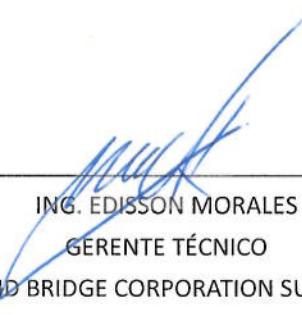


**SERVICIOS DE INGENIERÍA PARA EL DISEÑO
FINAL DEL PUENTE GUAYASAMÍN**

ANÁLISIS DE FUERZAS SÍSMICAS


ING. EDISSON MORALES

GERENTE TÉCNICO

CHINA ROAD AND BRIDGE CORPORATION SUCURSAL ECUADOR

Contenido

1 Introducción.....	1
1.1 Arreglo General de la Luz del Puente Principal	1
1.2 Pilas y Cimentación de Puente Principal	2
1.3 Distribución de la Superestructura del Puente	4
2 Criterios del Rendimiento Sísmico y Entrada de Movimiento Sísmico	6
2.1 Criterios Sísmicos.....	6
2.2 Entrada de Movimiento Sísmico.....	6
2.2.1 Espectro de respuesta	6
2.2.2 Curvas Time-History para SEE (TR1035)	7
2.3 Especificaciones Técnicas	12
3 Modelo Mecánico	13
3.1 Modelo dimensional del análisis dinámico	13
3.2 Análisis de Características Dinámicas.....	14
4 Análisis Lineal del espectro de respuesta.....	19
4.1 Localización de elementos principales	19
4.2 Respuesta para SEE.....	21
4.2.1 Formulas de combinación: $1,0X+0,3Y+0,3Z$	21
4.2.2 Formulas de combinación: $0,3X+1,0Y+0,3Z$	23
4.2.3 Formulas de combinación: $0,3X+0,3Y+1,0Z$	24
5 Análisis Lineal Time-History.....	27
5.1 Localización de elementos principales	27
5.2 Respuesta longitudinal y vertical.....	29
5.3 Respuesta transversal y vertical	31
6 Análisis de parámetros del amortiguador longitudinal.....	33
6.1 Condición de análisis del parámetros.....	33

6.2 Resultados del análisis de parámetros	33
6.3 Resultados de la optimización del parámetro de amortiguamiento	38
7 Análisis No Lineal Time-History (Período de retorno 1035 años)	39
7.1 Respuesta Longitudinal y vertical.....	42
7.2 Respuesta transversal y vertical	44
7.3 Comparación de la fuerza interna	46
8 Conclusiones.....	49

1 Introducción

1.1 Arreglo General de la Luz del Puente Principal

El Puente Principal tiene una longitud de 480m, está diseñado como una estructura rígida de viga continua en hormigón pos-tensado de (80+150+130+60+60)m.

