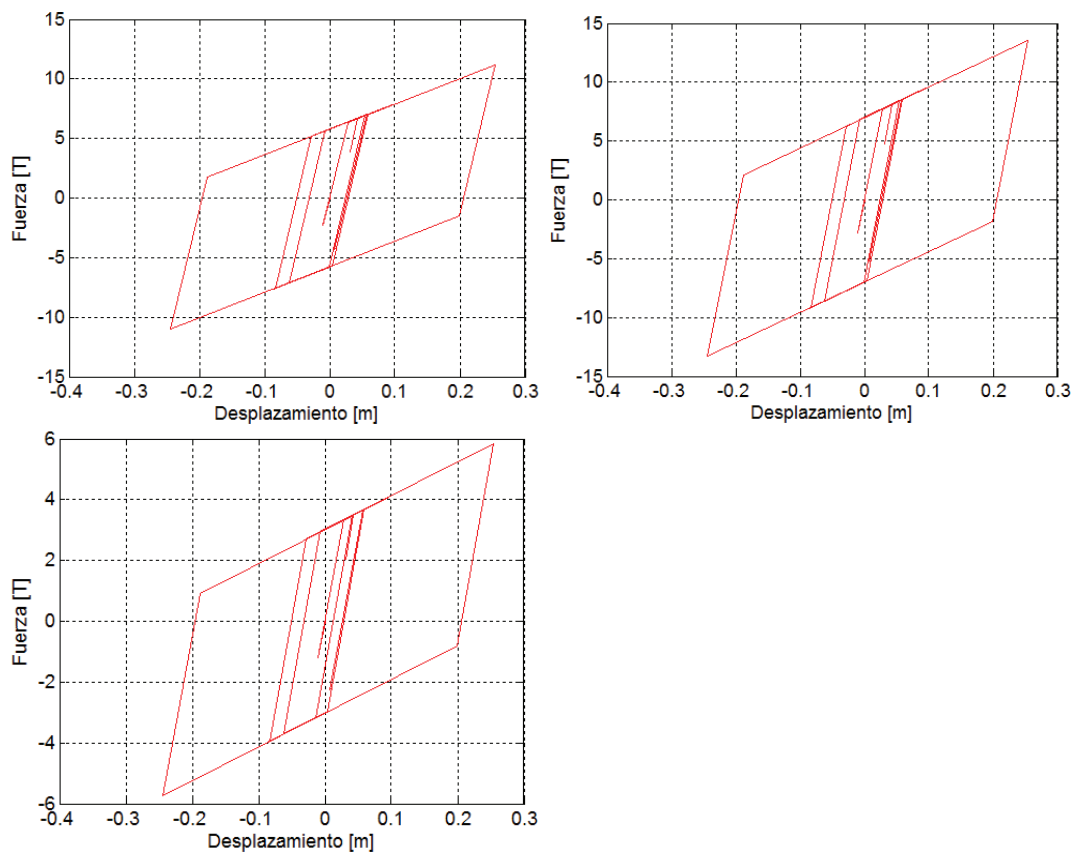


Desplazamiento para cada instante de t



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

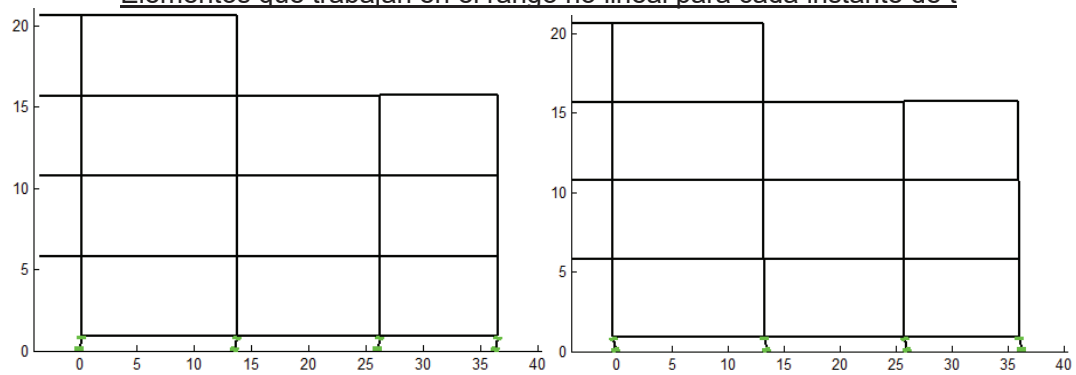
FIGURA 6.45: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 8



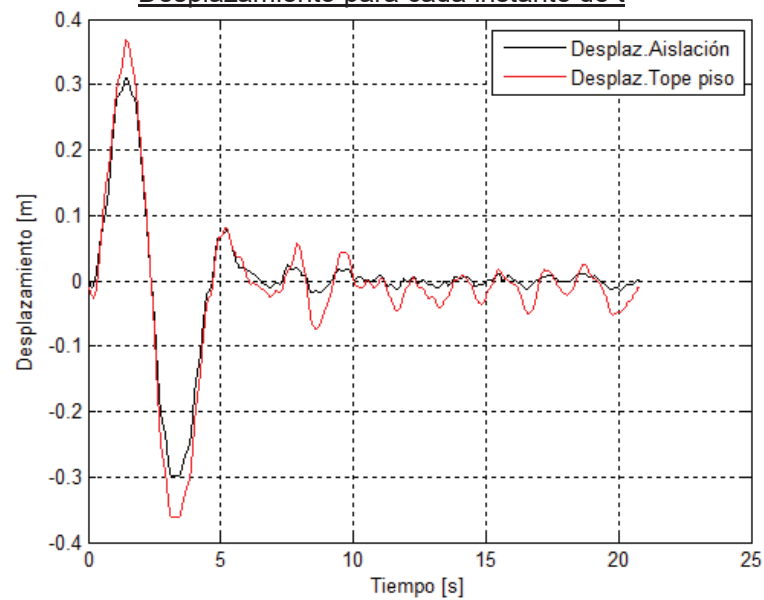
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.46: Respuesta en el tiempo del Pórtico 7

Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

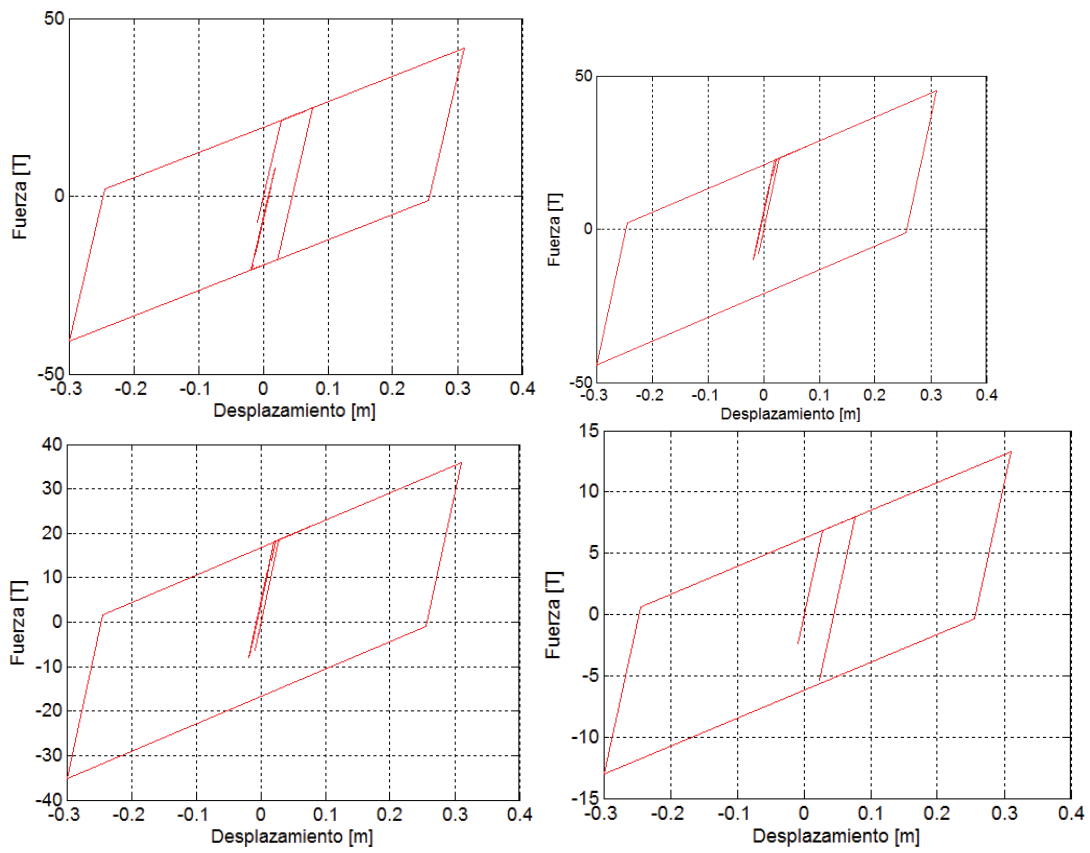


Desplazamiento para cada instante de t



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

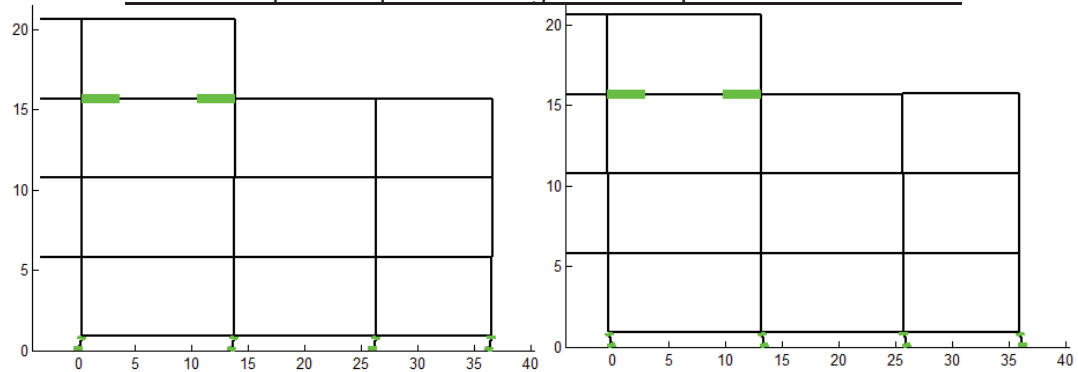
FIGURA 6.47: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 7



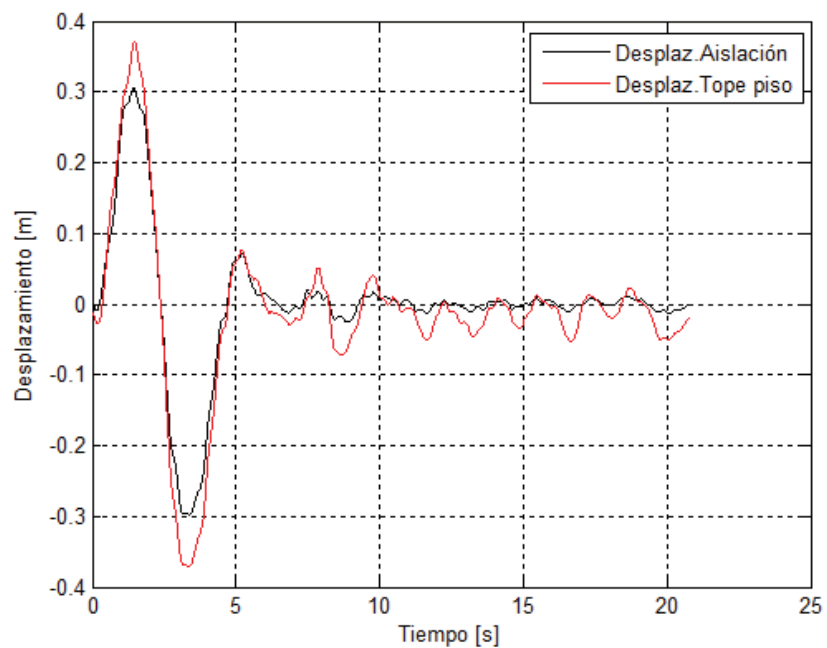
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.48: Respuesta en el tiempo del Pórtico 6

Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

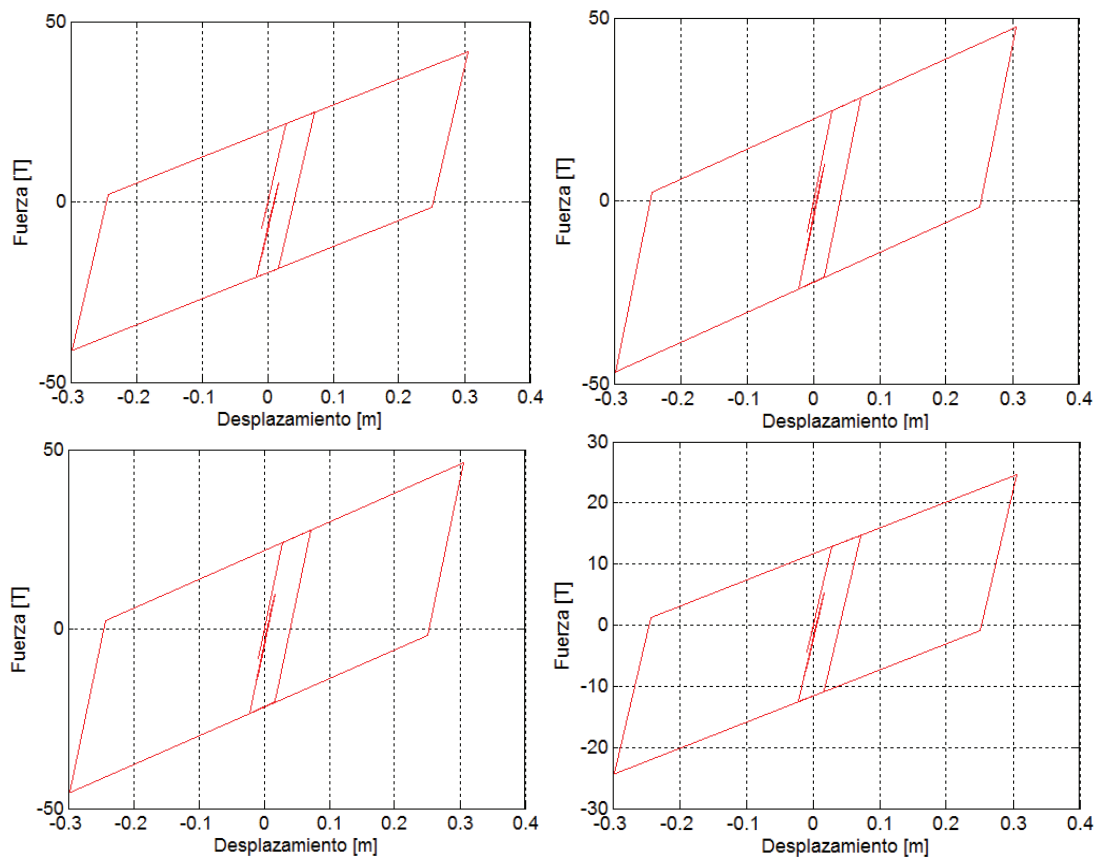


Desplazamiento para cada instante de t

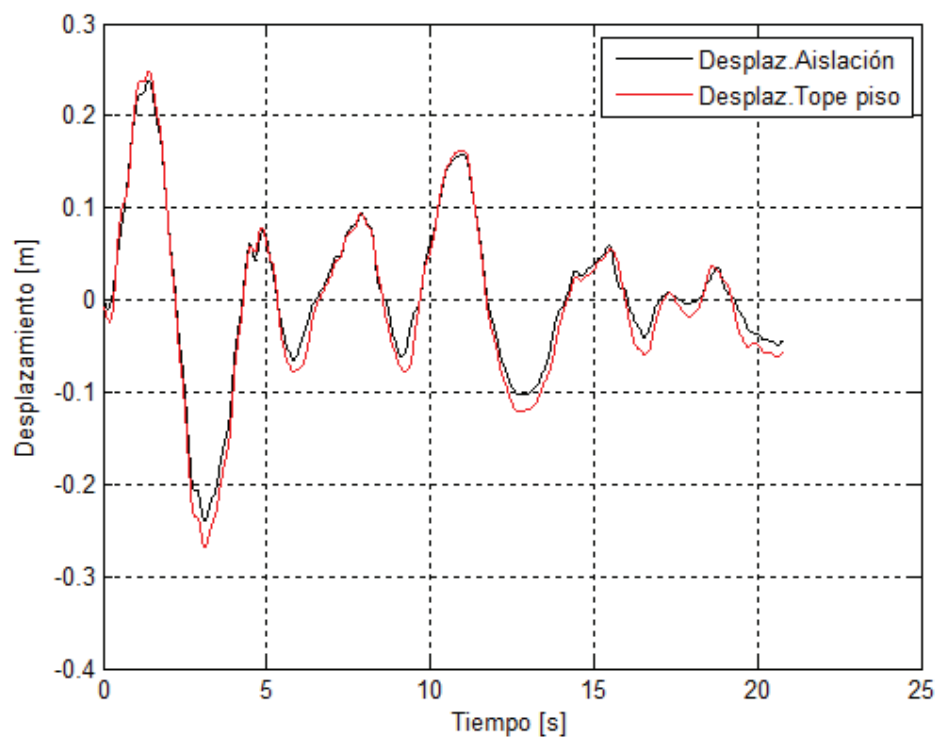
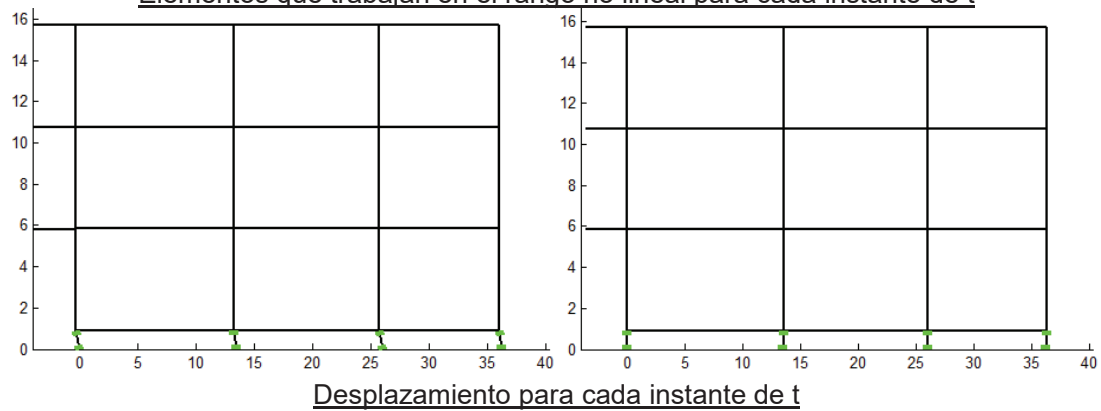


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.49: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 6

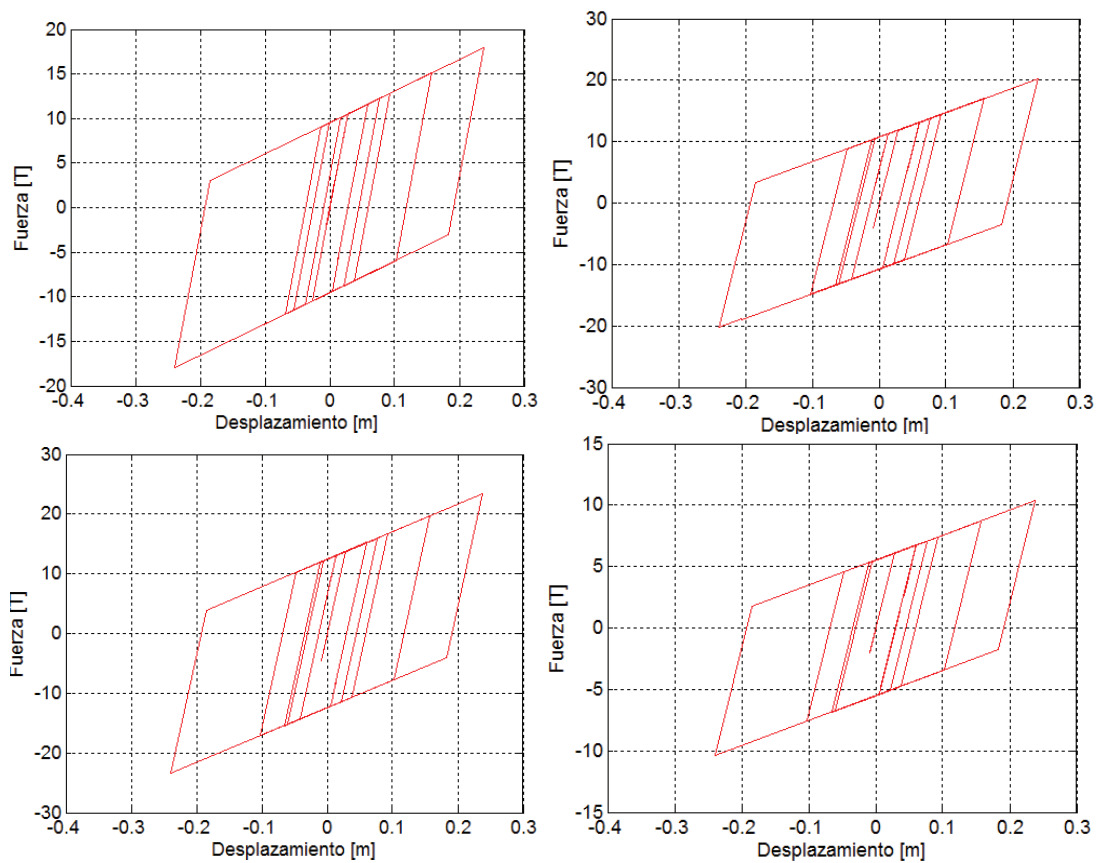


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.50: Respuesta en el tiempo del Pórtico 5Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

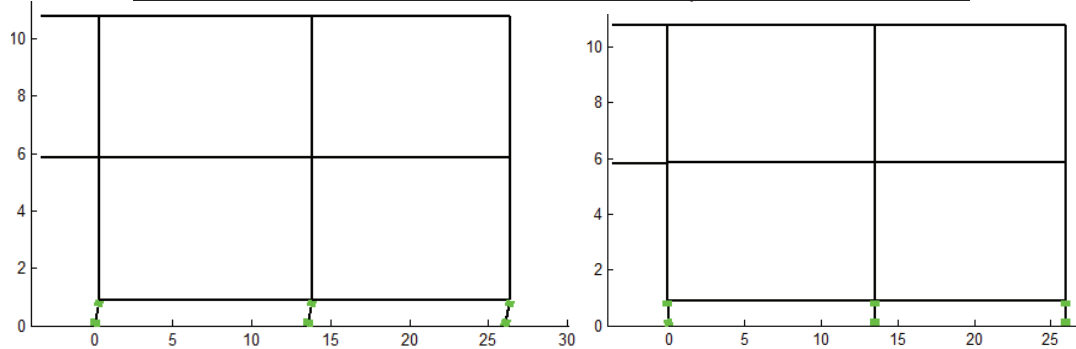
FIGURA 6.51: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 5



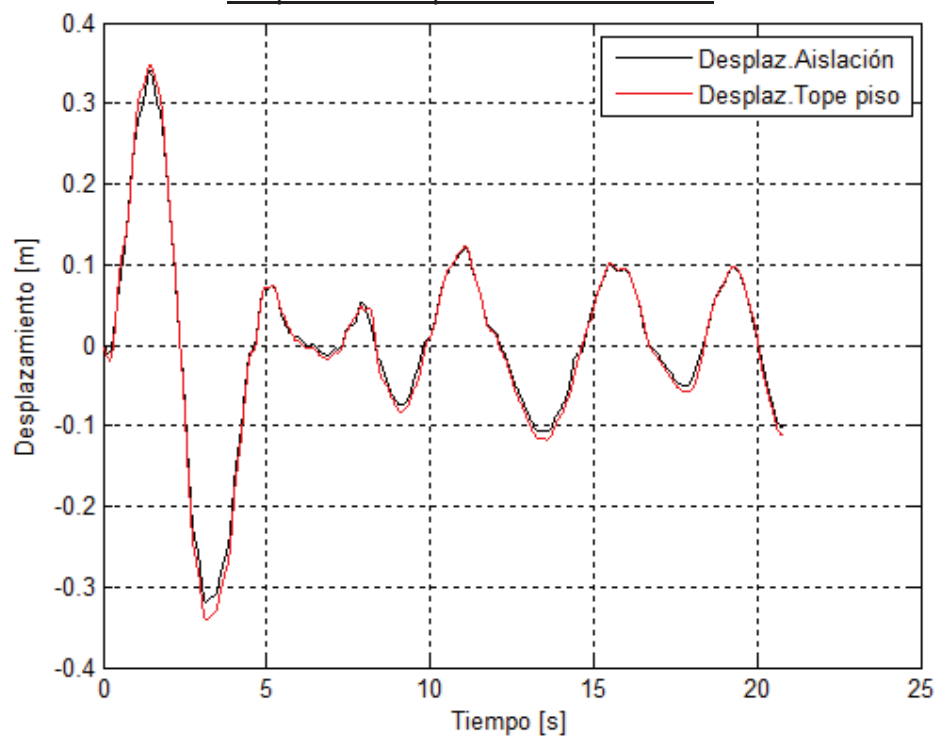
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.52: Respuesta en el tiempo del Pórtico 4

