



## **Estructuras con elementos de enlace que trabajan como disipador de energía**

Romero Abarca, Jorge Isaac

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Aguiar Falconí, Roberto Rodrigo, PhD

7 de agosto de 2020



### Document Information

<b>Analyzed document</b>	ROMERO ABARCA JORGE ISAAC - TESIS (1).docx (D77548949)
<b>Submitted</b>	8/6/2020 7:06:00 PM
<b>Submitted by</b>	Pazmiño Montero Martha Elizabeth
<b>Submitter email</b>	mepazminio@espe.edu.ec
<b>Similarity</b>	2%
<b>Analysis address</b>	mepazminio.espe@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / DINAMICA DE ESTRUCTURAS.pdf</b> Document DINAMICA DE ESTRUCTURAS.pdf (D12490986) Submitted by: crcepeda@espe.edu.ec Receiver: crcepeda.espe@analysis.orkund.com		3
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.researchgate.net/publication/334164454_INTERFACE_FOR_ICEINCI-LAB_AND_N">https://www.researchgate.net/publication/334164454_INTERFACE_FOR_ICEINCI-LAB_AND_N</a> ... Fetched: 7/23/2020 7:28:58 PM		9
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.researchgate.net/publication/303256522_Analisis_Sismico_de_Estructuras...">https://www.researchgate.net/publication/303256522_Analisis_Sismico_de_Estructuras...</a> Fetched: 6/11/2020 9:14:16 AM		8
<b>W</b>	URL: <a href="https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/download/1619/1249">https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/download/1619/1249</a> Fetched: 6/16/2020 2:23:25 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.researchgate.net/publication/313878746_Disipadores_de_energia_Shear_Link">https://www.researchgate.net/publication/313878746_Disipadores_de_energia_Shear_Link</a> Fetched: 12/1/2019 7:03:25 AM		2
<b>SA</b>	<b>DAVID EDUARDO SANCHEX.pdf</b> Document DAVID EDUARDO SANCHEX.pdf (D45009318)		1
<b>SA</b>	<b>20171026 Sinchiguano Juan.pdf</b> Document 20171026 Sinchiguano Juan.pdf (D31735865)		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/download/1617/1246">https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/download/1617/1246</a> Fetched: 6/18/2020 2:21:18 AM		1

Firma:

Ing. Aguiar Falconí, Roberto Rodrigo, PhD

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **Estructuras con elementos de enlace que trabajan como disipador de energía** fue realizado por el señor **Romero Abarca, Jorge Isaac** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 7 de agosto de 2020

Firma:

Ing. Aguiar Falconí, Roberto Rodrigo, PhD

CC: 1703641827



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Romero Abarca, Jorge Isaac**, con cédula de ciudadanía n° 1718233818, declaro que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **Estructuras con elementos de enlace que trabajan como disipador de energía** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 7 de agosto de 2020

Romero Abarca, Jorge Isaac

CC: 1718233818



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Romero Abarca, Jorge Isaac**, con cédula de ciudadanía n° 1718233818, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estructuras con elementos de enlace que trabajan como disipador de energía** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 7 de agosto de 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jorge Romero Abarca', written over a horizontal line.

Romero Abarca, Jorge Isaac

CC: 1718233818

### **Dedicatoria**

*Dedico este trabajo a mis padres y hermana por el apoyo incondicional y la comprensión a lo largo de toda la carrera, especialmente en las largas noches de estudio.*

*A mis abuelitos, tías, tíos y primos, que a pesar de la distancia me han seguido motivando a que cumpla mis sueños y siga luchando por ellos.*

*A mi director de tesis que ha sido un ejemplo a seguir, no solo por su dedicación a la investigación, sino también por su devoción y amor al deporte.*

## **Agradecimiento**

*A Dios por darme la fuerza para alcanzar mis metas, la paciencia para seguir luchando por mis sueños y la sabiduría para poder haber solventado todos los problemas que se me han presentado.*

*A mis padres y hermana por todo su apoyo, tanto en los momentos difíciles como en las victorias.*

*A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por compartir los conocimientos que me servirán para ser buen profesional.*

*A mi director de tesis, Ing. Roberto Aguiar, Ph.D quién me apoyó constantemente para poder realizar un gran trabajo, me motivó a seguir adelante con una gran devoción y amor por la investigación y el deporte. A la Ing. Blanca Chávez, Mgs por su ayuda y apoyo en el presente trabajo de titulación.*

*A los demás colaboradores de los diferentes países, quienes muy generosamente nos han apoyado con su conocimiento.*

## Índice

<b>Carátula.....</b>	<b>1</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>7</b>
<b>Índice.....</b>	<b>8</b>
<b>Índice tablas.....</b>	<b>12</b>
<b>Índice figuras.....</b>	<b>16</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>19</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo 1. Generalidades.....</b>	<b>21</b>
Antecedentes.....	21
Planteamiento del problema.....	25
Área de estudio.....	27
Justificación.....	27
Objetivos.....	29
<i>Objetivo General.....</i>	<i>29</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>29</i>
Metas.....	29
Hipótesis.....	30
<b>Capítulo 2. Evaluación de la Estructura Actual.....</b>	<b>31</b>
Características de la Edificación.....	31
<i>Ubicación.....</i>	<i>31</i>

<i>Daño observado en el sismo de 16 de abril de 2016</i> .....	31
Descripción estructural .....	33
Sismicidad en Ecuador .....	34
Análisis de la estructura.....	37
<i>Análisis dinámico</i> .....	42
<i>Análisis estático</i> .....	46
<i>Resumen de funciones en CEINCI-LAB</i> .....	52
<b>Capítulo 3.    Evaluación de la estructura utilizando disipadores TADAS.....</b>	<b>59</b>
Parámetros elásticos del disipador TADAS .....	59
<i>Cálculo de la curvatura del disipador TADAS</i> .....	60
<i>Fuerza y desplazamiento de fluencia del disipador TADAS</i> .....	61
<i>Rigidez elástica del disipador TADAS</i> .....	62
<i>Parámetros elásticos de disipador TADAS</i> .....	62
Modelación de la estructura con disipadores utilizando el método de la diagonal equivalente .....	63
<i>Descripción estructural</i> .....	66
<i>Análisis dinámico</i> .....	70
<i>Análisis estático</i> .....	73
<i>Resumen de funciones en CEINCI-LAB</i> .....	78
Modelación de la estructura con disipadores utilizando al disipador como un elemento más de la estructura .....	82
<i>Descripción estructural</i> .....	83
<i>Análisis Dinámico</i> .....	84

	10
<i>Análisis Estático</i> .....	86
<i>Resumen de funciones en CEINCI-LAB</i> .....	93
<b>Capítulo 4. Evaluación de la estructura utilizando elementos de enlace</b> .....	<b>96</b>
Parámetros elásticos del elemento de enlace .....	96
<i>Fuerza y desplazamiento de fluencia del elemento de enlace</i> .....	98
<i>Rigidez lateral</i> .....	99
<i>Parámetros elásticos del elemento de enlace</i> .....	102
Prediseño del elemento de enlace .....	104
<i>Geometría del elemento de enlace</i> .....	104
<i>Detalle del enlace.</i> .....	105
Modelación de la estructura equivalente en acero.....	109
<i>Descripción estructural</i> .....	111
<i>Análisis Dinámico</i> .....	112
<i>Análisis Estático</i> .....	114
Modelación de la estructura con disipadores utilizando el elemento de enlace en el centro del pórtico .....	119
<i>Descripción estructural</i> .....	119
<i>Análisis Dinámico</i> .....	121
<i>Análisis Estático</i> .....	123
Alternativas de diseño.....	129
<i>Estructura con cartelas metálicas</i> .....	130
<i>Estructura con elemento de enlace a un costado del pórtico.</i> .....	132

	11
Resumen de funciones en CEINCI-LAB .....	134
<b>Capítulo 5. Comparación de los Resultados Obtenidos .....</b>	<b>138</b>
<b>Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>145</b>
Conclusiones.....	145
Recomendaciones .....	147
<b>Referencias.....</b>	<b>148</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>151</b>

## Índice tablas

<b>Tabla 2.1</b> <i>Cargas por piso</i> .....	40
<b>Tabla 2.2</b> <i>Fuerzas en pórticos 1-4</i> .....	41
<b>Tabla 2.3</b> <i>Fuerzas en pórticos A-H</i> .....	42
<b>Tabla 2.4</b> <i>Factor de Amortiguamiento</i> .....	43
<b>Tabla 2.5</b> <i>Indicadores de rigidez</i> .....	45
<b>Tabla 2.6</b> <i>Análisis dinámico de la estructura de hormigón armado sin reforzamiento</i> ...	45
<b>Tabla 2.7</b> <i>Distribución de fuerzas</i> .....	46
<b>Tabla 2.8</b> <i>Fuerzas Axiales Estructura de Hormigón Armado – Sentido X</i> .....	47
<b>Tabla 2.9</b> <i>Fuerzas Cortantes Estructura de Hormigón Armado – Sentido X</i> .....	48
<b>Tabla 2.10</b> <i>Momentos en Estructura de Hormigón Armado – Sentido X</i> .....	49
<b>Tabla 2.11</b> <i>Fuerzas Axiales en Estructura de Hormigón Armado - Sentido Y</i> .....	50
<b>Tabla 2.12</b> <i>Fuerzas Cortantes en Estructura de Hormigón Armado - Sentido Y</i> .....	51
<b>Tabla 2.13</b> <i>Momentos en Estructura de Hormigón Armado - Sentido Y</i> .....	52
<b>Tabla 3.1</b> <i>Parámetros del diagrama bilineal para disipadores TADAS</i> .....	63
<b>Tabla 3.2</b> <i>Períodos, derivas y desplazamientos en estructura reforzada con disipadores TADAS, mediante el método de diagonales equivalentes</i> .....	71
<b>Tabla 3.3</b> <i>Fuerzas transmitidas a los pórticos</i> .....	72
<b>Tabla 3.4</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido X</i> .....	73
<b>Tabla 3.5</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido X</i> .....	74
<b>Tabla 3.6</b> <i>Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido X</i> .....	75

<b>Tabla 3.7</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura de Hormigón Armado con disipadores</i>	
<i>TADAS (diagonal equivalente) – Sentido Y.</i> .....	76
<b>Tabla 3.8</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores</i>	
<i>TADAS (diagonal equivalente) – Sentido Y.</i> .....	77
<b>Tabla 3.9</b> <i>Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS</i>	
<i>(diagonal equivalente) – Sentido Y.</i> .....	78
<b>Tabla 3.10</b> <i>Periodos, derivas y desplazamientos en estructura reforzada con</i>	
<i>disipadores TADAS mediante elemento disipador</i> .....	85
<b>Tabla 3.11</b> <i>Fuerzas transmitidas a los pórticos</i> .....	85
<b>Tabla 3.12</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura de Hormigón Armado con disipadores</i>	
<i>TADAS (elemento disipador) – Sentido X.</i> .....	87
<b>Tabla 3.13</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores</i>	
<i>TADAS (elemento disipador) – Sentido X.</i> .....	88
<b>Tabla 3.14</b> <i>Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS</i>	
<i>(elemento disipador) – Sentido X.</i> .....	89
<b>Tabla 3.15</b> <i>Fuerzas en disipadores TADAS pórticos 1-4</i> .....	89
<b>Tabla 3.16</b> <i>Fuerzas Axial – Estructura de Hormigón Armado con disipadores</i>	
<i>TADAS (elemento disipador) – Sentido Y.</i> .....	90
<b>Tabla 3.17</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores</i>	
<i>TADAS (elemento disipador) – Sentido Y.</i> .....	91
<b>Tabla 3.18</b> <i>Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS</i>	
<i>(elemento disipador) – Sentido Y.</i> .....	92
<b>Tabla 3.19</b> <i>Fuerzas en disipador TADAS pórticos A-H</i> .....	93
<b>Tabla 4.1</b> <i>Secciones equivalentes en acero</i> .....	110
<b>Tabla 4.2</b> <i>Relación ancho espesor de secciones de acero</i> .....	111

<b>Tabla 4.3</b> <i>Derivas y desplazamiento de estructura de acero equivalente.</i> .....	113
<b>Tabla 4.4</b> <i>Fuerzas transmitidas a los pórticos.</i> .....	113
<b>Tabla 4.5</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura de Acero Equivalente – Sentido X.</i> .....	114
<b>Tabla 4.6</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura de Acero Equivalente – Sentido X.</i> .....	115
<b>Tabla 4.7</b> <i>Momentos– Estructura de Acero Equivalente – Sentido X.</i> .....	116
<b>Tabla 4.8</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura de Acero Equivalente – Sentido Y.</i> .....	117
<b>Tabla 4.9</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura de Acero Equivalente – Sentido Y.</i> .....	118
<b>Tabla 4.10</b> <i>Momentos – Estructura de Acero Equivalente – Sentido Y.</i> .....	119
<b>Tabla 4.11</b> <i>Derivas y desplazamiento de estructura de acero con elementos de enlace (centro).</i> .....	122
<b>Tabla 4.12</b> <i>Fuerzas transmitidas a los pórticos</i> .....	123
<b>Tabla 4.13</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido X.</i> .....	124
<b>Tabla 4.14</b> <i>Fuerzas Cortantes – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido X.</i> .....	125
<b>Tabla 4.15</b> <i>Momento – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido X.</i> .....	126
<b>Tabla 4.16</b> <i>Fuerzas Axiales – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido Y.</i> .....	127
<b>Tabla 4.17</b> <i>Fuerzas Cortante – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido Y.</i> .....	128
<b>Tabla 4.18</b> <i>Momento – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido Y.</i> .....	129
<b>Tabla 4.19</b> <i>Derivas y desplazamiento de estructura de con elementos de enlace (cartelas).</i> .....	131
<b>Tabla 4.20</b> <i>Derivas y desplazamiento de estructura de con elementos de enlace (costado).</i> .....	134

**Tabla 5.1** *Factores de amortiguamiento en estructuras analizadas* ..... 139

## Índice figuras

<b>Figura 1.1</b> <i>Disipador TADAS</i> .....	23
<b>Figura 1.2</b> <i>Disipador TADAS sobre contravientos de acero</i> .....	23
<b>Figura 1.3</b> <i>Esquema de elemento de enlace</i> .....	24
<b>Figura 1.4</b> <i>Episcentros de los terremotos mayores a 6.5 grados en Magnitud Richter, ocurridos desde 1900 hasta el 2017.</i> .....	26
<b>Figura 2.1</b> <i>Ubicación del hospital</i> .....	31
<b>Figura 2.2</b> <i>Daño en mampostería y elementos estructurales. a) Nudo interior del tercer piso, b) Daño en paredes con salientes, c) Rotura diagonal en pared entre ventanas.</i> .....	32
<b>Figura 2.3</b> <i>Configuración estructural de la estructura del primer piso</i> .....	34
<b>Figura 2.4</b> <i>Secciones en estructura de hormigón armado</i> .....	34
<b>Figura 2.5</b> <i>a) Sismicidad en Ecuador, b) Sismicidad en la Costa</i> .....	35
<b>Figura 2.6</b> <i>Acelerogramas del terremoto del 16<sup>a</sup></i> .....	36
<b>Figura 2.7</b> <i>Espectros del Manta comparados con espectros de NEC-15</i> .....	37
<b>Figura 2.8</b> <i>Numeración de nudos y elementos a) pórticos A-H, b) pórticos 1-4</i> .....	38
<b>Figura 2.9</b> <i>Detalle típico de losa</i> .....	39
<b>Figura 2.10</b> <i>Carga rectangular equivalente para carga triangular y trapezoidal</i> .....	40
<b>Figura 2.11</b> <i>Distribución de cargas</i> .....	41
<b>Figura 3.1</b> <i>Disipadores TADAS y ADAS</i> .....	59
<b>Figura 3.2</b> <i>Diagramas de deformación, momento, geometría y curvatura de un disipador TADAS</i> .....	60
<b>Figura 3.3</b> <i>Relación fuerza deformación de un disipador TADAS</i> .....	63
<b>Figura 3.4</b> <i>Modelo diagonal-disipador como resortes en serie</i> .....	64
<b>Figura 3.5</b> <i>Partición de la rigidez efectiva del disipador hacia cada diagonal.</i> .....	65

	17
<b>Figura 3.6</b> Secciones de diagonales y elemento TADAS .....	66
<b>Figura 3.7</b> Placas que conforman el dissipador de energía TADAS; b) Curva constitutiva del dissipador TADAS ensayado. ....	66
<b>Figura 3.8</b> Vista en planta del reforzamiento.....	67
<b>Figura 3.9</b> Pórticos Exteriores de reforzamiento. a) Pórticos A - H, b) Pórticos 1 - 4....	68
<b>Figura 3.10</b> Numeración de nudos y elementos en estructura con dissipadores TADAS a) Pórticos 1-4, b) Pórticos A-H.....	69
<b>Figura 3.11</b> a) Modelo Empotrado - Rodillo, b) Modelo del elemento en coordenadas globales para ensamblaje con la matriz de rigidez.....	82
<b>Figura 3.12</b> Numeración de nudos y elementos en estructura con dissipadores TADAS considerado como un elemento adicional de la estructura a) Pórticos 1-4, b) Pórticos A – H .....	83
<b>Figura 4.1</b> Tipologías estructurales. a) Marco resistente a momento (MRF), b) Pórtico arriostrado concéntricamente (CBF), c) Pórtico arriostrado excéntricamente (EBF).....	96
<b>Figura 4.2</b> Tipo de estructura con elementos de enlace.....	97
<b>Figura 4.3</b> Ensayo de un elemento de enlace corto; a la izquierda curva de histéresis y a la derecha estado en el que quedó el elemento luego de varios ciclos de carga de hasta 0.075 rad.....	98
<b>Figura 4.4</b> Ensayo de un elemento de enlace largo; a la izquierda curva constitutiva obtenida y a la derecha estado en que quedó el elemento luego de varios ciclos de carga llegando a una deformación de 0.06 rad.....	98
<b>Figura 4.5</b> Variación de la rigidez relativa en función de la longitud del enlace, e, para distintos valores de h/L.....	100
<b>Figura 4.6</b> Diagrama de momentos flectores y esfuerzos de corte en el enlace. ....	101

<b>Figura 4.7</b> Valores de desplazamiento, a) desplazamiento horizontal, b) desplazamiento vertical. ....	101
<b>Figura 4.8</b> Energía interna en la estructura.....	102
<b>Figura 4.9</b> Diagrama de cuerpo libre de un elemento de enlace.....	102
<b>Figura 4.10</b> Diagrama de interacción M-V y clasificación.....	104
<b>Figura 4.11</b> Detalle del enlace en la zona central de la viga con riostras formadas por secciones tubulares con placas de conexión.....	106
<b>Figura 4.12</b> Detalle de elemento de enlace.....	108
<b>Figura 4.13</b> Secciones equivalentes en acero .....	110
<b>Figura 4.14</b> Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.....	111
<b>Figura 4.15</b> Pórticos exteriores de reforzamiento. a) Pórticos 1 - 4, b) Pórticos A - H	120
<b>Figura 4.16</b> Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero con elementos de enlace (centro) a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.....	121
<b>Figura 4.17</b> Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero con elementos de enlace (cartelas) a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.....	130
<b>Figura 4.18</b> Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero con elementos de enlace (costado) a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.....	132
<b>Figura 5.1</b> Comparación de los periodos de los distintos modelos analizados.....	138
<b>Figura 5.2</b> Comparación de desplazamientos y derivas máximos en el sentido X de los modelos analizados.....	140
<b>Figura 5.3</b> Comparación de derivas y desplazamientos máximos en el sentido Y de los modelos analizados.....	141
<b>Figura 5.4</b> Parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.....	142

## Resumen

El presente proyecto contempla el análisis de una estructura con disipadores TADAS, y una estructura arriostrada excéntricamente generando un elemento de enlace que trabaja como disipador de energía. Para dicho análisis se toma como base la estructura del bloque 2 del Hospital Rodríguez Zambrano, el cual después del terremoto del 16 de abril de 2016, fue reforzado mediante el uso de disipadores TADAS. Este disipador se lo analiza con el modelo de diagonal equivalente, y se contrasta con el modelo que considera al disipador como un elemento más de la estructura. Para analizar una estructura con diagonales excéntricas, se obtiene una estructura de acero equivalente, la cual se la refuerza con diagonales excéntricas generando el elemento de enlace. Para ésta se considera 3 formas de colocar el elemento de enlace (al centro del vano, en un costado del vano, y con la utilización de cartelas). Una vez obtenido los resultados de la investigación se observa que mediante el uso de elementos de enlace hay un mejor control en las derivas de piso y en los desplazamientos de la estructura, siendo la estructura con el elemento de enlace ubicado al centro del vano la mejor opción. Además, según lo revisado y en base a la experiencia de reforzamiento del hospital Rodríguez Zambrano, puede obtenerse menores costos de reparación en estructuras después de un sismo con el uso de elementos de enlace removibles.

Palabras clave:

- **ANALISIS SÍSMINO**
- **DISIPADORES TADAS**
- **ELEMENTOS LINK**

### **Abstract**

The present project contemplates the analysis of a structure with TADAS dissipator, and an eccentrically braced frame structure generating a link element that works as an energy dissipator. For this analysis, the structure of block 2 of the Rodríguez Zambrano Hospital is taken as a base, which after the earthquake of April 16, 2016, was reinforced by the use of TADAS dissipator. This dissipator is analyzed with the equivalent diagonal model, and is contrasted with the model which considers the dissipator as one more element of the structure. An equivalent steel structure was obtained, which is reinforced with eccentric diagonals generating the link element. For this, 3 ways of placing the connecting element are considered (in the center of the span, on one side of the span, and with the use of gussets). Once the results of the investigation are obtained, it is observed that through the use of link elements there is better control in the floor drifts and in the displacements of the structure, with the structure with the link element located in the center of the span being the best option. Furthermore, as reviewed and based on the experience of strengthening the Rodríguez Zambrano Hospital, lower repair costs can be obtained in structures after an earthquake with the use of removable link elements.

Keywords:

- **ANALYSIS OF WEEKS**
- **TADAS HEATSINKS**
- **LINKING ELEMENTS**

## Capítulo 1. Generalidades

### Antecedentes

Ecuador se ubica en el cinturón de fuego del Pacífico y sobre la subducción de la placa de Nazca y el continente americano, una de las zonas de contacto de placas tectónicas más activas del mundo, por lo que se lo considera como un país vulnerable a eventos sísmicos.

Debido a esto, se presentó eventos sísmicos como el de 1906 con una magnitud de 8.8, catalogado como uno de los sismos de mayor magnitud presentados en Ecuador. Asimismo, los sismos de Bahía de Caráquez en agosto de 1998 y el de Pedernales en abril de 2016 muestran los problemas de nuestras edificaciones en relación al diseño sismorresistente en Ecuador. (Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016)

Varias de las obras presentes en los sitios de epicentro de estos terremotos se catalogan como edificaciones esenciales (NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014) por lo que deben conservar su nivel de funcionalidad después de un evento sísmico. Esto no se evidenció en el terremoto de abril de 2016 en estructuras como, por ejemplo, el hospital del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) en Manta, para el cual fue necesaria la evacuación de la mayor parte de los pacientes y se atendieron en carpas improvisadas en las afueras del hospital. Por esta razón, es evidente la necesidad de tomar precauciones para lograr un mejor comportamiento de las obras de ingeniería civil en general, y en particular las edificaciones esenciales en el país.

En la ciudad antes mencionada, se encuentra el Hospital Rodríguez Zambrano, que tras el terremoto de abril de 2016 de magnitud 7.8 dejó un daño entre leve y extensivo en la mampostería, no obstante, no se evidenció daño en elementos estructurales. Por este motivo se decidió reforzar a la estructura mediante disipadores

TADAS (Triangular plate added damping and stiffness) con el fin de conferirle mayor amortiguamiento, para que en futuros sismos su desplazamiento sea menor. (Aguiar Falconí, Zevallos Loor, & Palacios Rodríguez, 2016)

El reforzamiento de estructuras es una metodología acertada e innovadora para solventar problemas en estructuras averiadas por sismos en nuestro medio, metodología que ya se utiliza a nivel mundial desde hace aproximadamente dos décadas. Varios expertos a nivel mundial centran sus investigaciones para encontrar nuevos y mejores dispositivos para disipar la energía transferida de un sismo a la estructura. Estos dispositivos se comportan como fusibles estructurales, que se activarán ante la presencia de sismos, concentrando en éstos el daño y dejando a la estructura con menores afectaciones. Existen varios dispositivos disipadores de energía, de éstos los más económicos son los que actúan por fluencia del material, aunque deben ser reemplazados después de que hayan trabajado en presencia de un sismo fuerte. (Mora, 2015)

Los disipadores TADAS se desarrollaron por (Tsai, Chen, Hong, & Su, 1995), quienes les dieron forma de un triángulo cuya base es  $b$ , altura  $h$ , y espesor de la placa  $t$  como se indica en la Figura 1.1. Este dispositivo se coloca sobre contravientos de acero unidos a la estructura mediante placas. Como se evidencia en la Figura 1.2, en este dispositivo se puede notar el desplazamiento que existe entre la parte superior e inferior del dispositivo, lo que da origen a la disipación de energía.

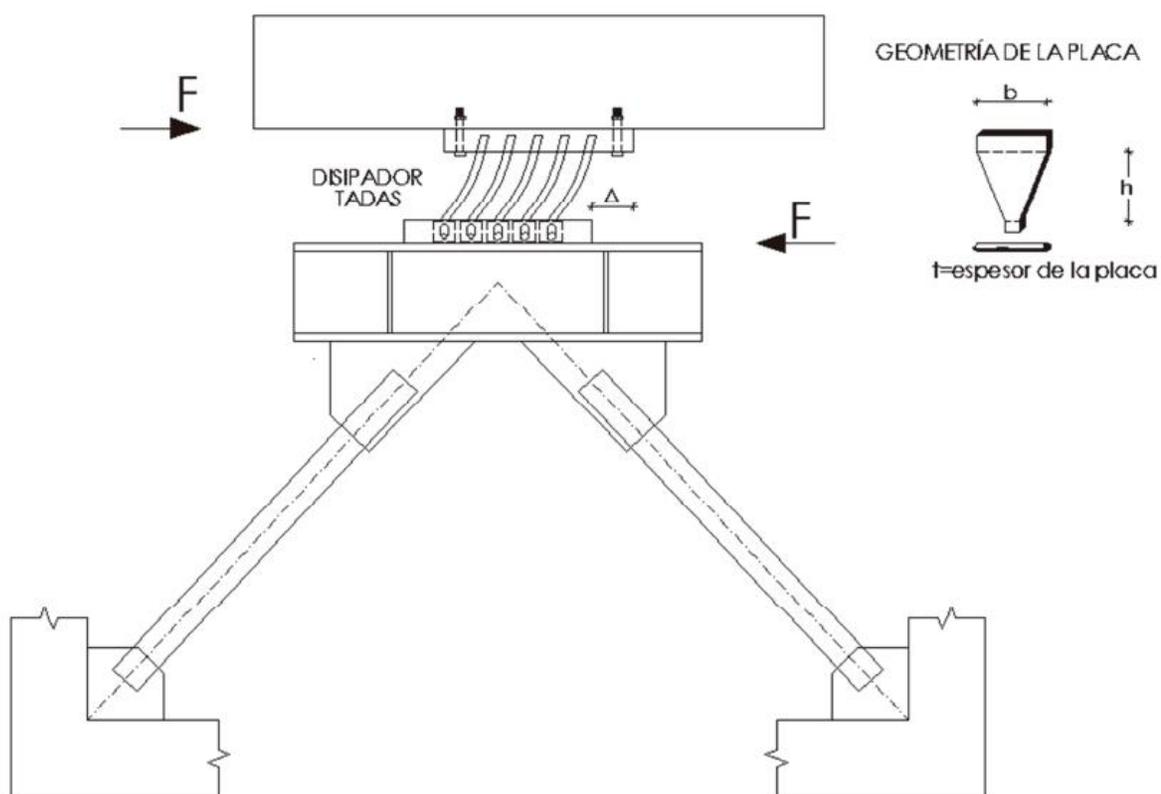
**Figura 1.1**

*Disipador TADAS*



**Figura 1.2**

*Disipador TADAS sobre contravientos de acero*

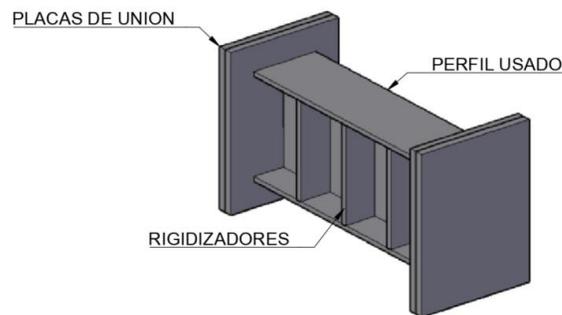


*Nota.* Recuperado de (Aguilar Falconí, Rodríguez, & Mora, Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS, 2016)

Como una innovación se plantea el método propuesto en este proyecto, el cual consiste en un elemento de enlace conformado por una viga rigidizada mediante placas. Dicho sistema cumplirá la misma función que un dissipador de energía a un menor costo.

### Figura 1.3

*Esquema de elemento de enlace*



Como indica (Gascón, 2011) al analizar el comportamiento de edificios con contravientos excéntricos de acero, los elementos que se forma entre dichos contravientos actúan en el rango inelástico, lo que permite que los otros elementos de la estructura permanezcan en el rango elástico. Para lograr este comportamiento, estos elementos de enlace deben cumplir con las especificaciones que indica la norma AISC en cuanto a los rigidizadores verticales y conexiones al resto de la estructura.

Investigaciones como la realizada por (Oyarzún, 2012) concluyen que a pesar de que no todos los elementos de enlace en una estructura fluyen después del sismo, los demás elementos de la estructura deben diseñarse siguiendo los parámetros de diseño por capacidad. Esto se debe a que no se sabe hasta qué punto se puede reducir las fuerzas que llegan a los demás elementos de la estructura.

Como se muestra en investigaciones anteriores, han sido varios los esfuerzos de los ingenieros civiles por encontrar nuevas y mejores formas para construir estructuras más seguras.

## **Planteamiento del problema**

Según prensa, a lo largo de la historia han ocurrido numerosos sismos. Entre ellos se destaca el que ocurrió en Haití en enero de 2010 con una magnitud de 7.0 que dejó 316000 muertos. Este número de fallecidos fue en gran parte por la precariedad de sus construcciones, en donde se evidenció las consecuencias de la mala calidad en los materiales y en las técnicas constructivas empleadas.

A pesar de todos los daños ocasionados, estos eventos catastróficos dejan lecciones importantes con las que los ingenieros civiles mejoran la calidad y seguridad de las estructuras. Dos de los sismos que dejan varias enseñanzas significativas son los sismos de 1994 de Northridge, California o el que ocurrió en Kobe, Japón en 1995. De las más importantes lecciones que recalca (Tena, 2004) se encuentran: la eficacia de nuevas tecnologías para mejorar la respuesta de las estructuras ante movimientos telúricos como los aisladores sísmicos, la presencia de fallas frágiles en las conexiones de estructuras de acero, especialmente en las soldaduras, y también en la fragilidad de estructuras viales con segundos pisos que resulta en estructuras tipo péndulo.

En América Latina también se tuvo la presencia de sismos importantes, por lo que se investiga nuevas formas de afrontar este problema. De estas investigaciones surge la idea de utilizar al acero estructural mediante el uso de sus ventajas en distintas configuraciones estructurales como puede ser pórticos arriostrados concéntrica o excéntrica.

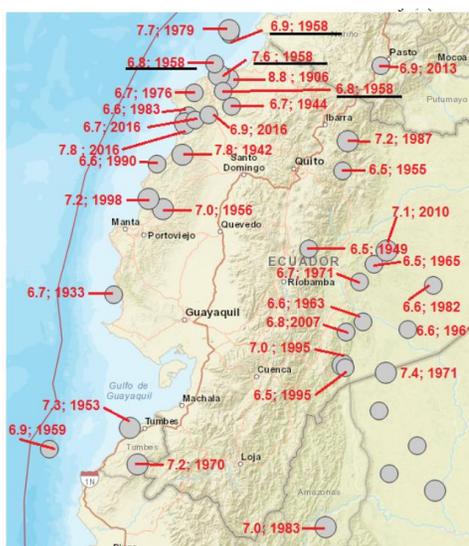
Aunque como indica (Calo Catota, 2018), en países como Chile aún se realiza estudios sobre este sistema el cual ya está en su norma de la construcción. Así mismo destaca que a pesar de las investigaciones realizadas previamente, aún existe inseguridad en el uso de este tipo de configuración estructural.

Como se dijo anteriormente, Ecuador se encuentra en una zona de alta peligrosidad sísmica, que provocó sismos catastróficos a lo largo de la historia. Varias de las estructuras catalogadas como edificaciones esenciales no resistieron de forma adecuada las solicitaciones provistas por los sismos que se presentaron en años recientes. Como consecuencia de esto, las estructuras quedaron fuera de servicio o para ser demolidas.

Como dice (Moncayo, 2017), la sismicidad en Ecuador a lo largo de su historia es amplia, se destaca por ejemplo el gran terremoto de Esmeraldas de 1906 con una magnitud de  $M_w = 8.8$  o el sismo de Pedernales que ocurrió en el año de 1942 con una magnitud de 7.8. En la Figura 1.4 se presenta un mapa con un resumen geográfico que muestra la sismicidad en Ecuador.

#### Figura 1.4

*Epicentros de los terremotos mayores a 6.5 grados en Magnitud Richter, ocurridos desde 1900 hasta el 2017.*



Nota. Recuperado de (Moncayo, 2017)

El sismo del pasado 16 de abril de 2016 ocasionó la muerte de 656 personas y 16601 heridos. Las pérdidas económicas fueron superiores a los 3300 millones de dólares, por lo que fue catalogado como uno de los sismos más devastadores en Ecuador. Además, se registraron 2 réplicas el 18 de mayo de 2016 con una magnitud de 6.8, lo que produjo el colapso de estructuras en que se evidenció un fuerte daño después del terremoto principal. (Aguilar Falconí *et al.*, 2016)

El Hospital Rodríguez Zambrano de la ciudad de Manta tuvo daño moderado en la mampostería y un posible daño en elementos estructurales. Esto sugiere el reforzamiento de la estructura para darle un mayor amortiguamiento, también implica la búsqueda de nuevos métodos constructivos con disipadores de energía que sean más accesibles y se los pueda fabricar en el mercado local.

### **Área de estudio**

El proyecto se realizará con base en el modelo matemático del bloque 2 del hospital "Rodríguez Zambrano" de la ciudad de Manta, que fue afectado por el terremoto de 2016. Se realizará según su diseño actual y reforzado con disipadores TADAS, que son bastante costosos, por lo que para nuevos proyectos de reforzamiento o de diseño, se recomienda utilizar el elemento de enlace como disipador de energía.

El resultado de la presente investigación se puede utilizar en el diseño de cualquier estructura que se encuentra en una zona de peligrosidad sísmica. Se beneficiará de forma indirecta a las estructuras en cuyo análisis se considere elementos disipadores con características similares a las estructuras de la presente investigación.

### **Justificación**

A lo largo de la historia ocurrieron numerosos sismos en diferentes partes del mundo que han puesto a prueba a las estructuras construidas hasta esas fechas. El trabajo arduo de los ingenieros civiles es buscar nuevas metodologías de diseño de

estructuras y nuevos dispositivos para que estas estructuras se desenvuelvan de mejor manera ante las acciones sísmicas.

Según cifras publicadas por el diario (El Telégrafo, 2017) referente a la infraestructura afectada en el terremoto de abril de 2016, 35264 casas sufrieron daño, de éstas 13962 colapsaron. En esta noticia también destaca que 51 puestos de salud, 875 escuelas y 11 universidades presentaron daños en su estructura.

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción se clasifica a las estructuras como edificaciones esenciales, entre las que están los hospitales y puestos de salud; y como estructuras de ocupación especial, los centros de educación. Según prensa, algunos de los tipos de estructuras mencionadas como esenciales o especiales quedaron fuera de funcionamiento después del movimiento telúrico, lo que ocasionó que se atienda a los pacientes en carpas improvisadas a las afueras de estos hospitales.

Los tipos de estructuras que se va a analizar en la presente investigación se forma a partir de marcos de acero arriostrados excéntricamente, en donde se forman secciones de viga corta que concentran fuerzas cortantes. La absorción de estas fuerzas por parte de estos elementos es lo que originan la disipación de energía.

La forma de construcción de marcos resistentes a momento hace que estas estructuras presenten una respuesta dúctil. Esta es la forma de construcción tradicional y la más usada en nuestro medio. Para dar más rigidez lateral a las estructuras se utiliza marcos arriostrados concéntricamente, sin embargo, la estabilidad y la rigidez lateral de este tipo de estructuras depende principalmente del pandeo de las diagonales. Este pandeo se produce por las fuerzas de compresión que actúan sobre éstas.

Para asegurar un funcionamiento continuo y reforzamiento de estructuras ya existentes, se plantea el análisis en una estructura catalogada como edificación esencial con distintos tipos de disipadores de energía, y se muestra las ventajas y desventajas de su uso. La importancia de este proyecto se enfoca en modelar una propuesta de disipador de energía con un costo más accesible y competitivo en el mercado local.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Diseñar la estructura del Hospital Rodríguez Zambrano con elementos de enlace que trabajen como disipadores de energía, mediante el uso del software **CEINCI-LAB** con el fin de proponer una alternativa viable de disipador de energía funcional a un menor costo.

### ***Objetivos Específicos***

- Analizar la estructura planteada sin reforzamiento.
- Modelar la estructura mediante el uso de disipadores de energía.
- Diseñar la estructura mediante el uso de elemento del enlace concebidos desde la fase inicial de la estructura.
- Comparar los resultados de los modelos desarrollados con disipadores de energía TADAS y elementos de enlace.

## **Metas**

- Elaboración del modelo analítico de la estructura planteada sin reforzamiento, para obtener los resultados de desplazamientos, derivas y fuerzas con el uso del software **CEINCI-LAB**.
- Elaboración del modelo analítico de la estructura planteada reforzada mediante disipadores de energía TADAS, para obtener los resultados de

desplazamientos, derivas y fuerzas con el uso de nuevas rutinas en **CEINCI-LAB**, creadas para el análisis de estructuras con este tipo de disipadores.

- Elaboración del modelo analítico de la estructura planteada con elementos de enlace, para obtener los resultados de desplazamientos, derivas y fuerzas con el uso de nuevas rutinas en **CEINCI-LAB**, creadas para este tipo de estructuras.
- Definición de las ventajas y desventajas de los tipos de reforzamiento analizados.

### **Hipótesis**

El uso de elementos de enlace en las estructuras es una opción económica y fácil de ejecutar para proporcionar amortiguamiento y usarlo como un disipador de energía que se pueda reemplazar con facilidad.

## Capítulo 2. Evaluación de la Estructura Actual

### Características de la Edificación

#### *Ubicación*

El hospital Rodríguez Zambrano se encuentra ubicado en el barrio Santa Martha en la ciudad de Manta y fue fundado el 5 de agosto de 1988. Este hospital se localiza en una zona de alta peligrosidad sísmica, ubicada a 172 kilómetros aproximadamente del epicentro del terremoto de abril de 2016; y a 55.8 kilómetros del terremoto de agosto de 1998. Actualmente este hospital cuenta con 220 camas, que abarca un área de influencia de 155000 habitantes.

#### **Figura 2.1**

##### *Ubicación del hospital*



#### ***Daño observado en el sismo de 16 de abril de 2016***

Al realizar la evaluación después del sismo ocurrido el 16 de abril de 2016, se esperaba encontrar fisuramiento en elementos estructurales, ya que la modelación realizada por (Aguar Falconí *et al.*, 2016) daba derivas de piso superior a 0.6%, sin embargo, tras la inspección no se encontró fisuras en elementos estructurales.

En los pisos inferiores se presentó daño moderado en mampostería, sobre todo en paredes con salientes y en paredes entre ventanas sin un marco de hormigón armado en su contorno. Ésta falla en la mampostería se produce por las fuerzas de corte presentes en las mismas. Varias de las divisiones y paredes de lámina delgada que estaban instaladas en esta estructura tuvieron un buen desempeño sísmico, por lo que una de las propuestas de reconstrucción será el uso de este material, como las paredes con Gypsum.