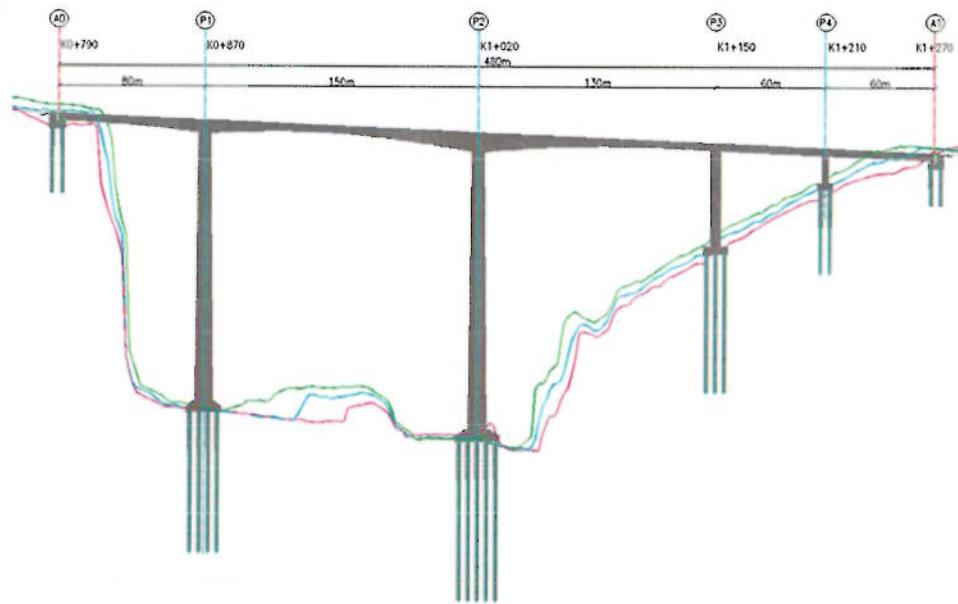


Figura 1- 1 Arreglo General

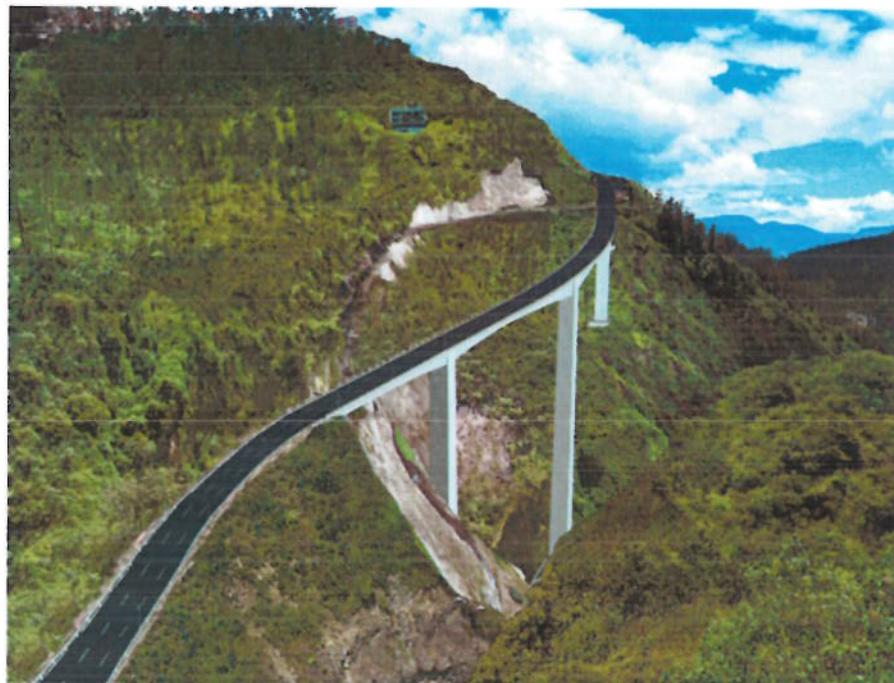


Figura 1- 2 Representación del Puente Guayasamín

1.2 Pilas y Cimentación de Puente Principal

Las Pilas P1 y P2 son monolíticas con el tablero y cuentan con una pila acampanada con dimensiones (7m~10m) x (8m~12m), las dimensiones de la perforación o pozo de la pila es (5,6m~8,6m) x (6,6m~10,6m) con un espesor de (0,7m~1m). El pozo de la Pila P3 es de 8,5 m x 5,5m con un espesor de pared de 0,65m. La Pila P4 tiene una construcción sólida de 8,5m x 3,0m.

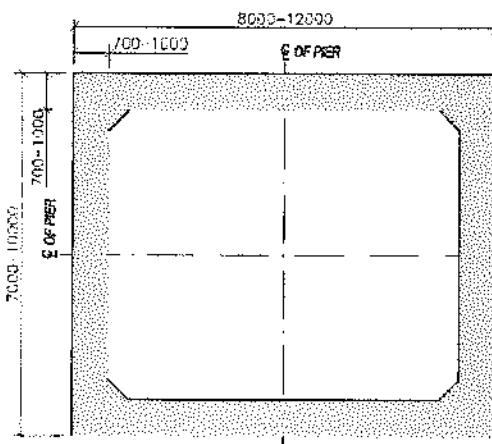


Figura 1- 3 Dimensiones Pilas P1 & P2

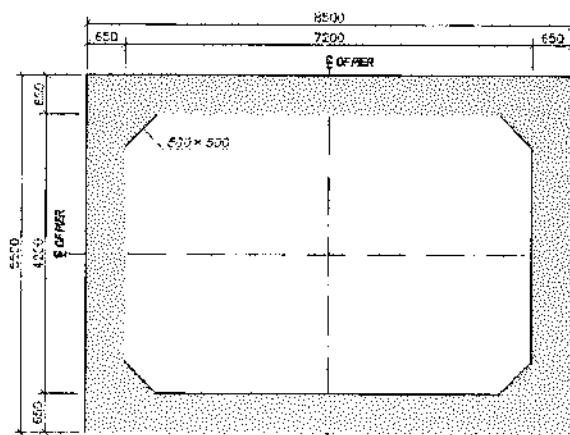


Figura 1- 4 Dimensiones Pila P3

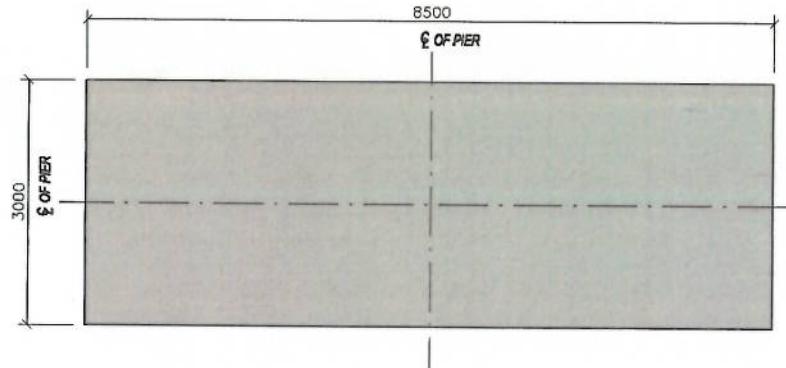
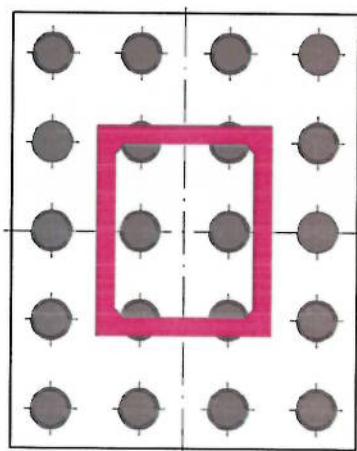
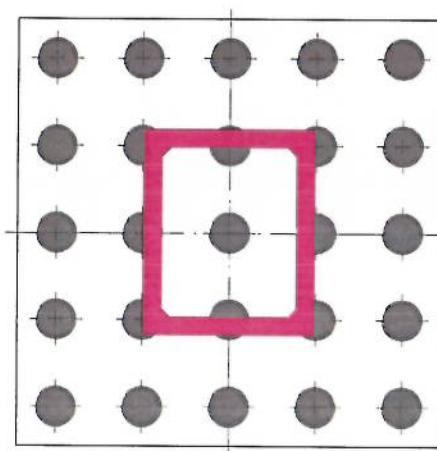


Figura 1- 5 Dimensiones Pila P4

La Pila P1 estará apoyada en una cimentación de 20 pilotes perforados de 2,3-2m de diámetro (sección superior de 2,3m, sección inferior de 2m). Para la Pila P2, la pila del puente será apoyada en una cimentación de 25 pilotes de 2,3-2m de diámetro (sección superior de 2,3m, sección inferior de 2m). Para la Pila P3, la pila del puente será apoyada en una cimentación de 9 pilotes de 2,1-1,8m de diámetro (sección superior de 2,1m, sección inferior de 1,8m). Para la Pila P4, la pila del puente será apoyada en una cimentación de 6 pilotes de 2,1-1,8m de diámetro (sección superior de 2,1m, sección inferior de 1,8m).