Elementos que trabajan en el rango no lineal para cada instante de t

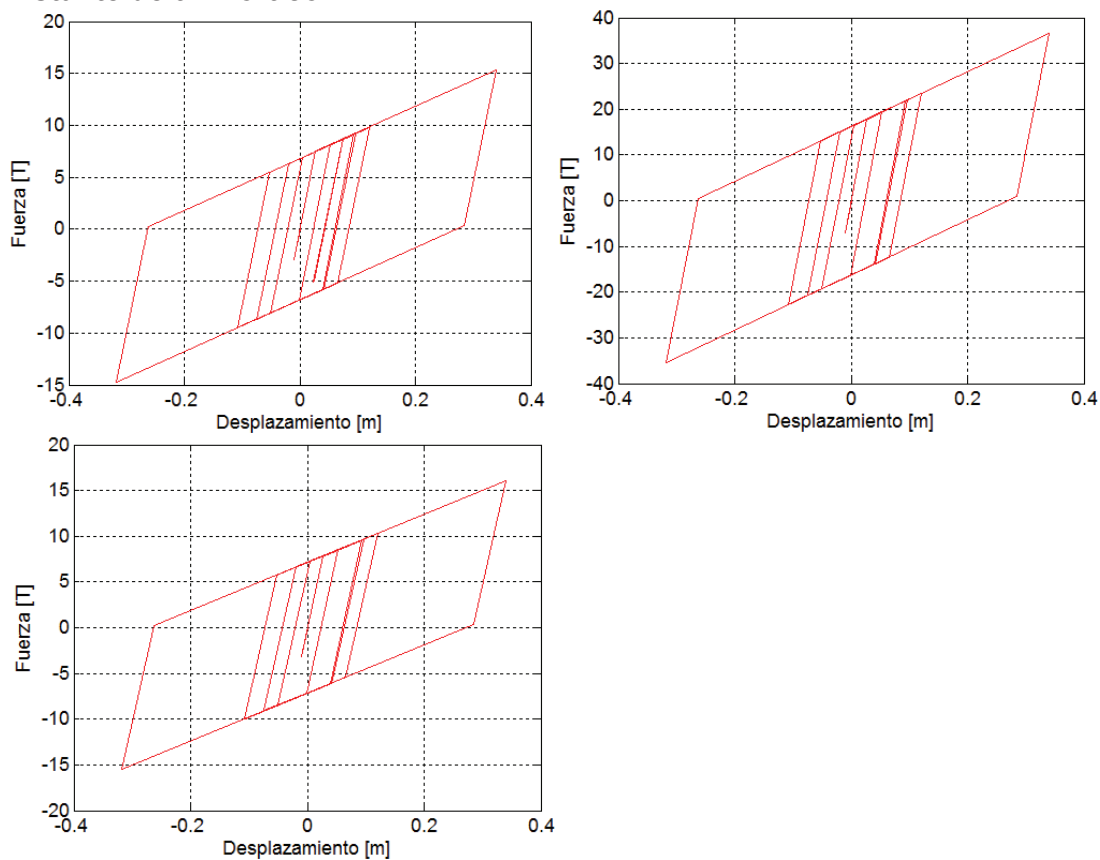


Desplazamiento para cada instante de t



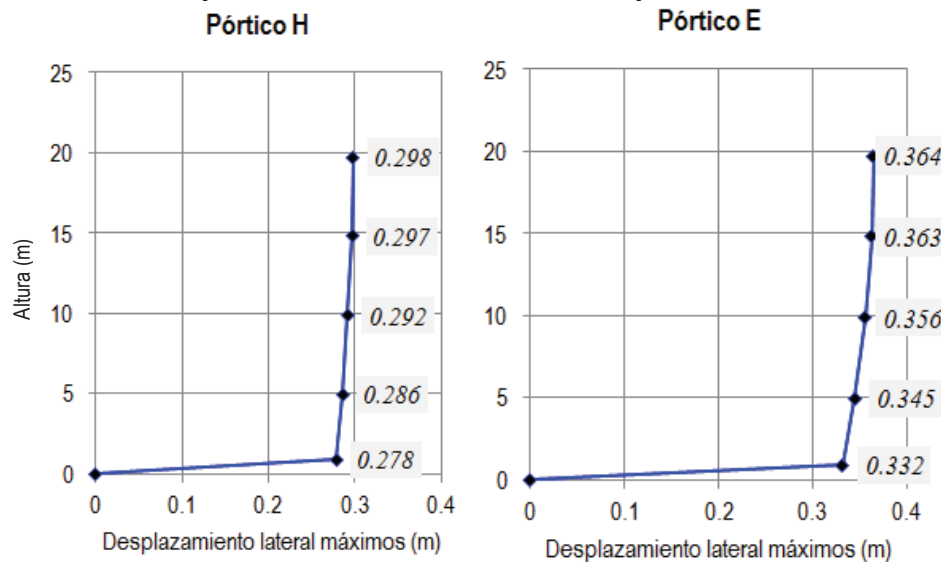
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

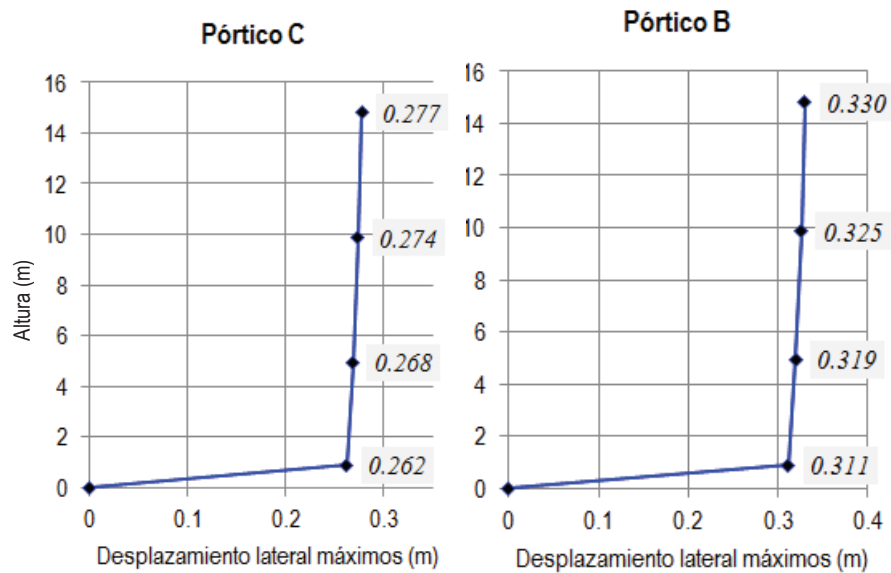
FIGURA 6.53: Diagrama de Histéresis del sistema de aislación para cada instante de t – Pórtico 4



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

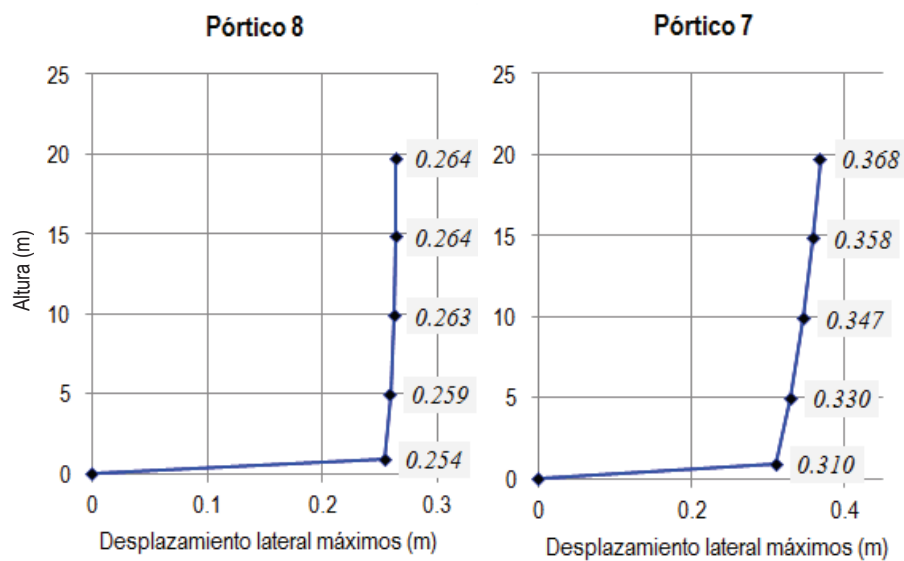
FIGURA 6.54: Desplazamientos máximos de los pórticos en sentido X