### Figura 2.2

*Daño en mampostería y elementos estructurales. a) Nudo interior del tercer piso, b) Daño en paredes con salientes, c) Rotura diagonal en pared entre ventanas.*



a)



b)



c)

*Nota.* Recuperado de (Aguiar Falconí, Zevallos Loor, & Palacios Rodríguez, Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía, terremoto de Ecuador de abril de 2016, 2016)

Una vez realizada la evaluación de la estructura, y al no presentar fisuramiento en elementos estructurales, se decidió reforzar solo con la colocación de disipadores TADAS. Esto se lo realiza con el fin de conferirle un mayor amortiguamiento a la estructura y que ésta presente menores desplazamientos laterales.

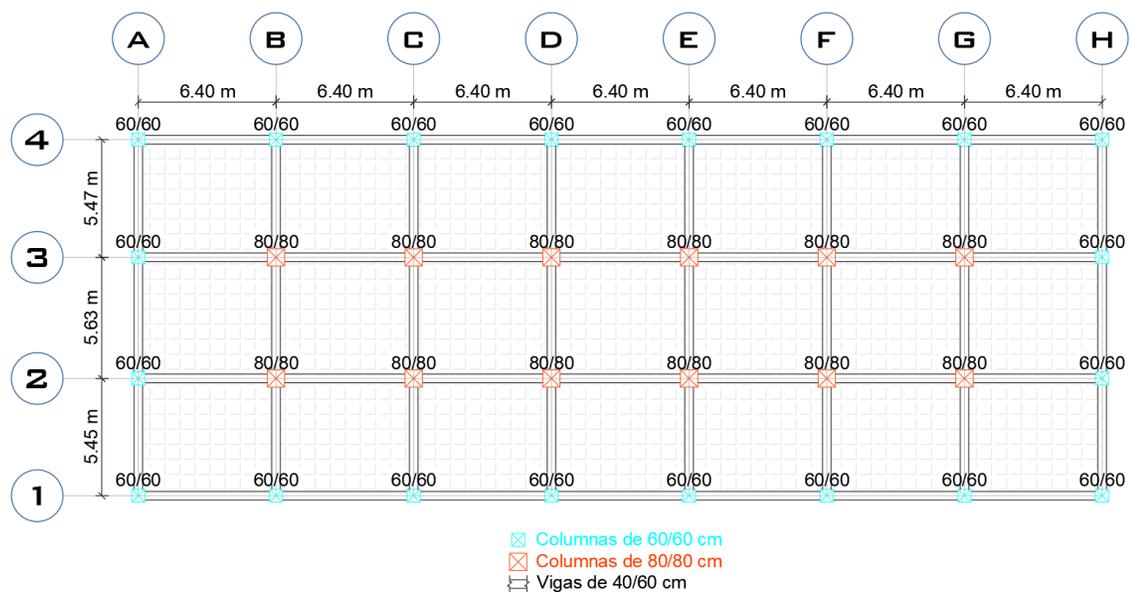
### **Descripción estructural**

El bloque estructural a analizar en la presente investigación corresponde al bloque 2 del hospital Rodríguez Zambrano. Esta estructura es un edificio de 6 pisos con 8 ejes de columnas en el sentido longitudinal y 4 ejes de columnas en el sentido transversal.

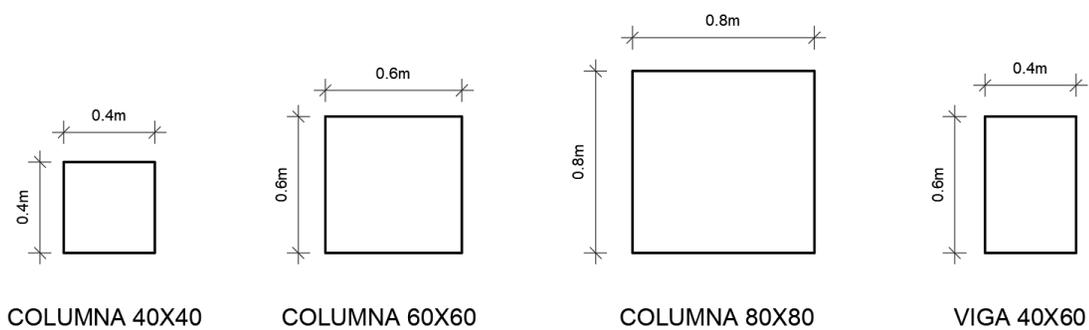
Las columnas exteriores de la estructura son de 60x60 cm en los dos primeros pisos y se reducen a columnas de 40x40 cm en los siguientes pisos. En cuanto a las columnas internas, éstas son de 80x80 cm en los pisos 1 y 2, se reduce su sección transversal a columnas de 60x60 cm en los pisos 3 y 4, y finalmente se reduce a 40x40 cm en los dos últimos pisos. Las vigas de toda la estructura son de 40x60 cm.

**Figura 2.3**

*Configuración estructural de la estructura del primer piso*

**Figura 2.4**

*Secciones en estructura de hormigón armado*



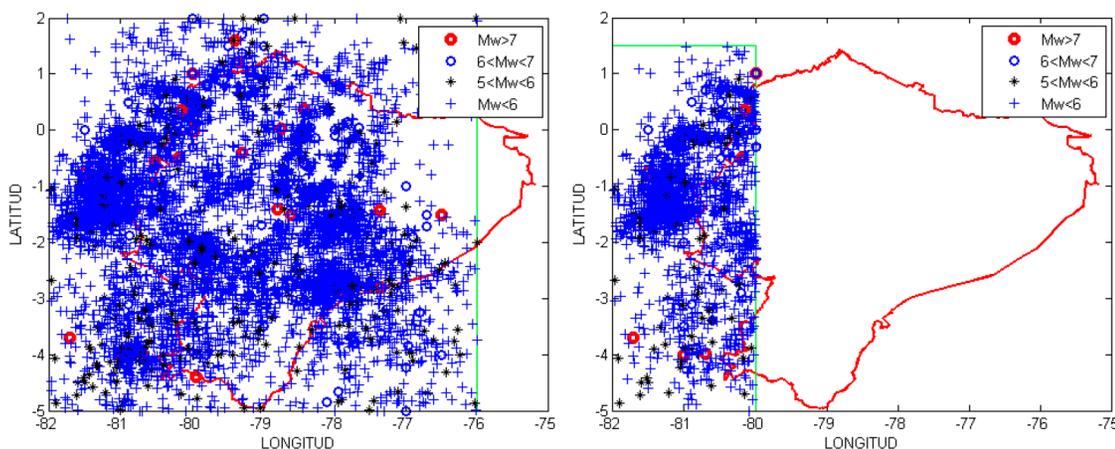
### Sismicidad en Ecuador

En la Figura 2.5 se presenta la sismicidad en Ecuador con una profundidad de hasta 300 km, en la que recalca que solo en la región oriental esta presenta poca actividad sísmica. En esta misma figura se presenta epicentros de sismos con una

profundidad menor a 30 km ubicados en la región costa. Estos sismos pertenecen a la subducción con bajo ángulo de buzamiento.

### Figura 2.5

a) Sismicidad en Ecuador, b) Sismicidad en la Costa.



*Nota.* Recuperado de (Aguiar Falconí, Zevallos Loor, & Palacios Rodríguez, Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía, terremoto de Ecuador de abril de 2016, 2016)

Al observar la Figura 2.5, hay un acoplamiento de las placas tectónicas en las provincias de Manabí y Esmeraldas debido a la gran presencia de movimientos telúricos en esta zona, por lo tanto, se tiene una mayor peligrosidad sísmica en comparación con las provincias restantes que limitan con el océano pacífico. En estas provincias ocurrieron 7 terremotos cerca de la ciudad de Manta desde 1906 hasta 2016. Estos sismos tienen una recurrencia de 20 años con un terremoto muy destructivo.

En el sismo ocurrido el 16 de abril de 2016 se pudo obtener información sobre los acelerogramas presentados. De estos acelerogramas se destaca que en Manta existe una aceleración máxima importante, lo que se refleja en el daño que se evidencia en las estructuras de la ciudad, convirtiéndola así en una de las ciudades más afectadas por este sismo.

**Figura 2.6**

*Acelerogramas del terremoto del 16<sup>a</sup>.*



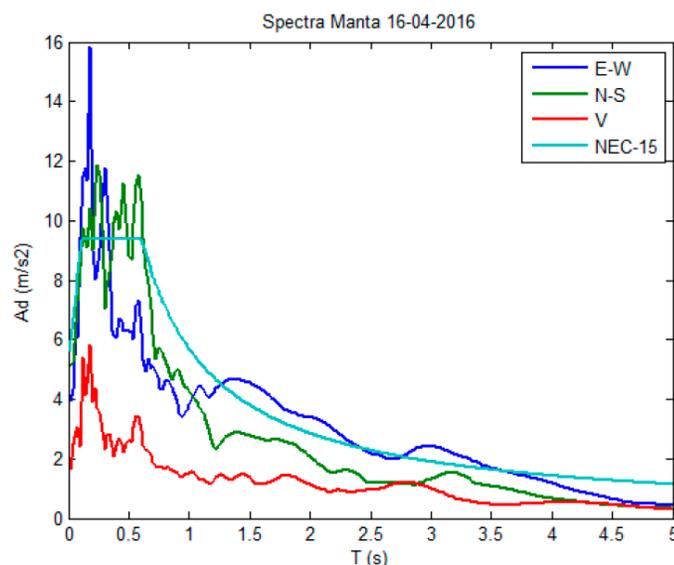
*Nota.* Recuperado de (Aguiar Falconí, Zevallos Loor, & Palacios Rodríguez, Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía, terremoto de Ecuador de abril de 2016, 2016)

Con esta información se puede obtener espectros de respuesta elásticos para el 5% de amortiguamiento en la ciudad de Manta. En la Figura 2.7 se puede apreciar los espectros obtenidos en el sismo de Manta y se compara con el espectro de la norma NEC-15.

Al ver que el espectro de la NEC-15 da valores bajos en relación a las componentes E-W y N-S, se plantea la interrogante de cuál es el espectro que debe usarse para el reforzamiento de estructuras. Por esto es importante realizar estudios de peligrosidad sísmica mediante métodos probabilísticos y determinísticos.

**Figura 2.7**

*Espectros del Manta comparados con espectros de NEC-15.*



*Nota.* Recuperado de (Aguiar Falconí, Zevallos Loor, & Palacios Rodríguez, Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía, terremoto de Ecuador de abril de 2016, 2016)

### **Análisis de la estructura**

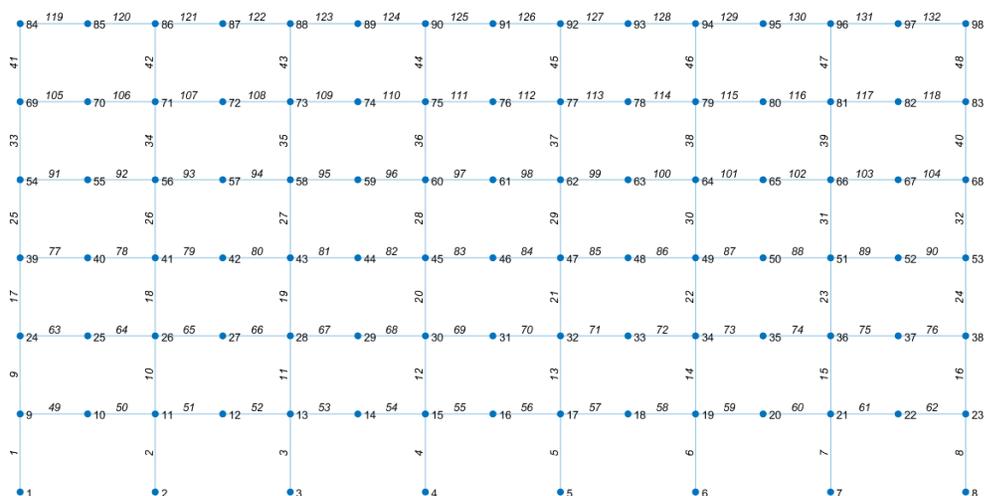
Para el análisis de la estructura se utilizó el software **CEINCI-LAB**. Este software fue creado por el Dr. Roberto Aguiar y varios colaboradores a lo largo de varios años de docencia. Este software permite realizar un análisis a partir de la matriz de rigidez de cada miembro de la estructura, sus grados de libertad, el ensamblaje de la matriz de rigidez de la estructura en coordenadas de piso, y el análisis estático y modal espectral; controlando la programación de cada uno de estos parámetros. Actualmente nuevos colaboradores siguen sumando esfuerzos para aportar con nuevas funciones con el fin de complementar este trabajo.

Para este análisis se utiliza programas que ayudan al dibujo de la geometría de pórticos regulares, los mismos que son descritos al final de este capítulo. En estos se

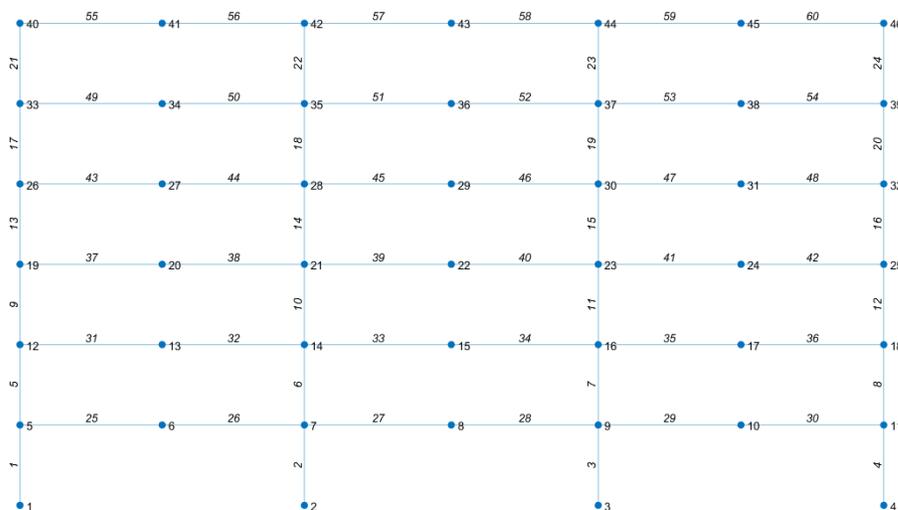
ingresa un vector con el número de vanos (nv) y el número de pisos (np), y como resultado se muestra la numeración de nudos y elementos presentados en la Figura 2.8.

**Figura 2.8**

*Numeración de nudos y elementos a) pórticos A-H, b) pórticos 1-4*



a)



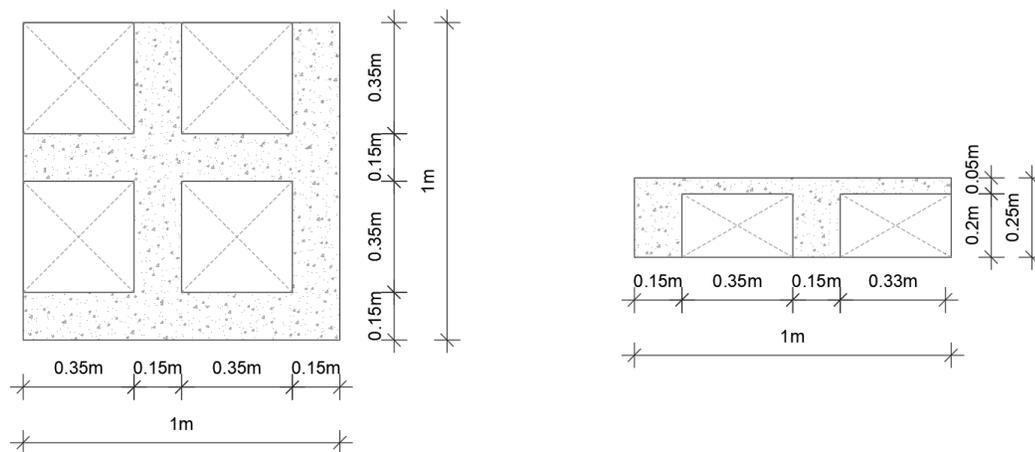
b)

Para el análisis estático y dinámico de estructuras se requiere el ingreso de las cargas que actúan sobre los nudos o elementos de la estructura, en esta estructura se utiliza las cargas descritas a continuación:

La losa presente en esta estructura es una losa de 25 cm de peralte y con nervios de 15 cm.

**Figura 2.9**

*Detalle típico de losa*



Por lo que el peso de la losa es:

$$losa = 1 * 1 * 0.05 * 2.40 + 0.15 * 0.20 * 3.40 * 2.40$$

$$losa = 0.375 T/m^2$$

Se considera 2 cm de acabados y 2 cm de masillados, teniendo:

$$masillado = 1 * 1 * 0.02 * 1.60 = 0.032 T/m^2$$

$$acabados = 1 * 1 * 0.02 * 1.60 = 0.032 T/m^2$$

Para el cálculo de la carga reactiva por sismo se considera la siguiente fórmula, en ésta ya se toma en cuenta el peso propio de los elementos en cada piso. Para el último piso no se considera el aporte de la carga viva.

$$W = CM + 0.25 * CV \quad \text{Ecuación ( 2.1 )}$$

El resumen de los pesos se presenta en la Tabla 2.1. Aquí ya se considera las cargas provocadas por el peso propio de los elementos.

Tabla 2.1

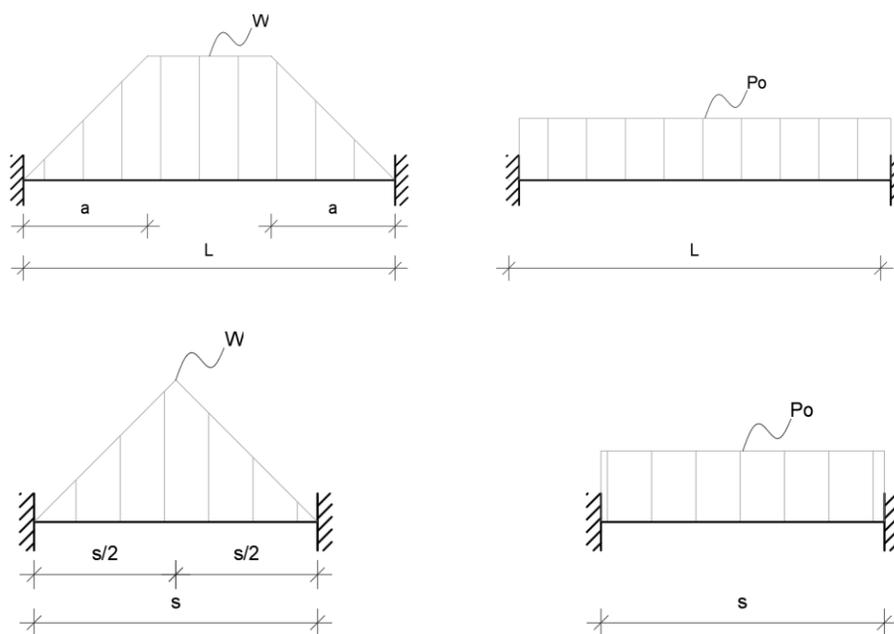
Cargas por piso

PISO	CARGA [T/m <sup>2</sup> ]
1	1.0124
2	0.9409
3	0.949
4	0.9257
5	0.9294
6	0.7727

Una vez obtenidas las cargas en cada planta se pasa las mismas a cada viga, para esto se calcula la carga rectangular equivalente mediante las siguientes fórmulas:

Figura 2.10

Carga rectangular equivalente para carga triangular y trapezoidal



- Carga Triangular

$$P_o = \frac{W s}{3}$$

Ecuación ( 2.2 )

- Carga Trapezoidal

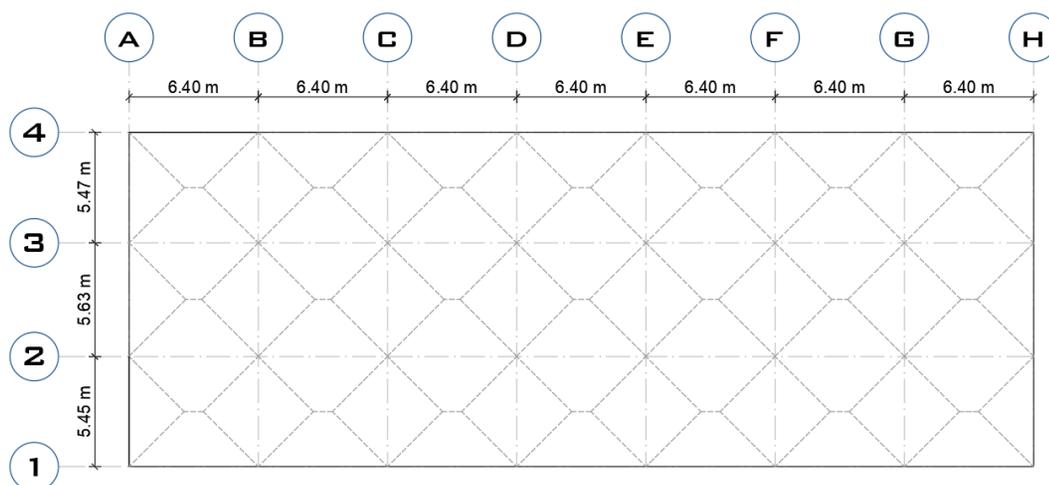
$$P_o = \frac{W s}{3} \left( \frac{3 - m^2}{2} \right) \quad \text{Ecuación ( 2.3 )}$$

$$m = \frac{s}{L} \quad \text{Ecuación ( 2.4 )}$$

Siendo  $s$  la dimensión más corta y  $L$  la dimensión más larga.

**Figura 2.11**

*Distribución de cargas*



Las cargas finales aplicadas a cada pórtico se resumen en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3.

**Tabla 2.2**

*Fuerzas en pórticos 1-4*

PISO	DISTANCIAS DEL VANO			
	S	L	m	Po
1	5.47	6.4	0.85	2.09
2	5.47	6.4	0.85	1.95
3	5.47	6.4	0.85	1.96
4	5.47	6.4	0.85	1.92
5	5.47	6.4	0.85	1.92
6	5.47	6.4	0.85	1.60

**Tabla 2.3***Fuerzas en pórticos A-H*

PISO	DISTANCIAS DEL VANO			FUERZAS (Po)		
	1-2	2-3	3-4	1-2	2-3	3-4
1	5.45	5.63	5.47	1.84	1.90	1.85
2	5.45	5.63	5.47	1.71	1.77	1.72
3	5.45	5.63	5.47	1.72	1.78	1.73
4	5.45	5.63	5.47	1.68	1.74	1.69
5	5.45	5.63	5.47	1.69	1.74	1.69
6	5.45	5.63	5.47	1.40	1.45	1.41

**Análisis dinámico**

Para el análisis dinámico de la estructura, se toma en cuenta los espectros registrados en el sismo del 16 de abril de 2016, en la componente este – oeste (Figura 2.7). Se evaluará todos los pórticos de la estructura con este sismo, con el fin de poder hacer una comparación uniforme entre los distintos modelos que se analizarán en la presente investigación.

- **Factor de amortiguamiento  $\xi$**

Al analizar la vibración libre sub amortiguada, se puede obtener el factor de amortiguamiento para una estructura. Los investigadores (Newmark & Hall, 1982) presentan una tabla de valores de amortiguamiento, con los siguientes comentarios:

- El valor del amortiguamiento  $\xi$  está relacionado con el tipo de material y el sistema estructural.
- El valor del amortiguamiento  $\xi$  presenta una relación directa entre este valor y los esfuerzos presentes en la estructura, mientras más bajo sea el nivel de esfuerzos menor será el valor del amortiguamiento  $\xi$ .

Tabla 2.4

Factor de Amortiguamiento

Material y/o sistema estructural	Nivel de esfuerzos o deformaciones	$\xi$ (%)
Columnas aisladoras de porcelana	Deformaciones elásticas	0.5 a 1
Sistemas de tuberías que pueden vibrar libremente	Esfuerzos admisibles $< 0.5 \sigma_y$	1 a 2
	Cercanos a $\sigma_y$ , sin excederlo	2 a 3
Sistemas estructurales de acero soldado	Esfuerzos admisibles $< 0.5 \sigma_y$	2 a 3
	Cercanos a $\sigma_y$ , sin excederlo	5 a 6
Concreto pretensado	Esfuerzos admisibles $< 0.5 \sigma_y$	2 a 3
	Cercanos a estados últimos Sin pérdida de pretensión	5 a 7
	Sin pretensión residual	7 a 10
Sistemas estructurales de Hormigón Armado	Esfuerzos admisibles sin agrietamiento visible	2 a 3
	Agrietamiento visible generalizado	3 a 5
	Cercanos a estados últimos	7 a 10
Estructuras de acero apernadas	Esfuerzos admisibles $< 0.5 \sigma_y$	5 a 6
	Esfuerzos a nivel de cadencia	8 a 12
Sistemas estructurales de madera, con elementos clavados o apernados.	Esfuerzos admisibles	5 a 7
	Cercano a estados últimos, con juntas apernadas	10 a 15
	Estado de agotamiento con juntas clavadas	15 a 20

Nota. Recuperado de (Aguar, Dinámica de Estructuras con Matlab, 2006)

Para este modelo se usó un factor de amortiguamiento de 5%. Este valor varía dependiendo del tipo de reforzamiento presente en la estructura, los valores para cada modelo a analizar se presentarán en el capítulo correspondiente.

- **Matriz de masas**

Para realizar el análisis espacial de las estructuras que se modelan en la presente investigación, se considera que tiene 3 grados de libertad en cada piso asociados al centro de masas. La matriz de masas para este tipo de estructuras con  $n$  pisos es:

$$M = \begin{bmatrix} m & & \\ & m & \\ & & J \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación ( 2.5 )}$$

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación ( 2.6 )}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & & & \\ & J_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & J_n \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación ( 2.7 )}$$

En donde  $m$  es la matriz que contiene las masas de cada piso ordenadas en una matriz diagonal; y  $J$  es el momento de inercia de cada masa en cada piso, calculado con la siguiente ecuación:

$$J_i = \frac{m_i}{12} (a_i^2 + b_i^2) \quad \text{Ecuación ( 2.8 )}$$

En donde  $a_i$  y  $b_i$  son las dimensiones del piso que se está analizando.

- **Índice de vulnerabilidad en estructuras**

Es una relación que se presenta en unidades de velocidad [m/s]. Esta relación se la puede utilizar como un excelente estimador de la rigidez a diferencia de otro tipo de indicadores. Como indica (Guendelman Bedrack, 2004) la clasificación de las estructuras en base a este parámetro se lo representa en la Tabla 2.5, en donde  $H$  es la altura total y  $T$  es el periodo de la estructura.

**Tabla 2.5***Indicadores de rigidez*

H/T	INDICE
H/T < 20	Demasiado Flexible
20 < H/T < 40	Flexible
40 < H/T < 70	Normal
70 < H/T < 150	Rígido
150 < H/T	Demasiado Rígido

*Nota.* Recuperado de (Guendelman Bedrack, 2004)

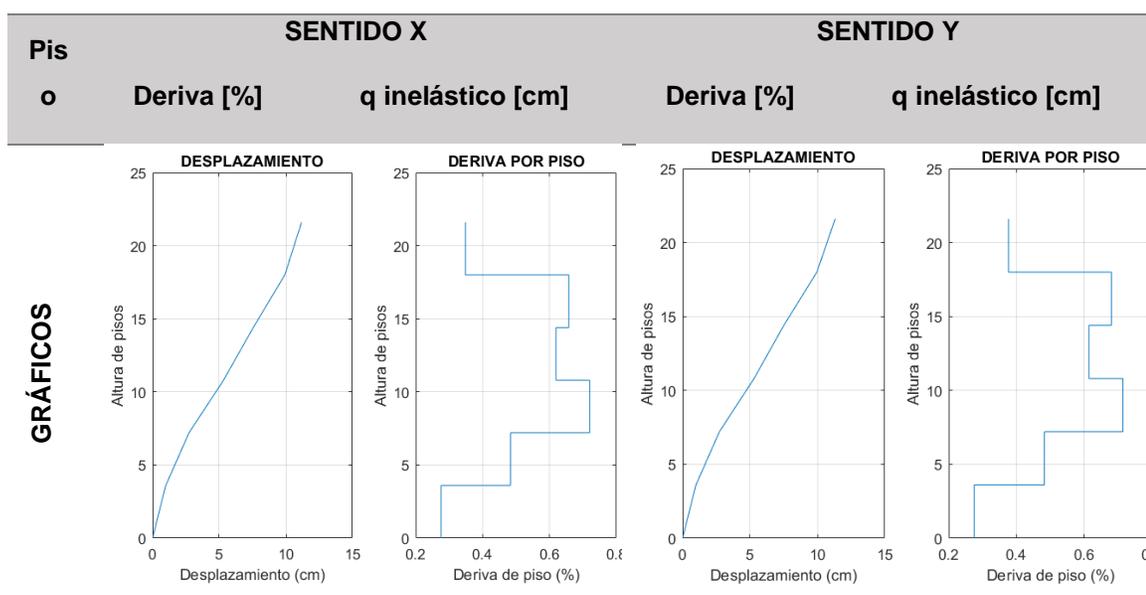
En la estructura de hormigón armado sin reforzamiento es  $H/T = 22.51$ , lo cual siguiendo la tabla mostrada anteriormente corresponde a una estructura flexible.

- **Derivas y periodo fundamental de la estructura**

El resumen del análisis dinámico en este modelo se lo presenta en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6***Análisis dinámico de la estructura de hormigón armado sin reforzamiento*

PERIODO [s]				
0.9593				
Pis o	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
1	0.276	0.0099	0.275	0.0099
2	0.484	0.0273	0.483	0.0273
3	0.720	0.0533	0.715	0.0530
4	0.620	0.0756	0.614	0.0751
5	0.658	0.0992	0.681	0.0996
6	0.349	0.1118	0.377	0.1132



Para la presente investigación se analiza las fuerzas que resultan de la afectación del sismo presentado en Manta con su componente EW, y que actúan en los elementos de los pórticos exteriores. Estas fuerzas se las resume en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7**

*Distribución de fuerzas*

PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
1	-7.50	-3.43
2	14.03	6.79
3	2.45	1.38
4	-2.87	-1.90
5	9.86	4.83
6	9.14	4.63

### **Análisis estático**

Con las fuerzas presentadas en el análisis dinámico de los pórticos mostradas en la Tabla 2.7, se realiza el análisis estático de los pórticos exteriores, ya que son en estos pórticos en los cuales se colocará el disipador de energía.

Tabla 2.8

Fuerzas Axiales Estructura de Hormigón Armado – Sentido X

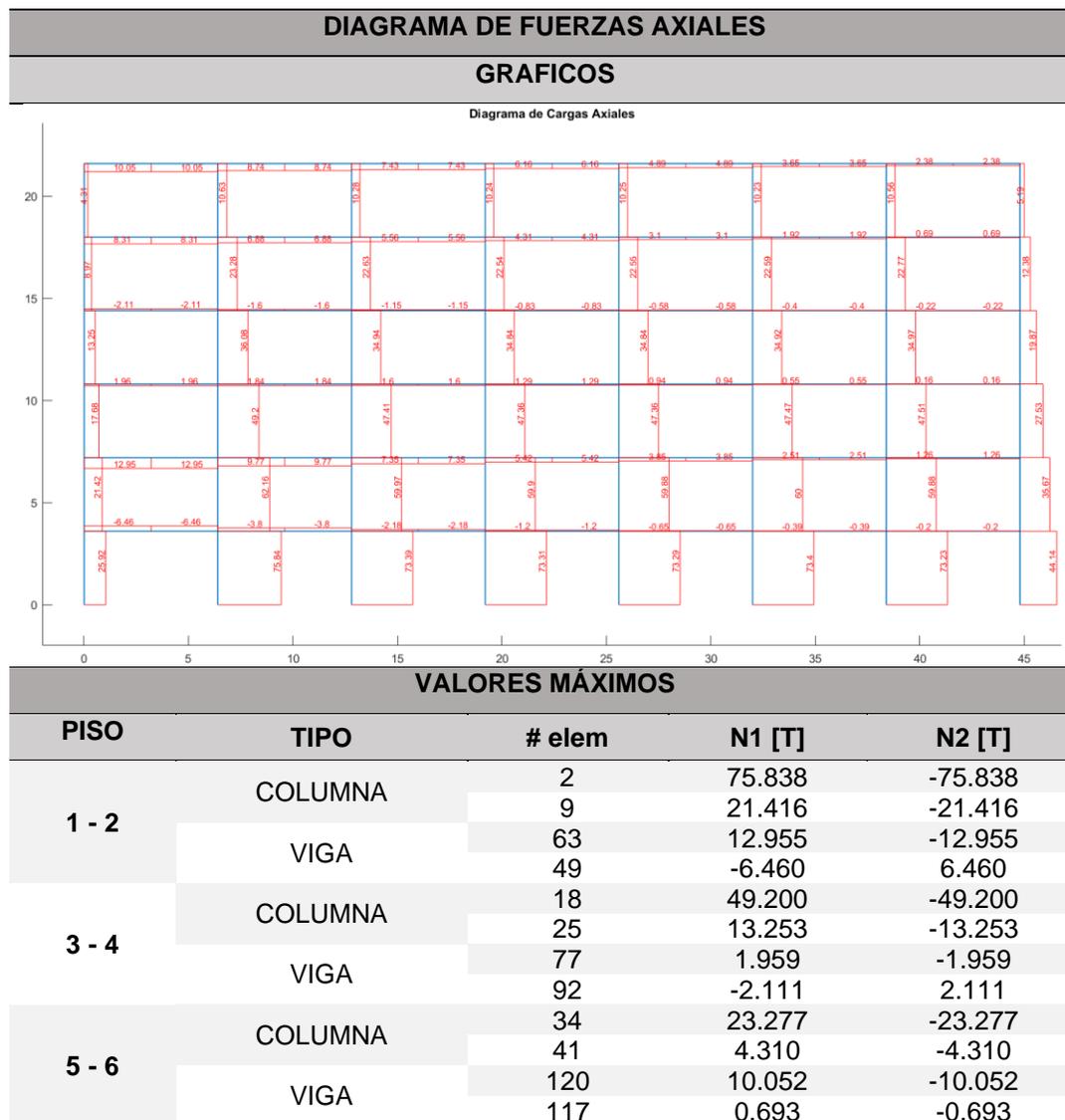


Tabla 2.9

Fuerzas Cortantes Estructura de Hormigón Armado – Sentido X

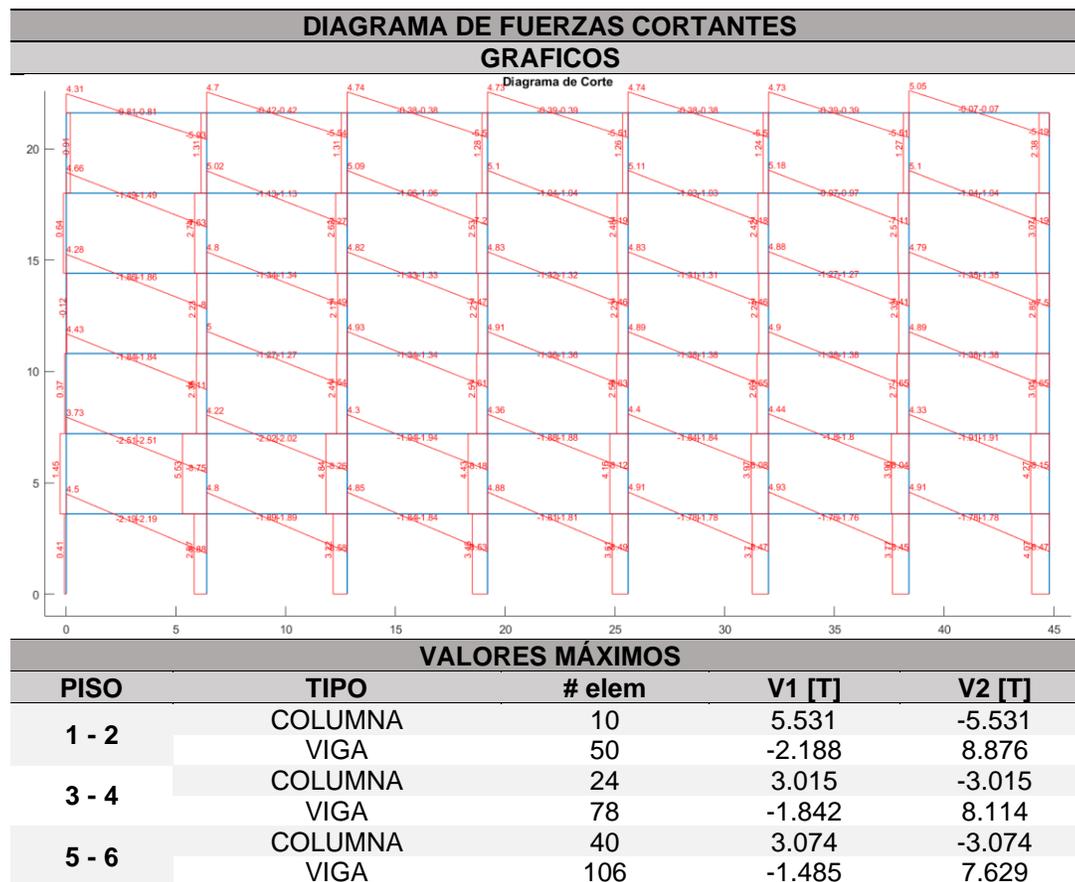
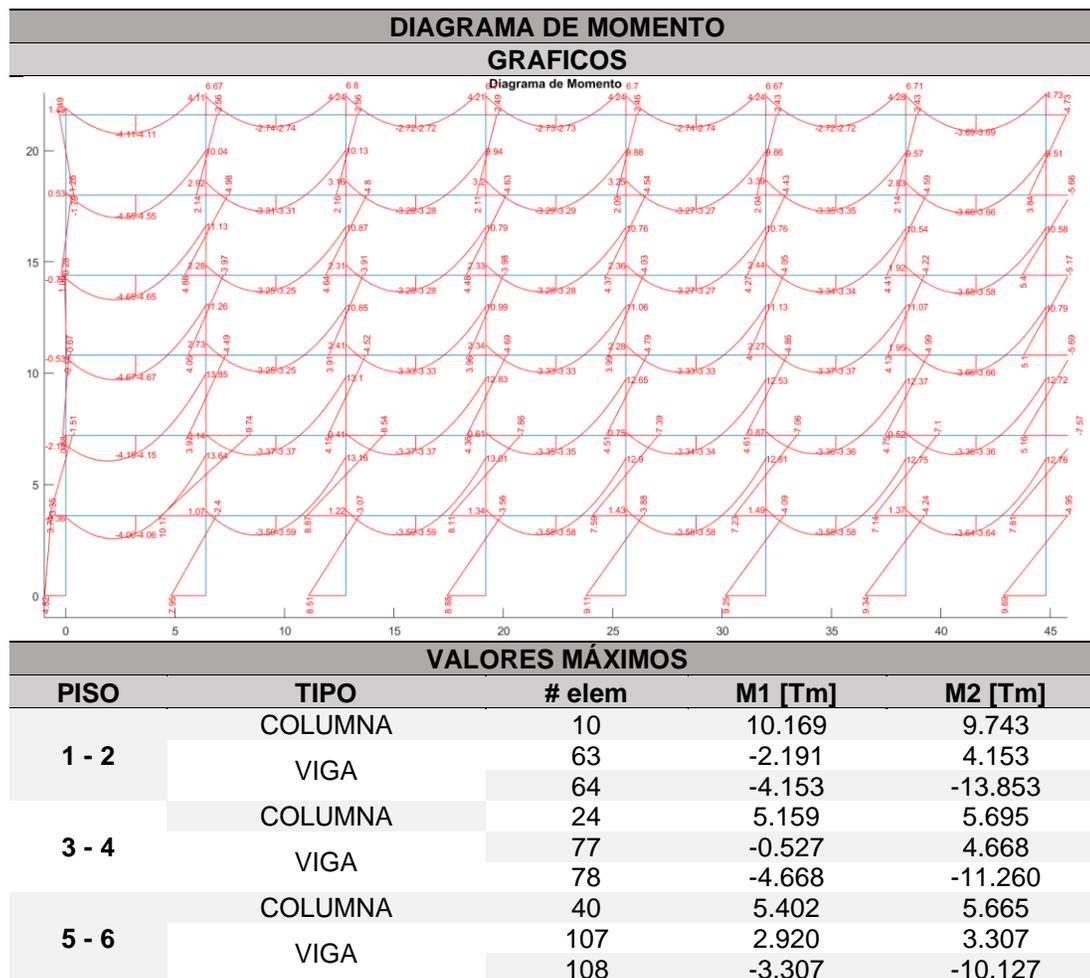


Tabla 2.10

Momentos en Estructura de Hormigón Armado – Sentido X



Los resultados de los pórticos exteriores aplicando en la dirección Y, se los presenta en las siguientes tablas:

Tabla 2.11

Fuerzas Axiales en Estructura de Hormigón Armado - Sentido Y

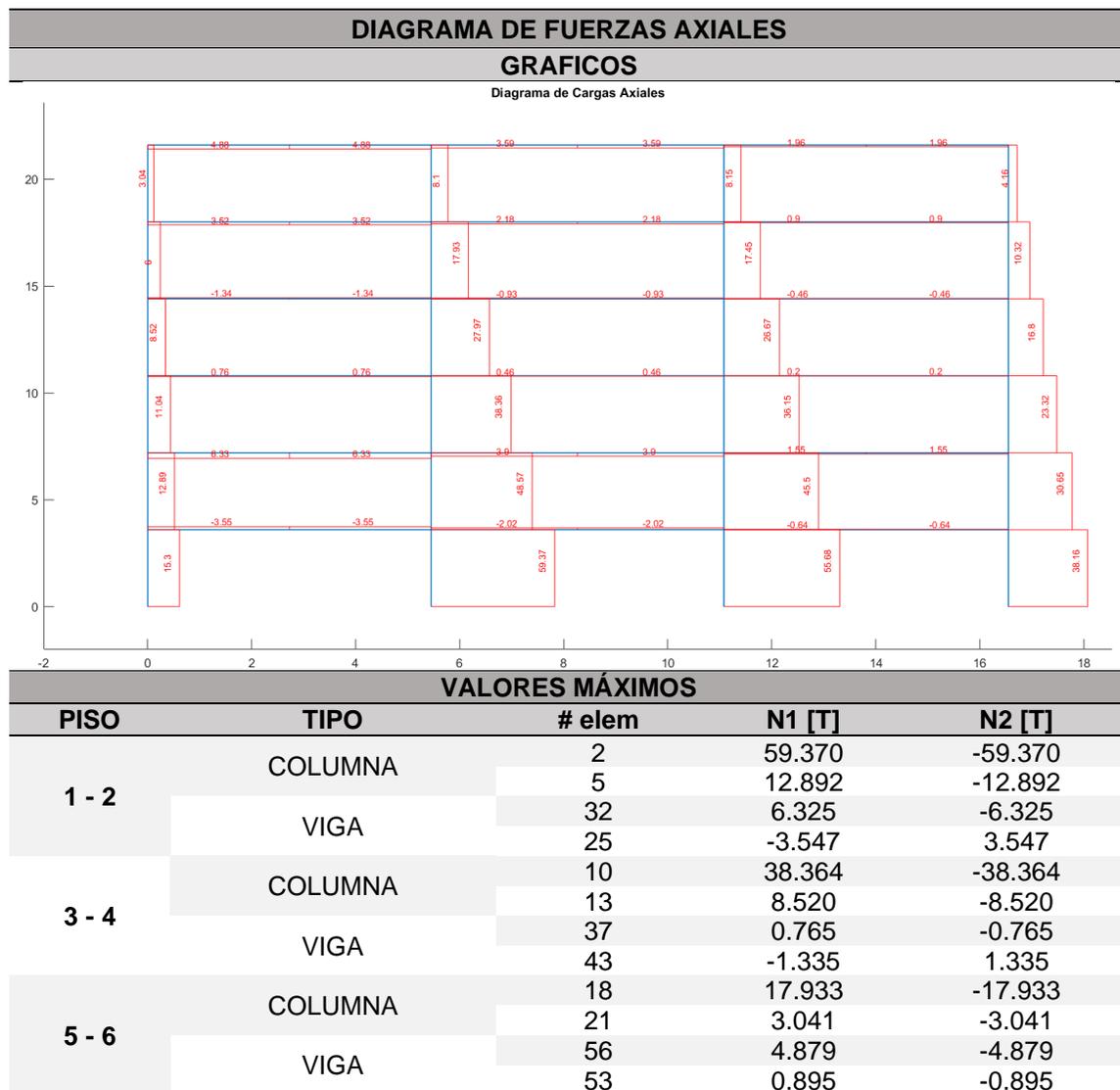


Tabla 2.12

Fuerzas Cortantes en Estructura de Hormigón Armado - Sentido Y

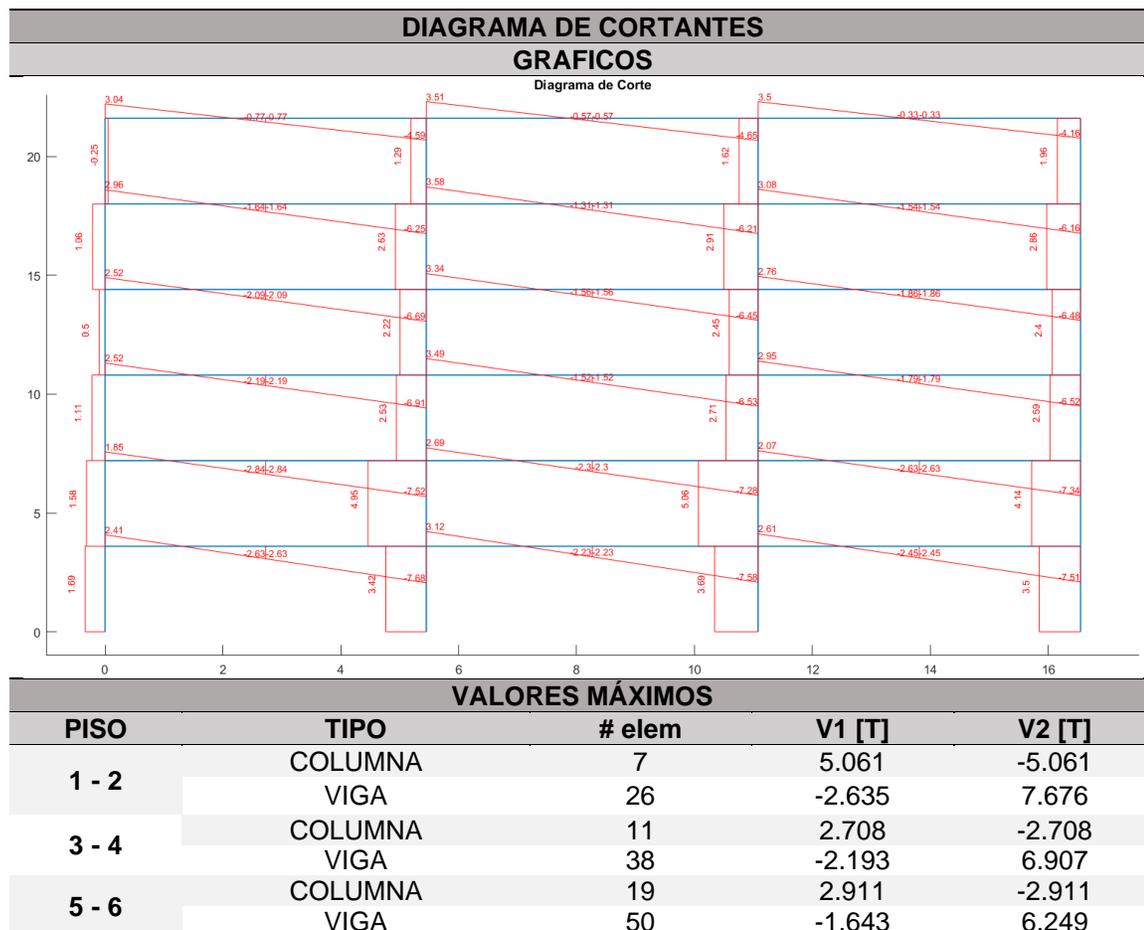
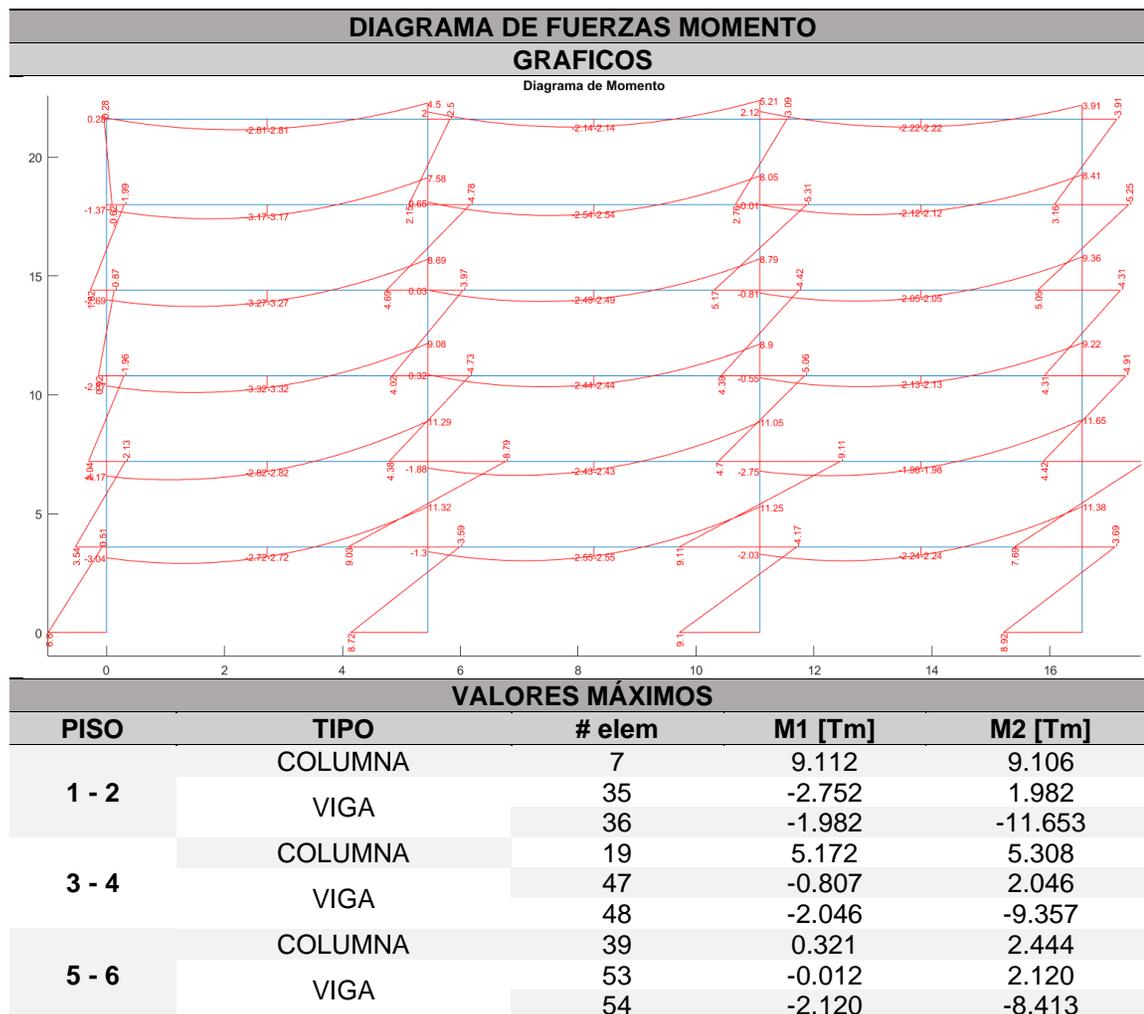


Tabla 2.13

Momentos en Estructura de Hormigón Armado - Sentido Y



### Resumen de funciones en CEINCI-LAB

En el transcurso de esta investigación e investigaciones anteriores se crearon nuevas funciones que complementan el programa CEINCI-LAB. Estas funciones ayudan y facilitan el ingreso de datos, haciéndolo más amigable al usuario y además optimiza el tiempo que se necesita para analizar la estructura.

Para realizar el análisis estático y dinámico de una estructura regular se usa los programas descritos en este apartado. Estos programas pueden ser usados para

analizar estructuras tanto en hormigón como en acero, tomando en cuenta las propiedades del material. Estos mismos programas sirven como complemento para realizar el análisis en otros tipos de configuración estructural, por lo que serán usados en otros modelos de la presente investigación.

### ***Rutinas para generar la geometría del pórtico***

- ***[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria\_nudo\_viga(sv,sp);***

Esta función ayuda a obtener los datos necesarios para dibujar la geometría de estructuras con pórticos regulares, en donde se ingresa las distancias de los pórticos y alturas de pisos.

Los datos de ingreso son: **sv** es un vector que contiene las distancias de los pórticos de izquierda a derecha; **sp** es un vector que contiene las alturas de pisos desde abajo hacia arriba.

Los datos de salida son: **nv** es el número de vanos que tiene el pórtico; **np** es el número de pisos del pórtico; **nudt** es el número de elementos totales; **nudcol** es el número de columnas; **nudvg** es el número de vigas; **nod** es el número de nudos tomando en cuenta que cada viga de cada vano se encuentra dividida en dos elementos, esto se lo realiza con el fin de analizar los esfuerzos en la mitad de la viga; **nr** es el número de nudos restringidos.

- ***[X,Y]=glinea\_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);***

Esta función determina los vectores de coordenadas X y Y de cada nudo, necesarios para ubicar a cada nudo en el plano.

Los datos de entrada provienen del programa descrito anteriormente.

Los datos de salida son: **X** es el vector que contiene las coordenadas en X de los nudos; **Y** es el vector que contiene las coordenadas en Y de los nudos.

- **$[NI,NJ]=gn\_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);$**

Esta función determina los nudos inicial y final dependiendo de la numeración de nudos establecido en el programa `glinea_portico2`.

Los datos de salida son: **NI** es el vector que contiene el nudo inicial de todos los elementos de la estructura; **NJ** es el vector que contiene el nudo final de todos los elementos de la estructura.

- **$dibujo(X,Y,NI,NJ), dibujoplano(X,Y,NI,NJ), dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)$**

Realiza los dibujos que ayudan al modelado de la estructura. “dibujo” realiza el dibujo básico de la estructura; “dibujoplano” realiza el dibujo de la estructura en que se muestra la numeración de nudos y elementos; “dibujogdl” realiza el dibujo de la estructura en que se muestra los grados de libertad en cada nudo.

#### ***Rutinas para ubicar los grados de libertad en la estructura***

- **$[CG,ngl]=cg(nod,nr,RES)$**

Coloca los grados de libertad en los nudos, considerando tres grados de libertad en cada nudo necesarios para el análisis estático de la estructura.

Los datos de entrada son: **RES** es la matriz que contiene las condiciones de equilibrio en los nudos restringidos.

Los datos de salida son: **CG** es la matriz que contiene los grados de libertad en cada nudo; **ngl** es el número de grados de libertad del pórtico analizado.

- **$[CG,ngl]=cg\_sismo2(nod,nr,Y);$**

Coloca los grados de libertad en los nudos, considerando un grado de libertad por piso para el análisis sísmico.

- **$[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ);$**

Calcula la longitud, seno y coseno de los elementos del pórtico respecto a la horizontal.

Los datos de salida son: **L** es el vector que contiene la longitud de los elementos del pórtico; **seno** y **coseno** es un vector con el seno y coseno de los elementos.

- **[VC]=vc(NI,NJ,CG);**

Determina la matriz que ordena los grados de libertad de cada elemento, considerando 3 grados de libertad por nudo.

Los datos de salida son: **VC** es la matriz que contiene los vectores de colocación de cada elemento, formado con los grados de libertad en el nudo inicial y final de cada elemento de la estructura.

### ***Rutinas para generar las secciones de la estructura***

- **[ELEM]=gelem\_portico(SECCION);**

Es la matriz que ordena las características geométricas de las secciones (área e inercia) presentes en el pórtico. Mediante rutinas de programación, esta función ayuda al ingreso de dichas características en todos los elementos de la estructura.

Los datos de entrada son: **SECCION** es la matriz que contiene las áreas y las inercias de los elementos, la cual se presenta en el siguiente orden: [elemento, área, inercia, elementos a generar, salto].

Los datos de salida son: **ELEM** es la matriz que contiene las áreas y las inercias de todos los elementos de la estructura.

### ***Rutinas para calcular las matrices de rigidez***

- **[K]=krigidez\_arm(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,E,CG,NI,NJ,nr,nmiembro)**

Calcula la matriz de rigidez de cada elemento para luego ensamblarla mediante el vector de colocación VC.

Los datos de entrada son: **E** módulo de elasticidad de las secciones, **nmiembro** es el número del primer elemento (columna, viga o elemento de enlace) del grupo de elementos que se va a analizar.

Los datos de salida son: **K** es el aporte del grupo de elementos analizados a la matriz de rigidez de la estructura.

- **[KE,A]=matriz\_es1(NPOR,NP,KLTOT,RTOT,THETA);**

Esta función encuentra la matriz de rigidez de la estructura en coordenadas de piso.

Los datos de entrada son: **NPOR** es el número de pórticos que tiene la estructura; **NP** es el número de pisos; **KLTOT** es una matriz que contiene las rigideces laterales de los pórticos, tomando en cuenta que primero deberán estar ubicados los pórticos del sentido que se va a analizar; **RTOT** es el vector que contiene la distancia del pórtico al centro de masa de la estructura, tomando el sentido antihorario como valor positivo; **ALPHA** es el vector que contiene los ángulos de cada pórtico con la horizontal.

Los datos de salida son: **KE** es la matriz en coordenadas de piso de la estructura; **A** es el vector que contiene las distancias y los ángulos de cada pórtico.

### ***Rutinas para realizar el análisis dinámico de la estructura***

- **[T,fi,OM]=orden\_eig(KE,M);**

Esta función sirve para calcular los periodos, modos y frecuencias de vibración de la estructura.

Los datos de entrada son: **M** es la matriz de masa de la estructura.

Los datos de salida son: **T** es un vector que contiene los períodos de vibración de la estructura; **fi** es una matriz que contiene los primeros modos de vibración, **OM** es un vector que contiene las frecuencias de vibración.

- **$[qte]=desplazamientos\_modales\_CQC(T,fi,Ad,gama,na,OM,zeda);$**

Función que determina los desplazamientos en cada modo de vibración y los desplazamientos totales, aplicando el criterio de la combinación cuadrática perfecta CQC, son desplazamientos totales elásticos (sin multiplicar por el factor R).

Los datos de entrada son: **Ad** es un vector que contiene las aceleraciones espectrales en cada modo de vibración; **gama** es un vector con los factores de participación de cada modo; **na** es el número de modos de vibración o número de grados de libertad; **zeda** es el factor de amortiguamiento de la estructura.

Los datos de salida son: **qte** son los desplazamientos resultado de la combinación modal.

- **$[Derv]=deriva(YY,qti)$**

Función que muestra las derivas de piso.

Los datos de entrada son: **YY** es el vector con las coordenadas en Y de cada piso; **qti** son los desplazamientos inelásticos.

Los datos de salida son: **Derv** son las derivas en cada piso.

- **$[P]=fuerza\_portico(A,KLTOT,np,qte,NPOR)$**

Es una función que convierte los desplazamientos provocados por el sismo en fuerzas a cada piso de cada pórtico.

Los datos de salida son: **P** es una matriz en la que muestra las fuerzas en cada pórtico y en cada piso, en las filas se muestra los pórticos y en las columnas se muestra los pisos.

### ***Rutinas para calcular cargas y fuerzas en elementos***

- **$[Q,Q2]=cargas\_arm(njc,nmc,ngl,L,seno,coseno,CG,VC,F,Fm,datos,nr,NI,NJ);$**

Es una función que calcula el vector de cargas  $Q$  de un pórtico plano.

Los datos de entrada son:  $njc$  es el número de juntas cargadas;  $nmc$  es el número de miembros cargados;  $F$  es la matriz que contiene las cargas que llegan a los nudos de la estructura, considerando en la primera columna las fuerzas en X, en la segunda las fuerzas en Y y en la tercera los momentos;  $Fm$  es la matriz que contiene las cargas en los elementos, y los elementos adicionales que se quieran generar siempre que tengan la misma carga y la misma longitud.

Los datos de salida son:  $Q$  es el vector de cargas  $Q$ ;  $Q2$  es la matriz que contiene los momentos de empotramiento perfecto de cada elemento de la estructura.

- **$[FF]=fuerzas\_acero\_arm(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,E,q,Q2,CG,nr,NI,NJ,nmiembro)$**

Es una función que calcula las fuerzas en elementos de la estructura.

Los datos de entrada son:  $q$  es el vector de desplazamientos siguiendo los grados de libertad de la estructura, calculados mediante la ecuación  $q = K \setminus Q$ .

Los datos de salida son:  $FF$  es la matriz que contiene las fuerzas en los elementos de la estructura (vigas y columnas).

- **$dibujo\_axial\_eq(X,Y,NI,NJ,VC,L,seno,coseno,nudt,Fm,FF,fact,nelem)$**
- **$dibujo\_cortante\_eq(X,Y,NI,NJ,VC,L,seno,coseno,nudt,Fm,FF,fact,nelem)$**
- **$dibujo\_momento\_eq(X,Y,NI,NJ,VC,L,seno,coseno,nudt,Fm,FF,fact,nelem)$**

Son las funciones que calcula los diagramas de axial, cortante y momento del pórtico mediante equilibrio de los elementos.

### Capítulo 3. Evaluación de la estructura utilizando disipadores TADAS

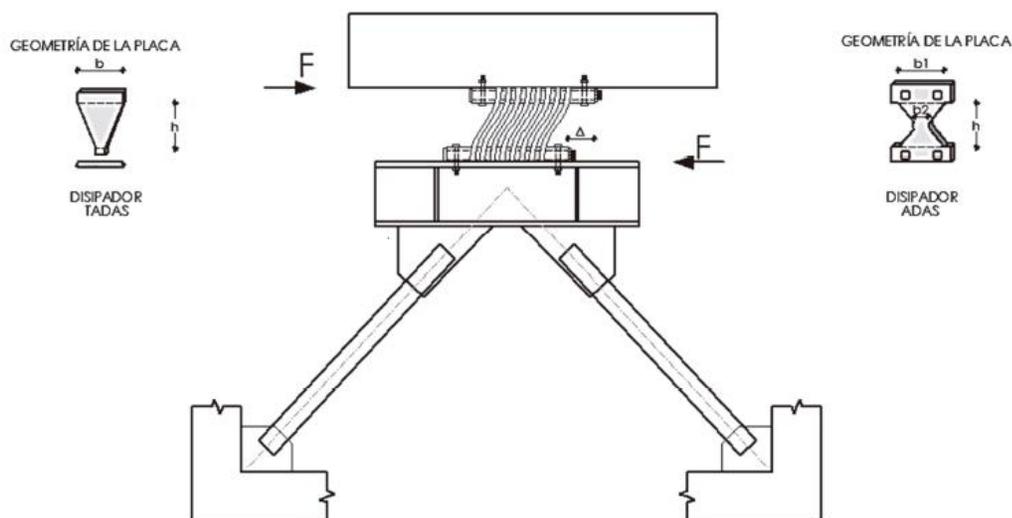
#### Parámetros elásticos del disipador TADAS

Los disipadores TADAS (Triangular plate added damping and stiffness) son dispositivos instalados en la estructura que se activan cuando un sismo o un movimiento fuerte actúa en la misma. Estos dispositivos permiten disipar la energía aplicada a la estructura, sin embargo, al funcionar por fluencia de las placas de acero que lo conforman, éste deberá ser reemplazado después de que falle.

Estos disipadores se los coloca generalmente sobre diagonales de acero en forma de "V" invertida y su comportamiento es similar a los disipadores ADAS, desarrollados en Nueva Zelanda por Tyler en 1978.

#### Figura 3.1

*Disipadores TADAS y ADAS*



*Nota.* Recuperado de (Aguar Falconí, Rodriguez, & Mora, Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS, 2016)

En la Figura 3.1 en la parte superior izquierda se puede apreciar un disipador TADAS. Este disipador se encuentra con un empotramiento en la parte superior que va conectada a la viga, y una articulación en la conexión con las diagonales de acero; esto

permite el desplazamiento de la parte superior e inferior del disipador, lo que da origen a la disipación de energía. (Mora, 2015)

Como se indica en (Mora, 2015), las diagonales de acero en donde se van a ubicar los disipadores TADAS, deben ser lo bastante rígidas para que trabajen en el rango elástico ante un sismo severo, y para que el desplazamiento lateral que se produzca en la parte inferior del disipador sea similar al desplazamiento del entrepiso sobre el cual está asentado.

### ***Cálculo de la curvatura del disipador TADAS***

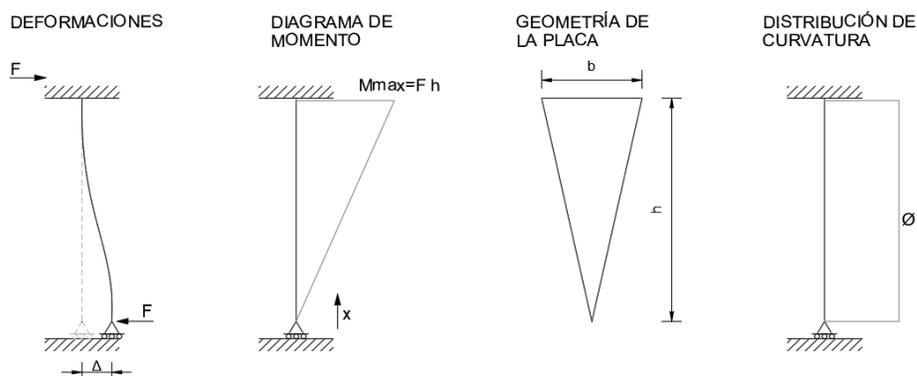
Al considerar un disipador TADAS en funcionamiento, éste se va a desplazar un valor  $q$ , por acción de una fuerza  $F$ . El momento máximo que se producen en el disipador será:

$$M_{max} = F * h \quad \text{Ecuación ( 3.1 )}$$

Siendo  $h$  la altura del disipador. Adicional se conoce que los valores de  $E$  es el módulo de elasticidad, y  $I$  es el valor de la inercia. Con estos valores se puede observar la construcción de los diagramas de deformación, momento, geometría y curvatura.

### **Figura 3.2**

*Diagramas de deformación, momento, geometría y curvatura de un disipador TADAS*



*Nota.* Recuperado de (Aguar Falconí, Rodriguez, & Mora, Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS, 2016)

La ecuación que define la variación de momentos  $M_{(x)}$  y del ancho de la placa  $b_{(x)}$  son:

$$M_{(x)} = \frac{M_{max} x}{h} \quad \text{Ecuación ( 3.2 )}$$

$$b_{(x)} = \frac{b x}{h} \quad \text{Ecuación ( 3.3 )}$$

A partir de conceptos de resistencia de materiales se conoce:

$$\phi_{(x)} = \frac{M_{(x)}}{E I_{(x)}} \quad \text{Ecuación ( 3.4 )}$$

$$\phi_{(x)} = \frac{\frac{M_{max} x}{h}}{E \frac{b x}{h} \frac{t^3}{12}}$$

$$\phi_{(x)} = \frac{M_{max}}{E b \frac{t^3}{12}} = cte \quad \text{Ecuación ( 3.5 )}$$

### **Fuerza y desplazamiento de fluencia del disipador TADAS**

De la Figura 3.2 se obtiene la curvatura de fluencia que es:

$$\phi_{y(x)} = \frac{\varepsilon_y}{t/2} \quad \text{Ecuación ( 3.6 )}$$

El momento de fluencia es:

$$M_{y(x)} = \frac{f_y b_{(x)} t^2}{6} \quad \text{Ecuación ( 3.7 )}$$

Para el punto donde el momento es máximo  $b_x = b$ , entonces:

$$M_{y max} = \frac{f_y b t^2}{6} \quad \text{Ecuación ( 3.8 )}$$

Del diagrama de momentos

$$F_y = \frac{M_{y max}}{h} \quad \text{Ecuación ( 3.9 )}$$

Al reemplazar

$$F_y = \frac{f_y b t^2}{6 h} \quad \text{Ecuación ( 3.10 )}$$

El desplazamiento de fluencia se halla integrando dos veces la curvatura

$$q_y = \iint \phi_{y(x)} dx$$

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

$$q_y = \frac{f_y h^2}{E t} \quad \text{Ecuación ( 3.11 )}$$

El momento plástico máximo es:

$$M_{p \max} = \frac{f_y b t^2}{4} \quad \text{Ecuación ( 3.12 )}$$

El momento plástico máximo para un disipador TADAS es:

$$M_{p \max} = F_u h \quad \text{Ecuación ( 3.13 )}$$

De igualar estas dos expresiones se obtiene:

$$F_u = \frac{f_y b t^2}{4 h} \quad \text{Ecuación ( 3.14 )}$$

### **Rigidez elástica del disipador TADAS**

La rigidez del disipador TADAS se obtiene al dividir la fuerza y el desplazamiento de fluencia.

$$K_{dis} = \frac{F_y}{q_y} \quad \text{Ecuación ( 3.15 )}$$

$$K_{dis} = \frac{E b t^3}{6 h^3} \quad \text{Ecuación ( 3.16 )}$$

### **Parámetros elásticos de disipador TADAS**

El resumen que define los puntos notables del modelo bilineal es:

Tabla 3.1

*Parámetros del diagrama bilineal para disipadores TADAS*

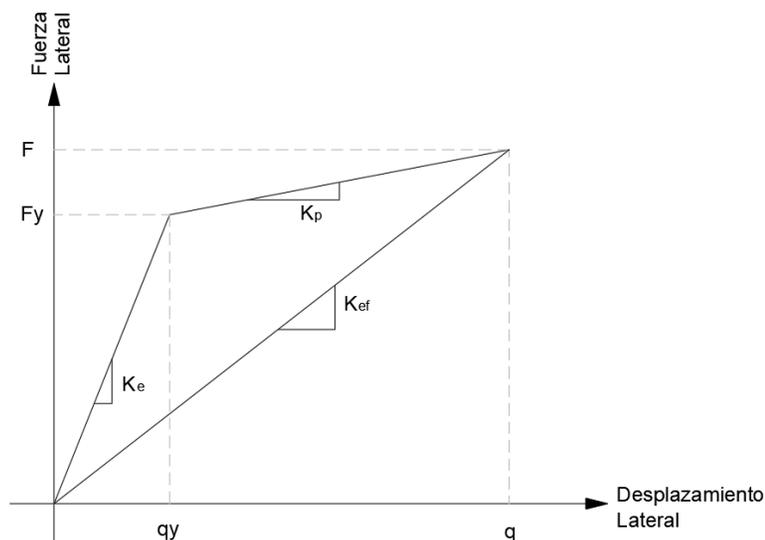
Parámetro	TADAS
Fuerza de fluencia	$F_y = \frac{n f_y b t^2}{6 h}$
Desplazamiento de fluencia	$q_y = \frac{f_y h^2}{E t}$
Rigidez elástica	$K_{dis} = \frac{n E b t^3}{6 h^3}$
Fuerza última	$F_u = \frac{n f_y b t^2}{4 h}$

### Modelación de la estructura con disipadores utilizando el método de la diagonal equivalente

Para realizar el modelo de análisis de una estructura con disipadores TADAS usando el método de “diagonal equivalente” se tiene que definir la rigidez efectiva del elemento disipador, la misma que se puede visualizar en la Figura 3.3.

Figura 3.3

*Relación fuerza deformación de un disipador TADAS*



La rigidez post fluencia y la rigidez elástica del disipador establece una relación denominada  $\alpha$ . Según (Aguiar Falconí, Rodriguez, & Mora, 2016) los valores frecuentes que puede tomar  $\alpha$  son: 0, 0.03 y 0.05; aunque estos valores pueden ser ajustados con la curva constitutiva del elemento disipador que se va a construir.

$$K_p = \alpha K_e \quad \text{Ecuación ( 3.17 )}$$

La rigidez de un pórtico reforzado con disipadores TADAS sobre diagonales de acero se lo calcula como la suma de la rigidez del marco sin reforzamiento y la rigidez efectiva del conjunto contravientos-disipador.

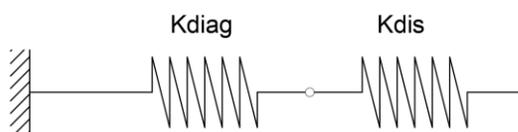
La rigidez secante  $K_{ef}$  es igual a:

$$K_{ef} = \frac{F}{q} \quad \text{Ecuación ( 3.18 )}$$

La diagonal del contraviento trabaja como resortes en serie con el disipador, por lo que se trabaja con este principio para encontrar una rigidez equivalente del conjunto diagonales – disipador.

### Figura 3.4

*Modelo diagonal-disipador como resortes en serie*



*Nota.* Recuperado de (Aguiar Falconí *et al.*, 2016)

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{Diag}} + \frac{1}{K_{Disp}} \quad \text{Ecuación ( 3.19 )}$$

Para encontrar la rigidez del disipador se debe establecer esta rigidez en coordenadas locales, por lo que la matriz de paso  $T$  es:

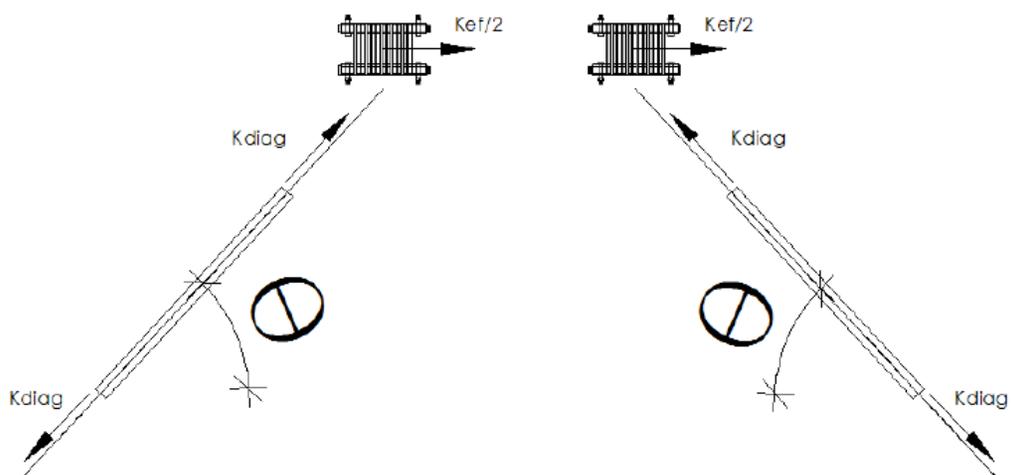
$$T = \frac{1}{\cos \theta} \quad \text{Ecuación ( 3.20 )}$$

Las diagonales solo van a trabajar con su rigidez axial, la cual es:

$$K_{diag} = \frac{E * A}{L} \quad \text{Ecuación ( 3.21 )}$$

**Figura 3.5**

*Partición de la rigidez efectiva del disipador hacia cada diagonal.*



*Nota.* Recuperado de (Aguiar Falconí, Rodriguez, & Mora, Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS, 2016)

Por lo tanto, la rigidez del disipador en coordenadas locales es:

$$K_{Disp} = T^T K_{ef} T \quad \text{Ecuación ( 3.22 )}$$

$$K_{Disp} = \frac{K_{ef}}{\cos^2 \theta} \quad \text{Ecuación ( 3.23 )}$$

La rigidez efectiva del conjunto es:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{Diag}} + \frac{2 \cos^2 \theta}{K_{ef}}$$

$$K_{eq} = \frac{K_{diag} K_{ef}}{K_{ef} + 2 \cos^2(\theta) K_{diag}} \quad \text{Ecuación ( 3.24 )}$$

### **Descripción estructural**

Se presenta el modelo a analizar mediante el uso de diagonales equivalentes. Las secciones usadas en este modelo serán las presentadas en la Figura 2.4 y la Figura 3.6.

### **Figura 3.6**

*Secciones de diagonales y elemento TADAS*



Los disipadores de energía que se utilizó para reforzar este hospital son disipadores TADAS de 6 y 10 placas. Como se puede ver en la Figura 3.7 este dispositivo tiene una forma triangular, lo que permite que el daño se produzca a lo largo de estas placas y de una forma uniforme. Estos disipadores fueron adquiridos a la empresa chilena SPD (Sistema de Protección sísmica) y son de acero A36 con un límite de fluencia de 320 MPa. (Aguiar, 2018)

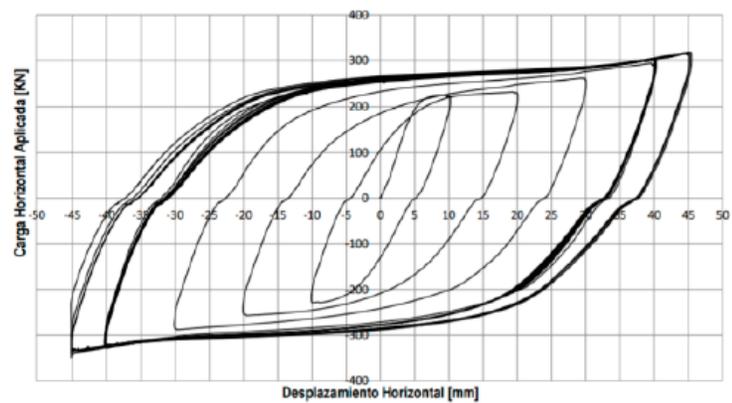
Antes de realizar el reforzamiento de esta estructura se ensaya dichos disipadores, para así obtener la curva constitutiva. En dichos ensayos se evidencia que los lazos de la curva constitutiva son estables. Una vez realizados los ensayos, se obtiene el factor de amortiguamiento de los disipadores a emplear en el reforzamiento. El valor del amortiguamiento en estos disipadores es de 42% en la mayoría de los ciclos de carga. (Aguiar, 2018).

### **Figura 3.7**

*Placas que conforman el disipador de energía TADAS; b) Curva constitutiva del disipador TADAS ensayado.*



a)



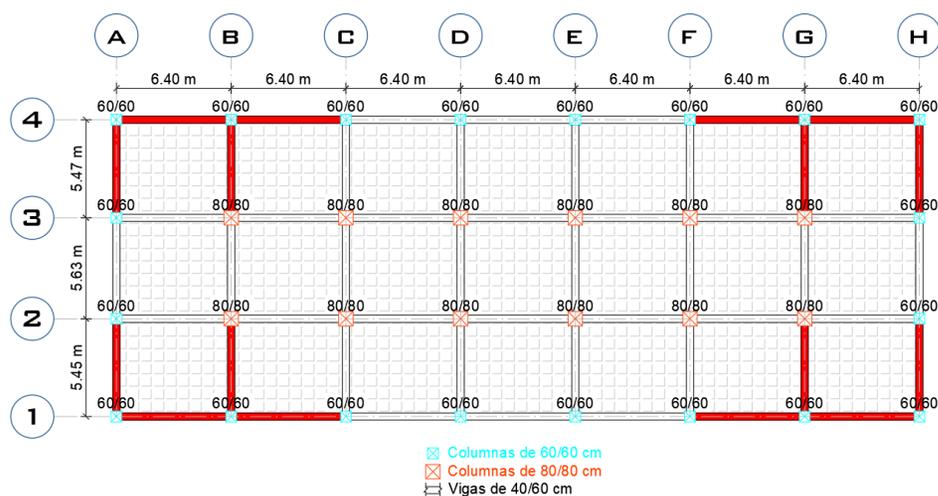
b)

*Nota.* Recuperado de (Aguilar, Analysis of Used Dissipators in Reinforcement of Hospital Rodríguez Zambrano de Manta, 2018)

Los pórticos que tienen disipadores TADAS se presentan marcados en color rojo en la Figura 3.8. En los dos primeros pisos de esta estructura se utilizan disipadores TADAS de 10 placas, y en los pisos superiores de 6 placas.