a) Cabezal de pilote P1



b) Cabezal de pilote P2

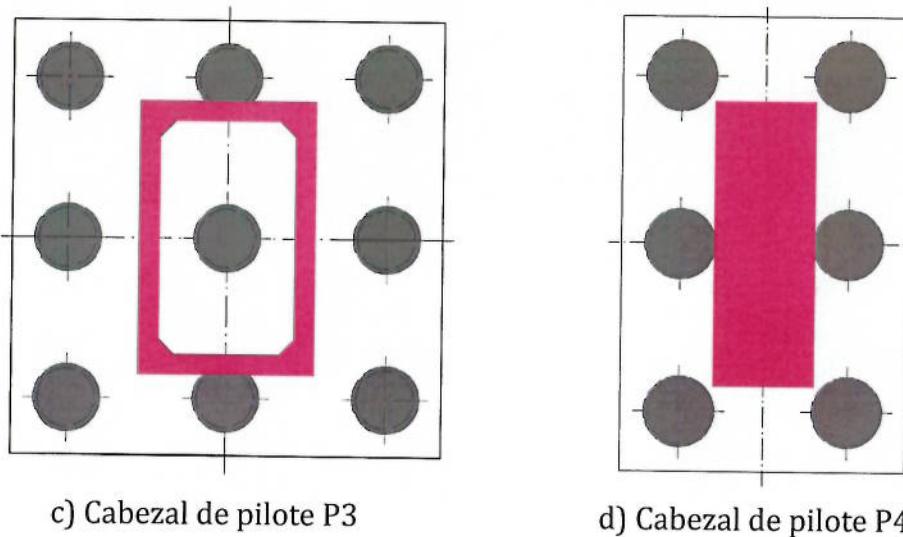


Figura 1- 6 Distribución General de la Cimentación de Pilas

1.3 Distribución de la Superestructura del Puente

La superestructura consiste en dovelas de vigas cajón de hormigón pos-tensado, fundido-en-sitio en con una profundidad variable entre 4,0m~10,5m, formado por dos secciones; luz-P1 tiene una profundidad que varía entre 4,0m~7,0m y luz-P2 tiene una profundidad que varía entre 4,0m~10,5m. El tablero tiene un ancho general de 13,5m y longitudes típicas de las dovelas de 2,0m, 4,0m, 4,5m y 5,0m. La superestructura del Puente Principal será montada empleando el método de voladizos sucesivos balanceados fundidos en sitio con carros de avance con la excepción del vano P4-A1, la cual será construida con un encofrado completo.

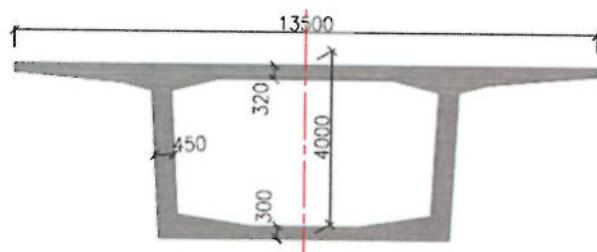


Figura 1- 7 Sección Típica del Tablero del Puente Principal en el vano central.

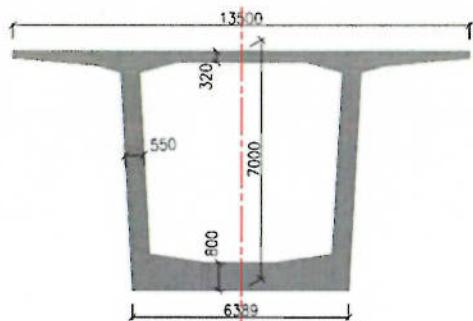


Figura 1- 8 Sección Típica del Tablero del Puente Principal en P1

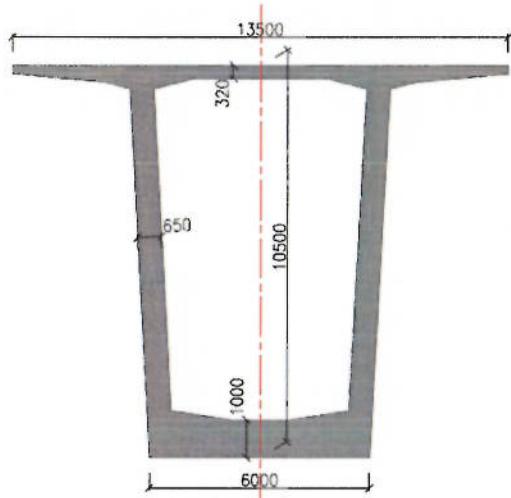


Figura 1- 9 Sección Típica del Tablero del Puente Principal en P2

El tablero será monolítico con las pilas, con la excepción de las ubicaciones de las juntas de dilatación en los dos extremos, apoyadas en las pilas por aisladores mecánicos. Se utilizarán juntas de dilatación tipo modulares para contrarrestar los movimientos de diseño del tablero.

2 Criterios del Rendimiento Sísmico y Entrada de Movimiento Sísmico

2.1 Criterios Sísmicos

Conforme a la «AASHTO LRFD BRIDGE, Design Specifications, 2014» y junto con las características estructurales del proyecto, se puede definir el rendimiento deseado, dicho rendimiento se expresará en términos de niveles de sísmicos: con un sismo de evaluación de seguridad (SEE). La siguiente tabla detalla los criterios de rendimiento:

Tabla 2- 1 Nivel de fortificación sísmica y objetivos de rendimiento

Nivel de Peligro Sísmico	Período de Retorno	Criterios Básicos de Rendimiento
Sismo de Evaluación de Seguridad (SEE)	1035 años	Sin colapsos, daños reparables, acceso limitado para los vehículos de emergencia dentro de 48 horas (elementos estructurales principales:), servicio completo al cabo de mes(es)

2.2 Entrada de Movimiento Sísmico

2.2.1 Espectro de respuesta

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} \quad T < T_a ;$$

$$a = c \quad T_a \leq T \leq T_b ;$$

$$a = qc \quad T > T_b ;$$

Notas: $q = (T_b/T)^r$

Tabla 2- 2 Parámetro del espectro de respuesta

Período	Ratio del amortiguador	a_0	c	T_a	T_b	r
1.035 años	5%	0,61	1,50	0,10	0,56	1,0