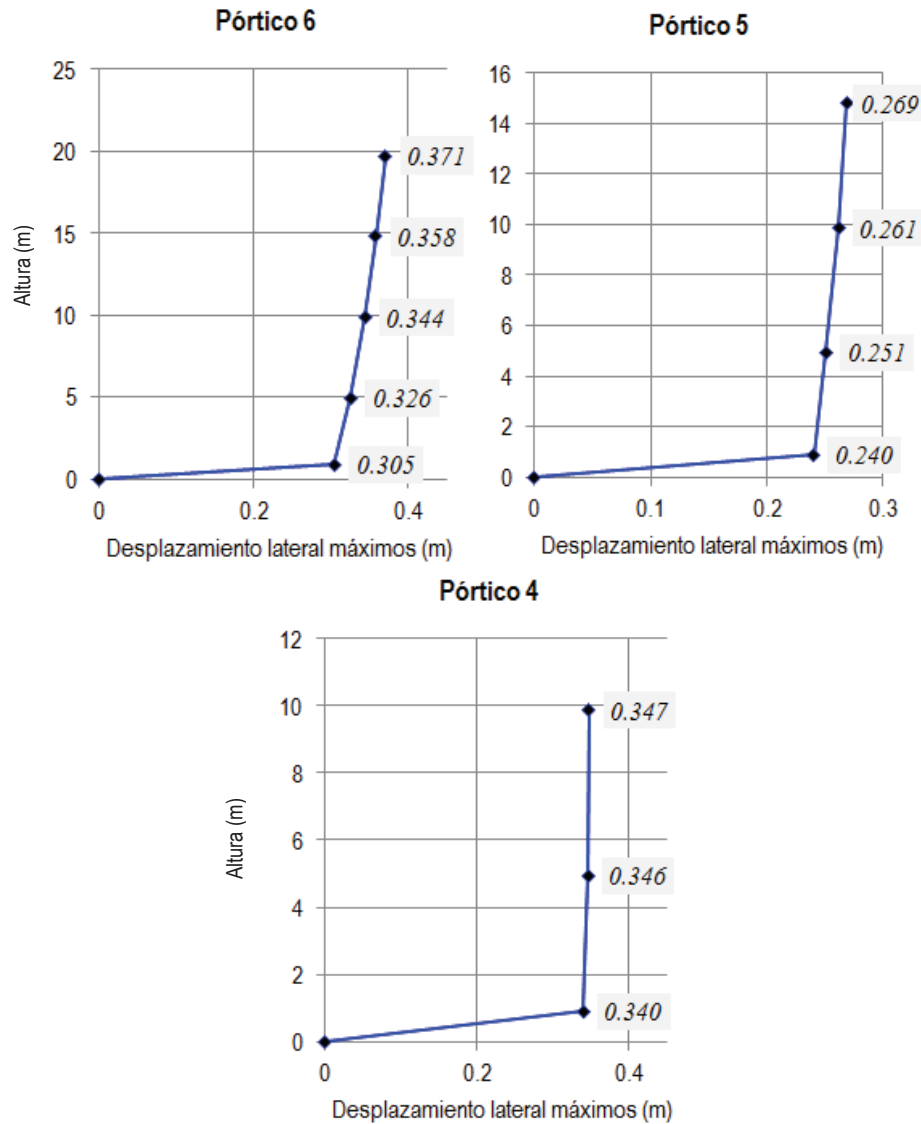




Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.55: Desplazamientos máximos de los pórticos en sentido Y





Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

6.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

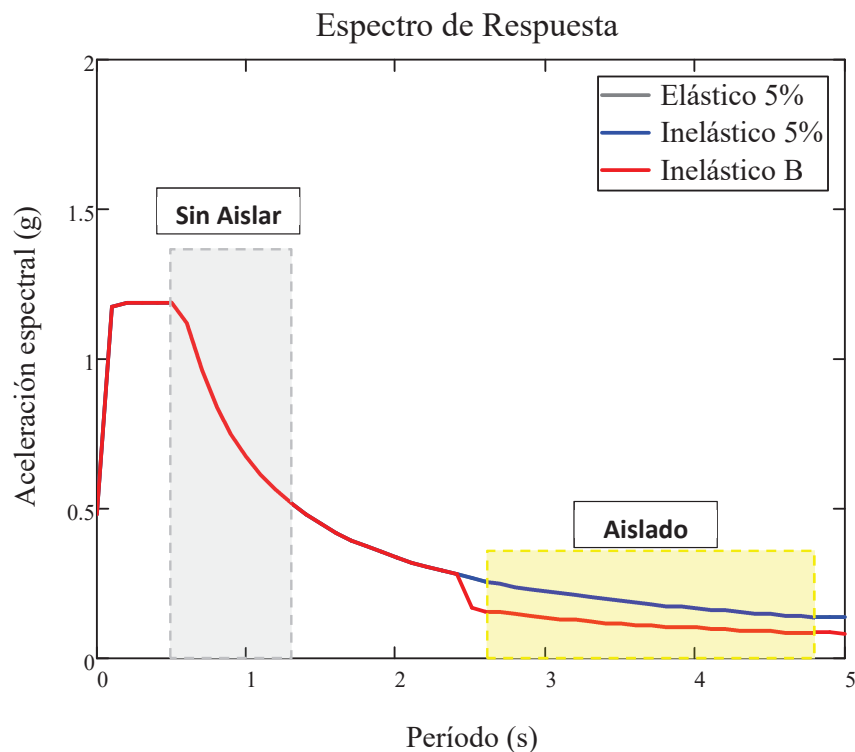
En este apartado se realizará una comparación de los resultados de los pórticos analizados mediante cada uno de los métodos antes descritos, además se usan los resultados obtenidos a partir de una análisis modal espectral para cada uno de los pórticos en estudio.

Las comparaciones se realizarán a través de gráficas elaboradas mediante los resultados obtenidos.

6.7.1. PERÍODOS

Los pórticos analizados sin aislamiento poseen períodos entre 0.65 s y 1.20 s, una vez aislados, como se puede observar en la FIGURA 6.56 el período de los sistemas aislados se incrementa notablemente y con valores superiores a los 2 s.