### **Figura 3.8**

*Vista en planta del reforzamiento.*

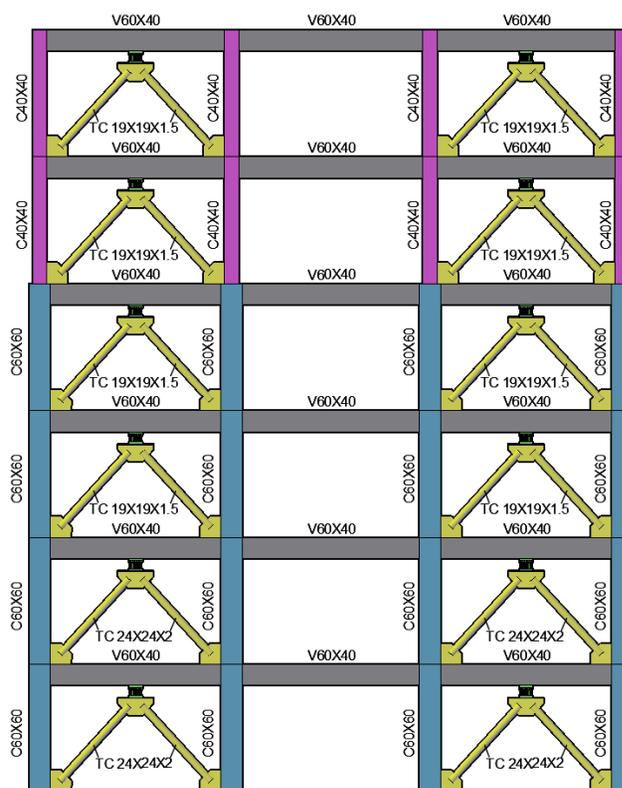


**Figura 3.9**

*Pórticos Exteriores de reforzamiento. a) Pórticos A - H, b) Pórticos 1 - 4*



a)

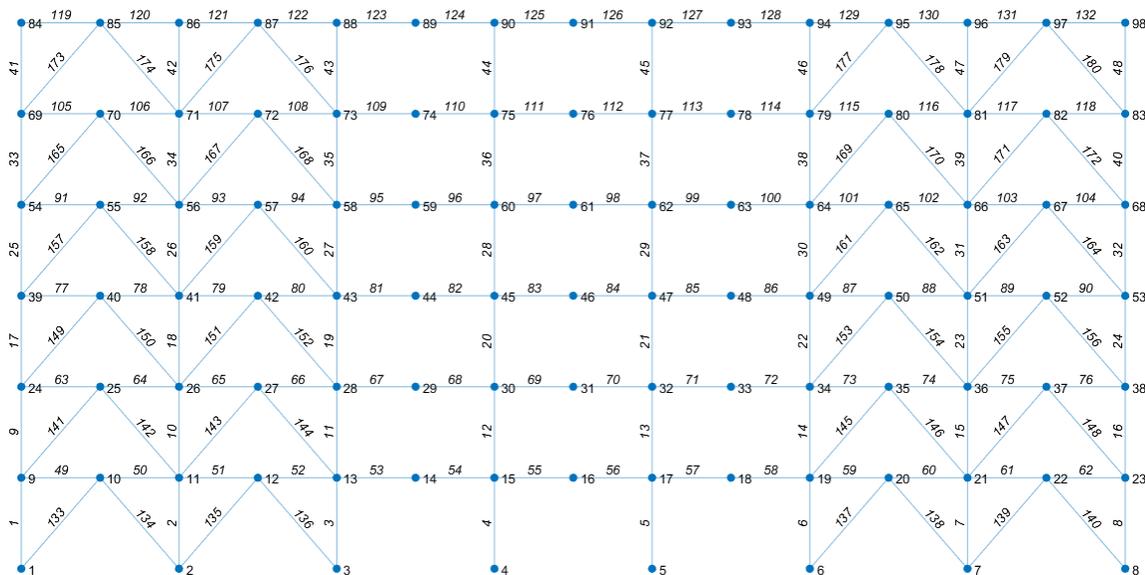


b)

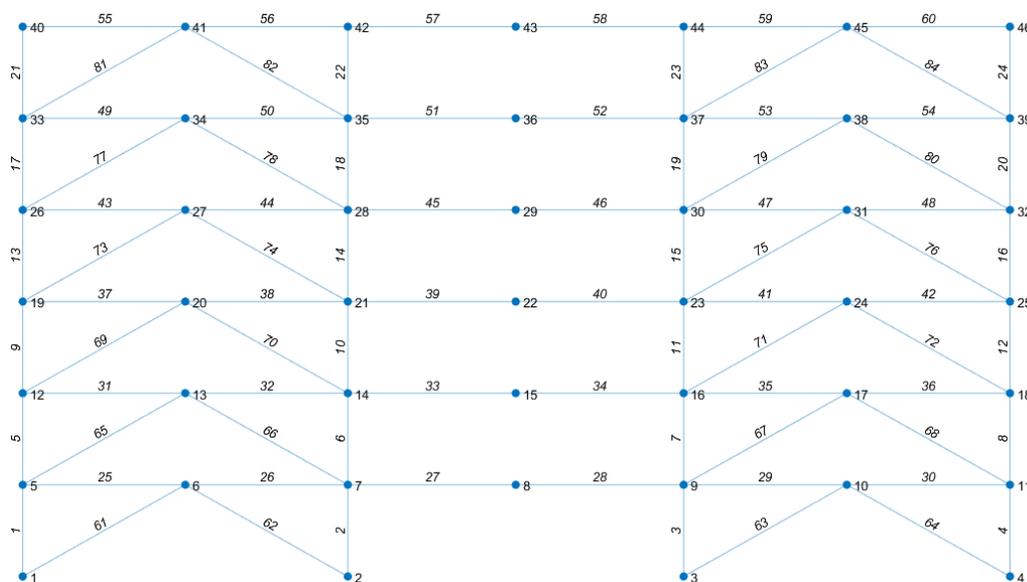
Para el análisis de este modelo matemático, primero se creó los programas que facilitan el modelado geométrico de la estructura, los mismos que serán descritos a detalle al final del presente capítulo. En éstos se coloca los vanos, pisos y el número de pórtico en el que se coloca las diagonales, lo cual se muestra en la Figura 3.10.

### Figura 3.10

*Numeración de nudos y elementos en estructura con disipadores TADAS a) Pórticos 1-4, b) Pórticos A-H*



a)



b)

### **Análisis dinámico**

- **Factor de reducción del espectro por amortiguamiento**

Al modelar una estructura en la que se emplea disipadores de energía, se utiliza un factor de amortiguamiento diferente. El análisis de esta estructura se realizó con el

sismo presentado en Manta en 2016, pero este valor se calculó para un amortiguamiento de 5% (Aguar Falconí *et al.*, 2016). Para analizar la estructura mediante un espectro asociado con el factor de amortiguamiento en la estructura, se divide el espectro para el factor  $B$  el que se calcula mediante la siguiente ecuación (Aguar, Palacios, Palacios, & Gastón, 2019).

$$B = \left( \frac{z_{eda}}{0.05} \right)^{0.3} \quad \text{Ecuación ( 3.25 )}$$

En base a la Tabla 2.4 y a los ensayos del disipador, se establece un factor de amortiguamiento de 0.25. Esto como recomendación y en base a la experiencia obtenida de (Aguar, Cagua, Romero, & Pilatasig, 2019). De este modelo se puede obtener los valores de derivas de piso y el periodo de este modelo.

- **Índice de vulnerabilidad**

En esta estructura, una vez obtenido el periodo indicado en la Tabla 3.2, se obtiene un índice de vulnerabilidad de:

$$\frac{H}{T} = 23.34 \quad \text{Ecuación ( 3.26 )}$$

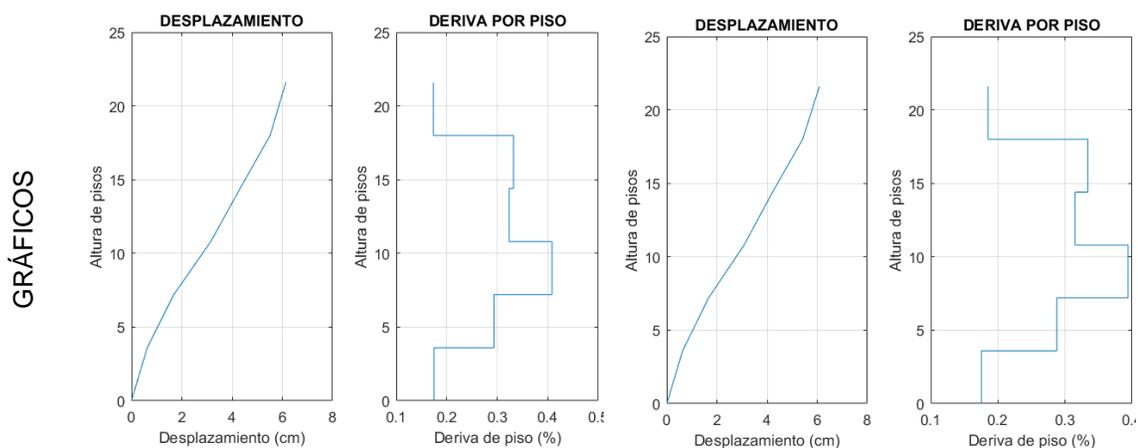
Lo que cataloga a esta estructura siguiendo la Tabla 2.5, como una estructura flexible.

### Tabla 3.2

*Períodos, derivas y desplazamientos en estructura reforzada con disipadores TADAS, mediante el método de diagonales equivalentes.*

PERIODO [s]				
0.9255				
Pis	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
1	0.175	0.0063	0.175	0.0063

	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
2	0.293	0.0168	0.288	0.0167
3	0.408	0.0315	0.394	0.0309
4	0.323	0.0432	0.315	0.0422
5	0.332	0.0551	0.334	0.0542
6	0.173	0.0614	0.185	0.0609



Una vez obtenidas las derivas de piso y los períodos de la estructura, se

determina la fuerza que el sismo transmite a los pórticos. En este caso se presenta la fuerza en los pórticos exteriores que es motivo de análisis de la presente investigación.

**Tabla 3.3**

*Fuerzas transmitidas a los pórticos.*

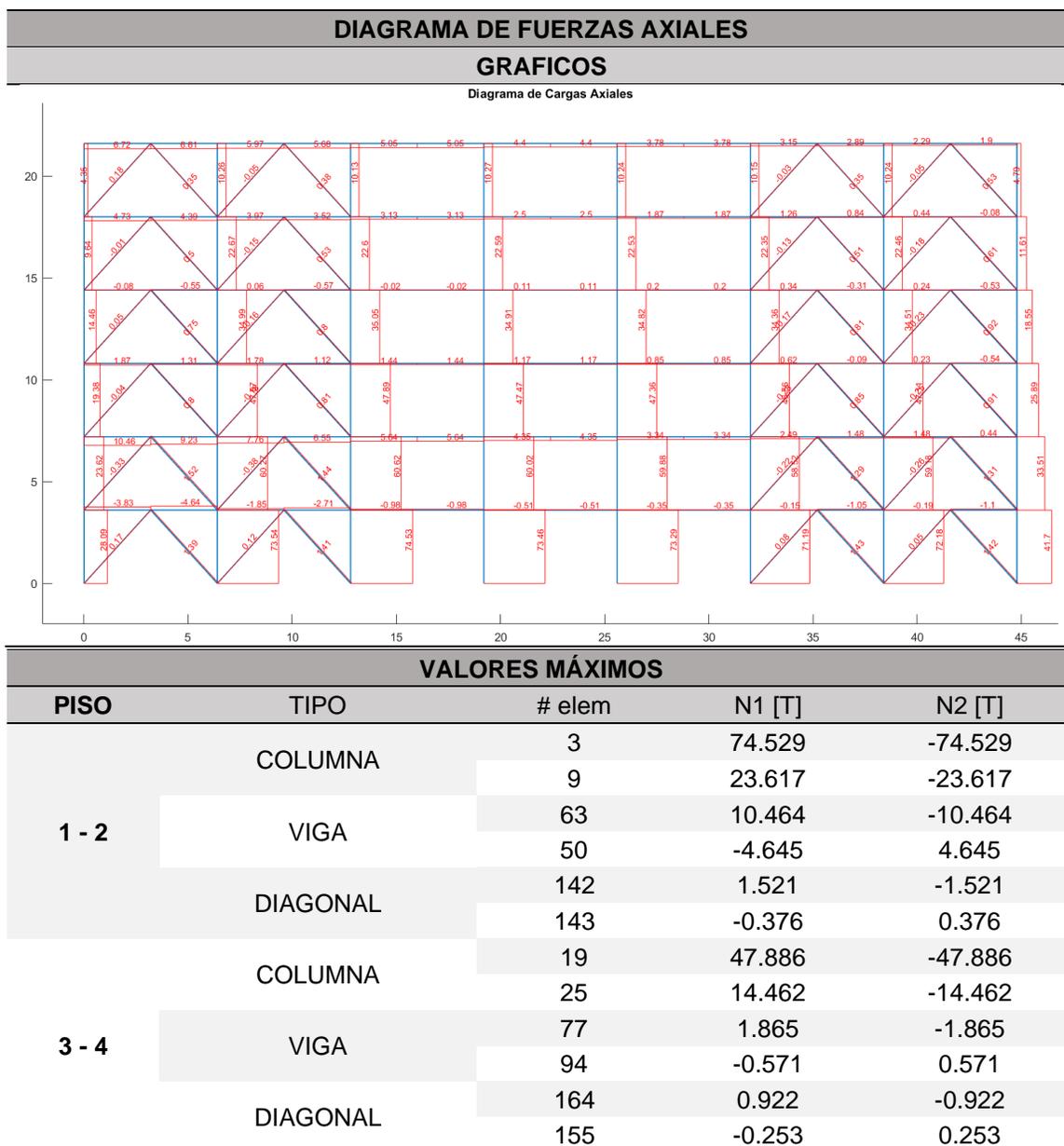
PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
1	-4.36	-1.43
2	11.02	5.18
3	2.30	1.11
4	-0.41	-0.45
5	5.71	2.61
6	5.53	2.66

### Análisis estático

Las fuerzas aplicadas en los elementos en el sentido X está expresado en las siguientes tablas:

**Tabla 3.4**

*Fuerzas Axiales – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido X.*



VALORES MÁXIMOS				
PISO	TIPO	# elem	N1 [T]	N2 [T]
5 - 6	COLUMNA	34	22.672	-22.672
		41	4.353	-4.353
	VIGA	119	6.715	-6.715
		118	-0.077	0.077
		172	0.607	-0.607
DIAGONAL	171	-0.176	0.176	

Tabla 3.5

Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido X

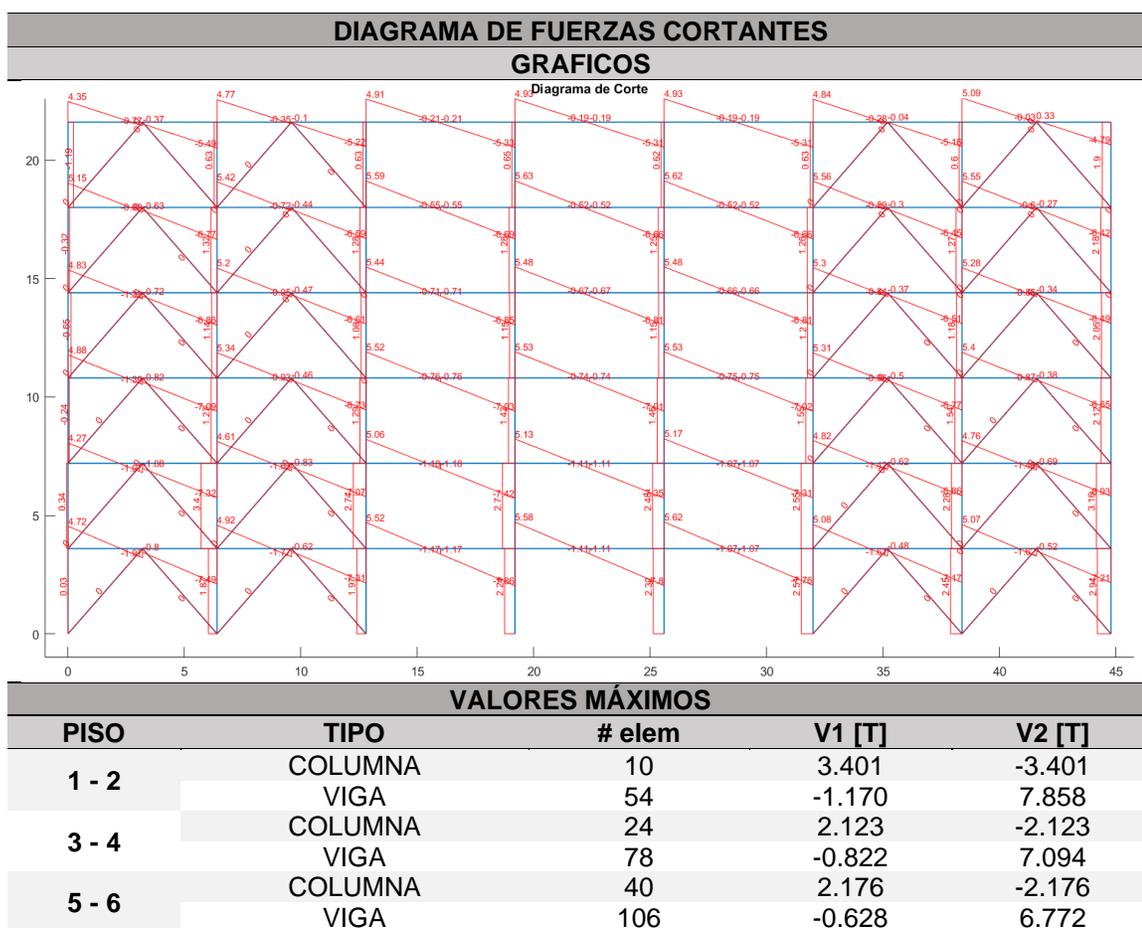
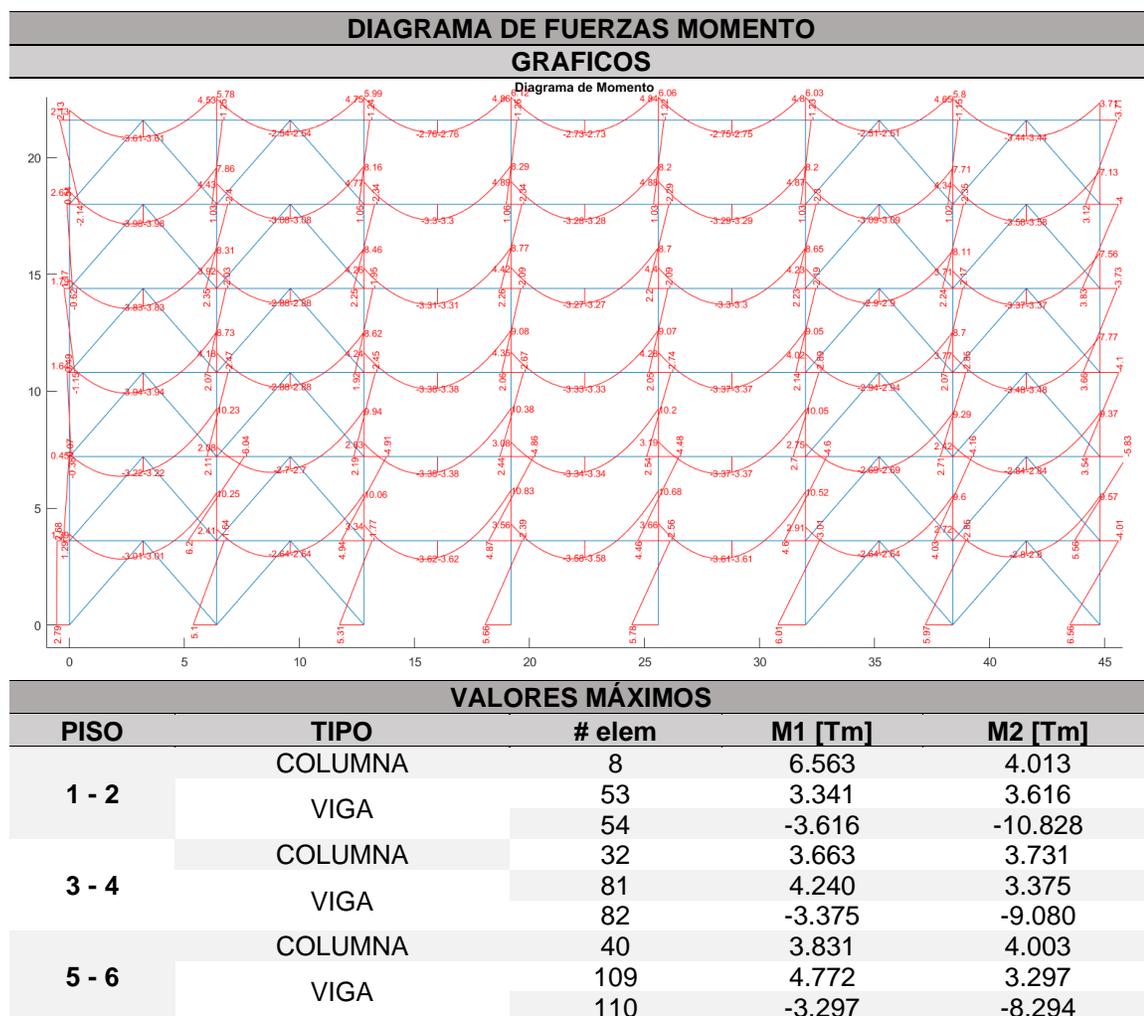


Tabla 3.6

Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido X



Los resultados de las fuerzas en los elementos aplicando el sismo en el sentido

Y se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 3.7

Fuerzas Axiales – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido Y.

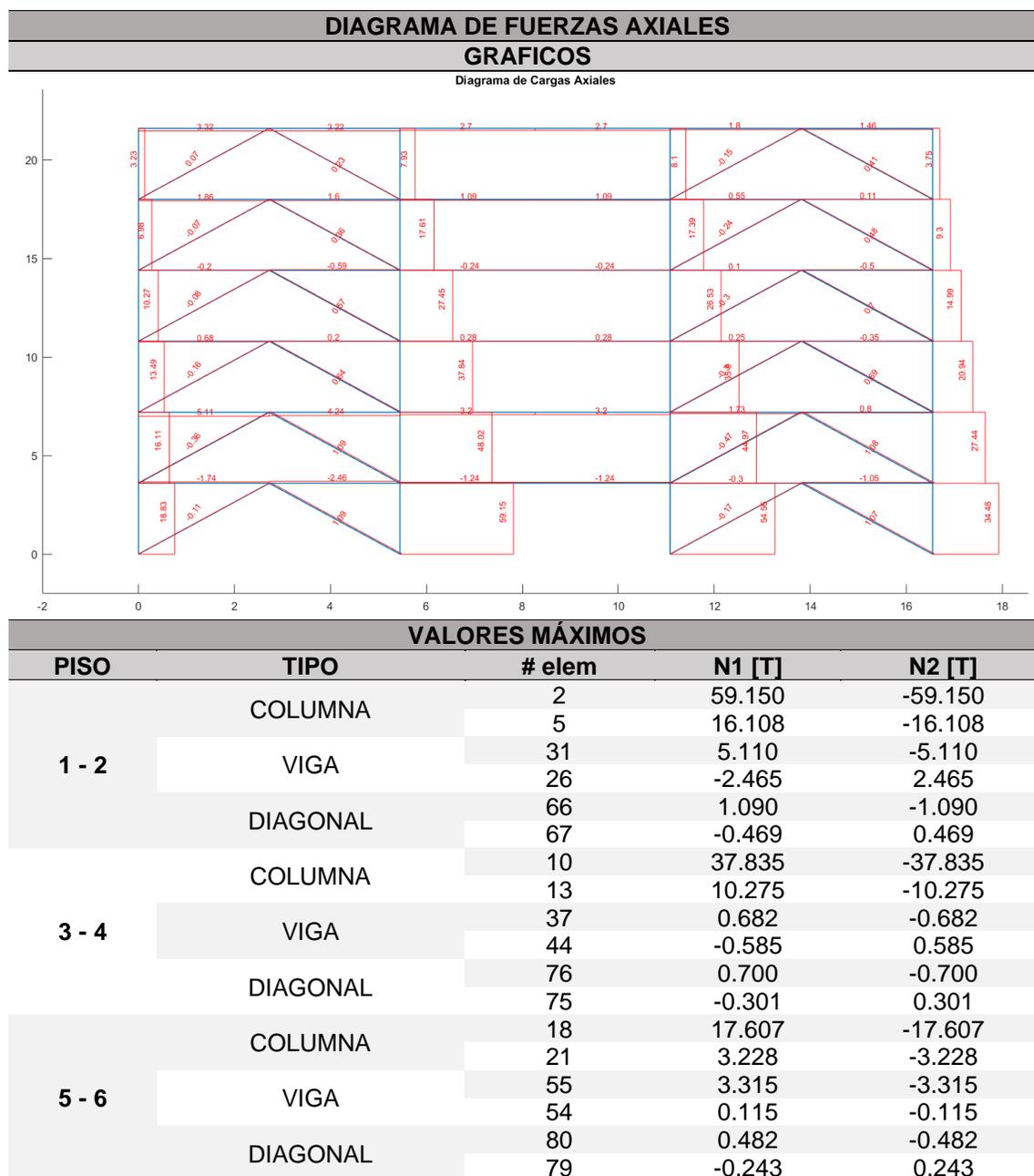


Tabla 3.8

Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido Y.

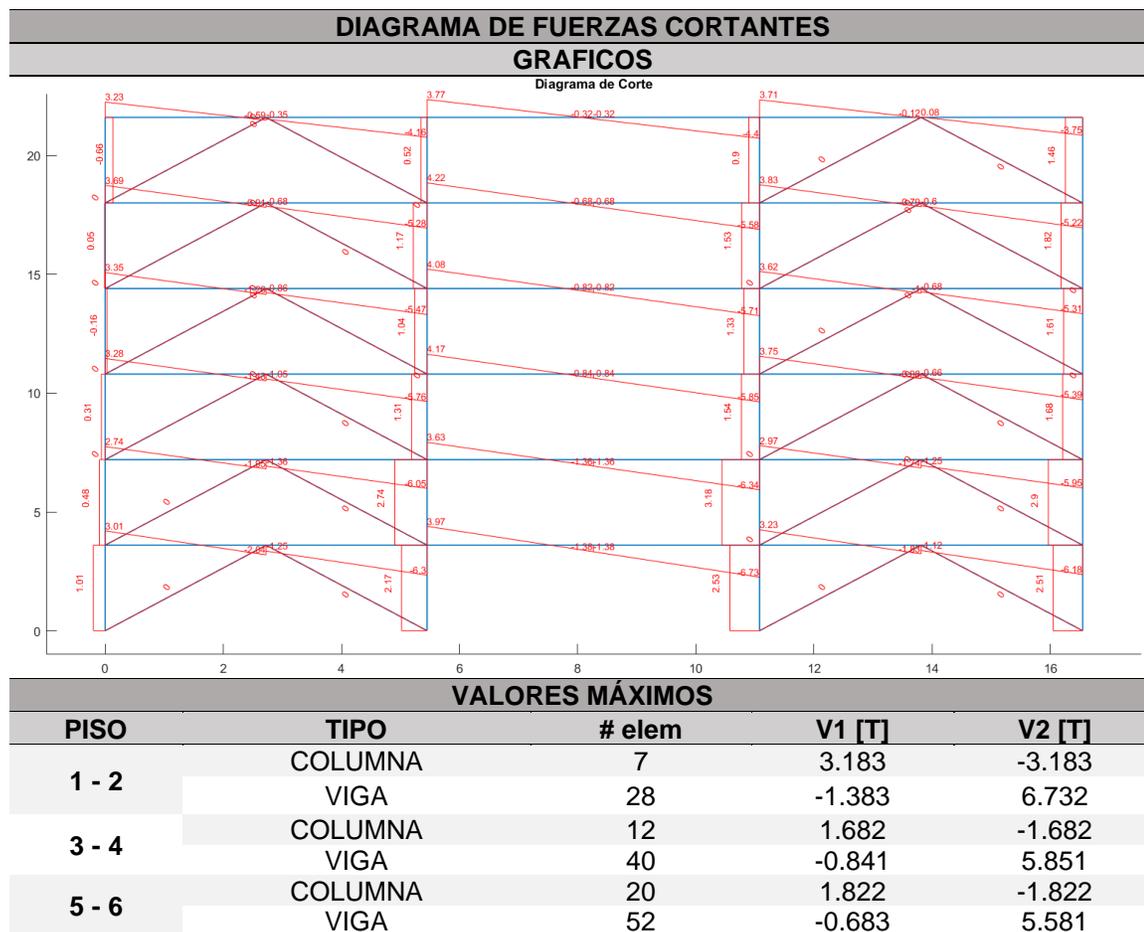
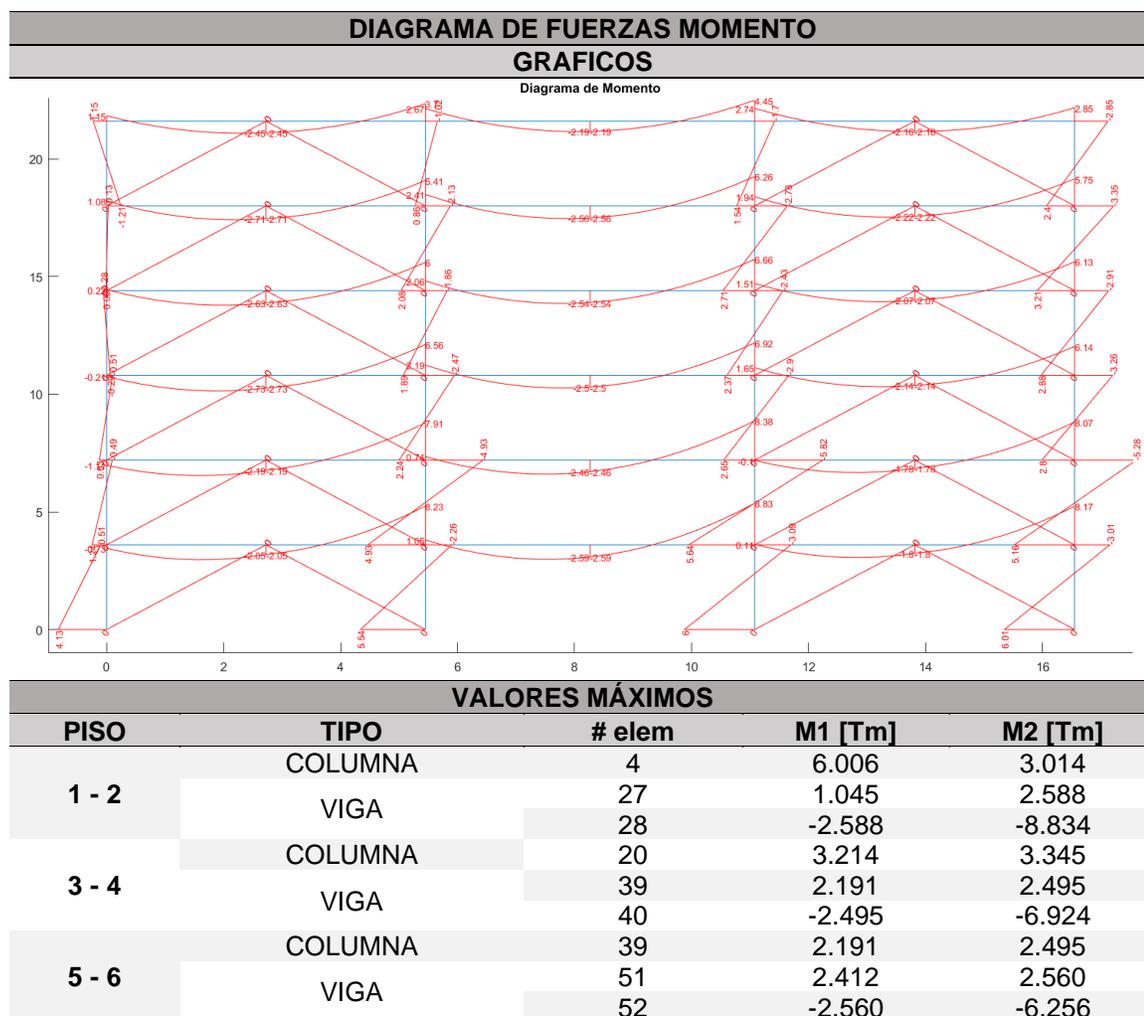


Tabla 3.9

Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (diagonal equivalente) – Sentido Y.



### Resumen de funciones en CEINCI-LAB

Para generar la geometría del pórtico con la cual se analiza la estructura con diagonales equivalentes, se crean rutinas que facilitan el ingreso de datos al usuario. Las rutinas adicionales para realizar el análisis estático y dinámico de la estructura se describen en el apartado 0.

### ***Rutinas para generar la geometría del pórtico***

- ***[GEN]=geometria\_nudo\_diagonales(nv, np, nudt, mar);***

Función que calcula el vector GEN necesario para generar las diagonales en los vanos correspondientes.

Los datos de entrada son: **nv** es el número de vanos; **np** es el número de piso; **nudt** es el número de elementos totales; **mar** es el vector que contiene el número del pórtico en el que están presentes diagonales, nombrados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

Los datos de salida son: **GEN** es el vector usado para generar las diagonales en la estructura.

- ***[NI2,NJ2]=gn\_portico(GEN);***

Función que sirve para generar los nudos inicial y final de las diagonales.

Los datos de salida son: **NI2** es el vector que contiene los nudos iniciales de las diagonales de la estructura; **NJ2** es el vector que contiene los nudos finales de las diagonales de la estructura.

- ***[NI,NJ]=gn\_portico3(NI,NJ,NI2,NJ2);***

Función que une en un solo vector los nudos inicial y final de los elementos: columnas, vigas y diagonales.

Los datos de salida son: **NI** es el vector que contiene los nudos iniciales de todos los elementos de la estructura; **NJ** es el vector que contiene los nudos finales de todos los elementos de la estructura.

- ***[F,Kef,Zeda]=rigidez\_efectiva\_TADAS(n,b,t,h,fy,q,alfa,E)***

Función que calcula la fuerza, rigidez y el factor de amortiguamiento del disipador TADAS.

Los datos de entrada son: **n** es el número de placas usadas en el dissipador; **b** es la base del dissipador; **h** es la altura del dissipador; **t** es el espesor de las placas del dissipador; **fy** es la fluencia del acero; **q** es el desplazamiento lateral asumido; **alfa** es la relación posfluencia con respecto a la rigidez elástica; **E** es el módulo de elasticidad del acero.

Los datos de salida son: **F** es la fuerza en el dissipador; **Kef** es la rigidez del dissipador; **Zeda** es el factor de amortiguamiento del dissipador.

- **[Kdiag,Keq]=rigidez\_equivalente\_TADAS(hci,hcd,hdis,L,hv,H,Kef,Adiag,E)**

Función que sirve para calcular la rigidez equivalente del conjunto formado por la diagonal de acero y el dissipador de energía TADAS

Los datos de entrada son: **hci** es la altura de la columna izquierda en centímetros; **hcd** es la altura de la columna derecha en centímetros, **hdis** es la altura del dissipador; **L** es la longitud de eje a eje de columnas; **hv** es la altura de la viga; **H** es la altura del piso en centímetros; **Kef** es la rigidez del dissipador reportada por la función rigidez\_efectiva\_TADAS; **Adiag** es el área de la diagonal que va a ser usada en el reforzamiento; **E** es el módulo de elasticidad de la estructura.

- **[KTA]=krigidez\_tadas(mbr,ngl,ELEM,seno,coseno,VC)**

Es la función que ensambla la matriz de rigidez de un elemento. Esta función puede ser usada para ensamblar la rigidez del conjunto formado por la diagonal de acero y el dissipador TADAS, también para ensamblar la rigidez de las diagonales dando como dato la rigidez axial  $EA/L$ .

Los datos de entrada son: **mbr** es el número de diagonales en el pórtico; **ngl** es el número de grados de libertad; **ELEM** es el vector que contiene las rigideces de los elementos que se va a analizar; **seno** y **coseno** es un vector con el seno y coseno de

los elementos; **VC** es la matriz que contiene el vector de colocación formado por los grados de libertad en cada nudo de cada elemento de la estructura.

Los datos de salidas son: **KTA** es el aporte de los elementos analizados a la matriz de rigidez de la estructura.

- **[FF]=fuerzas\_acero\_tadas(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,E,q,Q2)**

Se presenta la función que calcula la fuerza en elementos usando la rigidez como dato.

Los datos de entrada son: **L** es el vector que contiene la longitud de los elementos del pórtico; **E** es el módulo de elasticidad del acero; **q** es el vector de desplazamientos en los grados de libertad de la estructura, resultado de la ecuación  $q = K \setminus Q$ .

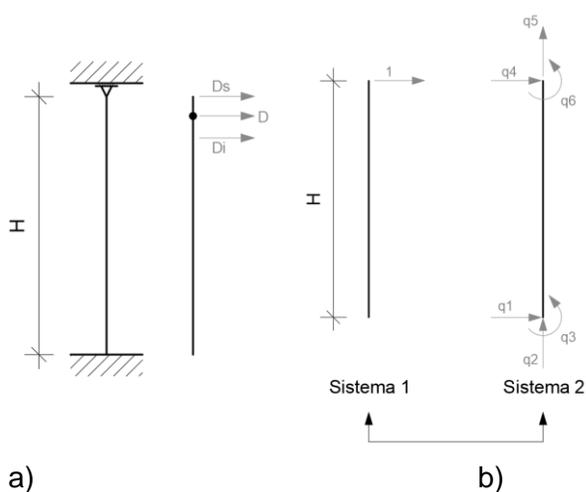
Los datos de salida son: **FF** es la matriz que contiene las fuerzas de los elementos analizados.

### Modelación de la estructura con disipadores utilizando al disipador como un elemento más de la estructura

Según lo indicado en (Aguiar, Cagua, Romero, & Pilatasig, 2019) se puede calcular el elemento disipador considerándolo como un elemento más de la estructura. El primer paso para colocar el disipador como un elemento adicional, es encontrar la matriz de rigidez de este elemento. Para ello se analiza los grados de libertad presentes en el elemento TADAS, los cuales se muestra en la Figura 3.11.

**Figura 3.11**

a) Modelo Empotrado - Rodillo, b) Modelo del elemento en coordenadas globales para ensamblaje con la matriz de rigidez



Nota. Recuperado de (Aguiar, Palacios, Palacios, & Gastón, 2019)

- **Matriz de paso  $T_{1-2}$**

Al observar la Figura 3.11, se plantea las siguientes ecuaciones:

$$D_s = q_4 \quad \text{Ecuación ( 3.27 )}$$

$$D_i = q_1 - q_3 * H \quad \text{Ecuación ( 3.28 )}$$

$$D = D_s - D_i \quad \text{Ecuación ( 3.29 )}$$

$$D = q_4 - q_1 + q_3 * H \quad \text{Ecuación ( 3.30 )}$$

$$D = [-1 \quad 0 \quad H \quad 1 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}$$

$$T_{1-2} = [-1 \quad 0 \quad H \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad \text{Ecuación ( 3.31 )}$$

La matriz de rigidez, en el sistema de coordenadas dos, se encuentra con la siguiente ecuación; en la que la matriz de rigidez  $k_1$  se toma la misma matriz de rigidez usada para analizar la estructura con el método de diagonales equivalentes.

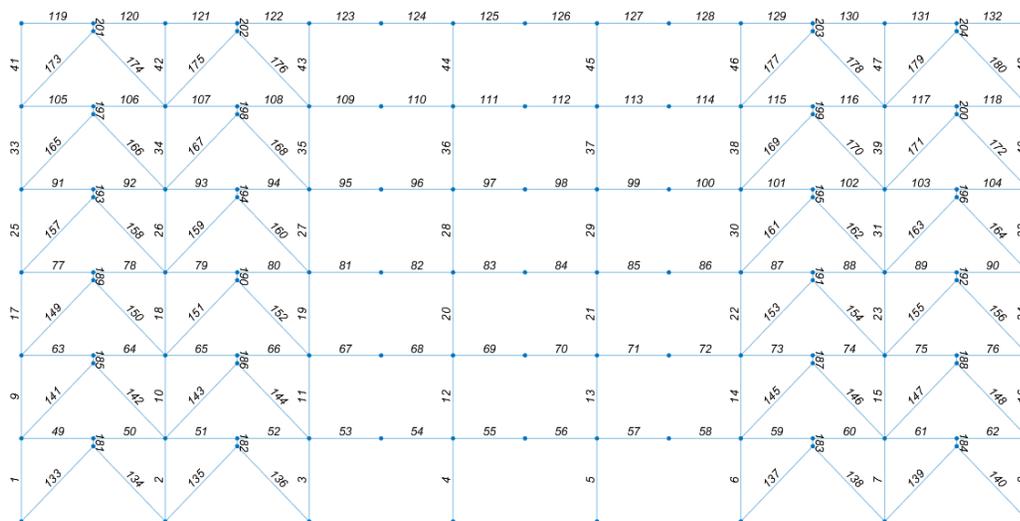
$$k_2 = T_{1-2}^t k_1 T_{1-2} \quad \text{Ecuación ( 3.32 )}$$

### **Descripción estructural**

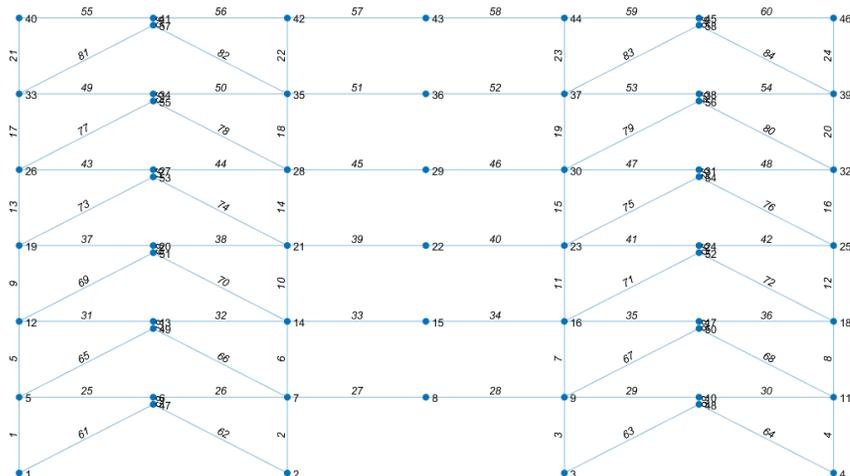
La numeración de nudos y elementos se los representa en las siguientes figuras.