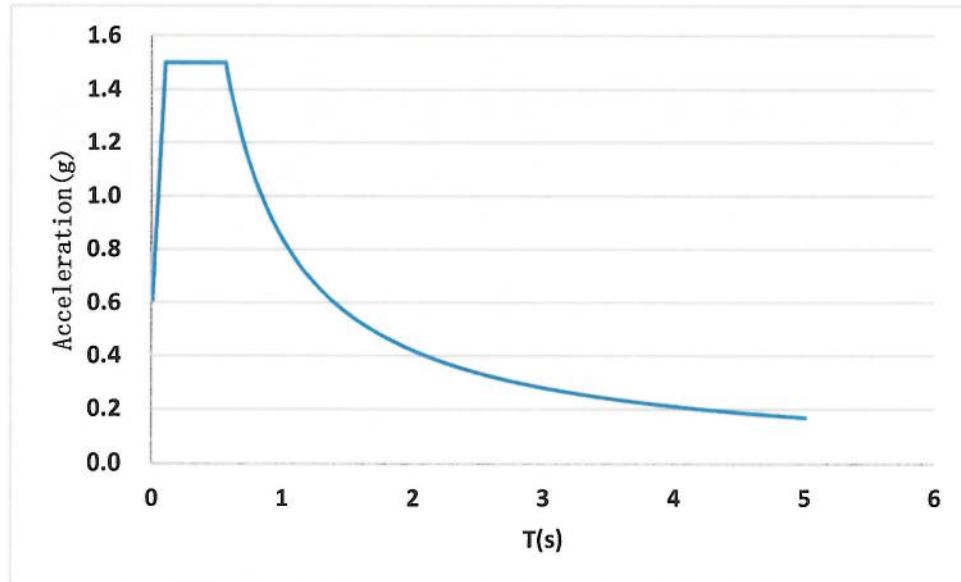


Figura 2- 1 El espectro de respuesta para SEE (ratio del amortiguador =5%)

2.2.2 Curvas Time-History para SEE (TR1035)

Existen 7 curvas para SEE, horizontal y vertical, conforme se detalla a continuación:

1) Curvas Time-History para SEE

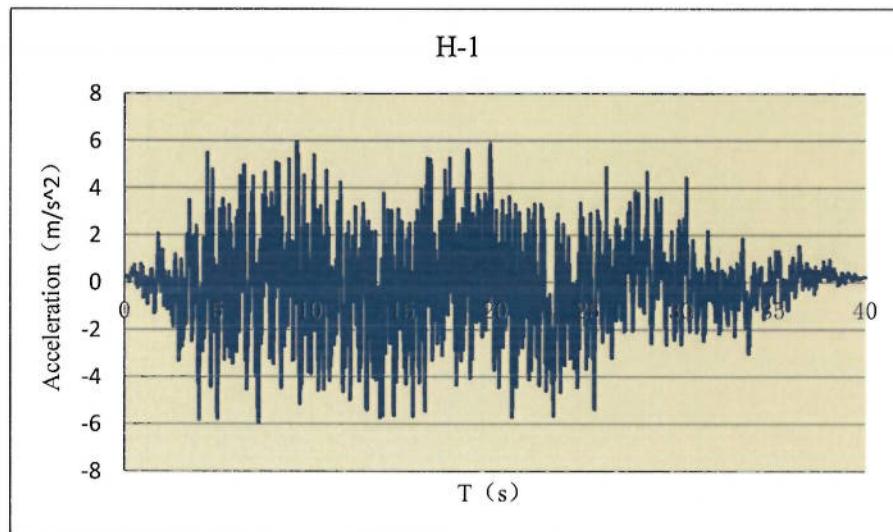


Figura 2- 2 Curvas Time-History en la dirección H-1 (horizontal) para SEE

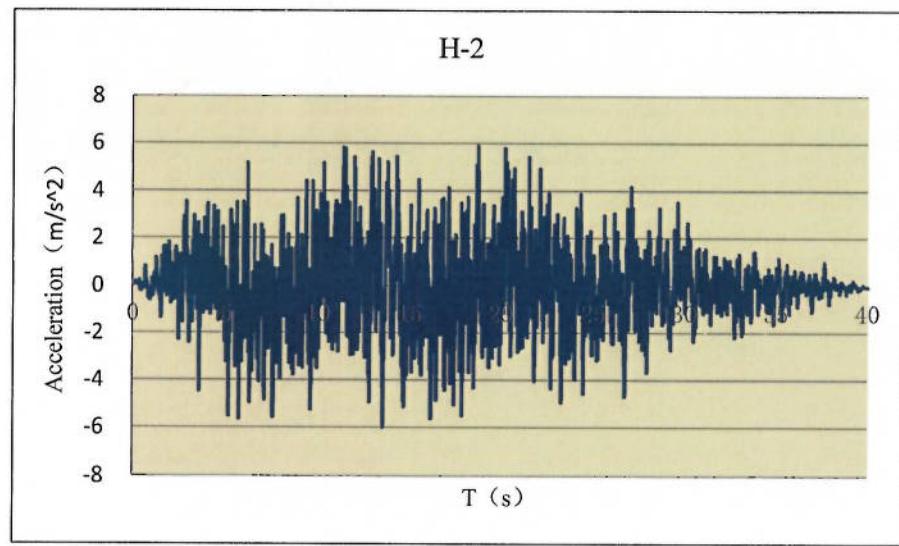


Figura 2- 3 Curvas Time-History en la dirección H-2 (horizontal) para SEE

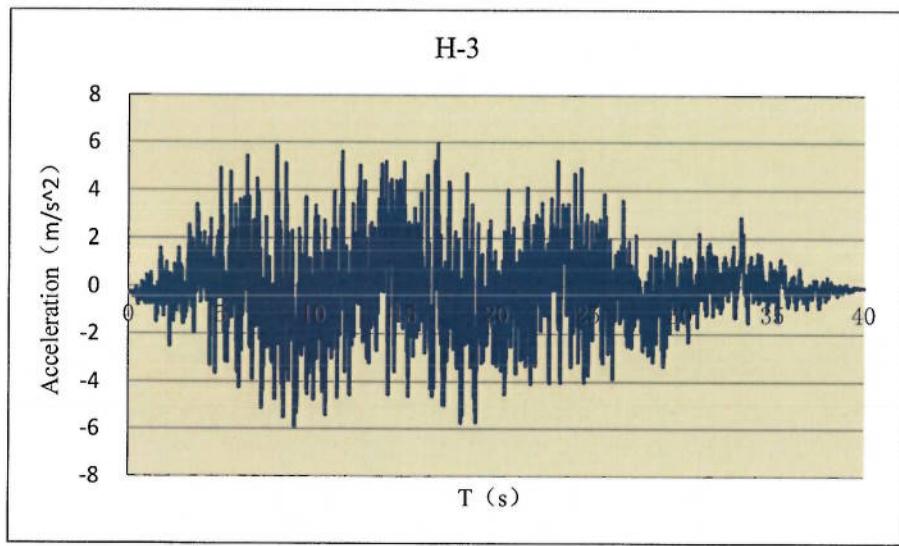


Figura 2- 4 Curvas Time-History en la dirección H-3 (horizontal) para SEE

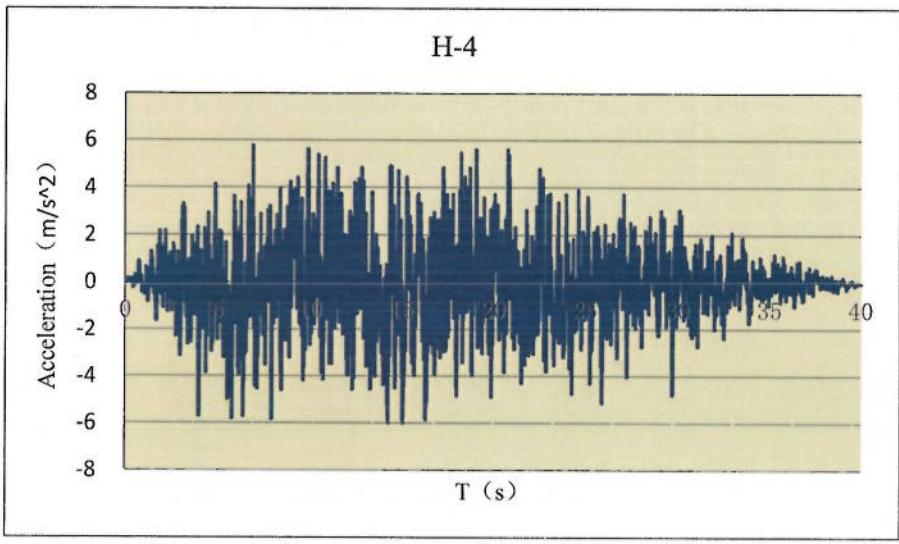


Figura 2- 5 Curvas Time-History en la dirección H-4 (horizontal) para SEE

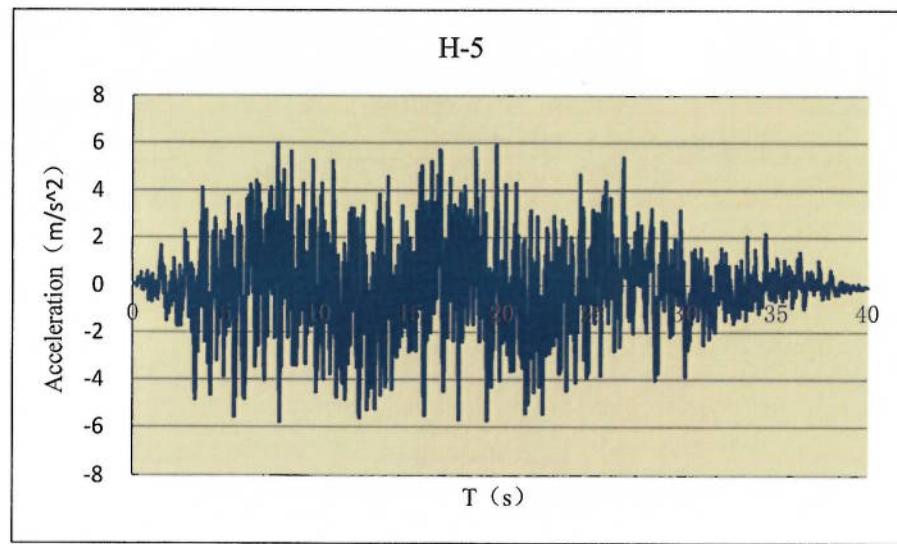


Figura 2- 6 Curvas Time-History en la dirección H-5 (horizontal) para SEE

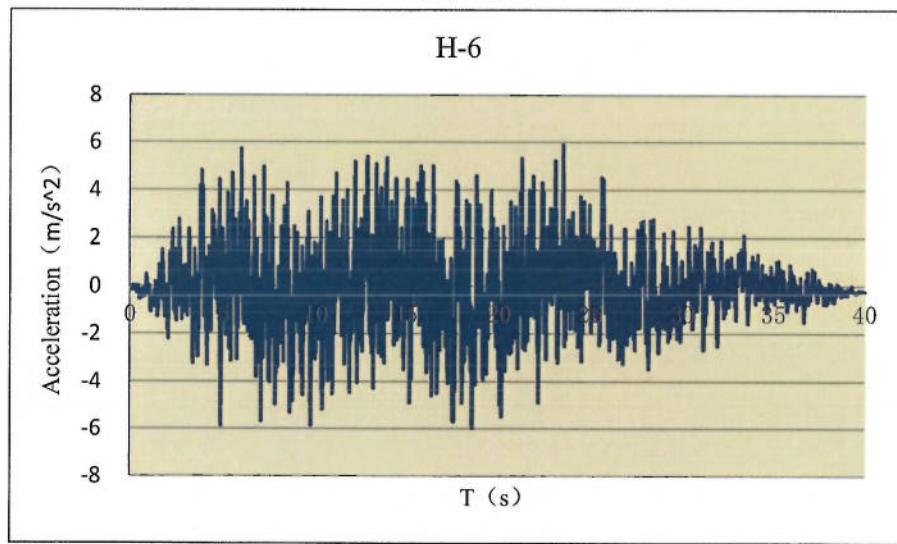


Figura 2- 7 Curvas Time-History en la dirección H-6 (horizontal) para SEE