FIGURA 6.56: Períodos de sistemas aislados y sin aislar

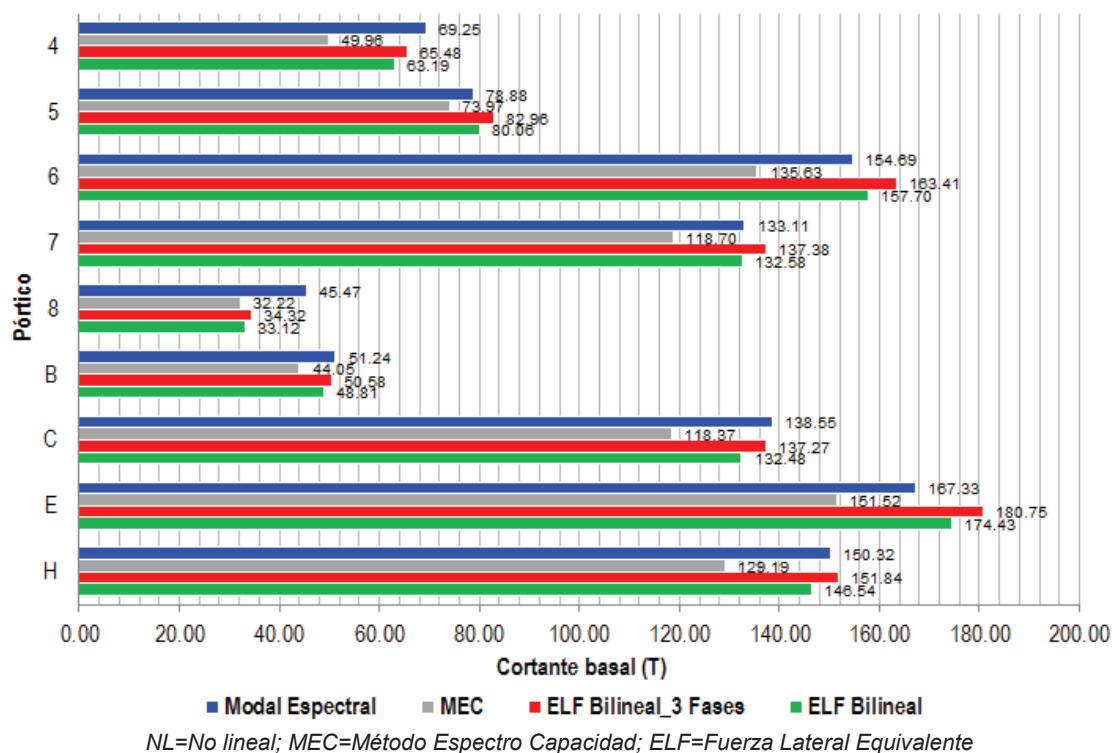


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

6.7.2. CORTANTE BASAL

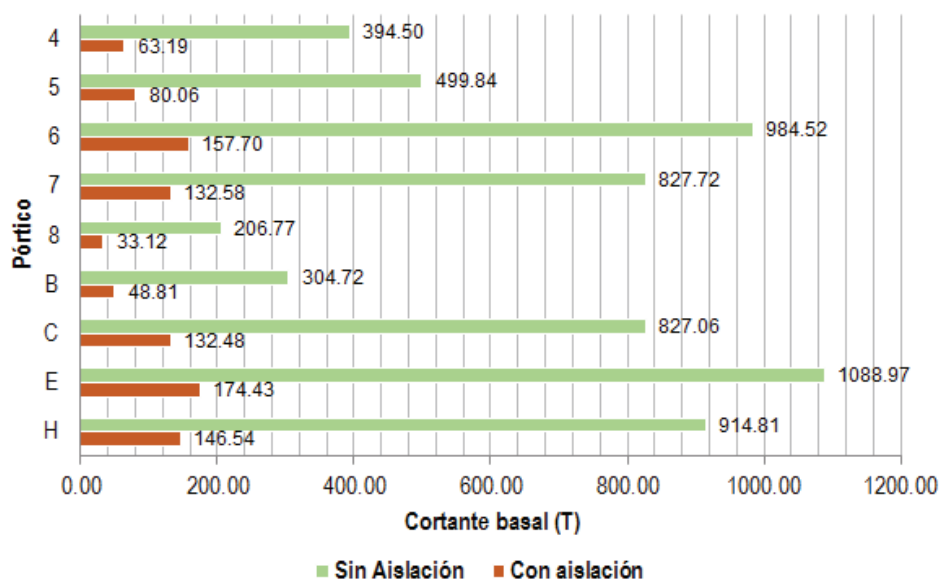
En la FIGURA 6.57 se presentan los valores de cortante basal obtenidos por cada uno de los métodos y en la se presenta la comparativa del cortante basal obtenido en los pórticos sin aislamiento y con aislamiento

FIGURA 6.57: Resultados de cortante basal



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 6.58: Cortante basal en sistemas aislados y sin aislar



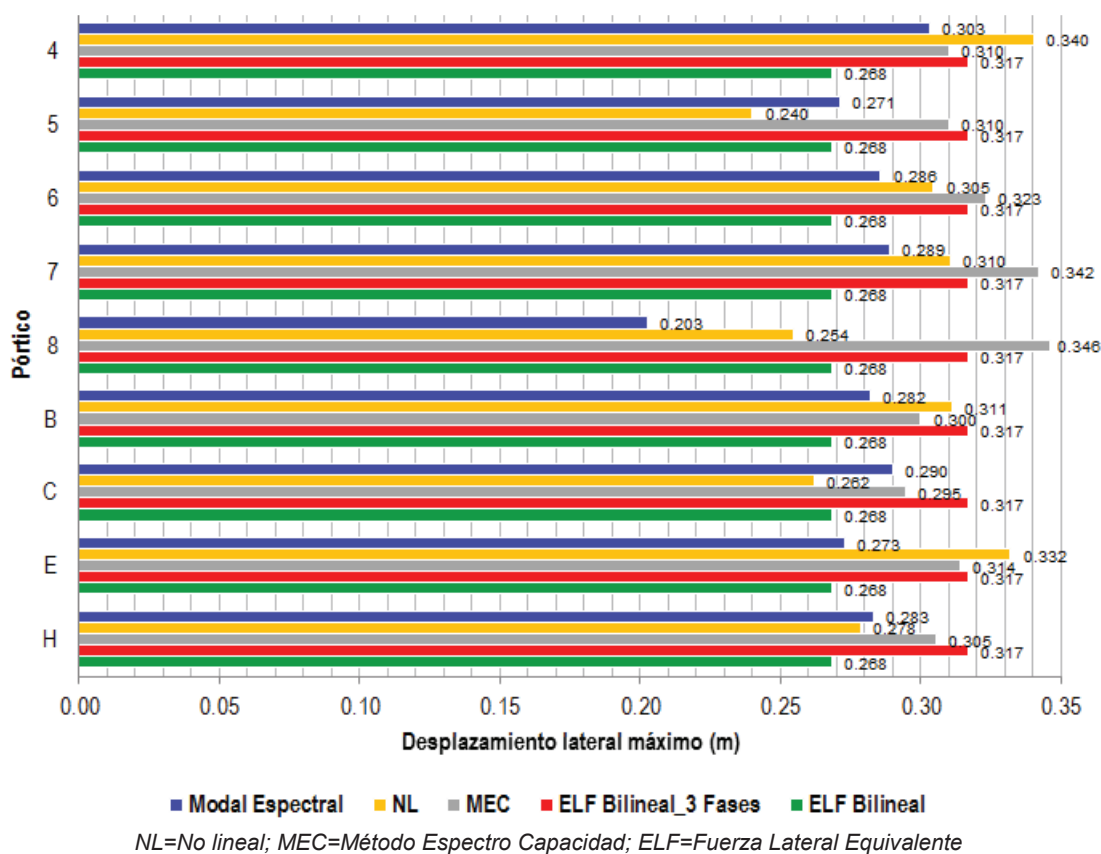
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa:

Una de las ventajas que presenta el uso de sistemas de aislamiento sísmico es la reducción del cortante basal, lo que queda evidenciado en la figura anterior.

6.7.3. DESPLAZAMIENTOS EN EL SISTEMA DE AISLACIÓN

En la FIGURA 6.59 se indica a modo de resumen los desplazamientos obtenidos en el sistema de aislación mediante cada uno de los métodos que forman parte de este trabajo de titulación.

FIGURA 6.59: Desplazamientos en el sistema de aislación

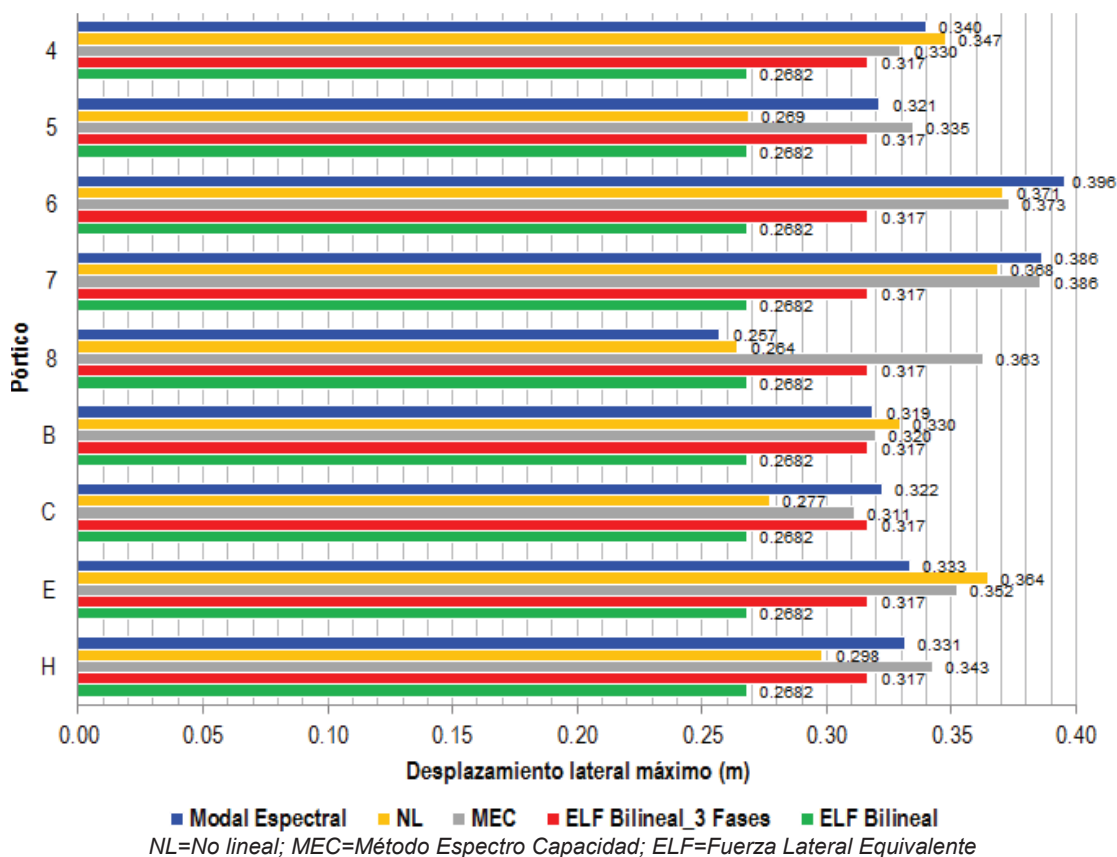


Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

6.7.4. DESPLAZAMIENTO DE PISO EN EL TOPE DE LOS PÓRTICOS

En la FIGURA 6.60 se representan a modo de resumen los desplazamientos de piso en tope de cada uno de los pórticos.