### **Figura 3.12**

*Numeración de nudos y elementos en estructura con disipadores TADAS considerado como un elemento adicional de la estructura a) Pórticos 1-4, b) Pórticos A – H*



a)



b)

### **Análisis Dinámico**

- **Factor de amortiguamiento**

En esta estructura se toma las mismas características de la estructura con disipadores TADAS analizado mediante diagonales equivalentes, por lo que se utiliza un factor de amortiguamiento de 25%. Como se puede observar en la siguiente figura los valores de periodos y derivas son similares entre los dos modelos a analizar.

- **Índice de vulnerabilidad**

En esta estructura, una vez obtenido el periodo indicado en la Tabla 3.10, se obtiene un índice de vulnerabilidad de:

$$\frac{H}{T} = 23.06$$

Lo que cataloga a esta estructura siguiendo la Tabla 2.5, como una estructura flexible.

Tabla 3.10

*Periodos, derivas y desplazamientos en estructura reforzada con disipadores TADAS mediante elemento disipador*

PERIODO [s]				
0.93652				
Pis o	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
1	0.168	0.0060	0.151	0.0054
2	0.289	0.0165	0.264	0.0149
3	0.425	0.0318	0.395	0.0292
4	0.339	0.0440	0.349	0.0417
5	0.317	0.0554	0.405	0.0563
6	0.171	0.0615	0.218	0.0642

DESPLAZAMIENTO

DERIVA POR PISO

DESPLAZAMIENTO

DERIVA POR PISO

GRÁFICOS

Estos desplazamientos ocasionados por el sismo, se los convierte a fuerzas

aplicadas en los pórticos, los mismos que se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11

*Fuerzas transmitidas a los pórticos*

PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
1	-5.11	-2.29
2	8.82	3.78

PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
3	2.56	0.80
4	0.07	-1.52
5	5.25	3.53
6	5.36	3.16

### ***Análisis Estático***

Una vez transmitido las fuerzas provenientes del sismo a los pórticos y mostrados en la Tabla 3.11, se procede al análisis estático de las fuerzas en los elementos de la estructura. Similar a los anteriores modelos, se muestra las fuerzas en los pórticos exteriores ya que son en estos pórticos en los cuales se colocará el elemento disipador.

En este caso, se observa que las fuerzas en las diagonales son pequeñas respecto al modelo realizado con diagonales equivalentes. Esto se da por el modelo adoptado mostrado en la Figura 3.11 considerando empotrado y un rodillo en la parte superior del elemento disipador.

Tabla 3.12

Fuerzas Axiales – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (elemento disipador) – Sentido X.

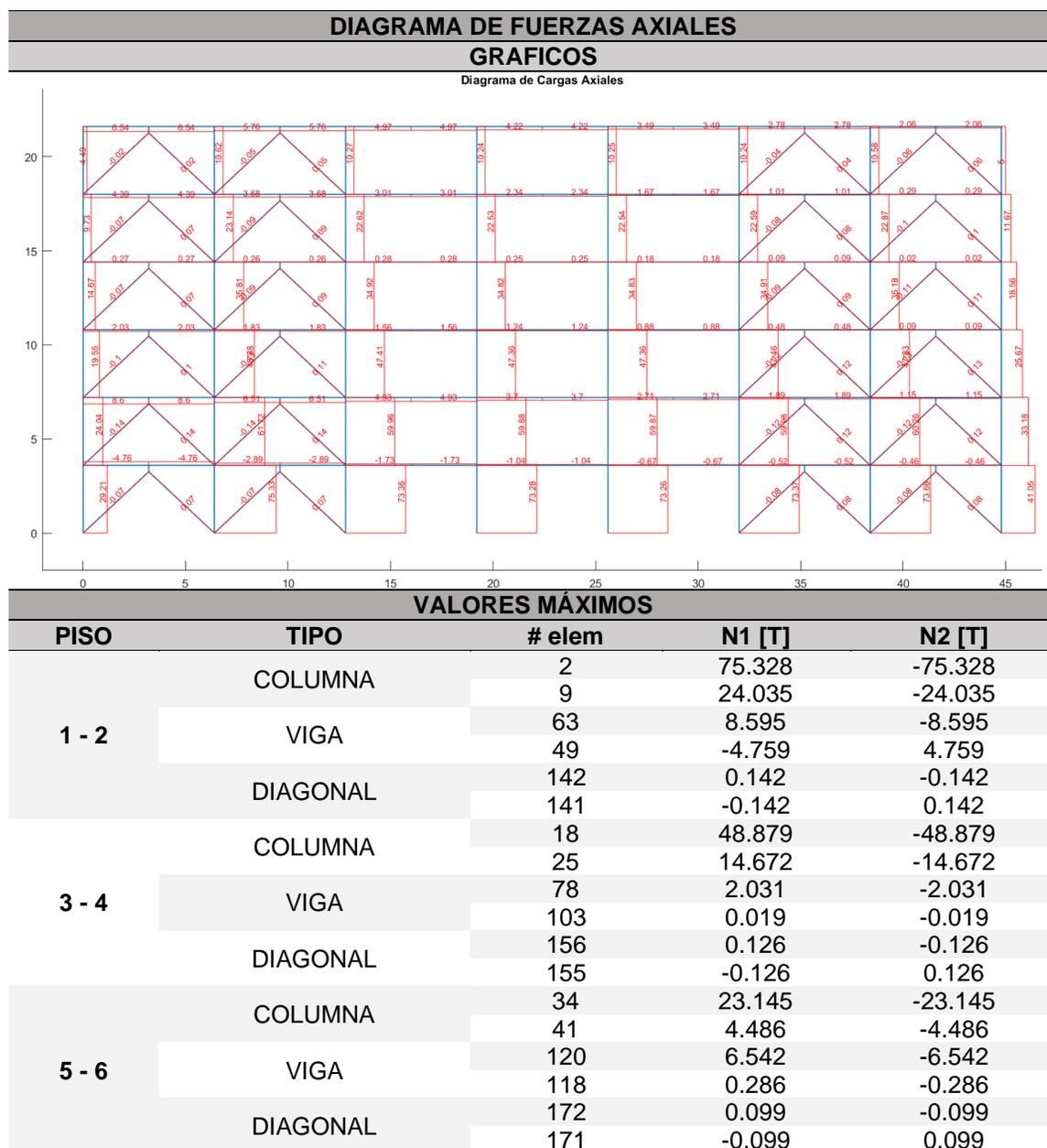


Tabla 3.13

Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS

(elemento disipador) – Sentido X.

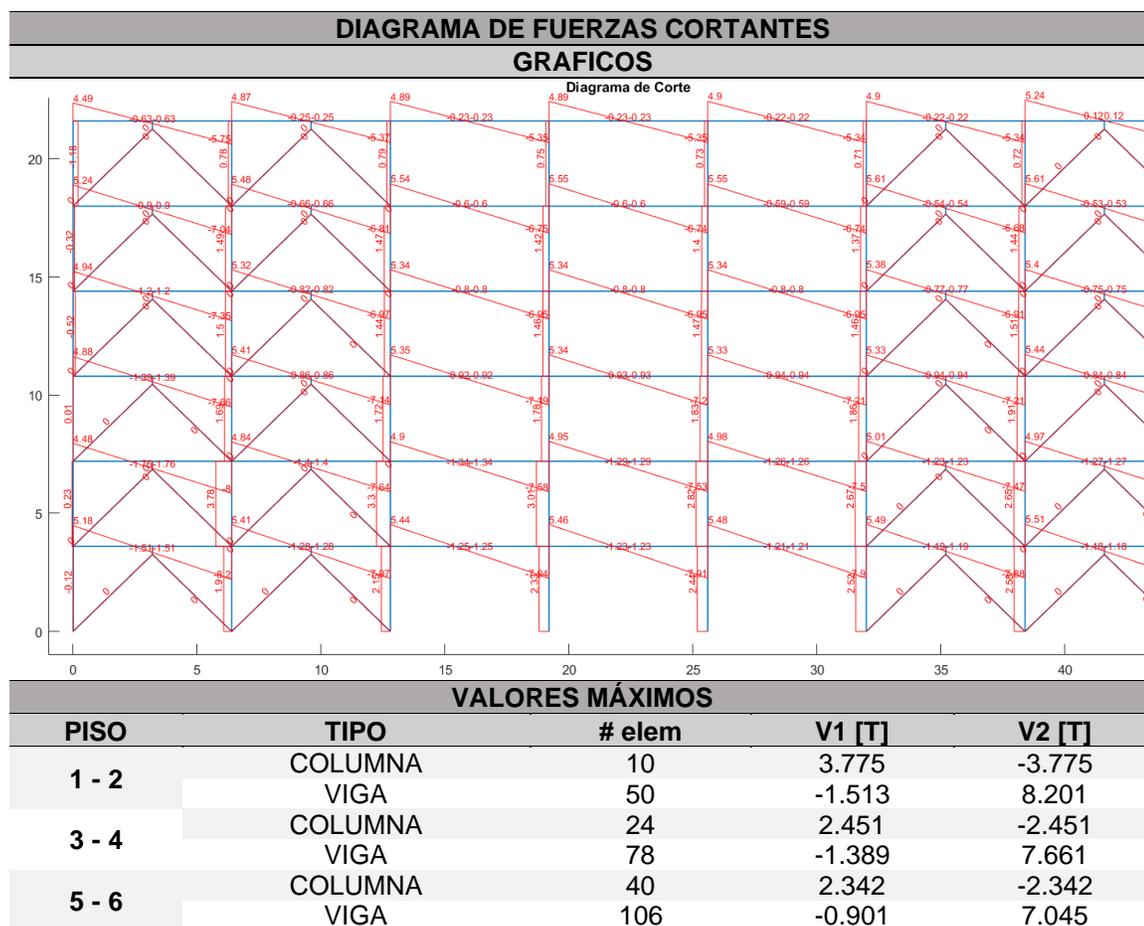


Tabla 3.14

Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (elemento disipador) – Sentido X.

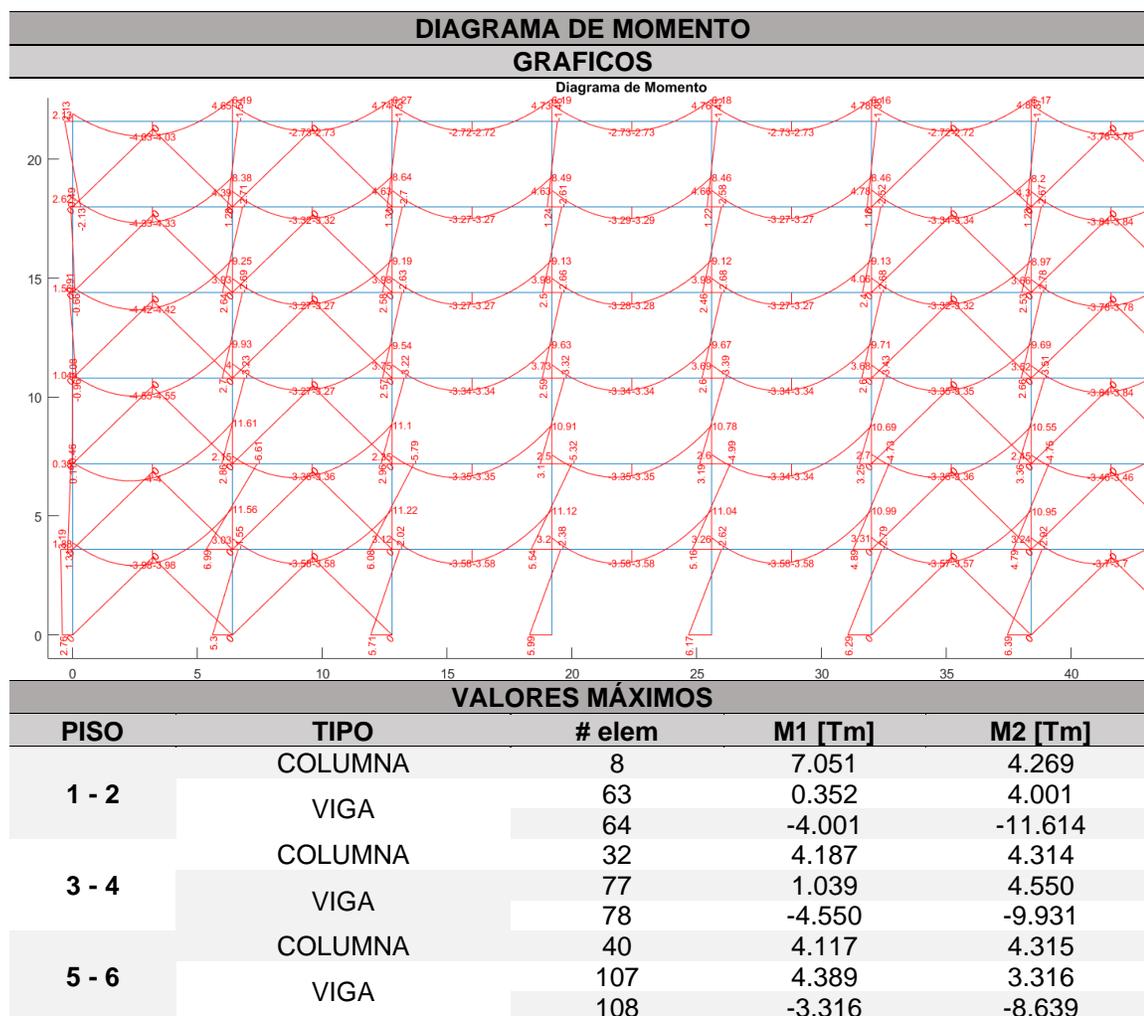


Tabla 3.15

Fuerzas en disipadores TADAS pórticos 1-4

TIPO	NÚMERO	F
TADAS	181	28.44
	182	28.46
	183	28.47
	184	28.47
	185	28.68
	186	28.68

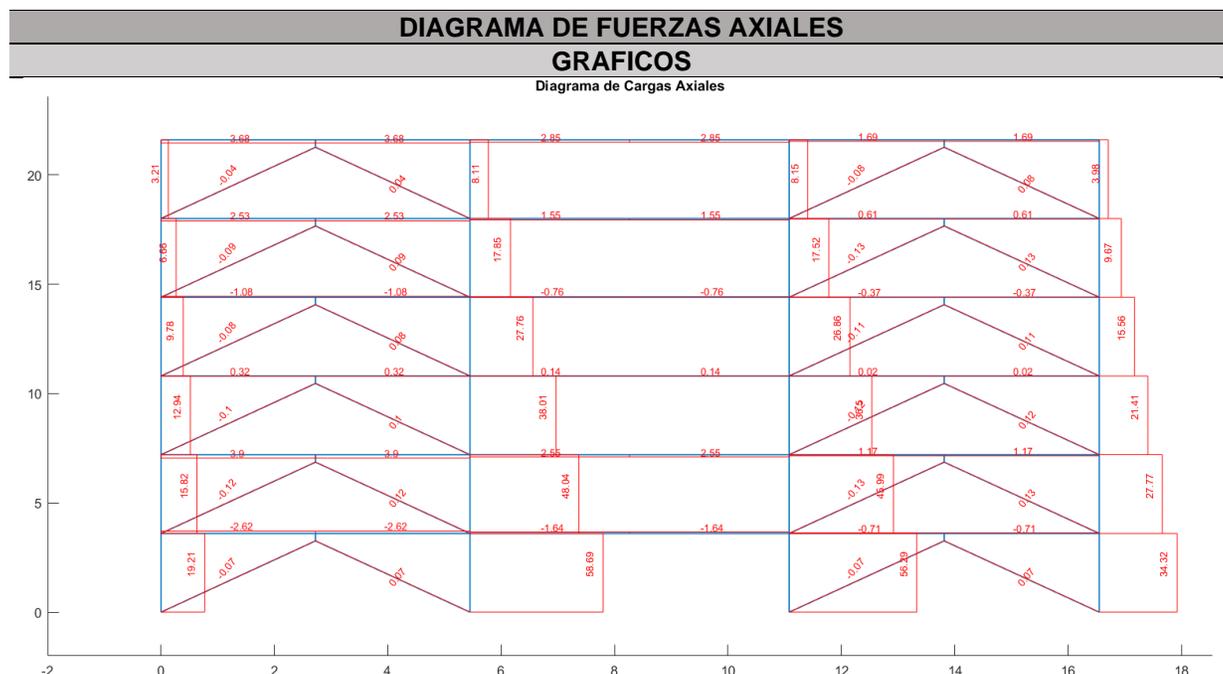
TIPO	NÚMERO	F
	187	28.61
	188	28.62
	189	28.78
	190	28.86
	191	28.89
	192	28.93
	193	28.64
	194	28.74
	195	28.75
	196	28.82
	197	28.61
	198	28.72
	199	28.69
	200	28.78
	201	28.36
	202	28.50
	203	28.47
	204	28.57

Las fuerzas en los elementos transmitidas a los pórticos exteriores en el sentido

Y se presenta en las siguientes tablas:

**Tabla 3.16**

*Fuerzas Axial – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (elemento disipador) – Sentido Y.*

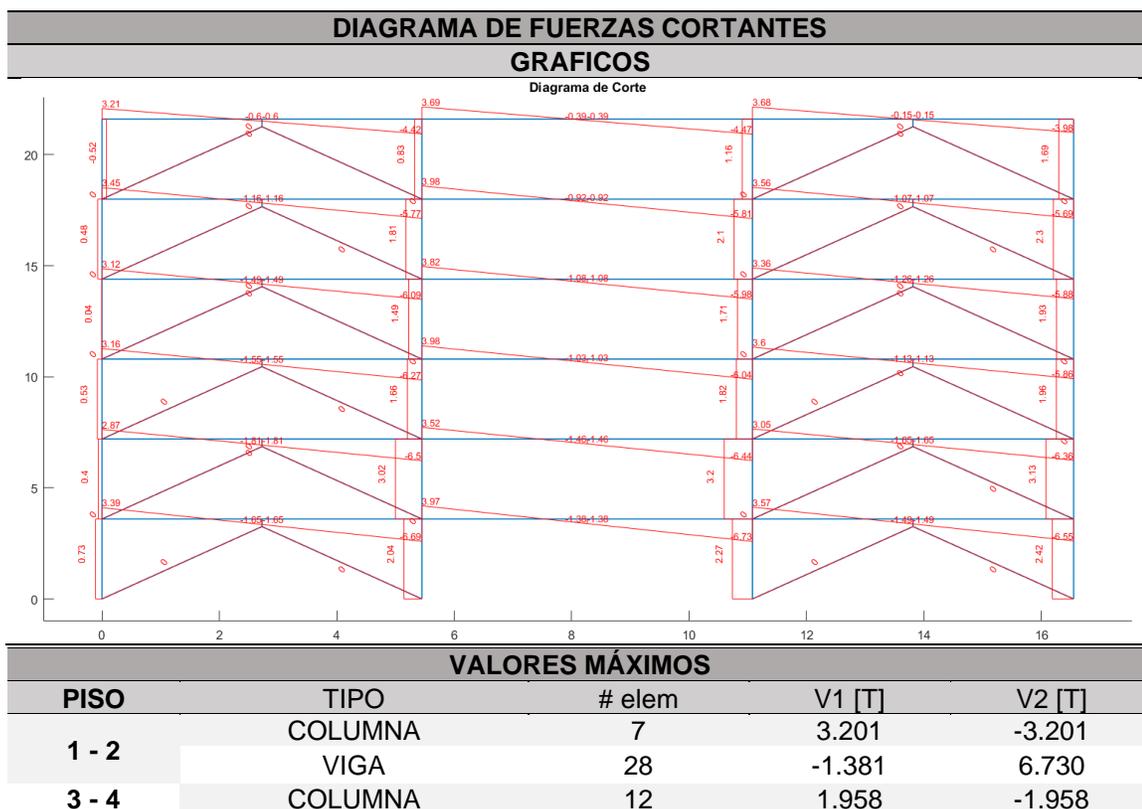


VALORES MÁXIMOS				
PISO	TIPO	# elem	N1 [T]	N2 [T]
1 - 2	COLUMNA	4	86.410	-86.410
		1	-33.690	33.690
	VIGA	32	25.659	-25.659
		25	-15.751	15.751
		68	0.131	-0.131
3 - 4	COLUMNA	67	-0.131	0.131
		12	50.767	-50.767
	VIGA	9	-16.518	16.518
		38	4.238	-4.238
		44	-8.591	8.591
5 - 6	COLUMNA	72	0.123	-0.123
		71	-0.123	0.123
	VIGA	16	35.456	-35.456
		17	-3.845	3.845
		55	21.781	-21.781
DIAGONAL	59	5.802	-5.802	
	80	0.130	-0.130	
		79	-0.130	0.130

Tabla 3.17

Fuerzas Cortantes – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS

(elemento disipador) – Sentido Y.



VALORES MÁXIMOS				
PISO	TIPO	# elem	V1 [T]	V2 [T]
5 - 6	VIGA	38	-1.551	6.266
	COLUMNA	20	2.302	-2.302
	VIGA	52	-0.915	5.814

Tabla 3.18

Momentos – Estructura de Hormigón Armado con disipadores TADAS (elemento disipador) – Sentido Y.

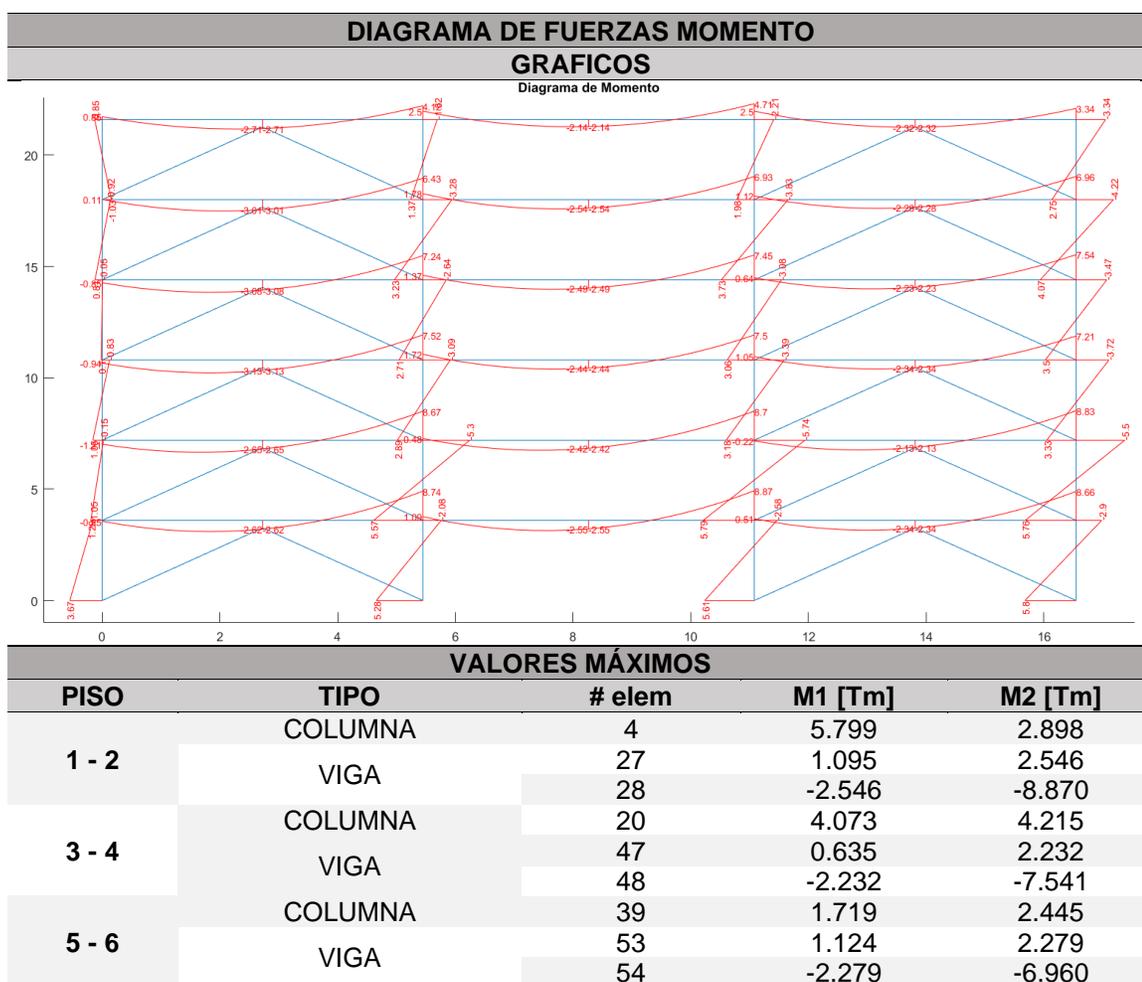


Tabla 3.19

Fuerzas en disipador TADAS pórticos A-H

TIPO	NÚMERO	F
TADAS	85	28.43
	86	28.44
	87	28.59
	88	28.61
	89	28.77
	90	28.86
	91	28.66
	92	28.82
	93	28.72
	94	28.90
	95	28.42
	96	28.64

### Resumen de funciones en CEINCI-LAB

#### Rutinas para generar la geometría del pórtico

- $[NI, NJ, X, Y] = gn\_portico\_V2(GEN2, num\_mar\_V, NI, NJ, X, Y, nod, h);$

Función que sirve para generar la geometría del pórtico considerando al elemento disipador como un elemento más de la estructura.

Los datos de entrada son: **GEN2** es el vector que se usa para generar las diagonales en una estructura; **num\_mar\_V** es el número de marcos en los que se va a colocar elementos disipadores; **NI** es el vector que contiene el nudo inicial de todos las columnas y vigas; **NJ** es el vector que contiene el nudo final de las columnas y vigas; **X** es el vector que contiene las coordenadas en X de los nudos; **Y** es el vector que contiene las coordenadas en Y de los nudos; **nod** es el número de nudos; **h** es la altura del elemento disipador.

Los datos de salida son: **NI** es el vector que contiene el nudo inicial de todos los elementos de la estructura; **NJ** es el vector que contiene el nudo final de todos los elementos de la estructura; **X** es el vector que contiene las coordenadas en X de todos

los nudos de la estructura;  $Y$  es el vector que contiene las coordenadas en  $Y$  de todos los elementos de la estructura.

***Rutinas para generar los grados de libertad.***

- $[CG,ngl]=cg\_sismo\_V2(nod,nr,Y,mar\_V);$

Es una función que ayuda a calcular los grados de libertad considerando un grado de libertad por piso. Además, asigna 3 grados de libertad en el nudo adicional creado para el elemento disipador.

***Rutinas para generar la matriz de rigidez.***

- $[KTA]=krigidez\_tadas\_elemento(mbr,ngl,Est,fy,b,h,t,alfa,n,VC)$

Función que calcula la matriz de rigidez ensamblada considerando al elemento TADAS como un elemento corto.

Los datos de entrada son:  $mbr$  es el número de diagonales en el pórtico;  $n$  es el número de placas usadas en el disipador;  $ngl$  es el número de grados de libertad del pórtico analizado;  $Est$  es el módulo de elasticidad del acero;  $fy$  es la fluencia del acero;  $b$  es la base del disipador;  $h$  es la altura del disipador;  $t$  es el espesor de las placas del disipador;  $alfa$  es la relación posfluencia con respecto a la rigidez elástica;  $n$  es el número de placas usadas en el disipador;  $VC$  es la matriz que contiene el vector de colocación generado con los grados de libertad en cada nudo de los elementos a analizar.

Los datos de salida son:  $KTA$  es la matriz de rigidez ensamblada del elemento disipador.

- $[qr\_TADAS,q\_Diag]=Fuerzas\_Diag\_Tadas2(VC,CG,nod,nr,Y,mar\_V,q);$

Función que sirve para encontrar los desplazamientos necesarios para calcular las fuerzas en el elemento TADAS, y las fuerzas en las diagonales.

Los datos de entrada son: **CG** es la matriz que contiene los grados de libertad en cada nudo; **q** es la matriz con los desplazamientos en los grados de libertad.

Los datos de salida son: **qr\_TADAS** es el vector que tiene los desplazamientos de los elementos TADAS; **qr\_Diag** es el vector que contiene los desplazamientos de las diagonales.

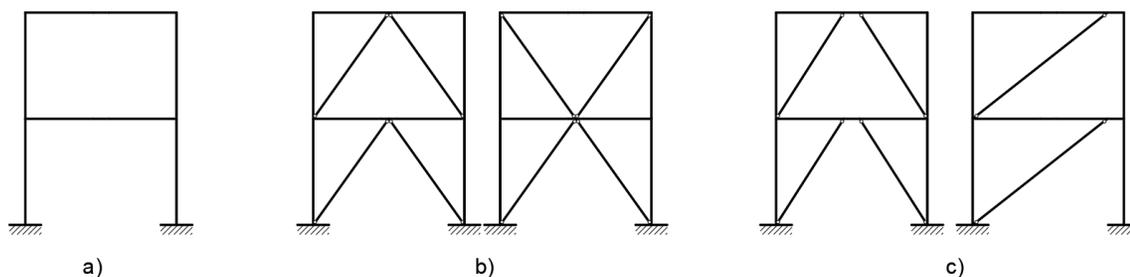
## Capítulo 4. Evaluación de la estructura utilizando elementos de enlace

### Parámetros elásticos del elemento de enlace

Existen varias configuraciones estructurales diseñadas para resistir las acciones conferidas a una estructura. En los marcos resistentes a momento (MRF), los miembros se encuentran diseñados para resistir las fuerzas horizontales. Por otra parte, los marcos arriostrados concéntricamente (CBF) poseen diagonales que actúan en compresión o tracción para resistir las fuerzas horizontales. En los marcos arriostrados excéntricamente (EBF), las fuerzas horizontales son resistidas por elementos de enlace o elementos “link” que actúan por flexión y/o corte.

#### Figura 4.1

*Tipologías estructurales. a) Marco resistente a momento (MRF), b) Pórtico arriostrado concéntricamente (CBF), c) Pórtico arriostrado excéntricamente (EBF)*



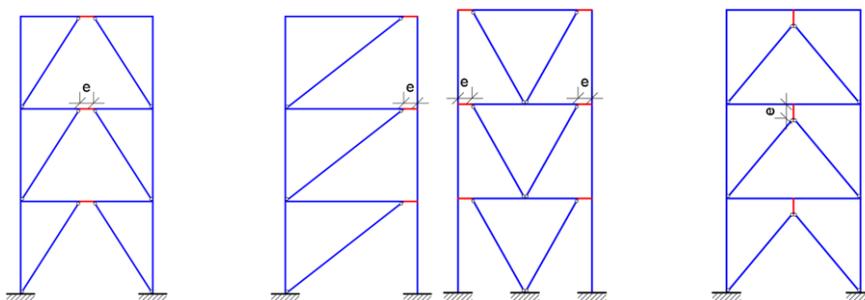
El diseño sísmico de edificaciones debe cumplir con dos criterios básicos: el primero es que la estructura debe poseer la rigidez suficiente para satisfacer las cargas de servicio y evitar daños a elementos no estructurales de baja sismicidad, y la segunda condición es que tengan la suficiente ductilidad para evitar el colapso cuando se presenten eventos sísmicos importantes. El uso de EBF ofrece ventajas significativas como un control de derivas más económico a comparación de un MRF, y mayor ductilidad y versatilidad que un CBF. (Saflor, 2018)

La metodología de construcción de pórticos arriostrados excéntricamente EBF (eccentrically-braced frame) se originó en Japón, con el propósito de tener estructuras con una alta rigidez elástica y mejorar la disipación de energía. Al utilizar esta metodología se combina las ventajas del uso de un marco resistente a momento y un marco arriostrado concéntricamente disminuyendo sus desventajas. (Saflor, 2018).

Una metodología para desarrollar una respuesta dúctil y estable en estructuras es mediante el uso de pórticos arriostrados excéntricamente. En estos modelos las fuerzas axiales provenientes de las diagonales presentes en la estructura son transmitidas en fuerzas cortantes y momentos a los elementos formados por dicha excentricidad. Varias de las configuraciones que se puede presentar al colocar diagonales se las detalla en la Figura 4.2.

#### Figura 4.2

*Tipo de estructura con elementos de enlace.*



*Nota.* Recuperado de (Crisafulli, 2018)

Estos enlaces disipan la energía que llega a ellos por fluencia del acero, convirtiéndolos en verdaderos “fusibles estructurales”. Para que se dé una adecuada disipación de la energía, estos deben estar detallados apropiadamente con el fin de que no presente pandeo local o fenómenos de inestabilidad. Los miembros restantes de la estructura deben ser dimensionados mediante el diseño por capacidad con el fin de que trabajen en el rango elástico. (Crisafulli, 2018)

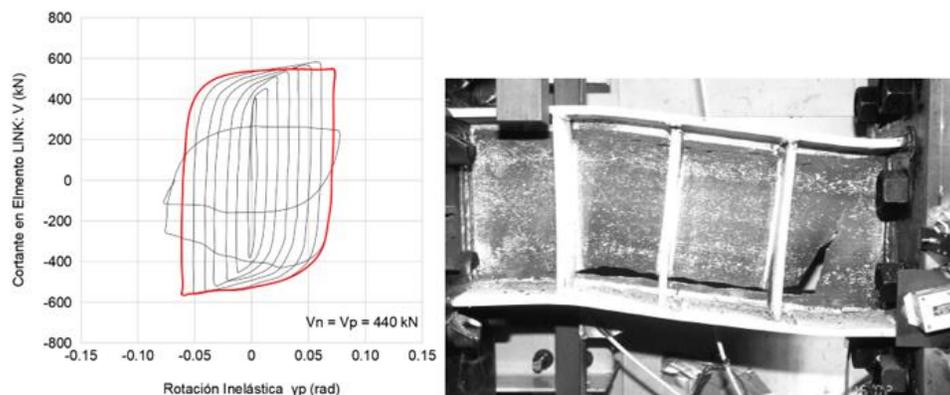
Con el avance de investigaciones en ingeniería sísmica, se busca que estos elementos de enlace puedan ser reemplazados. Esto se lo realiza ya que, si se los diseña con este fin, se puede reducir tiempo y costos de reparación de una estructura ya que el mayor daño se concentrará en dichos elementos. (Saflor, 2018)

### ***Fuerza y desplazamiento de fluencia del elemento de enlace***

Para analizar los elementos de enlace es importante señalar los ensayos de laboratorio realizados por (Okazaki, Arce, Ryu, & Engelhardt, 2004) los que se presentan en la Figura 4.3 y Figura 4.4.

#### **Figura 4.3**

*Ensayo de un elemento de enlace corto; a la izquierda curva de histéresis y a la derecha estado en el que quedó el elemento luego de varios ciclos de carga de hasta 0.075 rad.*

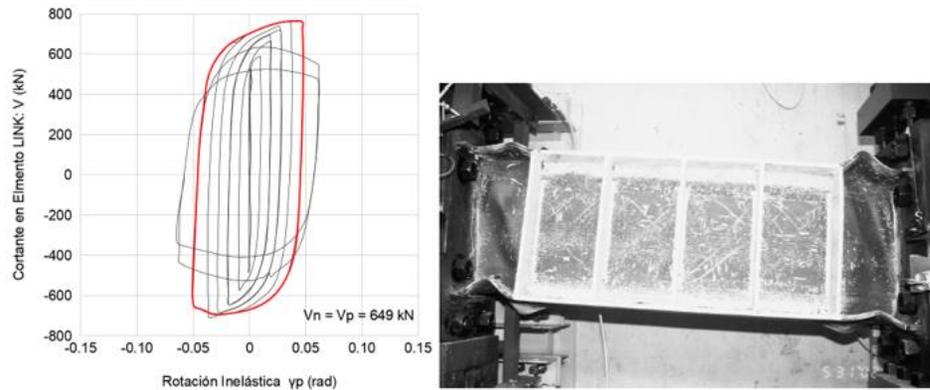


*Nota.* Recuperado de (Okazaki, Engelhardt, Nakashima, & Suita, 2004)

#### **Figura 4.4**

*Ensayo de un elemento de enlace largo; a la izquierda curva constitutiva obtenida y a la*

derecha estado en que quedó el elemento luego de varios ciclos de carga llegando a una deformación de 0.06 rad.



*Nota.* Recuperado de (Okazaki *et al.*, 2004)

Según (Aguiar, *et al.*, 2020) al analizar la Figura 4.3 se puede observar en las placas externas que la rotación del elemento de enlace es baja. También se observa que el alma del perfil se ha dañado y una de sus placas se encuentra rota, de esta forma se puede evidenciar la disipación de energía. Con estos ensayos se obtiene un amortiguamiento del 53%, un valor alto lo que ayuda a confirmar que con el uso de este tipo de disipadores se puede conferir amortiguamiento a la estructura, con un costo bajo.

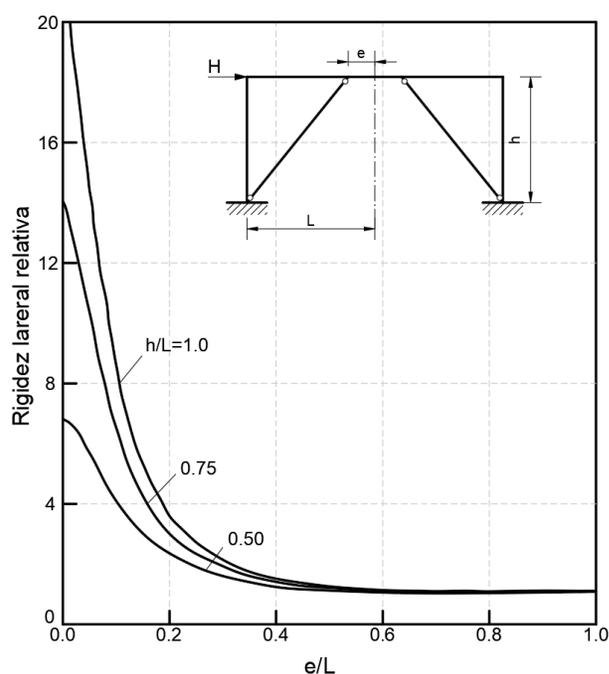
### **Rigidez lateral**

La influencia de los elementos de enlace en la rigidez lateral de la estructura está relacionada directamente a la longitud. En caso de que esta longitud sea pequeña con relación a la longitud de la viga, la rigidez lateral de dicha estructura será grande, asemejándose a un pórtico arriostrado concéntricamente. Mientras la longitud del elemento de enlace crece, la rigidez de la estructura decae asemejándose a un pórtico no arriostrado.

Según (Crisafulli, 2018), al calcular la longitud relativa del elemento de enlace,  $e/L$ , si se presentan valores entre 0.1 y 0.15, la rigidez lateral del pórtico con diagonales excéntricas es mayor, en comparación a mayores longitudes del elemento de enlace. Mientras el elemento de enlace sea mayor, las diagonales colocadas en este pórtico pierden efectividad y la rigidez cae asemejándose a un pórtico sin arriostramientos. Estos parámetros de variación de la rigidez lateral de una estructura se la pueden ver en la Figura 4.5.

### Figura 4.5

Variación de la rigidez relativa en función de la longitud del enlace,  $e$ , para distintos valores de  $h/L$

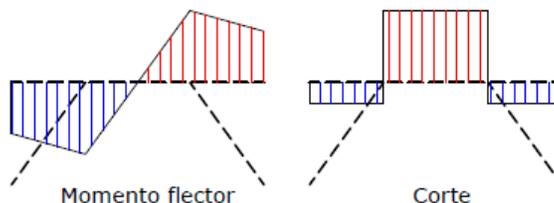


Nota. Recuperado de (Crisafulli, 2018)

Una vez realizado el análisis estructural del elemento se puede observar cómo sería el comportamiento de los elementos de enlace ubicado en el centro del vano.