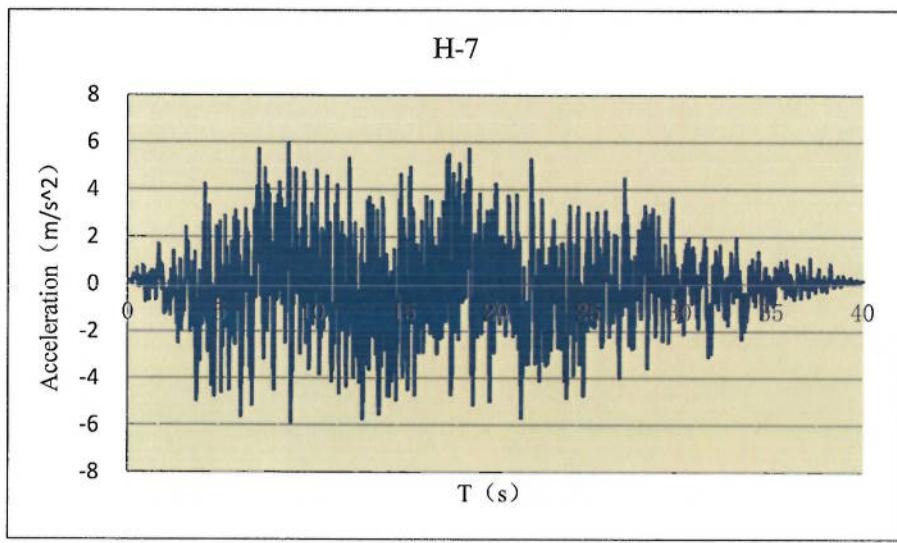


Figura 2- 8 Curvas Time-History en la dirección H-7 (horizontal) para SEE

2) Curvas Time-History en dirección vertical para SEE

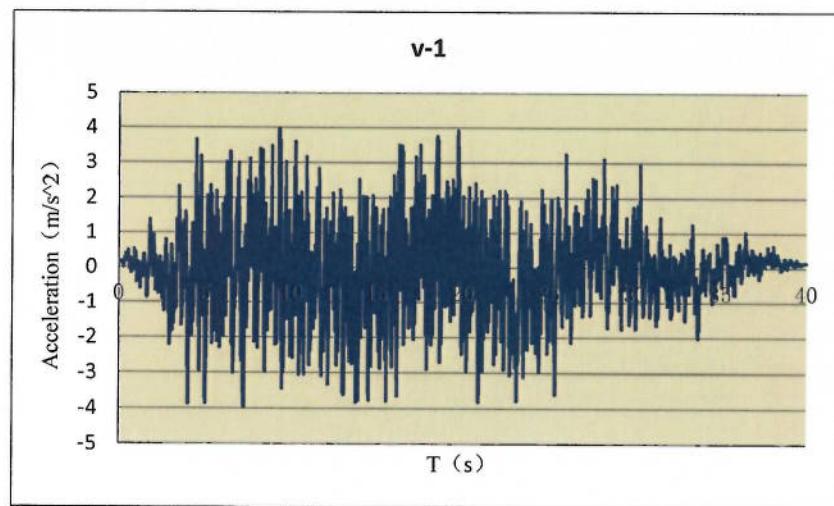


Figura 2- 9 Curvas Time-History en la dirección v-1 (horizontal) para SEE

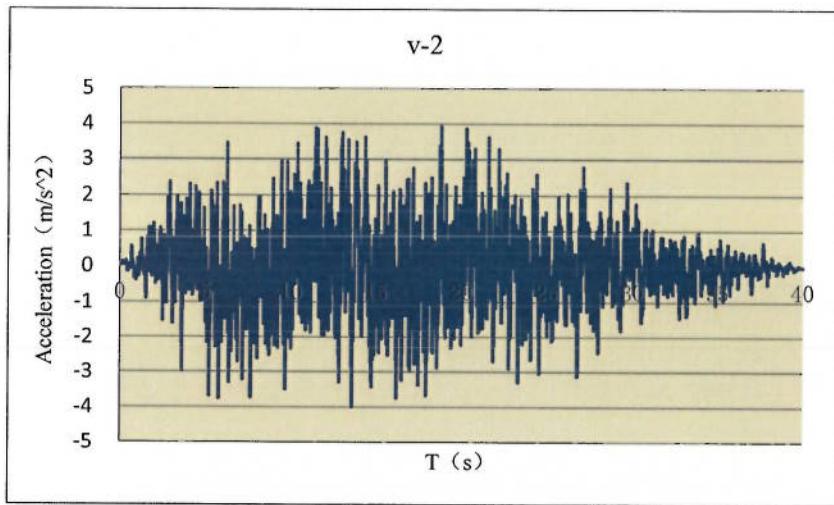


Figura 2- 10 Curvas Time-History en la dirección v-2 (horizontal) para SEE

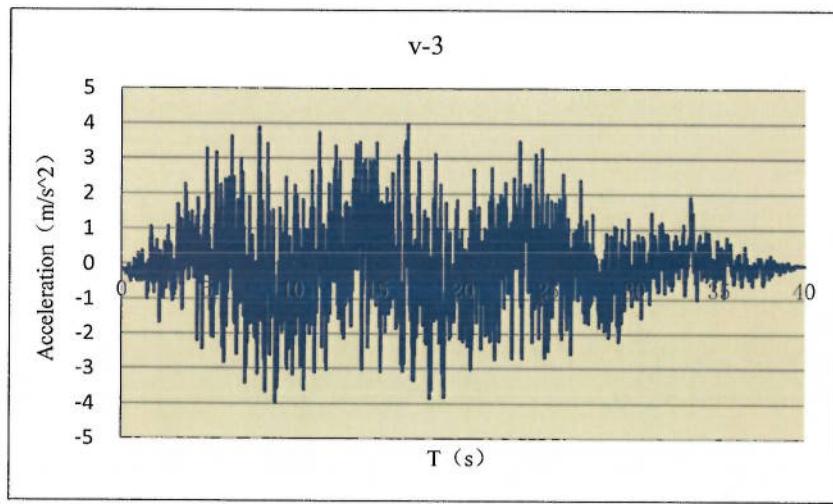


Figura 2- 11 Curvas Time-History en la dirección v-3 (horizontal) para SEE

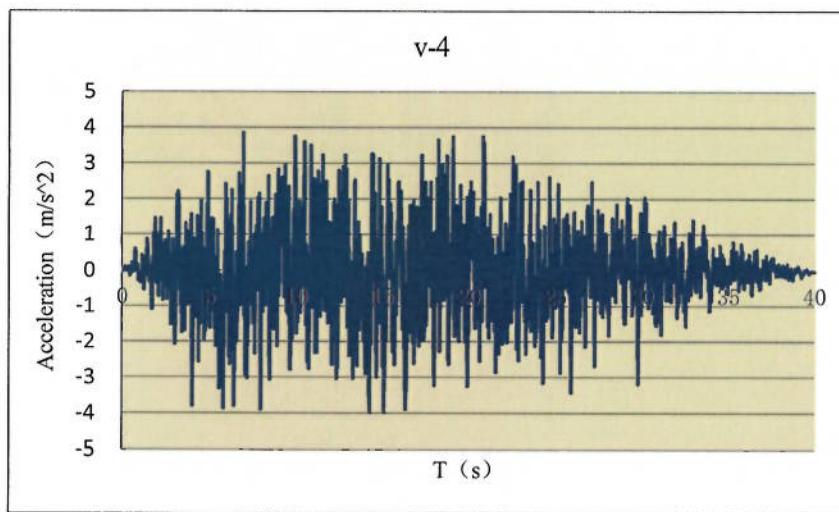


Figura 2- 12 Curvas Time-History en la dirección v-4 (horizontal) para SEE

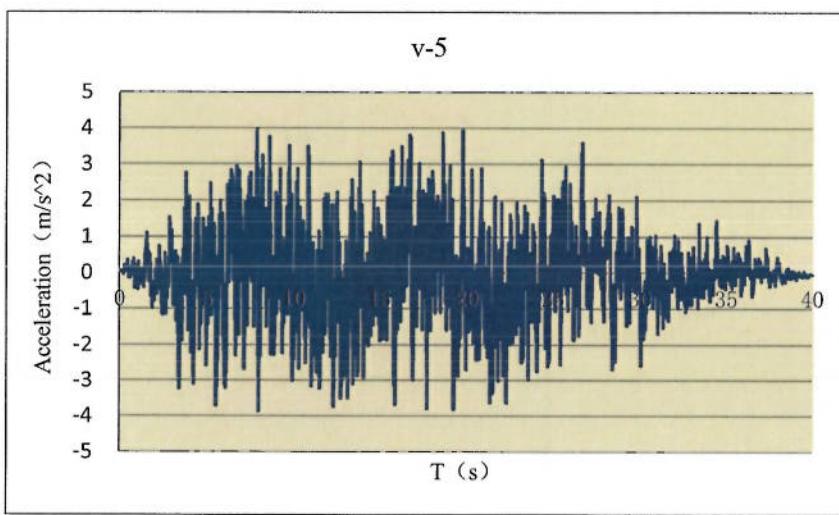


Figura 2- 13 Curvas Time-History en la dirección v-5 (horizontal) para SEE