FIGURA 6.60: Desplazamientos en el tope de la superestructura



NL=No lineal; MEC=Método Espectro Capacidad

Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

CAPÍTULO 7

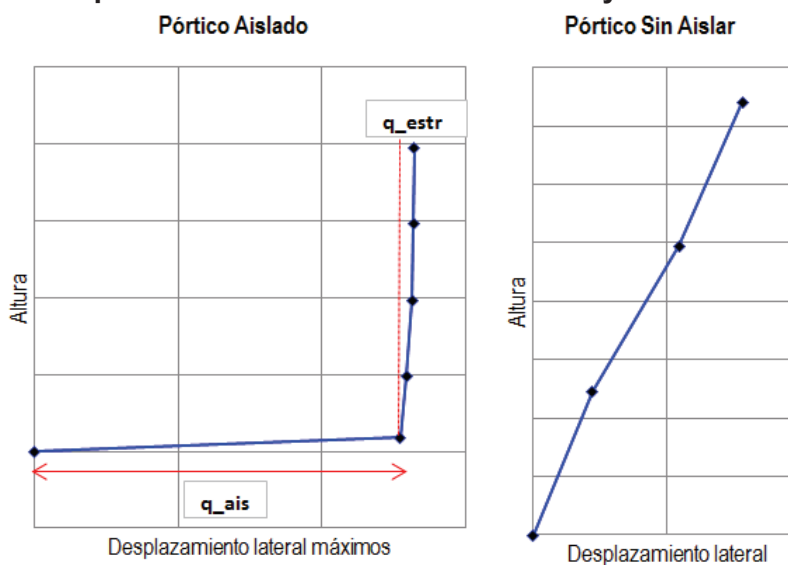
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo de titulación se han evaluado diferentes métodos de análisis de estructuras con aisladores triple péndulo de fricción. Los métodos incluyen planteamientos lineales y no lineales, ambos tipos fueron aplicados usando una serie de subrutinas desarrolladas en MATLAB para **CEINCI-LAB**. Fueron evaluados los desplazamientos máximos en el sistema de aislación, el cortante basal, la energía disipada y los períodos, para indicar la confiabilidad del uso de métodos simplificados presentados en el ASCE 7-16 en comparación con métodos más elaborados como el Método del Espectro Capacidad y el Análisis No Lineal de Historia en el Tiempo. Basados en los resultados obtenidos en este trabajo de titulación, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- Asumiendo que la toda la estructura aislada como un sistema de un grado de libertad, el desplazamiento obtenido en el sistema de aislación mediante los métodos simplificados es sobrestimado en casi un 10% en el caso de Fuerza Lateral Equivalente del ASCE 7-16, Modelo Rígido-Lineal o Bilineal. Sin embargo si se usa el Modelo de las 3 Fases de Constatinuo los resultados son muy próximos a los obtenidos mediante procedimientos no lineales como el Método del Espectro Capacidad .
- El cortante basal en el sistema de aislación, es ligeramente subestimado, del orden del 3%, en el método simplificado del ASCE 7-16 Modelo Rígido-Lineal o Bilineal. En cambio, los valores obtenidos usando el Modelo de las 3 Fases, el Método Espectro Capacidad y el Modal espectral los resultados son muy próximos con diferencias inferiores al 1%.
- Se demuestra que uso de la rigidez equivalente es apropiada para simular el comportamiento histerético del sistema de aislación. Lo mismo sucede con el uso de las rigideces tangentes.

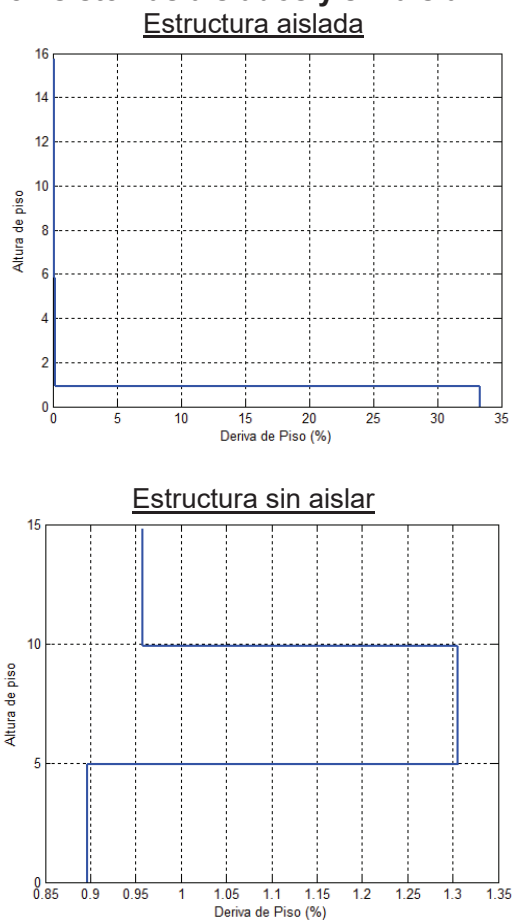
- De acuerdo a las conclusiones se puede decir que el uso del método simplificado del ASCE 7-16 con un Modelo Rígido-Lineal o Bilineal, es recomendable solo para etapas iniciales de prediseños pues da resultados muy bajos. Sin embargo el mismo método pero usando el Modelo de las 3 Fases de Constantinuo da resultados muy precisos en comparación con aquellos arrojados por el Método Espectro Capacidad, Análisis no lineal y el Análisis Modal Espectral. Por tanto los resultados de estos procedimientos deben ser usados para verificar resultados de análisis más exactos y como órdenes de magnitud.
- Como se puede observar en la comparativa de resultados, cuando el método modal espectral es aplicado de forma apropiada, es decir, a partir de datos obtenidos de un modelo de histéresis refinado como el de las 3 Fases de Constantinuo, se obtienen resultados muy cercanos a los obtenidos de un análisis no lineal tiempo historia o no lineal estático como es el caso del Método Espectro Capacidad.
- Para una correcta evaluación de la respuesta de la estructura es necesario conocer los parámetros geométricos y friccionales del sistema de aislación, a partir de datos proporcionados por el fabricante y obtenidos mediante ensayos.
- Una de las ventajas del uso de los sistemas de aislación es la reducción del cortante basal, lo cual queda demostrado en los resultados obtenidos en este trabajo de titulación.
- En la FIGURA 7.1 se indica la gráfica de desplazamientos típica en sistemas aislados y sin aislar; y en la FIGURA 7.2 se indica la gráfica de derivas. Como se puede observar en ambas gráficas los desplazamientos y derivas se concentran en el sistema de aislación, mientras que los sufridos por la superestructura son mínimos lo que permite controlar el daño.

FIGURA 7.1: Desplazamientos en sistemas aislados y sin aislar



Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

FIGURA 7.2: Derivas en sistemas aislados y sin aislar



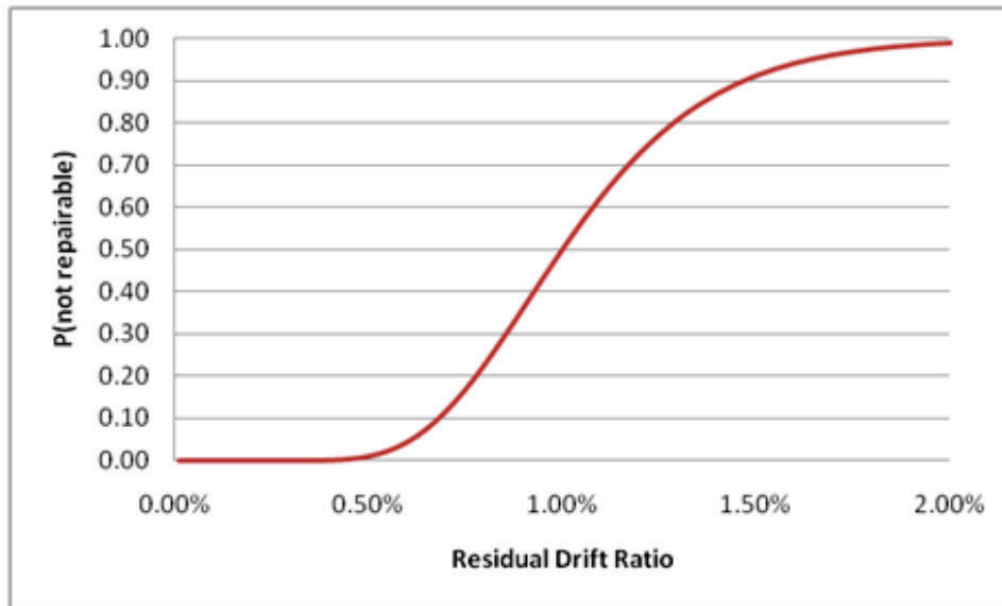
Elaborado por: Evelyn Tipanluisa

Para el desarrollo de cada uno de los diferentes métodos presentados en este trabajo de titulación, se revisó una gran cantidad de información técnica y de diseño, en base a dicha revisión se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos para análisis de estructuras aisladas:

- Para estructuras aisladas el factor de importancia será igual a uno (1) de acuerdo a lo indicado en las provisiones del NEHRP 2015 (FEMA, FEMA P-1050: NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, 2015).
- Sobre el sistema de aislación se debe proveer de un diafragma horizontal o cualquier otro elemento estructural, con el fin de dar continuidad y permitir transferir las fuerzas de forma adecuada de la superestructura al sistema de aislación.
- La separación mínima entre la estructura aislada y cualquier otra estructura, debe ser como mínimo igual a desplazamiento calculado en el sistema de aislación.
- Los desplazamientos y cortante basal deben ser hallados para las propiedades límite superiores e inferiores, y para los sismo DBE y MCE. En caso de no contar con las propiedades inferiores y superiores, se puede realizar los cálculos con las propiedades nominales especificadas por el fabricante y obtenidas a partir de ensayos. Y se ajustarán mediante los factores- λ incorporados en la última versión del código ASCE 7-16.
- Según el NEHRP 2015 (FEMA, FEMA P-1050: NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, 2015), para el uso de Método de la Fuerza Lateral Equivalente se recomienda limitar el amortiguamiento que proporcionan los sistemas de aislación a 30% y el período a menos de 5 s.
- Un sistema de aislación puede ser considerado factible si el período efectivo del sistema aislado es mayor de 3 veces el período de la estructura sin aislar.

- La superestructura debe ser diseñada para resistir el cortante basal dado por $V_s = \frac{V_{st}}{R_1}$, en esta ecuación es importante el valor de R_1 que es el factor de reducción de la fuerza sísmica de acuerdo al tipo de sistema resistente. El valor que debe asignarse a R_1 deberá estar en siguiente rango $\frac{3}{8}R \leq R_1 \leq 2$, con un valor recomendado de $R_1 = 1$ donde R se corresponde con el valor para el tipo de sistema resistente sin aislar.
 - La asignación de valores superiores a 1 significa que el cortante basal se reduce aún más y que la estructura soporta el sismo sufriendo daños.
- En cuanto a las derivas de piso en sistemas aislados se puede citar lo expuesto por el creador y fabricante de los aisladores pendulares friccionales, Víctor Zayas: “El estándar de aisladores indica que las estructuras aisladas que no son esenciales deben estar diseñadas y construidas para limitar los daños sísmicos a menos del 5% y en las estructuras esenciales se debe limitar el daño a menos del 2%; tal que las estructuras aisladas sufran menos daños que las estructuras no aisladas”. Estos criterios están basados en el concepto de “Funcionalidad Continua” expresado en documentos como el FEMA-58 (FEMA-58: Seismic Performance Assessment of Buildings, 2012) y el REDi Rating System (Almufti & Willford, 2013), en los cuales la deriva viene asociada a una probabilidad de reparación de la estructura como se indica en la FIGURA 7.3.

FIGURA 7.3: Posibilidad de reparación de una edificación basada en la deriva



Fuente: (FEMA, 2012)

Elaborado por: (FEMA, FEMA-58: Seismic Performance Assessment of Buildings, 2012)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2007). *Dinámica de Estructuras con MATLAB*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Superior Politécnica del Ejercito.
- Aguiar, R. (2012). *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Superior Politécnica del Ejercito.
- Aguiar, R. (2014). *Análisis Matricial de Estructuras con CEINCI-LAB*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Superior Politécnica del Ejercito.
- Aguiar, R., & Barbat, A. (1997). *Daño sísmico en estructuras de Hormigón Armado* (Primera ed.). (EDIESPE, Ed.) Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.
- Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., & Suárez, V. (2008). *Aisladores de Base Elastoméricos y FPS*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Superior Politécnica del Ejercito.
- Aguiar, R., Mora, D., & Tipanluisa, E. (2016). Método del Espectro de Capacidad en Estructuras con Aisladores FPT con CEINCI-LAB. *CIENCIA*, 21-45.
- Almazán, J. (2001). *Torsión accidental y natural en estructuras aisladas con el sistema de péndulo de fricción*. Tesis Doctoral de la Universidad Católica de Chile.
- Almufti, I., & Willford, M. (2013). *REDi Rating System (Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings)*. REDi.
- Army, U. (1986). Seismic Design Guidelines for Essential Buildings. *Departments of the Army (TM5-809-10-1)*.
- ASCE. (2010). *ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Resto, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ASCE. (2013). *ASCE/SEI 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- ASTM. (2014). *ASTM A36: Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken: ASTM International.
- ATC. (1996). *ATC 40: Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. California: ATC Applied technology Council.

- Chandrasekaran, S. (2010). *Seismic Design Aids for Nonlinear Analysis of Reinforcement Concrete Structures*.
- Chopra, A. (2014). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4 ed.). Prentice-Hall.
- Chopra, A., & Goel, R. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 561-582.
- Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. (1990). Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling. *Journal of Structural Engineering*, 455-474.
- FEMA. (2000). *FEMA 356: Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Washington, D.C: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2012). *FEMA-58: Seismic Performance Assessment of Buildings*. Redwood City, California: Applied Technology Council.
- FEMA. (2015). *FEMA P-1050: NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008). *Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings*. University at Buffalo. USA: Earthquake Engineering to Extreme Events.
- Freeman, S. (1998). Development and use of Capacity Spectrum Method. *Proceeding of the 6th U.S. Natl. Conf. on Earthquake Engineering*.
- Freeman, S., Nicoletti, J., & Tyrell, J. (1975). Evaluations of existing buildings for seismic risk: a case study of Puget Sound Naval Shipyard. *Proceeding of the U.S. Natl. Conf. of Earthquake Engineers*.
- Holzer, e. a. (1975). *A computer Code for general Analysis of two Dimensional Reinforced Concrete Structures*. New México: Report AFWL-TR-74-228.
- Kelly, J. M. (1993). *Earthquake-resistant design with rubber* (Segunda ed.). Springer-Verlag.
- McVitty, W., & Constantinou, M. (2015). *Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings*. University at Buffalo. MCEER (Earthquake Engineering to Extreme Events).
- Mokha, A., Constantinou, M., & Reinhorn, M. (1988). *Teflon Bearing in Aseismic Base Isolation: Experimental studies and Mathematical Modeling*. National

Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo. New York: NCEER.

Molinares, N., & Barbat, A. (1994). Edificios con aislamiento de base no lineal. *Monografías de Ingeniería Sísmica*, 98.

Mora, D. (2015). Comportamiento de Estructuras de Acero con y sin disipadores de Energía Tipo TADAS, ubicadas en la ciudad de Quito, por el Método del Espectro Capacidad. Tesis de la EPN.

Naemin, F., & Kelly, J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures from theory to practice*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Naoki, S. (2003). Damping Evaluation Using Full-Scale Data of Buildings in Japan. *Journal of Structural Engineering*.

NEC. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción. NEC_SE_DS: Peligro Sísmico-Diseño Sismo Resistente*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.

Rosenblueth, E., & Herrera, I. (1964). On a kind of hysteretic damping. *Engineering Mechanics Division*, 37-48.

WJE. (1996). Seismic Dynamic Analysis for Buildings. *U.S. Army Engineering Division by Wiss*.

Zayas, V., Stanley, L., & Stephen, M. (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 317-333.

Zorita, H. (2015). *Manual didáctico de estructuras II* (Primera ed.).

ANEXOS

REPORTE FOTOGRÁFICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL BLOQUE ESTRUCTURAL N° 1 DEL NUEVO CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DE LA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS ESPE

Construcción de Vigas de Cimentación y Pedestales



Planta de cimentación



Aisladores Centrales



Aisladores de Borde



Construcción de la Estructura Metálica



Vista Frontal



Vista Lateral



Vista Posterior
Anclaje a aisladores