**Figura 4.6**

*Diagrama de momentos flectores y esfuerzos de corte en el enlace.*

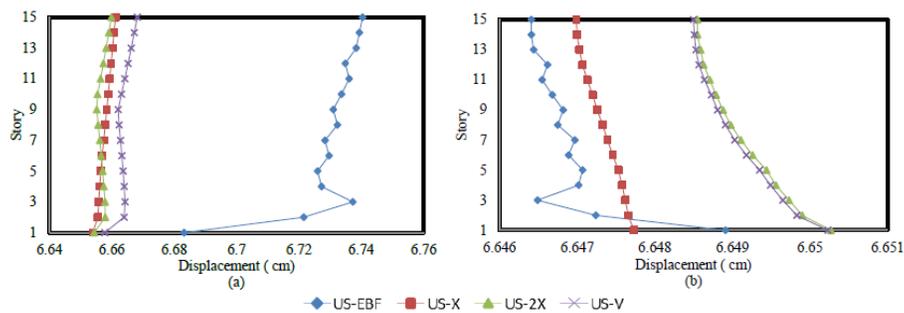


*Nota.* Recuperado de (Crisafulli, 2018)

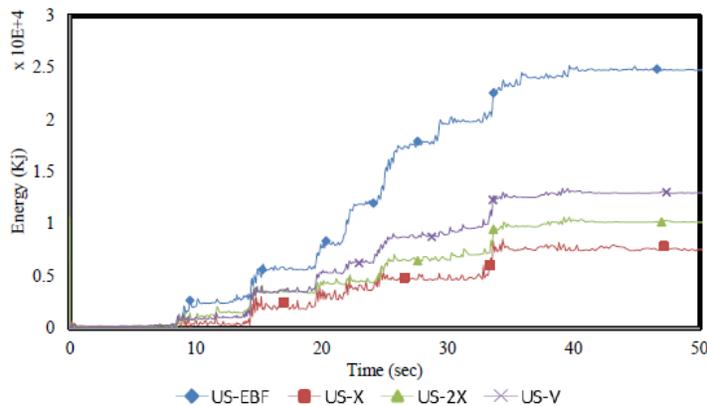
(Khademi & Rezaie, 2017) realizaron un estudio en el que compararon estructuras con pórticos concéntricamente y excéntricamente arriostrados en el que se presentaban 15 modelos en el constaban: estructuras con diagonales en forma de “X” cada dos pisos, estructuras con diagonales en “X” en cada piso, estructuras con diagonales en forma de “V” invertida, y estructuras arriostradas excéntricamente (EBF) con elementos de enlace al centro del pórtico. Como resultado de este estudio, se muestra que la estructura EBF presenta los mayores desplazamientos horizontales, y los menores desplazamientos verticales. Además, presenta una mayor capacidad de absorción de energía que alcanzó los 25000 KJ a comparación de las otras estructuras que alcanzó 800 KJ.

**Figura 4.7**

*Valores de desplazamiento, a) desplazamiento horizontal, b) desplazamiento vertical.*



*Nota.* Recuperado de (Khademi & Rezaie, 2017)

**Figura 4.8***Energía interna en la estructura***Figure 10. Internal energy value in the frames**

*Nota.* Recuperado de (Khademi & Rezaie, 2017)

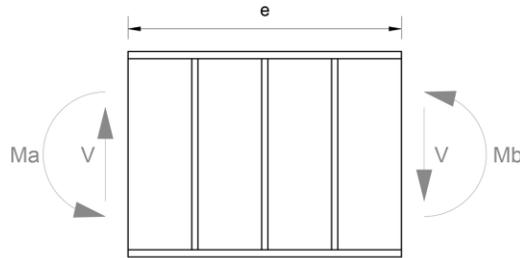
### **Parámetros elásticos del elemento de enlace**

Del análisis de los momentos flectores y cortantes en el elemento de enlace, se plantea el diagrama de cuerpo libre del enlace mostrado en la Figura 4.9. A partir de este diagrama se deduce la condición de fluencia balanceada. Este punto de equilibrio se produce cuando se da al mismo tiempo la plastificación por flexión y la rótula de corte. En base a las condiciones de equilibrio se deduce la longitud  $e_0$  en la que se produce esta condición.

$$e_0 = \frac{2 M_p}{V_p} \quad \text{Ecuación ( 4.1 )}$$

**Figura 4.9**

*Diagrama de cuerpo libre de un elemento de enlace.*



En esta ecuación  $M_p$  es el momento de plastificación del enlace y  $V_p$  la resistencia al corte correspondiente al estado límite de fluencia del alma:

$$V_p = 0.6 F_y A_{tw} \quad \text{Ecuación ( 4.2 )}$$

Donde el área  $A_{tw}$  se determina por medio de la siguiente ecuación cuando se tiene una sección I.

$$A_{tw} = (d - 2 t_f) * t_w \quad \text{Ecuación ( 4.3 )}$$

Por lo tanto, a partir de la condición de fluencia balanceada se pueden definir los elementos de enlace cortos cuando  $e \leq e_0$ . En estos elementos predominará la falla de corte sobre la de flexión. Los elementos de enlace largos son aquellos en los que  $e \geq e_0$  y en este predominará la falla por flexión.

Según (Crisafulli, 2018), los elementos de enlace con rigidizadores verticales adquieren una capacidad a cortante de  $1.5 V_p$  producido por el endurecimiento de posfluencia. También se aconseja que los valores de los momentos en los extremos no superen de  $1.2 M_p$ , para que no se presente inconvenientes debido a fracturas por fatiga de bajo ciclaje. Con estas consideraciones la ecuación para definir los elementos de enlace cortos es:

$$e_0 \leq \frac{2(1.2 M_p)}{1.5 V_p} = \frac{1.6 M_p}{V_p} \quad \text{Ecuación ( 4.4 )}$$

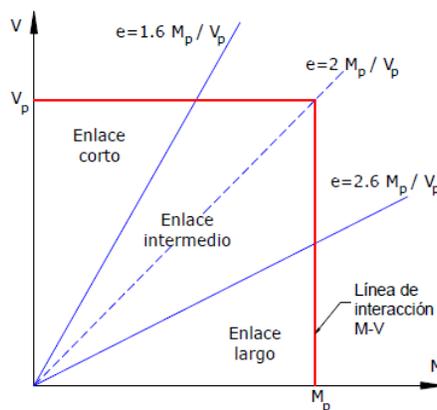
Al igual que el caso anterior, y en base a resultados experimentales, la ecuación para definir los elementos de enlace largos se modifica, así:

$$e_0 \geq \frac{2.6 M_p}{V_p} \quad \text{Ecuación ( 4.5 )}$$

Gráficamente esta clasificación se muestra en el siguiente diagrama:

**Figura 4.10**

*Diagrama de interacción M-V y clasificación.*



*Nota.* Recuperado de (Crisafulli, 2018)

Según (Malley & Popov, 1984) concluyeron que los elementos de enlace cortos ofrecen una mayor capacidad de disipación de la energía que los elementos de enlace largos. Además, identificaron que a pesar de que un elemento de enlace largo ofrece una mayor capacidad para colocar rigidizadores verticales, los elementos de enlace cortos presentan una mejor resistencia y ductilidad cuando se los ensaya mediante ciclos severos de carga.

### **Prediseño del elemento de enlace**

#### ***Geometría del elemento de enlace***

Para este modelo se usa una sección IPE 500 como sección para el elemento de enlace, con este valor se calculará los parámetros especificados anteriormente.

El momento de plastificación  $M_p$  del enlace es:

$$M_p = F_y * Z_x \quad \text{Ecuación ( 4.6 )}$$

$$M_p = 2530 \frac{kg}{cm^2} * 2190 cm^3$$

$$M_p = 55407.00 kg * m$$

La resistencia a corte es:

$$A_{tw} = (d - 2 * t_f) * t_w \quad \text{Ecuación ( 4.7 )}$$

$$A_{tw} = (500 - 2 * 16) * 10.2$$

$$A_{tw} = 47.64 cm^2$$

$$V_p = 0.6 * F_y * A_{tw} \quad \text{Ecuación ( 4.8 )}$$

$$V_p = 0.6 * 2530 * 47.64$$

$$V_p = 72463.25 kg$$

El elemento corto para una sección IPE 500 es:

$$e_o = \frac{1.6 M_p}{V_p} = \frac{1.6 * 55407.00}{72463.25} = 1.22 m \quad \text{Ecuación ( 4.9 )}$$

El elemento largo para una sección IPE 500 es:

$$e_o = \frac{2.6 M_p}{V_p} = \frac{2.6 * 55407.00}{72463.25} = 1.99 m \quad \text{Ecuación ( 4.10 )}$$

La longitud del elemento de enlace para el modelo de la presente investigación es de 0.50 m, por lo que se espera que la falla predominante sea por corte.

### ***Detalle del enlace.***

El detalle en el elemento de enlace es necesario para lograr un comportamiento adecuado del enlace y que haya una correcta disipación de la energía. Según (Crisafulli, 2018) los aspectos más importantes a considerar para evitar que ocurra pandeo local en el elemento de enlace son:

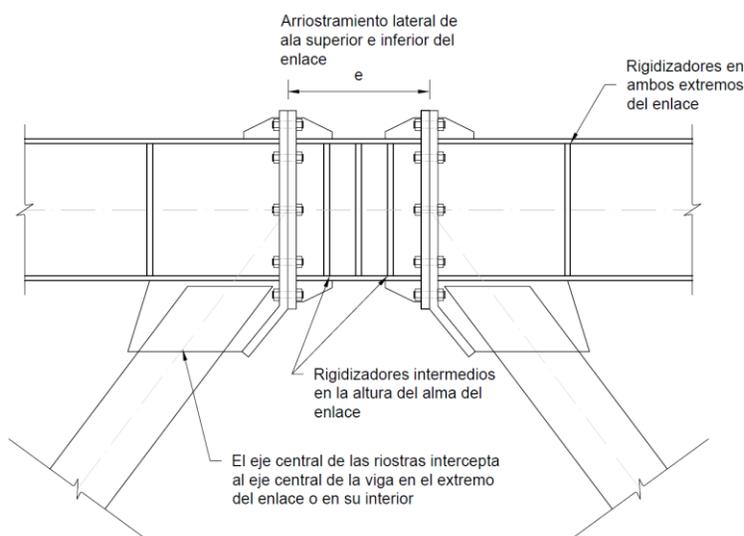
- Control de la relación anchura – espesor.
- Arriostramiento lateral del enlace.

- Colocación de rigidizadores en el alma del elemento de enlace en toda su altura.

Este detalle se presenta en la Figura 4.11.

### Figura 4.11

*Detalle del enlace en la zona central de la viga con riostras formadas por secciones tubulares con placas de conexión.*



*Nota.* Recuperado de (Crisafulli, 2018)

En cuanto a los rigidizadores verticales, se debe cumplir lo que se redacta a continuación que describe (Crisafulli, 2018) basándose en la norma AISC:

Las placas rigidizadoras en el elemento link o elemento de enlace deben estar colocadas en toda la altura de la viga. Estas placas se deben colocar a los dos lados del alma cuando la altura es mayor a 635 mm, caso contrario se podría colocar a un solo lado del alma. En caso de colocarse en un solo lado del alma, el ancho de la placa rigidizadora debe ser mayor que  $\left(\frac{b_f}{2} - t_w\right)$ , y en caso de colocarse en ambos lados el ancho debe ser mayor que  $(b_f - 2 t_w)$ . El espesor de esta placa debe ser mayor que

$0.75 t_w$  o 10 mm y la separación entre placas debe cumplir la distancia según el tipo de enlace mostrado a continuación:

- Enlaces cortos,  $e \leq 1.6 M_p/V_p$ :

$$a = 30 t_w - d/5 \text{ cuando se presente rotaciones de enlace } \gamma_p = 0.08$$

$$a = 52 t_w - d/5 \text{ cuando se presente rotaciones de enlace } \gamma_p = 0.02$$

donde  $d$  es la altura total de la viga.

- Enlaces largos,  $e \leq 1.6 M_p/V_p$ :

$$a = 1.5 b_f$$

donde  $b_f$  es el ancho del alma de la viga. En caso de que el largo de los rigidizadores sea  $e > 5 M_p/V_p$ , no es necesario disponer rigidizadores intermedios.

- Enlaces intermedios,  $1.6 M_p/V_p < e < 2.6 M_p/V_p$ :

La separación máxima  $a$  debe cumplir simultáneamente los límites indicados para enlaces cortos y largos.

La resistencia requerida de los cordones de soldadura que conectan las placas rigidizadoras con el alma del elemento link o elemento de enlace es  $F_y A_{st}$  (donde  $A_{st}$  es el área horizontal de la placa rigidizadora) y la de los cordones que conectan con las alas es  $F_y A_{st}/4$ ." (Crisafulli, 2018)

Para el presente modelo, una sección IPE 500 es un elemento de enlace corto, a pesar de poder colocar los rigidizadores verticales en un solo lado del elemento de enlace, se lo colocará en ambos lados. Esto se lo realiza porque este elemento va a estar sometido a grandes esfuerzos cortantes.

La placa rigidizadora se colocará en toda la base del elemento, cuyo ancho se describe en las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{b_f}{2} - t_w\right) = \left(\frac{200}{2} - 10.2\right) = 89.8 \text{ mm} \quad \text{Ecuación ( 4.11 )}$$

El espesor de los rigidizadores verticales para el elemento de enlace es:

$$1.75 t_w = 1.75 (10.2) = 17.85 \text{ mm} \quad \text{Ecuación ( 4.12 )}$$

Se adopta un espesor final de los rigidizadores verticales de 20 mm.

Las posibles separaciones de los rigidizadores se los calcula a continuación:

$$a = 30 t_w - \frac{d}{5} = 30(10.2) - \frac{500}{5} = 206 \text{ mm} \quad \text{Ecuación ( 4.13 )}$$

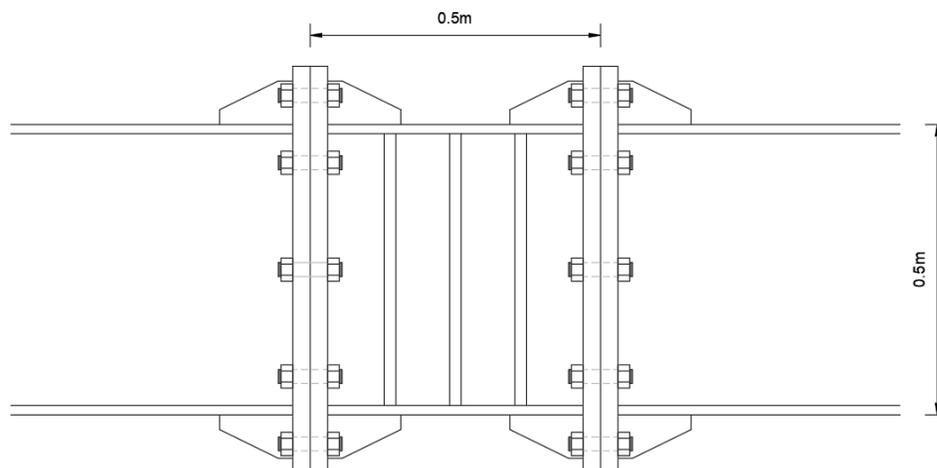
$$a = 52 t_w - \frac{d}{5} = 52 (10.2) - \frac{500}{5} = 430.4 \text{ mm} \quad \text{Ecuación ( 4.14 )}$$

En este ejemplo se va a colocar los rigidizadores verticales cada 125 mm. Para un total de 3 rigidizadores verticales en la longitud de 500 milímetros de longitud del elemento de enlace.

El detalle del elemento de enlace se presenta en la Figura 4.12.

**Figura 4.12**

*Detalle de elemento de enlace*



La conexión debe estar diseñada con pernos de alta resistencia y una placa de descarga. Con este tipo de conexión, el elemento de enlace puede estar fabricado con

acero de menor grado y la respuesta elástica de los demás elementos de la estructura está asegurada. Otro punto importante a tomar en cuenta en la conexión es que según (Babu & Sreekumar, 2012), tras hacer un estudio sobre conexiones viga columna atornilladas, demuestran que a medida que incrementan el diámetro del perno y las filas de pernos, aumenta el momento final y la rotación final de la junta. Además, aumentar el número de filas de pernos provoca un aumento significativo en la cantidad de energía disipada a diferencia de aumentar el diámetro del perno.

### **Modelación de la estructura equivalente en acero**

Para poder comparar una estructura con elementos de enlace a una estructura de hormigón armado con disipadores TADAS, se necesita convertir la estructura de hormigón armado a una estructura de acero. Esto se hace ya que en la estructura de hormigón armado no se puede colocar el elemento de enlace.

Para las secciones se va a realizar la siguiente conversión:

$$\eta = \frac{E_{acero}}{E_{hormigón}} \quad \text{Ecuación ( 4.15 )}$$

El módulo de elasticidad del hormigón es:

$$E_{hormigón} = 150000\sqrt{f'c} = 2323790.01 \frac{T}{m^2} \quad \text{Ecuación ( 4.16 )}$$

El módulo de elasticidad del acero es:

$$E_{acero} = 21000000 \frac{T}{m^2}$$

Por lo tanto  $\eta = 9.037$ , con esta relación se puede convertir las inercias de hormigón en acero.

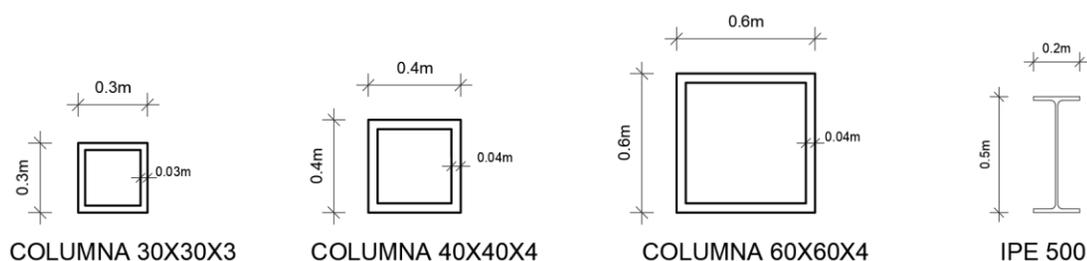
Tabla 4.1

Secciones equivalentes en acero

DESCRIPCIÓN	INERCI HORMIGÓN [cm <sup>4</sup> ]	INERCI ACERO [cm <sup>4</sup> ]	SECCIÓN ACERO		INERCI [cm <sup>4</sup> ]	AREA [cm <sup>2</sup> ]
			LADO [cm]	ESPE [cm]		
COL 40x40	213333.3	23606.8	30	3	39852.0	324.0
COL 60x60	1080000.0	119509.2	40	4	125952.0	576.0
COL 80X80	3413333.3	377708.1	60	4	470698.7	896.0
VIGA 40x60	720000.0	79672.8	IPE 500		48200.0	116.0

Figura 4.13

Secciones equivalentes en acero



Para el correcto desempeño de dichas secciones se deben comprobar que las mismas sean compactas. Según la (NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014) establece los límites para secciones rectangulares.

$$\frac{b}{t} < \lambda_{ps} = 0.55 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{Ecuación ( 4.17 )}$$

$$\lambda_{ps} = 0.55 \sqrt{\frac{21000000 \frac{T}{m^2}}{25492.90 \frac{T}{m^2}}}$$

$$\lambda_{ps} = 15.786$$

Las relaciones  $b/t$  de las secciones usadas en este modelo se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2

Relación ancho espesor de secciones de acero.

SECCIÓN ACERO		
LADO [cm]	ESPESOR [cm]	b/t
30	3	10
40	4	10
60	4	15

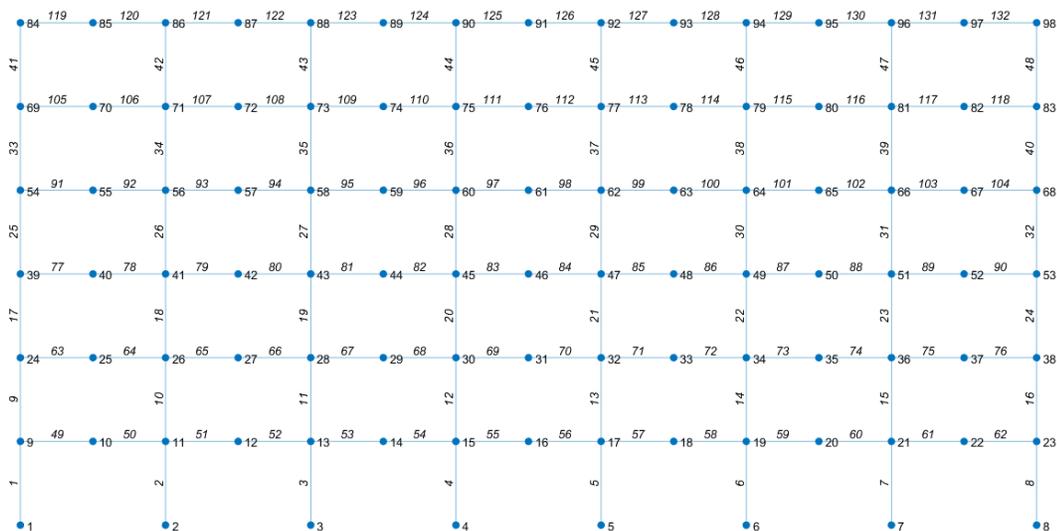
Así se comprueba que todas las secciones que se usa en el presente modelo son secciones compactas.

### Descripción estructural

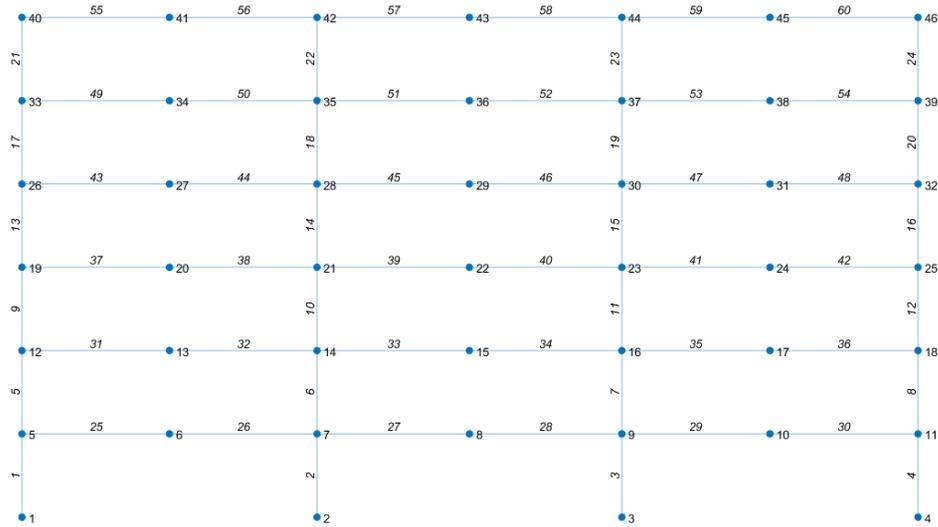
Figura 4.14

Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A

– H.



a)



b)

### **Análisis Dinámico**

- **Factor de amortiguamiento**

El factor de amortiguamiento que se utilizó en este modelo de análisis es de 4%.

Los resultados del análisis dinámico se los resume en las Tabla 4.3.

- **Índice de vulnerabilidad**

En esta estructura, una vez obtenido el periodo indicado en la Tabla 4.3, se obtiene un índice de vulnerabilidad de:

$$\frac{H}{T} = 20.75$$

Lo que cataloga a esta estructura siguiendo la Tabla 2.5, como una estructura flexible.

Tabla 4.3

*Derivas y desplazamiento de estructura de acero equivalente.*

PERIODO [s]				
1.0408				
Pis o	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
1	0.409	0.0147	0.426	0.0153
2	0.799	0.0435	0.834	0.0453
3	1.087	0.0826	1.133	0.0861
4	0.968	0.1175	1.009	0.1225
5	0.818	0.1469	0.875	0.1540
6	0.437	0.1626	0.481	0.1713

GRÁFICOS	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	DESPLAZAMIENTO	DERIVA POR PISO	DESPLAZAMIENTO	DERIVA POR PISO

Tabla 4.4

*Fuerzas transmitidas a los pórticos.*

PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
1	-8.50	-4.15
2	7.35	3.71
3	4.08	2.35
4	1.88	0.40
5	13.30	6.90

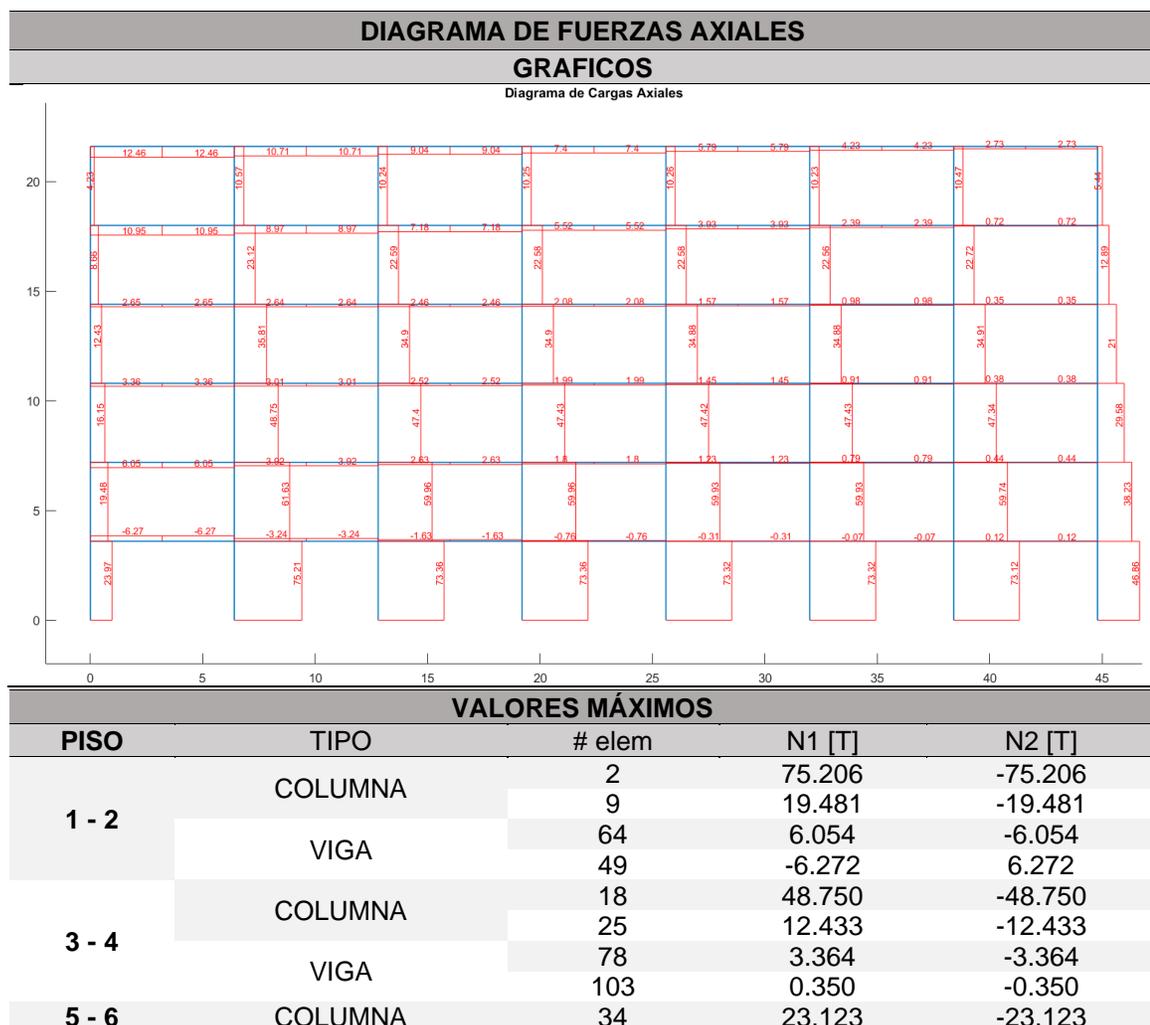
PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
6	11.13	5.80

### Análisis Estático

Después de realizar el análisis dinámico, se coloca las fuerzas en el pórtico provenientes del sismo. Los resultados de las fuerzas internas se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 4.5**

*Fuerzas Axiales – Estructura de Acero Equivalente – Sentido X.*



VALORES MÁXIMOS				
PISO	TIPO	# elem	N1 [T]	N2 [T]
		41	4.225	-4.225
	VIGA	119	12.463	-12.463
		117	0.720	-0.720

Tabla 4.6

Fuerzas Cortantes – Estructura de Acero Equivalente – Sentido X.

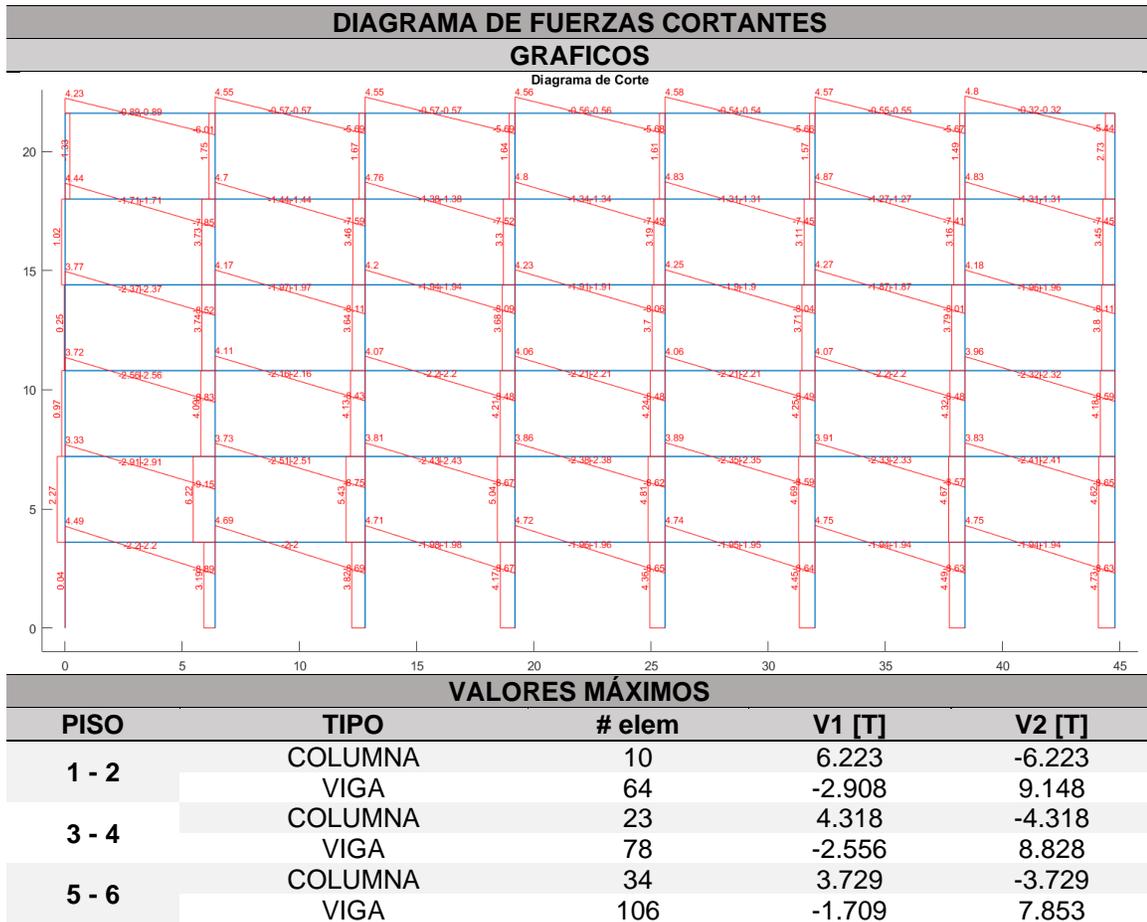


Tabla 4.7

Momentos– Estructura de Acero Equivalente – Sentido X.

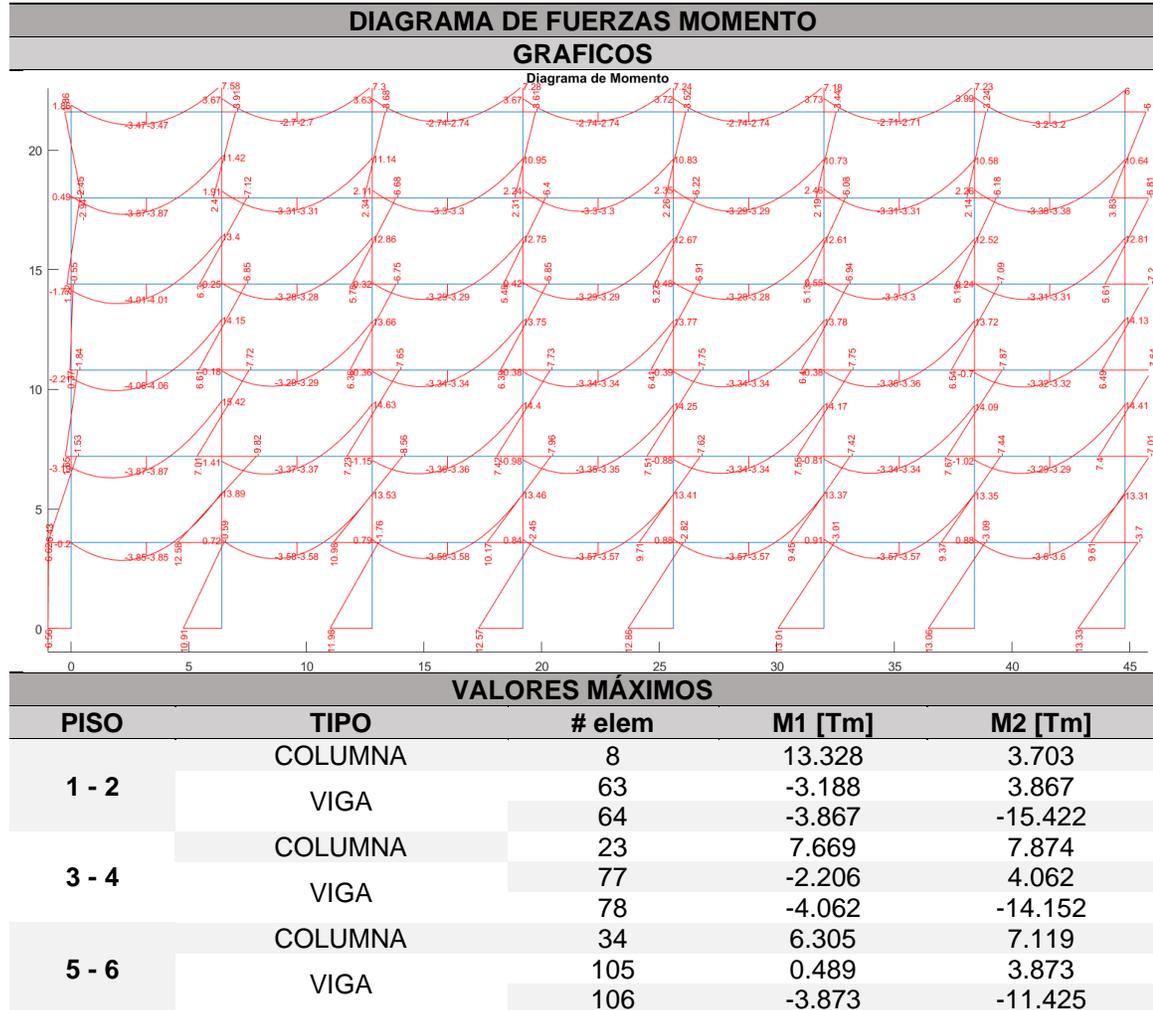


Tabla 4.8

Fuerzas Axiales – Estructura de Acero Equivalente – Sentido Y.

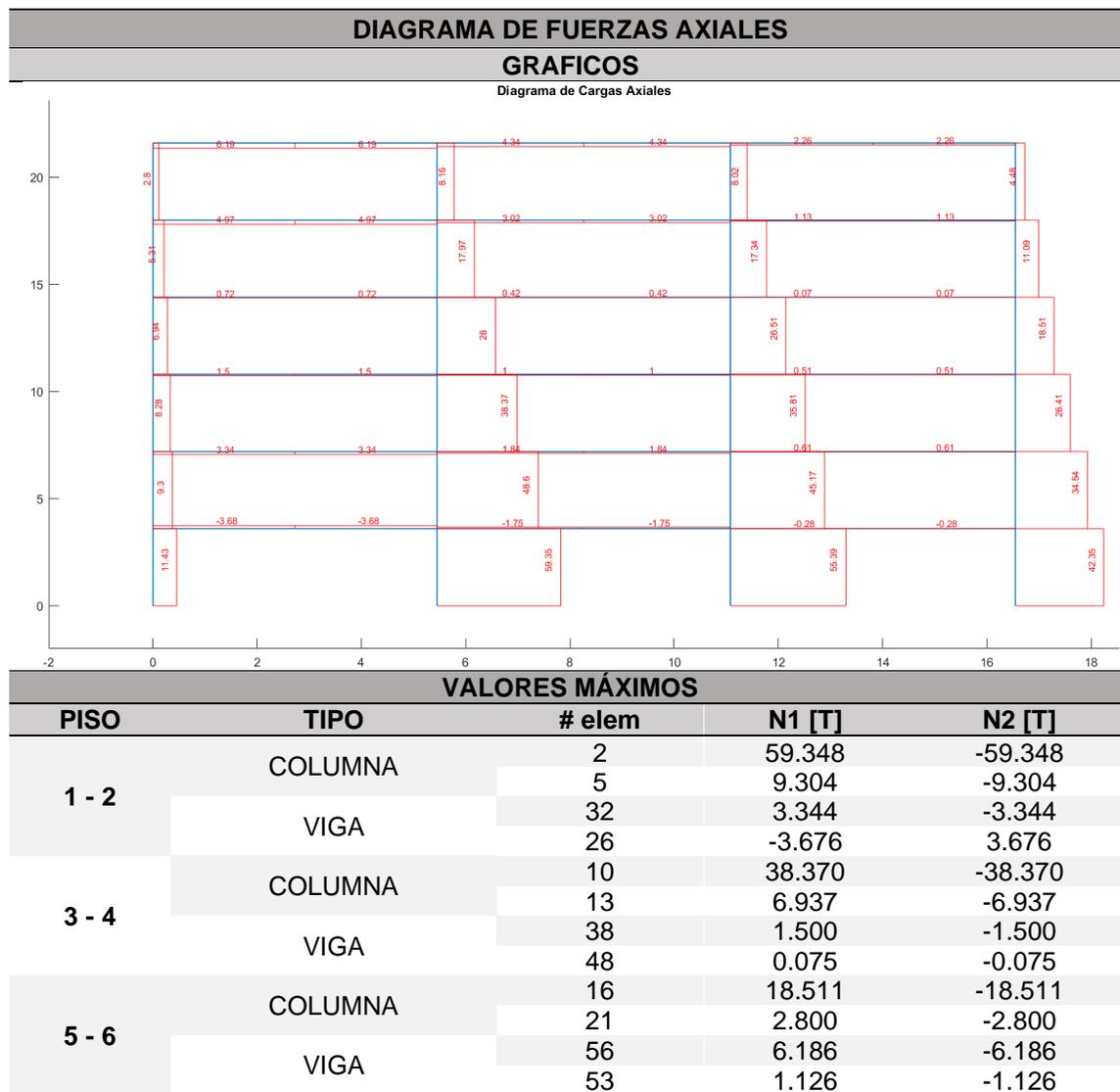


Tabla 4.9

Fuerzas Cortantes – Estructura de Acero Equivalente – Sentido Y.