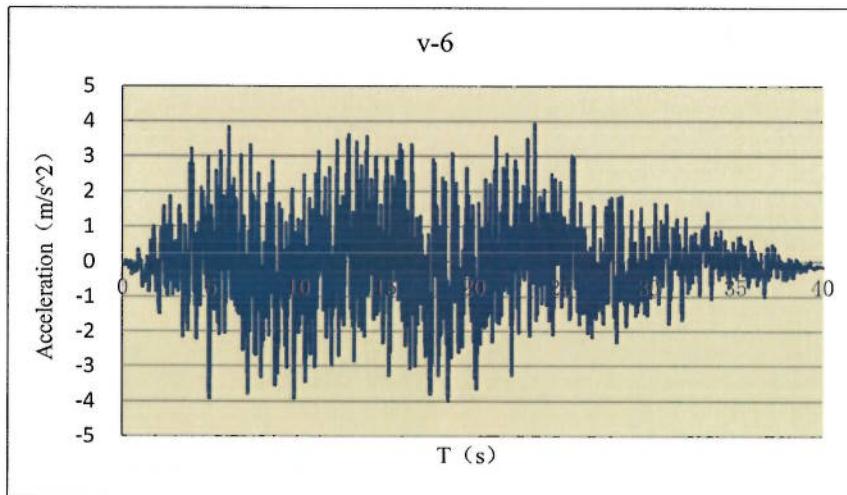


Figura 2- 14 Curvas Time-History en la dirección v-6 (horizontal) para SEE

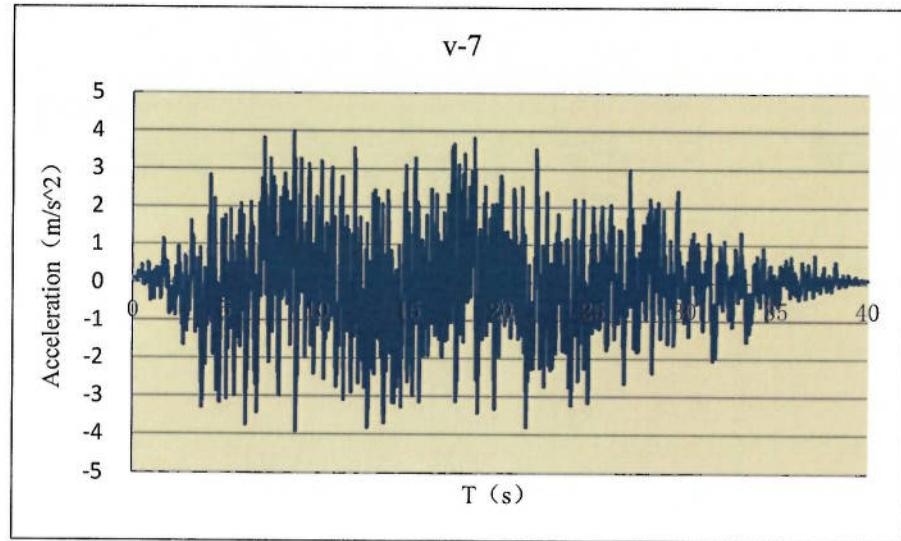


Figura 2- 15 Curvas Time-History en la dirección v-7 (horizontal) para SEE

2.3 Especificaciones Técnicas

- 1) AASHTO LRFD BRIDGE, Design Specifications, 2014.
- 2) AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2012.
- 3) Manual de Diseño Carreteras, MOP001-E 2003.
- 4) Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP 001-F 2002.
- 5) American Concrete Institute.
- 6) American Iron and Steel Institute.
- 7) American Standard of Testing of Materials.
- 8) American National of Standard Institute.
- 9) Normas y Reglamentos emitidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización.