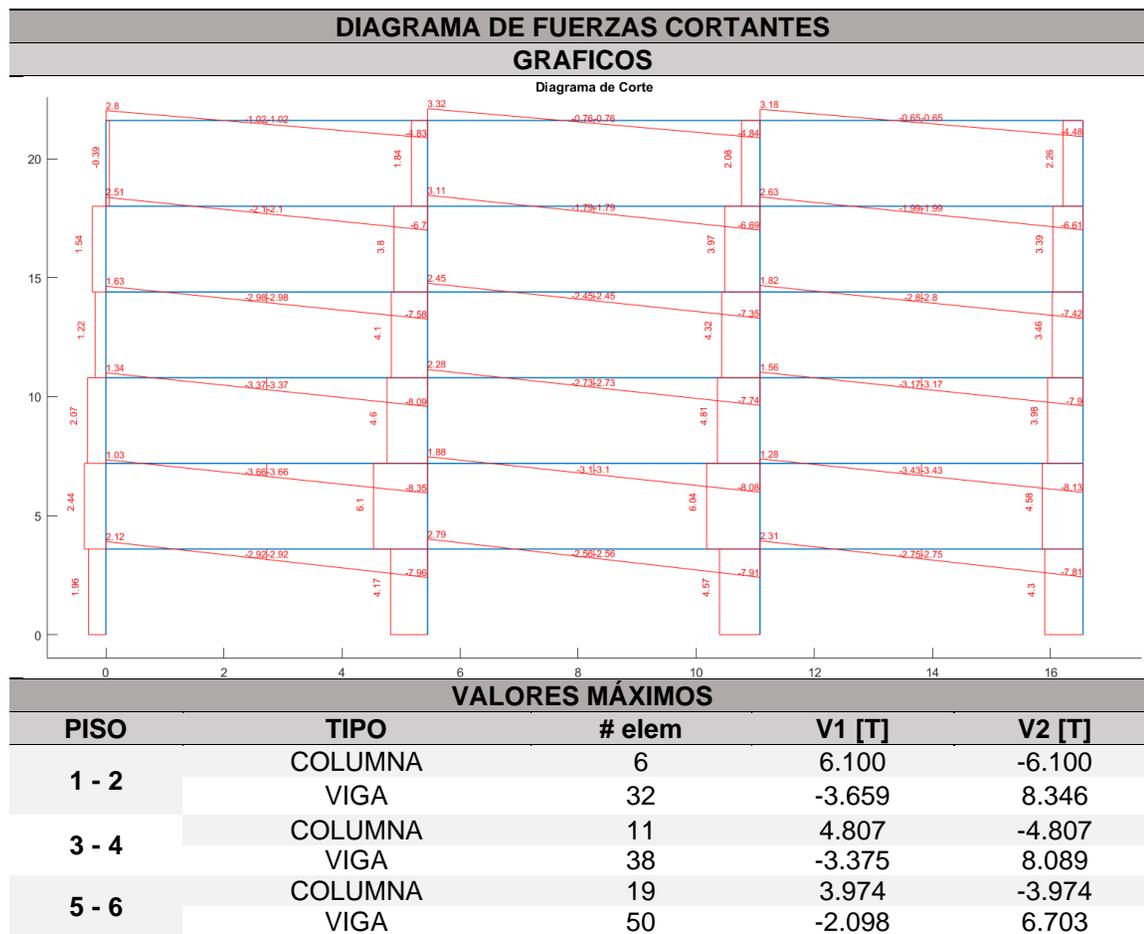
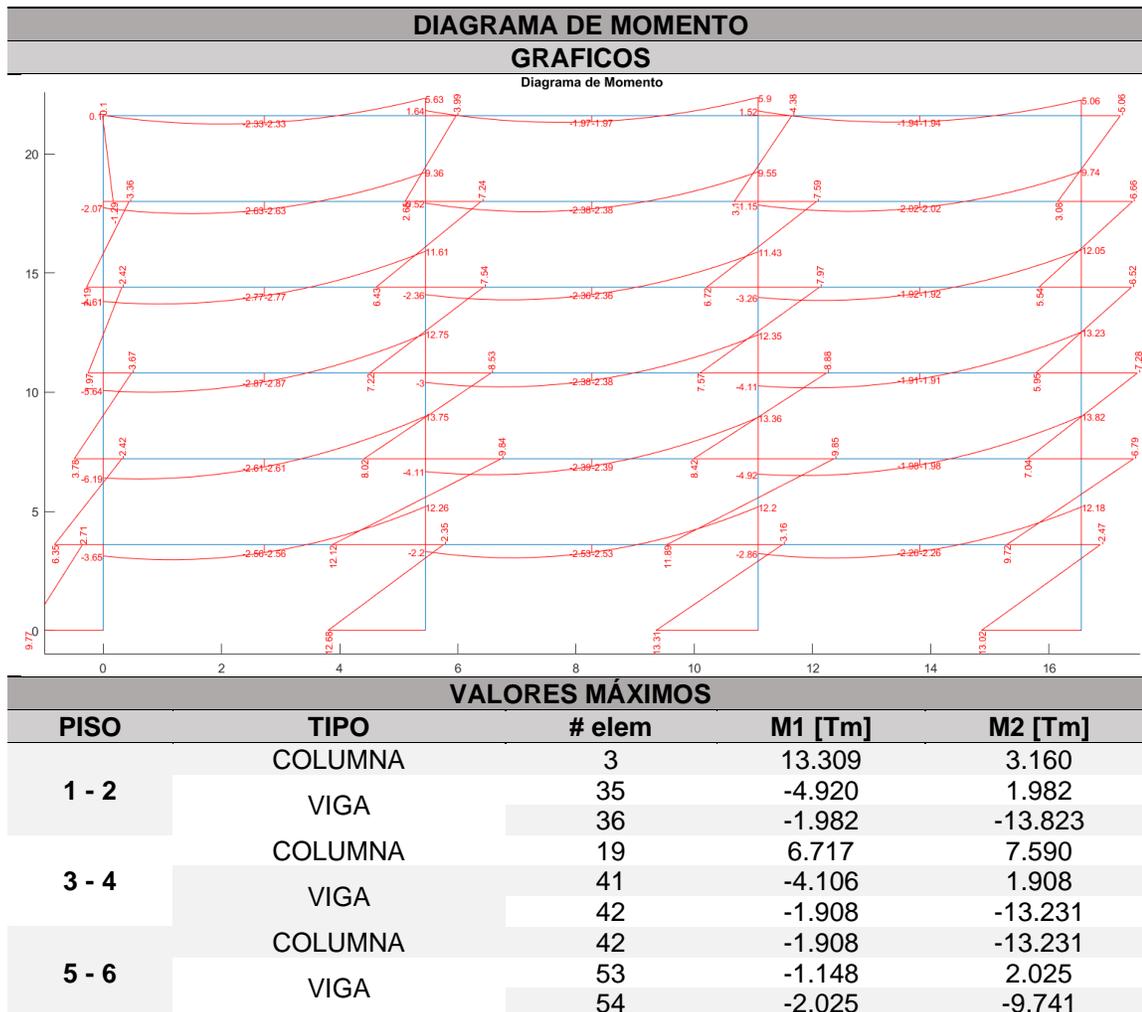


Tabla 4.10

Momentos – Estructura de Acero Equivalente – Sentido Y.



**Modelación de la estructura con disipadores utilizando el elemento de enlace en el centro del pórtico**

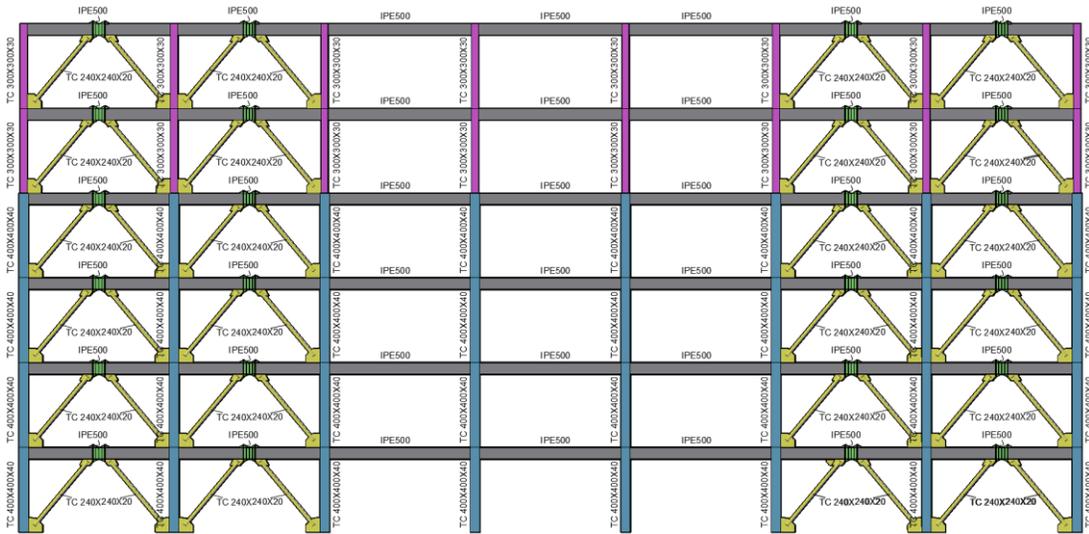
### **Descripción estructural**

Para este modelo, las diagonales excéntricas que forman el elemento link o elemento de enlace se colocarán en los mismos pórticos en los que se ubica los disipadores TADAS sobre contravientos de acero. Esta distribución estructural se

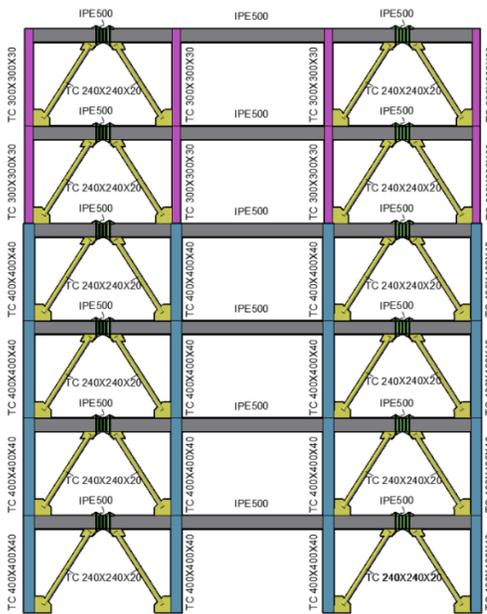
muestra en la Figura 3.8. Los pórticos exteriores reforzados con diagonales excéntricas se lo muestran en la Figura 4.16 la que se indica a continuación.

**Figura 4.15**

*Pórticos exteriores de reforzamiento. a) Pórticos 1 - 4, b) Pórticos A - H*



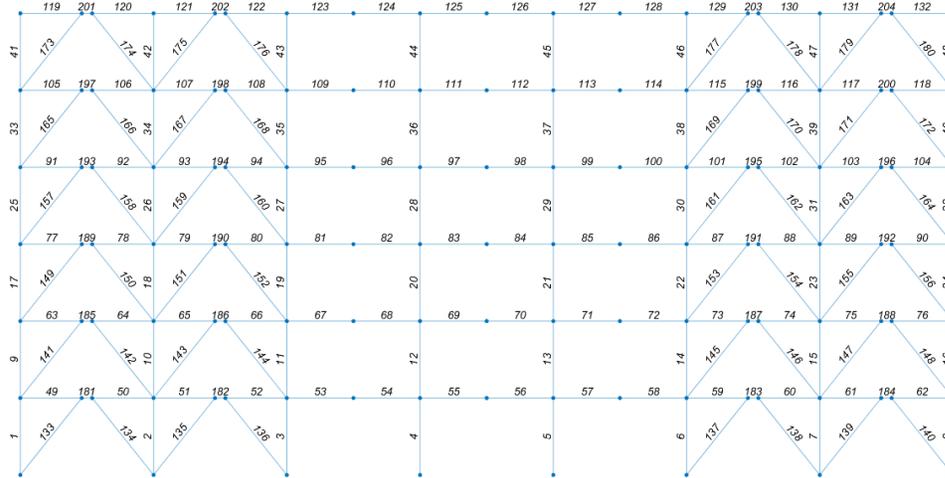
a)



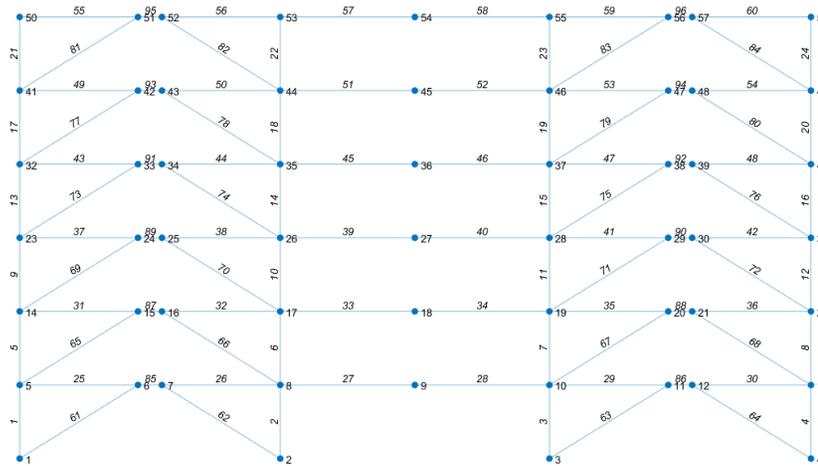
b)

**Figura 4.16**

*Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero con elementos de enlace*  
 (centro) a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.



a)



b)

**Análisis Dinámico**

- **Factor de amortiguamiento**

Este valor se lo toma en base a los ensayos presentados en la Figura 4.3 y

Figura 4.4 que muestra un factor de amortiguamiento del disipador de 53%. Pero al ser

un dispositivo nuevo que aún no se presenta los suficientes ensayos, especialmente de las conexiones a los otros elementos de la estructura, se toma un valor de amortiguamiento de la estructura de 10%; el cual es bastante conservador después de observar que el amortiguamiento de los ensayos del elemento de enlace es superior al disipador TADAS.

- **Índice de vulnerabilidad**

En esta estructura, una vez obtenido el periodo indicado en la Tabla 4.11, se obtiene un índice de vulnerabilidad de:

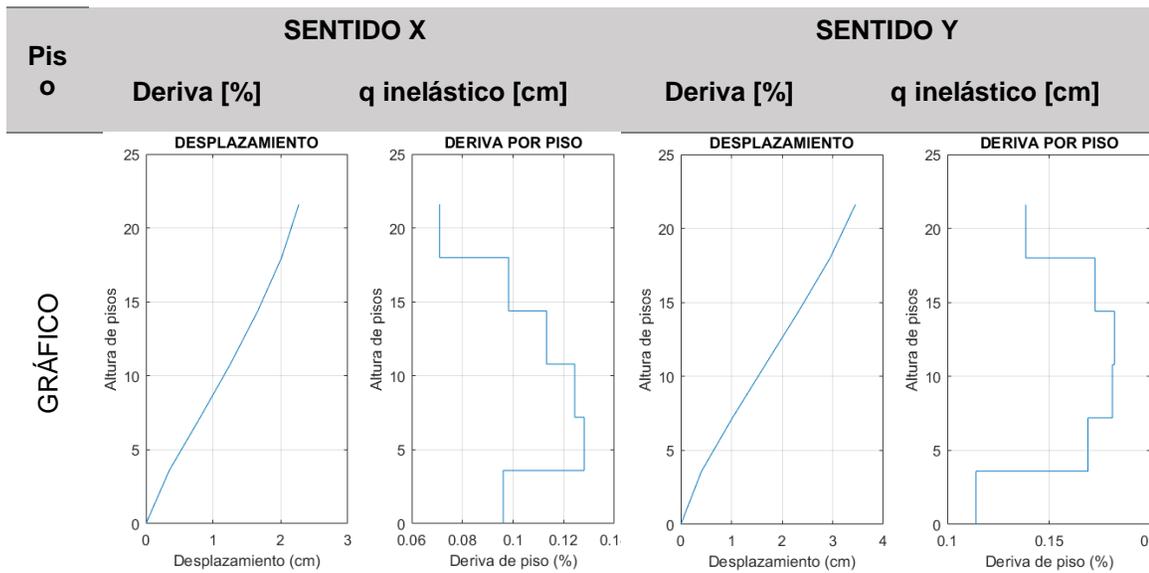
$$\frac{H}{T} = 50.68$$

Lo que cataloga a esta estructura siguiendo la Tabla 2.5, como una estructura normal.

**Tabla 4.11**

*Derivas y desplazamiento de estructura de acero con elementos de enlace (centro).*

PERIODO [s]				
0.426				
Pis o	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
1	0.096	0.0035	0.114	0.0041
2	0.128	0.0081	0.169	0.0102
3	0.124	0.0125	0.181	0.0167
4	0.113	0.0166	0.182	0.0233
5	0.098	0.0202	0.173	0.0295
6	0.071	0.0227	0.139	0.0345



**Tabla 4.12**

*Fuerzas transmitidas a los pórticos*

PISO	SENTIDO X	SENTIDO Y
	Pórtico 1 - 4	Pórtico A - H
1	-7.92	-2.33
2	12.22	5.22
3	18.67	9.55
4	17.07	7.96
5	24.35	12.92
6	23.77	11.65

**Análisis Estático**

Tabla 4.13

Fuerzas Axiales – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido X.

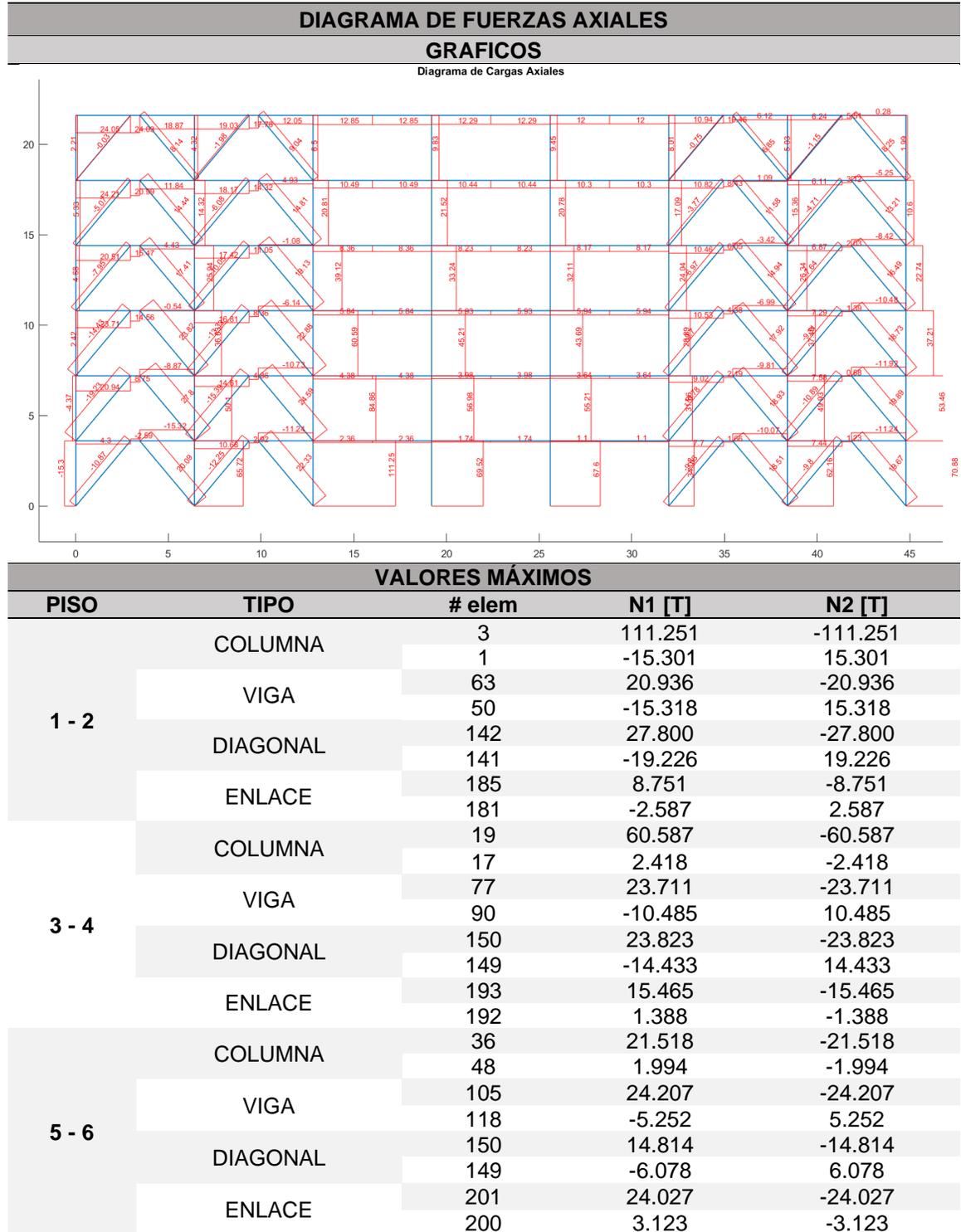


Tabla 4.14

Fuerzas Cortantes – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido X.

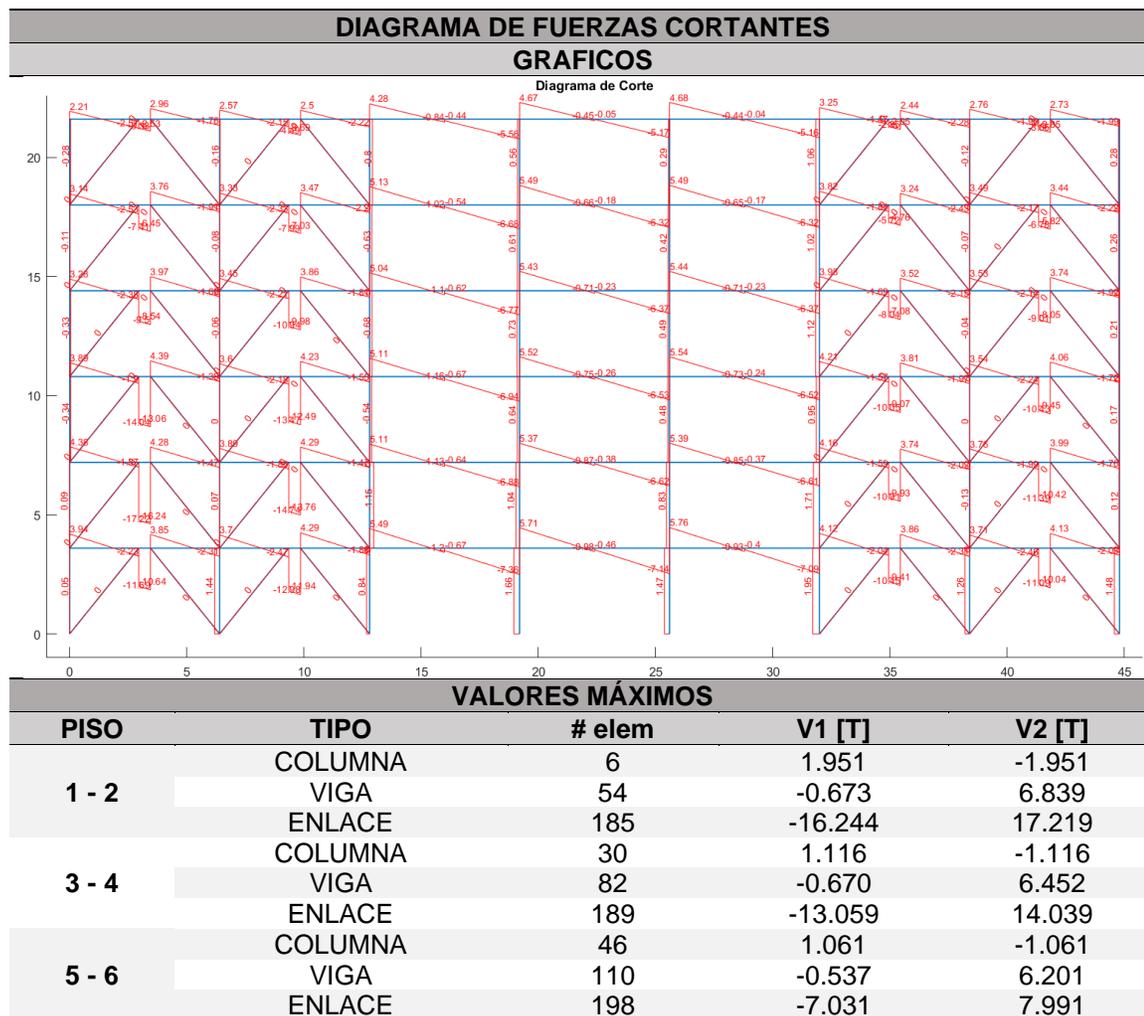


Tabla 4.15

Momento – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido X.

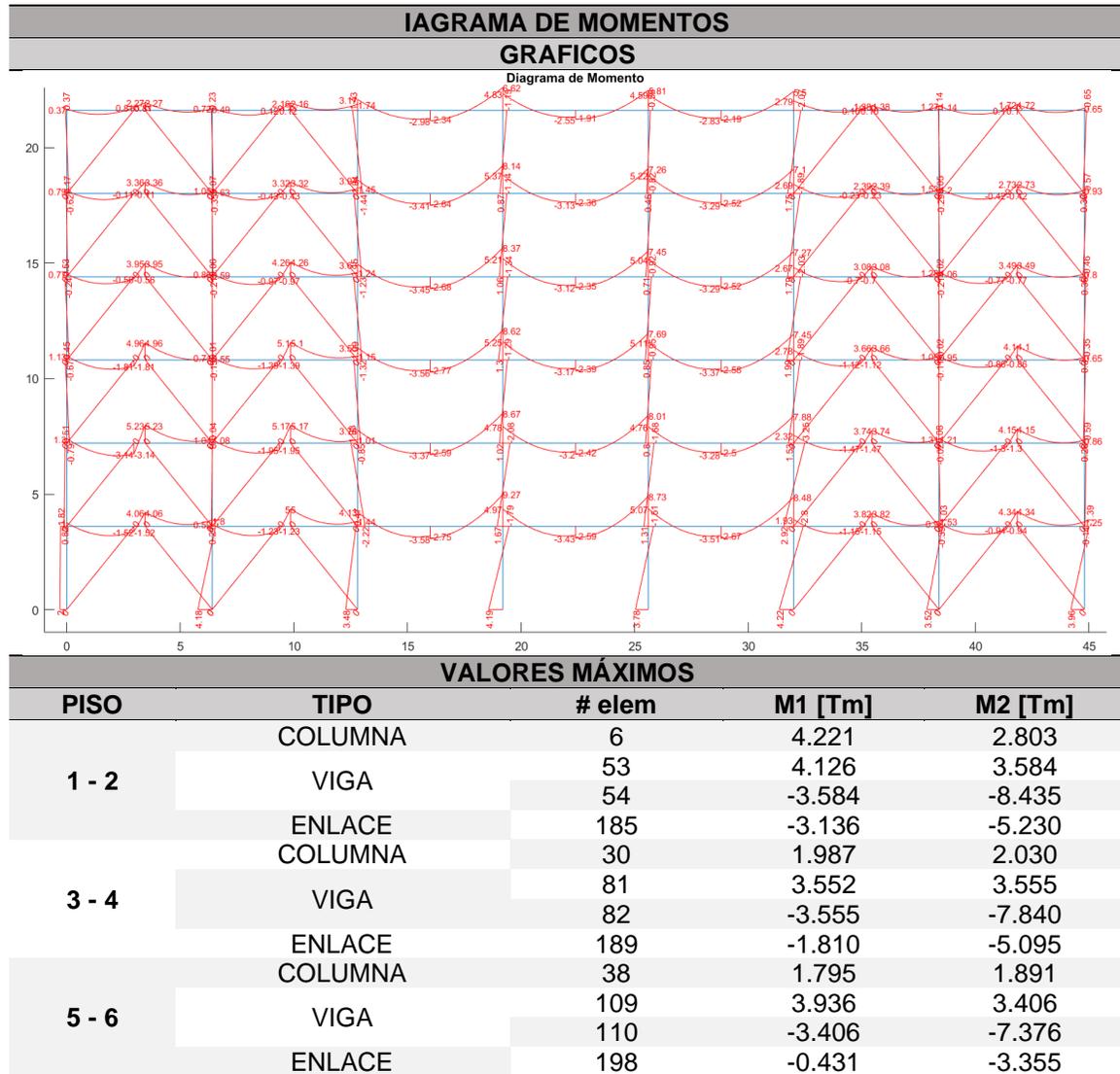


Tabla 4.16

Fuerzas Axiales – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido Y.

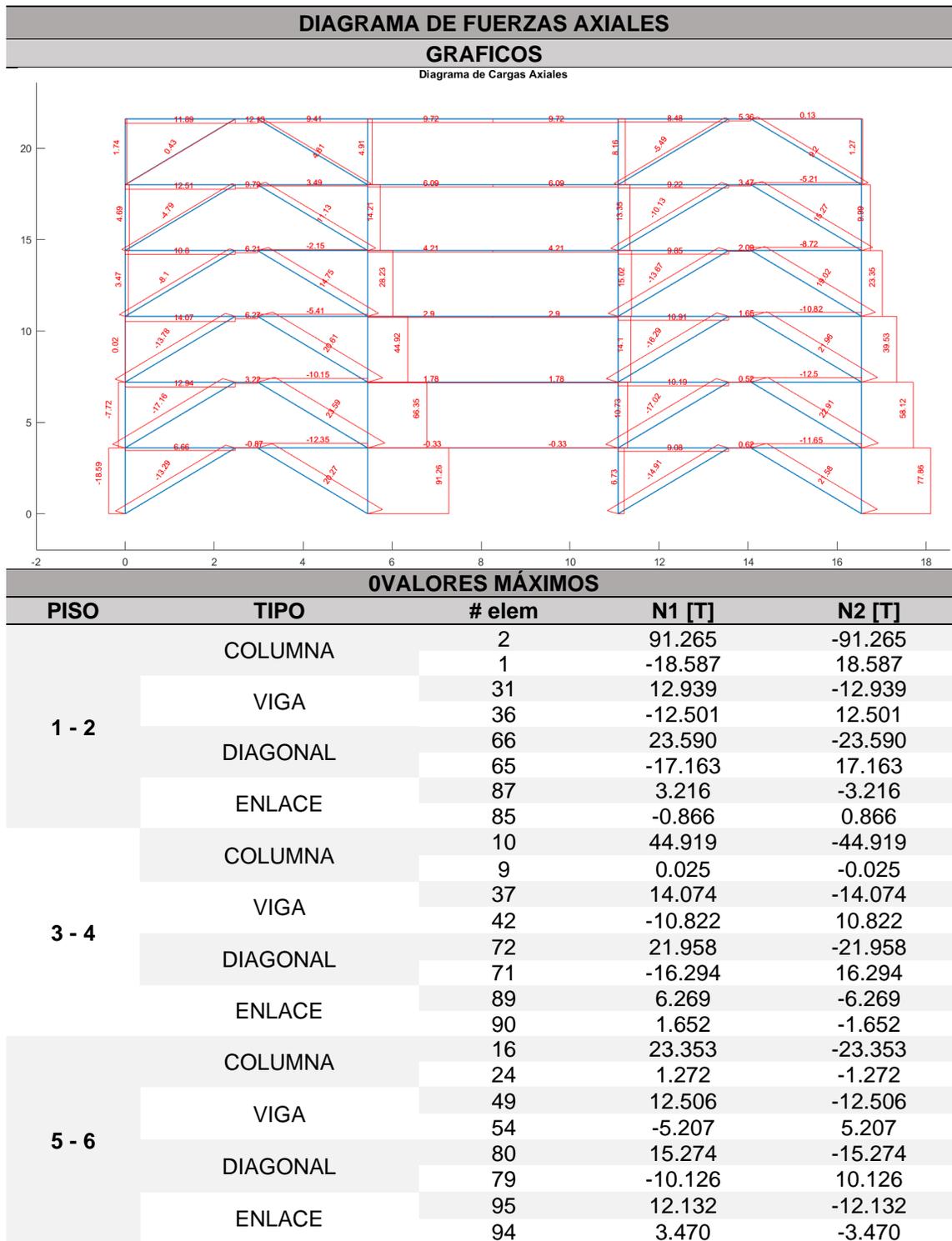


Tabla 4.17

Fuerzas Cortante – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido Y.

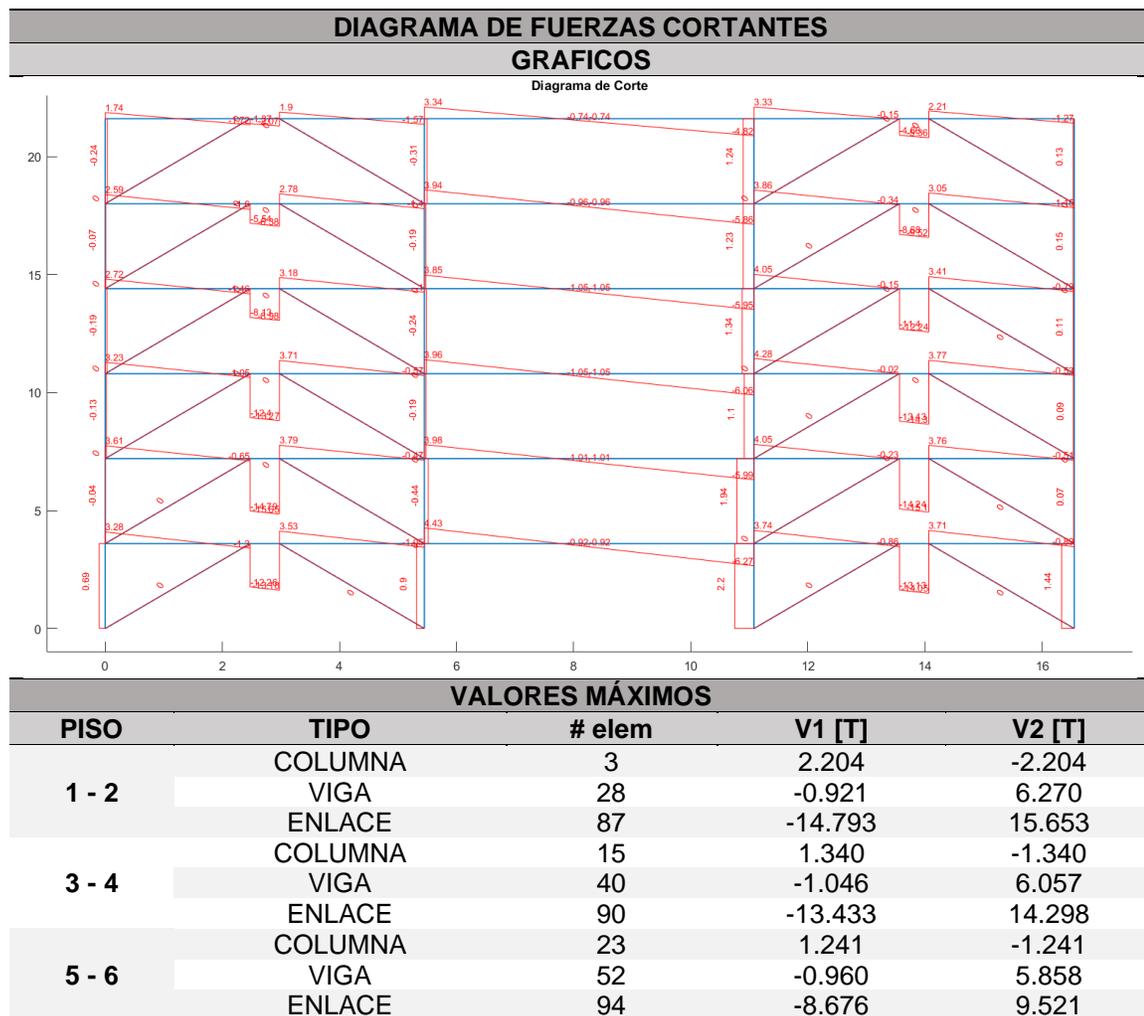
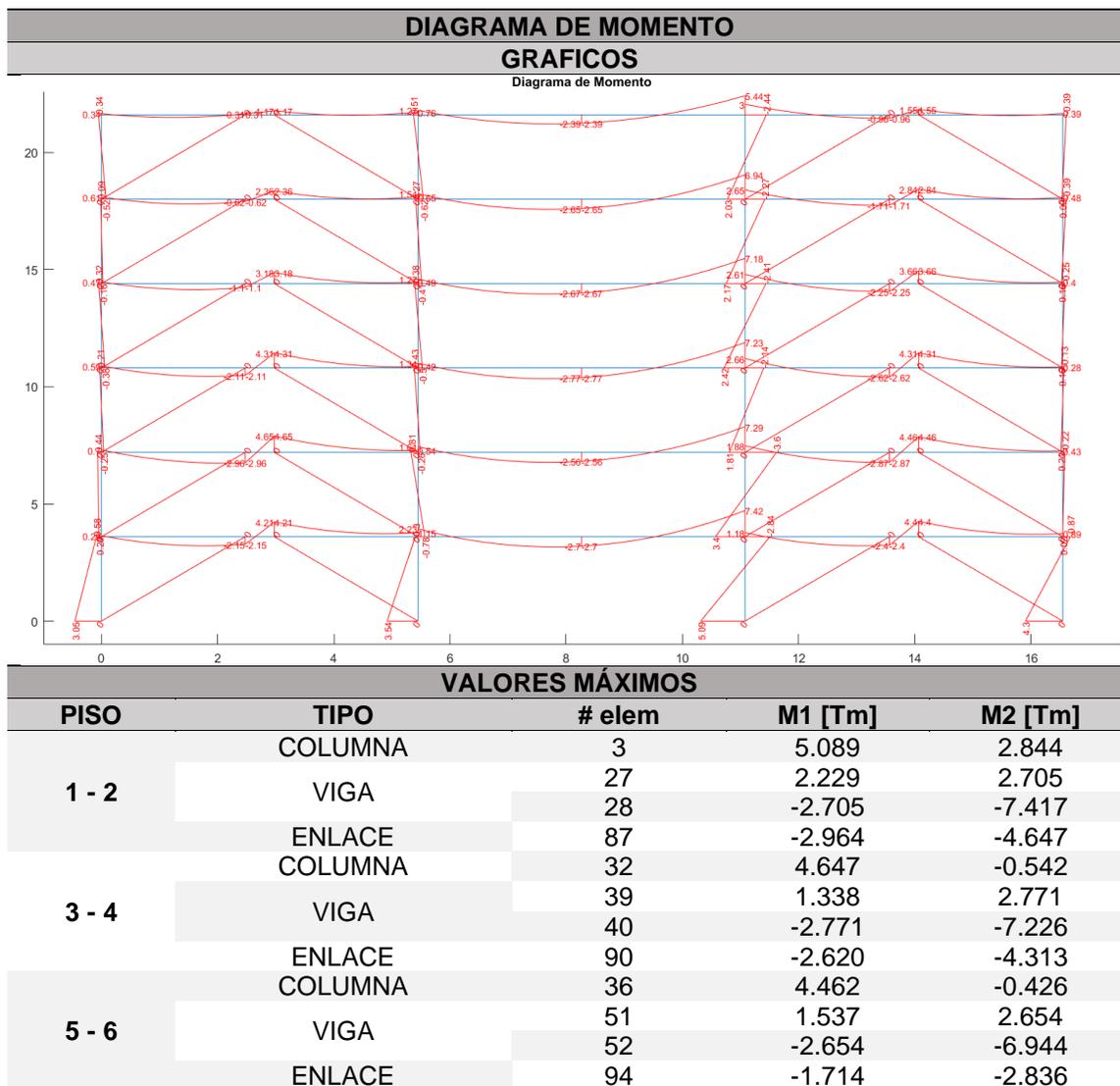


Tabla 4.18

Momento – Estructura con elementos de enlace (centro) – Sentido Y.



### Alternativas de diseño

Como alternativas de diseño de estructuras con elementos de enlace, se analizó también la posibilidad de colocar cartelas metálicas que generan en el centro de la viga elementos de enlace. También se puede colocar el elemento de enlace a un costado de

ciertos pórticos, generando una excentricidad entra la viga y la columna. Los resultados del análisis dinámico de estos modelos se los presenta a continuación.

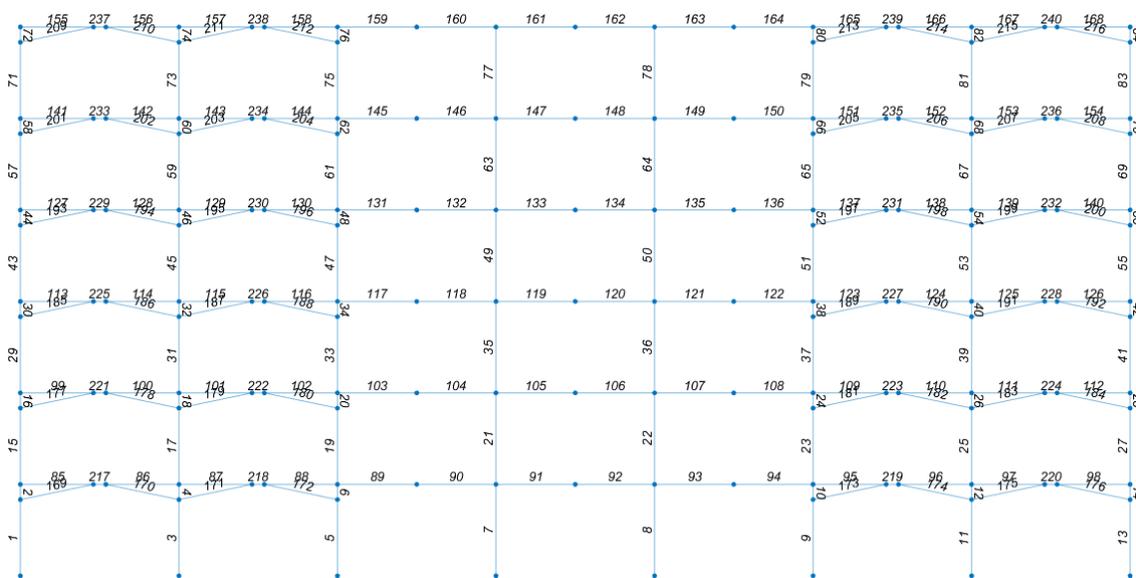
### ***Estructura con cartelas metálicas***

Una opción que resulta atractiva por parte de ingenieros e incluso arquitectos para conferir un mayor amortiguamiento a las estructuras es el uso de cartelas metálicas excéntricas. Puede resultar útil en el caso que se tenga diseños de fachadas o configuraciones arquitectónicas especiales.

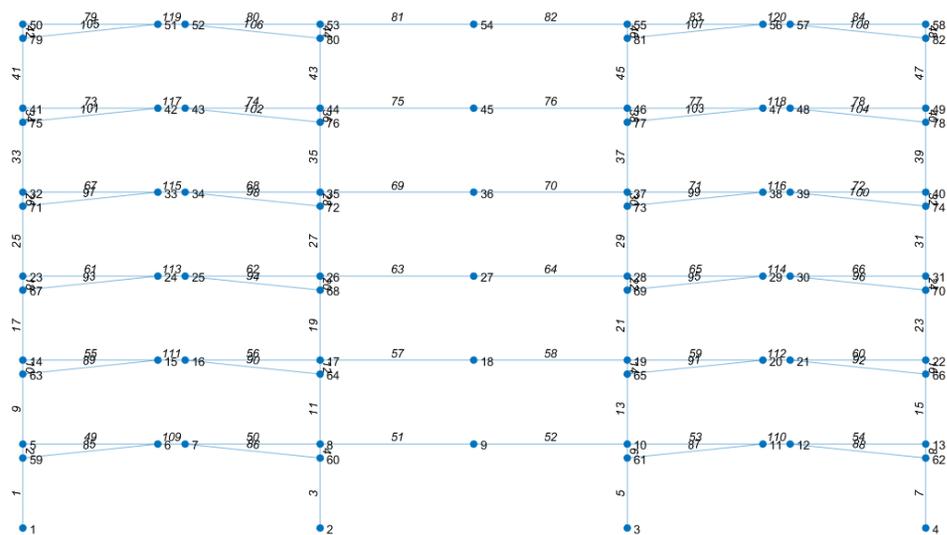
En este tipo de reforzamiento hay que cuidar que la altura de la cartela sea lo suficientemente grande como para ayudar a controlar las derivas y que no provoquen columnas cortas en la intersección con las mismas. Se toma un factor de amortiguamiento del 10%, y los resultados se presentan en las siguientes tablas.

**Figura 4.17**

*Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero con elementos de enlace (cartelas) a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.*



a)



b)

- **Índice de vulnerabilidad**

En esta estructura, una vez obtenido el periodo indicado en la Tabla 4.19, se obtiene un índice de vulnerabilidad de:

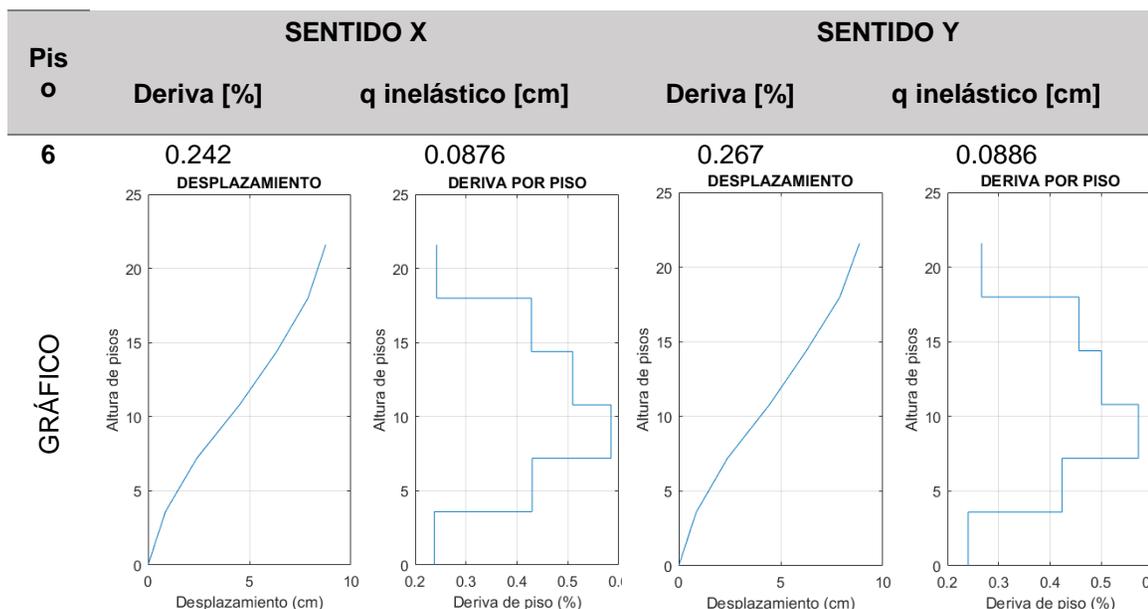
$$\frac{H}{T} = 24.70$$

Lo que cataloga a esta estructura siguiendo la Tabla 2.5, como una estructura flexible.

**Tabla 4.19**

*Derivas y desplazamiento de estructura de con elementos de enlace (cartelas).*

PERIODO [s]				
0.874				
Pis o	SENTIDO X		SENTIDO Y	
	Deriva [%]	q inelástico [cm]	Deriva [%]	q inelástico [cm]
1	0.238	0.0086	0.240	0.0087
2	0.430	0.0240	0.424	0.0239
3	0.585	0.0451	0.573	0.0445
4	0.509	0.0634	0.500	0.0625
5	0.428	0.0788	0.456	0.0790



### ***Estructura con elemento de enlace a un costado del pórtico.***

En este tipo de pórticos se va a usar un factor de amortiguamiento de 10%, el mismo que se utiliza en los modelos que contiene el elemento de enlace.

- **Índice de vulnerabilidad**

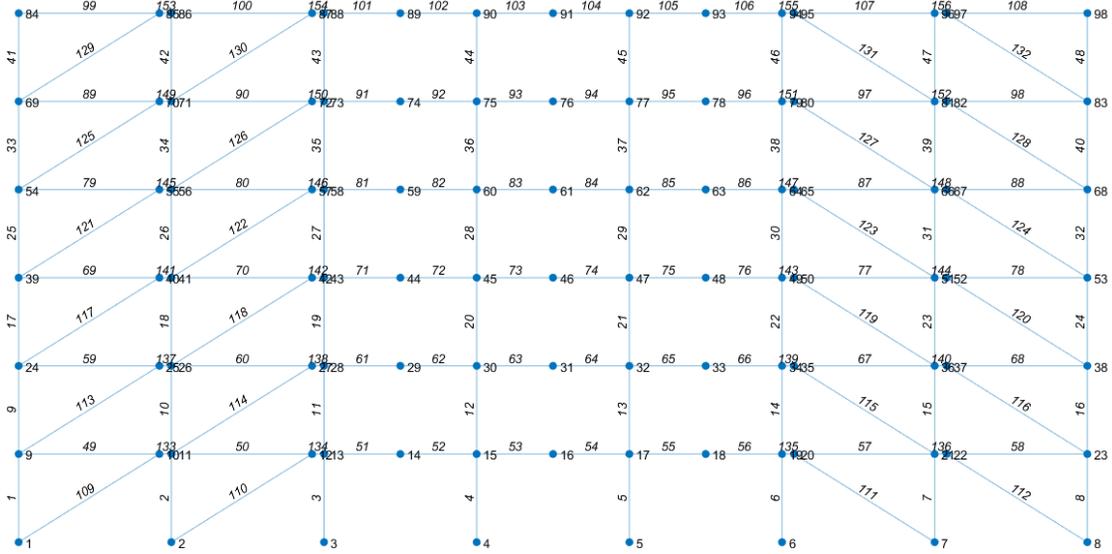
En esta estructura, una vez obtenido el periodo indicado en la Tabla 4.20 se obtiene un índice de vulnerabilidad de:

$$\frac{H}{T} = 46.379$$

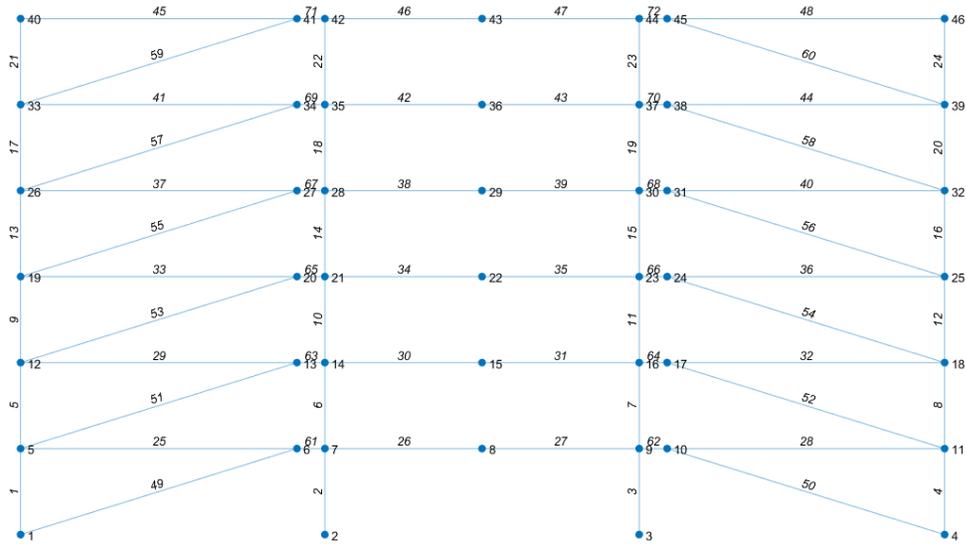
Lo que cataloga a esta estructura de acuerdo con la Tabla 2.5, como una estructura normal.

### ***Figura 4.18***

Numeración de nudos y elementos - Estructura de acero con elementos de enlace (costado) a) Pórticos 1 – 4, b) Pórticos A – H.



a)

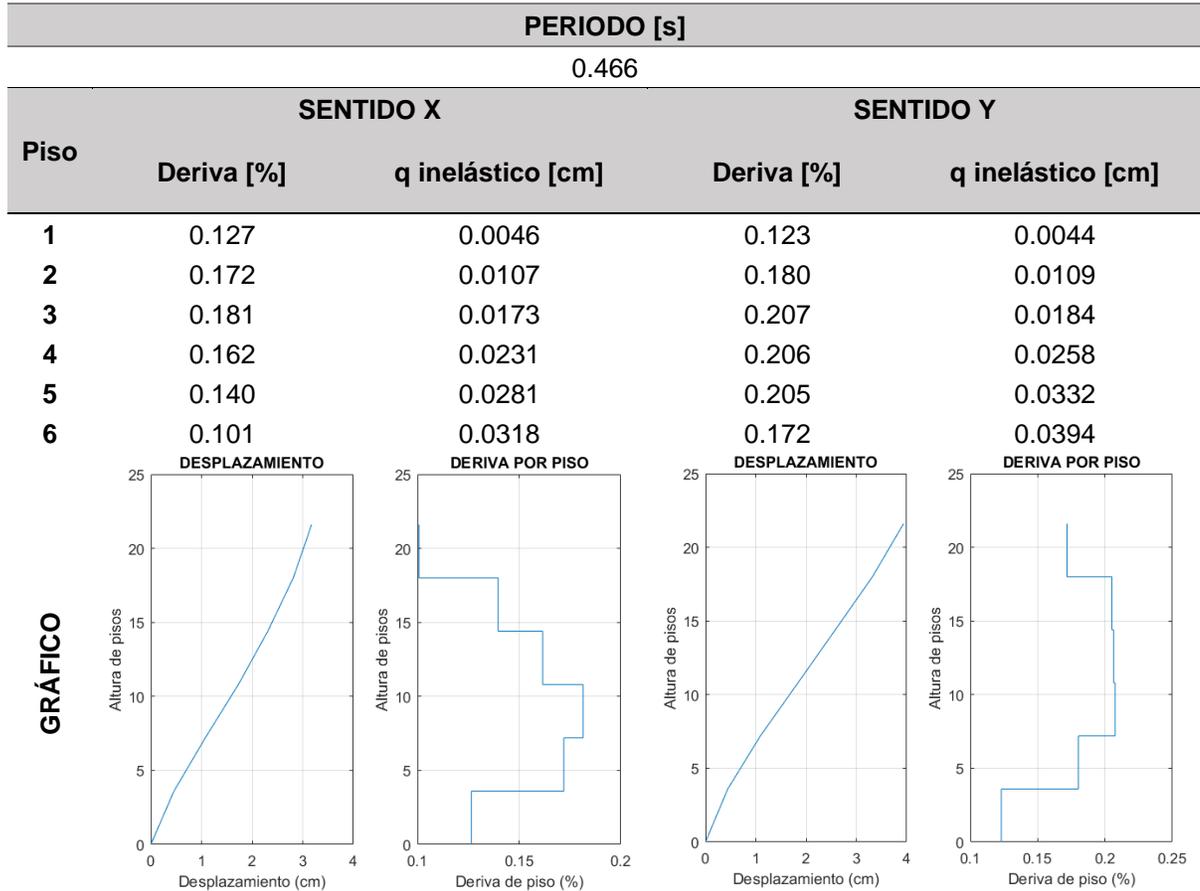


b)

Las derivas y periodos después del análisis de esta estructura se presentan a continuación. Como se observa el valor del periodo es muy similar a una estructura reforzada con elementos de enlace colocadas en el centro de los vanos, así mismo los desplazamientos y derivas.

**Tabla 4.20**

*Derivas y desplazamiento de estructura de con elementos de enlace (costado).*



### Resumen de funciones en CEINCI-LAB

- **$[X, Y]=glinea\_portico\_3nodos\_viga(nv, np, sv, sp, nod, nr, Long\_Enlace, mar\_Enlace);$**

Función que sirve para dibujar la geometría de los pórticos, se plantea ubicar dos nudos en las vigas de cada vano en donde exista diagonales excéntricas con el fin de generar la geometría necesaria para dibujar el elemento de enlace.

Los datos de entrada son: **nv** es el número de vanos que tiene el pórtico; **np** es el número de pisos del pórtico; **sv** es un vector que contiene las distancias de los

pórticos de izquierda a derecha; **sp** es un vector que contiene las alturas de pisos desde abajo hacia arriba; **nod** es el número de nudos totales de la estructura tomando en cuenta que en cada viga se encuentran dos nudos, esto se lo realiza con el fin de analizar los esfuerzos en la mitad de la viga; **nr** es el número de nudos restringidos; **Long\_Enlace** es la longitud del elemento de enlace; **mar\_Enlace** es un vector que contiene el número de pórtico en el que se desea colocar diagonales excéntricas generando un elemento de enlace.

Los datos de salida son: **X** es el vector que contiene las coordenadas en X de todos los nudos de la estructura; **Y** es el vector que contiene las coordenadas en Y de todos los nudos de la estructura.

- **[NI,NJ]=gn\_portico\_3nudos\_viga(nr,nv,np,nudt,nudcol,nudvg,mar\_Enlace)**

Función que sirve para obtener los nudos inicial y final de los elementos columna y viga del pórtico.

Los datos de entrada son: **nudt** es el número de elementos totales; **nudcol** es el número de columnas; **nudvg** es el número de vigas.

Los datos de salida son: **NI** son los nudos iniciales de las columnas y vigas; **NJ** son los nudos finales de las columnas y vigas.

- **[NI2,NJ2]=geometria\_3nudos\_diagonales(nr, nv, np, nudt, mar\_Enlace);**

Función que sirve para obtener los nudos inicial y final de los elementos “diagonal” del pórtico.

- **[NI,NJ,Vigas\_Interme]=rutina\_paso\_numeracion3(NI,NJ,nv,np,nudcol,nudvg,mar\_Enlace);**

Función que enumera las columnas, seguidos de las vigas, diagonales, y por último los elementos de enlace con el fin de tener agrupado a los elementos de un mismo tipo para un análisis más ordenado.

- ***[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria\_4nudos\_viga(sv,sp,mar\_Enlace)***

Función que da los parámetros geométricos cuando se tiene pórticos con cartelas metálicas.

- ***[X,Y]=glinea\_portico\_4nudos\_viga(nv,np,sv,sp,nod,nr,Long\_Enlace,mar\_Enlace,h\_diag)***

Función que sirve para calcular las coordenadas X y Y de los nudos de los pórticos con cartelas metálicas.

- ***[NI,NJ]=gn\_portico\_4nudos\_viga(nr,nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,mar\_Enlace)***

Función que sirve para calcular los nudos inicial y final de los pórticos con cartelas metálicas.

- ***[NI2,NJ2]=geometria\_4nudos\_diagonales(nr, nv, np, nudt, mar\_Enlace,nod);***

Función que sirve para calcular los nudos inicial y final de las cartelas metálicas.

- ***[CG,ngl]=cg\_cartela\_sismo(nod,nr,RES,nv,np,mar\_Enlace);***

Función que sirve para determinar los grados de libertad en pórticos con cartelas metálicas considerando un grado de libertad por piso.

- ***[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria\_5nudos\_viga(sv,sp,mar\_Enlace\_diag);***

Función que da los parámetros geométricos cuando se tiene pórticos con elementos de enlace a un costado del vano, dependiendo si el elemento de enlace necesita ser colocado al lado izquierdo o derecho del vano.

- ***[X,Y]=glinea\_portico\_5nudos\_viga(nv,np,sv,sp,nod,nr,Long\_Enlace,mar\_Enlace\_diag);***

Función que sirve para calcular las coordenadas X y Y de los nudos de los pórticos con elemento de enlace en un costado del vano.

- ***[NI2,NJ2]=geometria\_5nudos\_diagonales(nr, nv, np, nudt, mar\_Enlace\_diag,nod);***

Función que sirve para calcular los nudos inicial y final de las diagonales en pórticos con diagonal a un solo lado del vano.

- ***[NI,NJ,Vigas\_Interme]=rutina\_paso\_numeracion4(NI,NJ,nv,np,nudcol,nudvg,mar\_Enlace\_diag);***

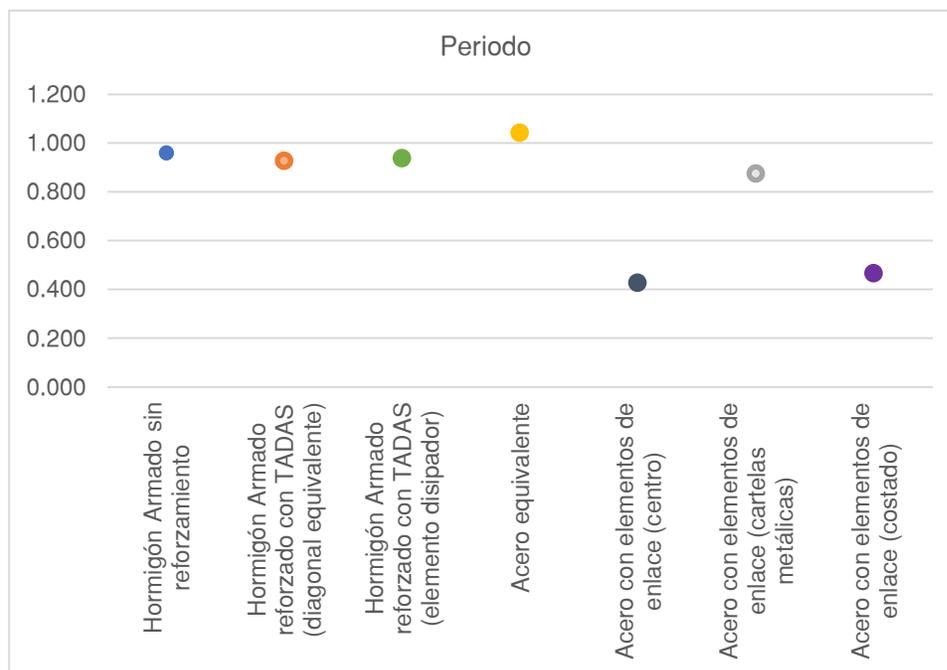
Función que enumera los elementos columna, seguidos de los elementos viga, diagonales, y por último los elementos de enlace con el fin de tener agrupado a los elementos para un análisis más ordenado, cuando se coloque los elementos de enlace a un lado del vano.

## Capítulo 5. Comparación de los Resultados Obtenidos

Una vez realizado los análisis y la comparación de los modelos matemáticos de una estructura con elemento disipador TADAS y una estructura con elementos de enlace, se resume los resultados obtenidos. En la Figura 5.1 se presenta un gráfico en el que muestra los periodos obtenidos de cada modelación.

**Figura 5.1**

*Comparación de los periodos de los distintos modelos analizados*



Como se puede observar en la Figura 5.1, los periodos de la estructura sin reforzamiento y la estructura analizada mediante elementos TADAS son similares, mientras que los periodos de la estructura analizada con elementos de enlace caen considerablemente respecto a la estructura equivalente de acero. Esto se debe a que los elementos TADAS dan un mayor amortiguamiento a la estructura, pero no ayudan en la rigidez lateral de los pórticos.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 5.1 en la que se indica el factor de amortiguamiento que se usa en cada uno de los modelos analizados. En ésta se destaca que para reforzar una estructura con disipadores TADAS se utiliza un factor de amortiguamiento de 25% y cuando se considera elementos de enlace se utiliza un factor de amortiguamiento de 10%.

Al usar un factor de amortiguamiento bajo en los elementos de enlace en relación a una estructura con disipadores TADAS, se aplica criterios bastante conservadores. Esto se debe a que no se tiene los suficientes estudios que garanticen el uso de un elemento de enlace como disipador de energía, y que pueda ser removido después de su falla producto de un sismo.

**Tabla 5.1**

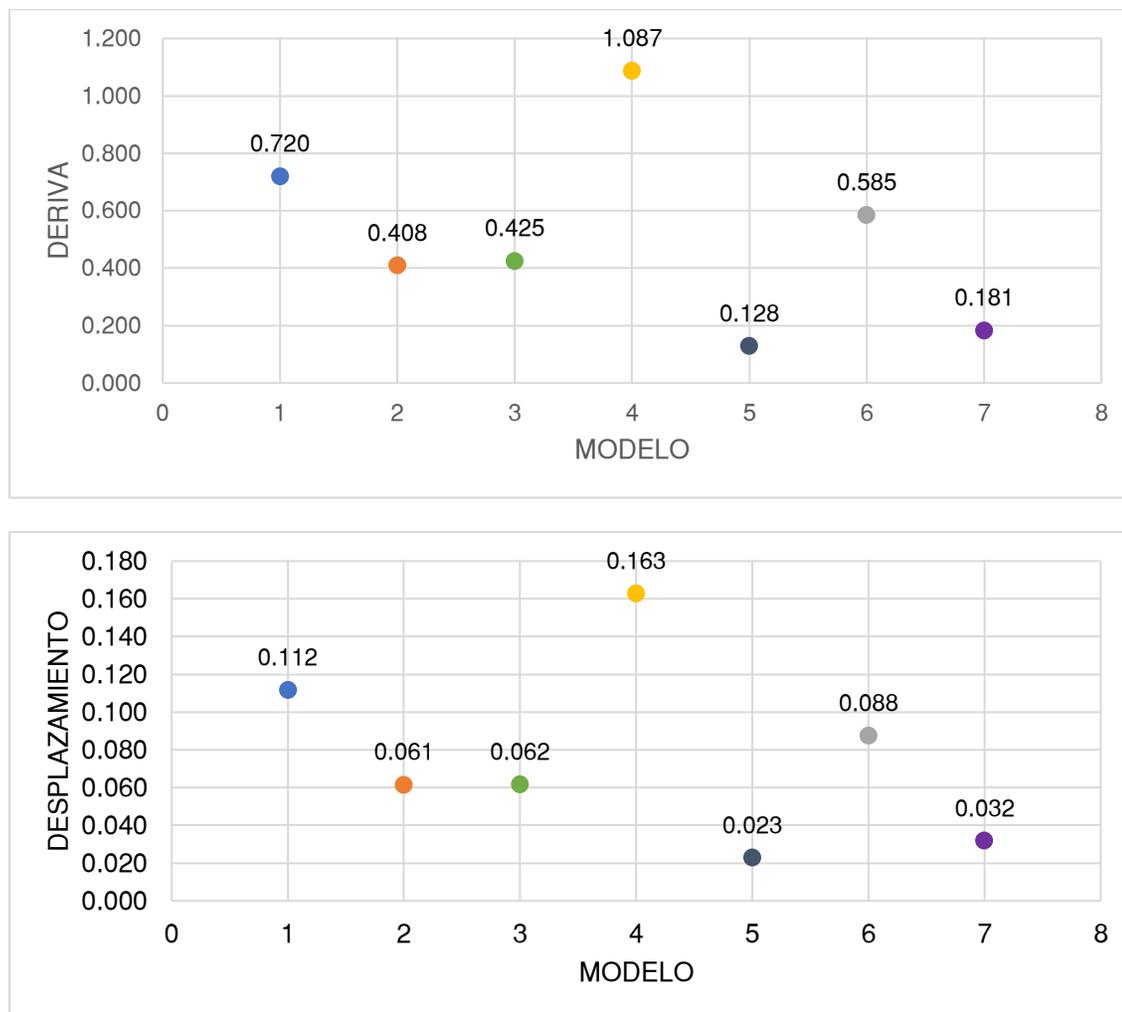
*Factores de amortiguamiento en estructuras analizadas*

	<b>MODELO</b>	<b>FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO</b>
1	Hormigón armado sin reforzamiento	5%
2	Hormigón Armado reforzado con disipadores TADAS (diagonal equivalente)	25%
3	Hormigón Armado reforzado con disipadores TADAS (elemento disipador)	25%
4	Acero equivalente	4%
5	Acero con elementos de enlace (centro)	10%
6	Acero con elementos de enlace (cartelas)	10%
7	Acero con elementos de enlace (costado)	10%

Tomando en cuenta los factores de amortiguamiento usados en los modelos, se puede observar en la Figura 5.2 y Figura 5.3, las derivas y desplazamientos de los pisos en los sentidos X y Y.

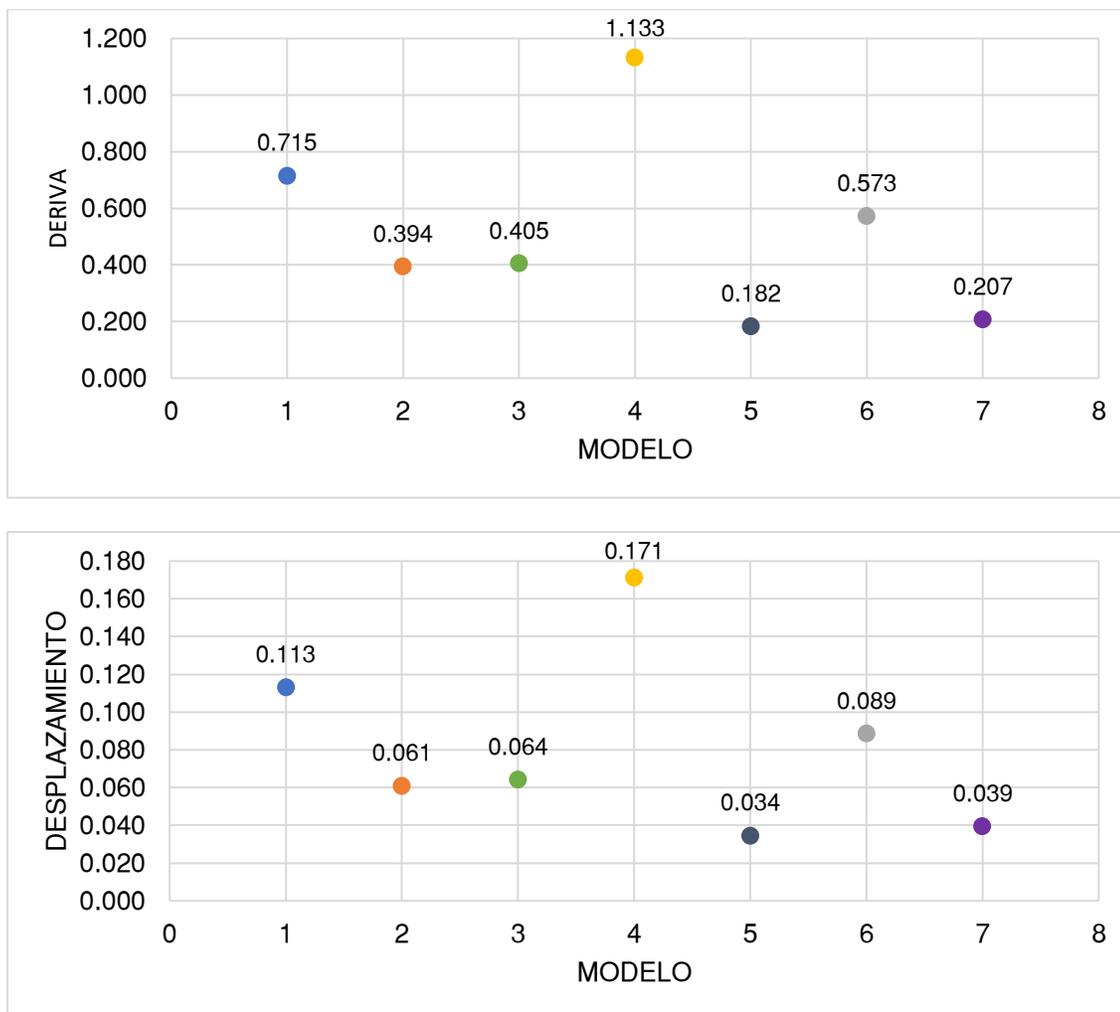
**Figura 5.2**

*Comparación de desplazamientos y derivas máximos en el sentido X de los modelos analizados.*



**Figura 5.3**

*Comparación de derivas y desplazamientos máximos en el sentido Y de los modelos analizados.*



Una de las principales ventajas del uso de disipadores de energía TADAS es que se los puede usar para reforzar estructuras ya existentes como se ha venido reforzando en varios edificios después del sismo ocurrido en Manta el 16 de abril de 2016, mientras que los elementos de enlace como disipadores de energía solo pueden ser concebidos desde la fase inicial de la estructura.

**Figura 5.4**

*Parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí*



*Nota.* Recuperado de (Aguar, Palacios, Palacios, & Gastón, 2019)

Una ventaja constructiva del uso de disipadores TADAS es la facilidad de colocación en una estructura en relación con el elemento de enlace. Esto se debe a que para realizar la instalación del elemento de enlace con las vigas se debe usar una modificación de las placas end-plate, las cuales pueden presentar problemas cuando existe una falla en la longitud de los elementos, haciendo que no encajen al momento de la instalación.

Mientras que, una de las principales ventajas del uso de elementos de enlace como disipadores de energía es su facilidad constructiva, pudiendo realizarse en el mercado local. Esto también conlleva a ventajas en costos de fabricación. A diferencia de los disipadores TADAS que es necesario enviarlos a fabricar en países como Chile, los elementos de enlace se los puede elaborar en fábricas nacionales, cuidando siempre las especificaciones de las normas. Los disipadores TADAS pueden llegar a costar 4000 dólares para su fabricación, los cuales adicionando sus gastos de envío pueden llegar a costar más de 4500 dólares.

Las estructuras con elementos de enlace presentan períodos bastante menores en relación a la estructura sin reforzamiento, ya que estos son pórticos arriostrados excéntricamente con un elemento de enlace corto, por lo tanto, la rigidez lateral de los mismos se asemeja a un pórtico arriostrado concéntricamente con una rigidez lateral alta.

Se puede observar en la Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3 que tanto los períodos, así como las derivas aumentan considerablemente cuando se utiliza elementos de enlace formado mediante cartelas metálicas. Es importante tener en cuenta esto, ya que se podría reforzar la estructura con cartelas metálicas y elementos de enlace en caso de que se presente necesidades arquitectónicas.

Otra de las principales ventajas del uso de elementos de enlace en estructuras es que puede ser reemplazable. (Clifton *et al.*, 2011) realizó un estudio en el que demuestran que se puede utilizar un elemento de enlace como elemento reemplazable para reducir el tiempo y costo de reparación de estructuras después del sismo de Christchurch, el cual ocurrió en 2011 con una magnitud de 6.3. En este estudio determinaron tres requisitos principales para el correcto funcionamiento de los elementos de enlace, que son:

- Los elementos de enlace deben estar diseñados para lograr una rotación plástica mayor a 0.08 radianes en modo de corte bajo el sismo de diseño o mayor.
- La demanda inelástica debe estar limitada al elemento link.
- Facilidad de extracción y reemplazo.

Una de las principales desventajas del uso de elementos de enlace como disipadores de energía es que estos no pueden ser usados para reforzar estructuras ya

existentes, debido a la dificultad constructiva y por no poder realizar una correcta unión de los elementos existentes al elemento de enlace.

Otra desventaja es el cuidado que se debe tener en la conexión del elemento de enlace a los demás elementos de la estructura. En caso de no dar una correcta conexión a estos elementos, las cargas de cortante no se transmitirían al elemento de enlace, lo que ocasionaría que el elemento no disipe la energía por fluencia de materia y generaría rótulas innecesarias.

## Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Del análisis de la estructura sin reforzamiento, así como de los datos obtenidos mediante investigaciones anteriores, se puede observar que las derivas máximas en esta estructura son inferiores al 1% con el sismo que ocurrió en Manta en su componente EW, a pesar de que este sismo es superior al sismo de diseño de la (NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014) como se lo puede evidenciar en la Figura 2.7. Es importante recalcar que esta edificación presentó daño entre moderado y extenso en mampostería, lo que inhabilitó ciertas áreas importantes que debían ser usadas para dar atención a las personas afectadas después del terremoto de 16 de abril.
- Después de realizar el modelamiento de la estructura con disipadores TADAS por el método de diagonal equivalente y considerando al disipador como un elemento más de la estructura, se puede observar que no hay una variación significativa en cuanto a periodos, derivas y desplazamientos como se evidencia en la Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3. Esto se da a pesar de que al considerar al disipador como un elemento adicional de la estructura se asemeja más a la realidad constructiva. Además, es importante señalar que las fuerzas en diagonales producto del sismo son superiores cuando se utiliza el método de diagonal equivalente.
- El elemento de enlace necesario para resistir las fuerzas producto del sismo que se toma en la presente investigación es una sección IPE 500, reforzado mediante placas en el alma de 2 cm de espesor. Al ser considerado un elemento de enlace corto, su falla predominante será por corte lo que

provocará la disipación de energía. Al usar estas diagonales excéntricas creando este elemento de enlace se puede evidenciar que proporciona una mayor rigidez en la estructura como se evidencia en los gráficos de periodos, derivas y desplazamientos.

- Al comparar el uso de disipadores TADAS se concluye que las derivas mejoran en un 45% cuando se analiza mediante diagonal equivalente y en un 43% analizado mediante elemento disipador; mientras que al usar elementos de enlace mejora sus derivas en un 85% al usar elementos de enlace colocados al centro, y en un 80% al colocarlos a un costado del vano. Con el uso de cartelas metálicas mejora en un 47%, aun superior en control de derivas y desplazamientos si se lo compara con el uso de disipadores TADAS.

## Recomendaciones

- Se recomienda hacer un análisis más detallado de las estructuras después de que haber sido afectadas por un sismo. Esto ayuda a comprender mejor el nivel de daño que se tuvo en las mismas y a proponer y diseñar el mejor tipo de reforzamiento necesario para asegurar su funcionamiento continuo.
- Se recomienda usar las fuerzas obtenidas en el modelo de diagonal equivalente para el diseño de las diagonales sobre las que va a ir el disipador TADAS, esto con el fin de que los desplazamientos del piso inferior sean igual a los desplazamientos en la base del disipador para lograr una correcta disipación de la energía.
- Como indica (American Institute of Steel Construction, 2016) cuando se coloca diagonales excéntricas generando un elemento de enlace, los demás elementos de la estructura se deben dimensionar siguiendo el criterio de diseño por capacidad. Esto con el fin de que cuando falle el elemento de enlace, los otros elementos de la estructura sigan manteniéndose en el rango elástico.
- Se recomienda continuar las investigaciones del elemento de enlace como un dispositivo disipador de energía que pueda ser remplazado después de su falla, para así lograr verificar los valores de amortiguamiento ensayados con materiales locales.

### Referencias

- Aguiar Falconí, R., Rodríguez, M., & Mora, D. (Mayo de 2016). *Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS*. Obtenido de ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/303256522>
- Aguiar Falconí, R., Zevallos Loor, M., & Palacios Rodríguez, J. (2016). *Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía, terremoto de Ecuador de abril de 2016*. Frontier Publicidad.
- Aguiar, R. (2006). *Dinámica de Estructuras con Matlab*. Centro de Investigaciones Científicas.
- Aguiar, R. (2018). Analysis of Used Dissipators in Reinforcement of Hospital Rodríguez Zambrano de Manta. *Revista Internacional de Ingeniería en Estructuras*, 1-28.
- Aguiar, R., Cagua, B., Romero, J., & Pilatasig, J. (2019). Dos modelos numéricos de análisis sísmico de estructuras con disipadores TADAS. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 363-380.
- Aguiar, R., Palacios, P., Palacios, A., & Gastón, K. (2019). Analysis of structures with energy dissipaters TADAS, using CEINCI-LAB. *Revista Internacional de Ingeniería en Estructuras*, 387-403.
- Aguiar, R., Romero, J., Frau, C., & Quiroga, D. (2020). Two Numerical models of sismical structure analysis with link elements. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 65-96.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. American Institute of Steel Construction.
- Babu, S. S., & Sreekumar, S. (2012). A Study on the Ductility of Bolted Beam- Column Connections. *International Journal of Modern Engineering Research*, 3517-3521.
- Calo Catota, B. P. (2018). Desempeño sísmico de edificaciones con marcos arriostrados excéntricamente con enlaces cortos diseñados según la NCH433. (*Tesis de Maestría*). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Clifton, C., Bruneau, M., MacRae, G., Leon, R., & Fussell, A. (2011). Steel structures damage from the Christchurch Earthquake series of 2010 and 2011. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 297-318.

- Crisafulli, F. J. (2018). *Diseño sismoresistente de construcciones de acero*. Asociación Latinoamericana del Acero.
- El Telégrafo. (13 de julio de 2017). Cifras del terremoto de 2016 se analizan en un encuentro. *El Telégrafo*.
- Gascón, A. (2011). Comportamiento de edificios de acero con marcos contraventeados excéntricamente. (*Tesis de maestría*). Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F.
- Guendelman Bedrack, T. (2004). *Análisis estático y dinámico de estructuras*. Editorial de la Universidad de la Serena.
- Khademi, Y., & Rezaie, M. (2017). Comparison Study of CBFs and EBFs Bracing in Steel Structures with Nonlinear Time History Analysis. *Civil Engineering Journal*, 1-9.
- Malley, J. O., & Popov, E. P. (1984). Shear Links in Eccentrically Braced Frames. *Journal of Structural Engineering*, 2275-2295.
- Mejía, R., Ruíz, E., & Ruiz, S. (1996). *Análisis comparativo de dos marcos: uno diseñado convencionalmente y otro con dispositivos TADAS*. México: Revista de Ingeniería Sísmica.
- Ministro de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *NEC: Peligro Sísmico diseño sismo resistente*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Moncayo, T. (2017). Terremotos mayores a 6.5 en escala Richter ocurridos en Ecuador desde 1900 hasta 1970. *Sistema de Información Científica*, 55-64.
- Mora, E. 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 de capacidad. (*Tesis de maestría*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). *Peligro Sísmico Diseño Sismoresistente*. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). *Earthquake spectra and design*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.-C., & Engelhardt, M. (2004). Recent research on link performance in steel eccentrically braced frames. *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Okazaki, T., Engelhardt, M., Nakashima, M., & Suita, K. (2004). Experimental study on link - to - link column connection in steel eccentrically braced frames. *13th World Conference on Earthquake Engineering*.

- Oyarzún, J. P. (2012). Evaluación de los parámetros de diseño para marco excéntrico en Chile. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Quinde Martínez, P., & Reinoso Angulo, E. (2016). *Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de diseño para la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Revista de Ingeniería Sísmica.
- Saflor, L. M. (2018). Analytical and Numerical Investigation of Detachable Short Links with Flush and Extended-End Plate Connections. (*Tesis de Maestría*). University of Naples "Federico II", Nápoles.
- Tena, A. (2004). Enseñanzas principales durante sismos recientes. *Seminario Anual Riesgo Terremoto y Huracán*, 1-37.
- Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., & Su, Y.-F. (1995). Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction. *Earthquake Spectra* 11,4, 505-528.

**Anexos**