3 Modelo Mecánico

3.1 Modelo dimensional del análisis dinámico

(1) Elemento Estructural

Se utilizó el programa de análisis de elementos finitos SAP 2000 para establecer los modelos de viaducto y puente, se realizó el estudio dinámico estructural y el análisis sísmico de la estructura. El sistema de coordenadas global utiliza los ejes x, y, z representando las direcciones longitudinal, transversal y vertical del puente, respectivamente. El tablero y las pilas se modelan como elementos tipo viga.

Los apoyos verticales y horizontales tienen restricción; la longitud de los Pilotes de P1, P2, P3, P4, es 3 veces el diámetro del pilote, y la consolidación de la cimentación del pilote.

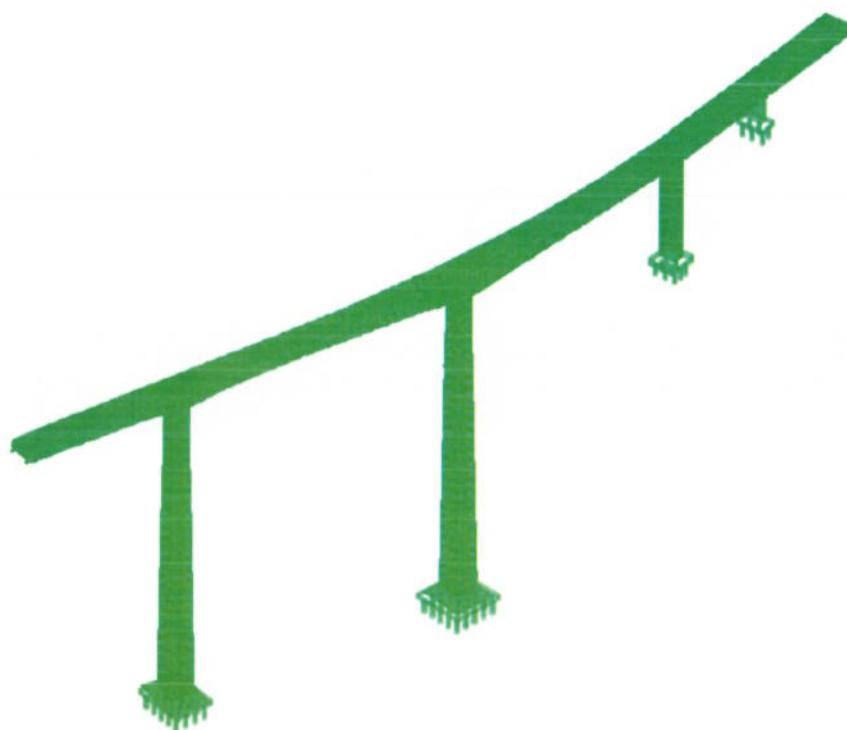


Figura 3- 1 Modelo dimensional del análisis dinámico

(2) Ratio del amortiguador

En el análisis de respuesta sísmica, el ratio del amortiguador seleccionado será de 5% conforme con la 《AASHTO-Guide Specification for LRFD Seismic Bridge

Design,2012》. En el análisis Time-History el ratio del amortiguador será de conformidad con el modelo del amortiguador Rayleigh. El primer modo será el modo de estructura básica, y el segundo, será el modo con la mayor contribución de masa.

3.2 Análisis de Características Dinámicas

En función del modelo dimensional de análisis dinámico del Puente Guayasamín, se estudian las características dinámicas de la estructura así como también su respuesta dinámica. Se utilizaron los métodos iterativos de subespacio para resolver la ecuación característica en el análisis de características dinámicas.

La Tabla 3-1 y Tabla 3-2 detallan las primeras 10 características dinámicas y la calidad del factor de participación. De las mismas se sabe que el ratio efectivo de participación de masa en cada dirección es de más del 90%, por lo tanto el espectro de respuesta cumple con los requerimientos de precisión basados en este modelo.

Tabla 3- 1 Primeros 10 modos

Modo	Período (s)	Frecuencia (Hz)	Características de Vibración
1	4,853	0,206	Vibración longitudinal del tablero
2	4,062	0,246	Vibración transversal del tablero
3	2,122	0,471	Vibración transversal del tablero
4	1,240	0,807	Vibración vertical simétrica positiva del tablero
5	1,123	0,890	Vibración transversal simétrica positiva del tablero
6	0,895	1,118	Vibración vertical simétrica positiva del tablero
7	0,865	1,156	Vibración vertical del tablero
8	0,820	1,220	Vibración transversal del tablero
9	0,696	1,438	Vibración vertical del tablero
10	0,681	1,469	Vibración vertical del tablero

Tabla 3- 2 Ratio efectivo de participación de masa

Modo	Período (s)	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
1	4,853	0,445	0,013	0,000	0,445	0,013	0,000
2	4,062	0,015	0,341	0,000	0,460	0,354	0,000
3	2,122	0,003	0,001	0,000	0,464	0,355	0,000
4	1,240	0,003	0,000	0,001	0,467	0,355	0,001
5	1,123	0,000	0,047	0,000	0,468	0,402	0,001
6	0,895	0,027	0,001	0,000	0,495	0,403	0,001
7	0,865	0,031	0,003	0,035	0,525	0,406	0,035
8	0,820	0,000	0,062	0,002	0,526	0,468	0,037

9	0,696	0,008	0,007	0,006	0,533	0,475	0,043
10	0,681	0,029	0,000	0,059	0,562	0,475	0,103
11	0,648	0,013	0,002	0,002	0,576	0,476	0,105
12	0,630	0,000	0,047	0,000	0,576	0,523	0,105
13	0,462	0,011	0,000	0,036	0,587	0,523	0,141
14	0,459	0,002	0,007	0,002	0,589	0,530	0,143
15	0,431	0,002	0,000	0,003	0,590	0,530	0,146
500	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000

Las características dinámicas de los modos de vibración son como se indica:

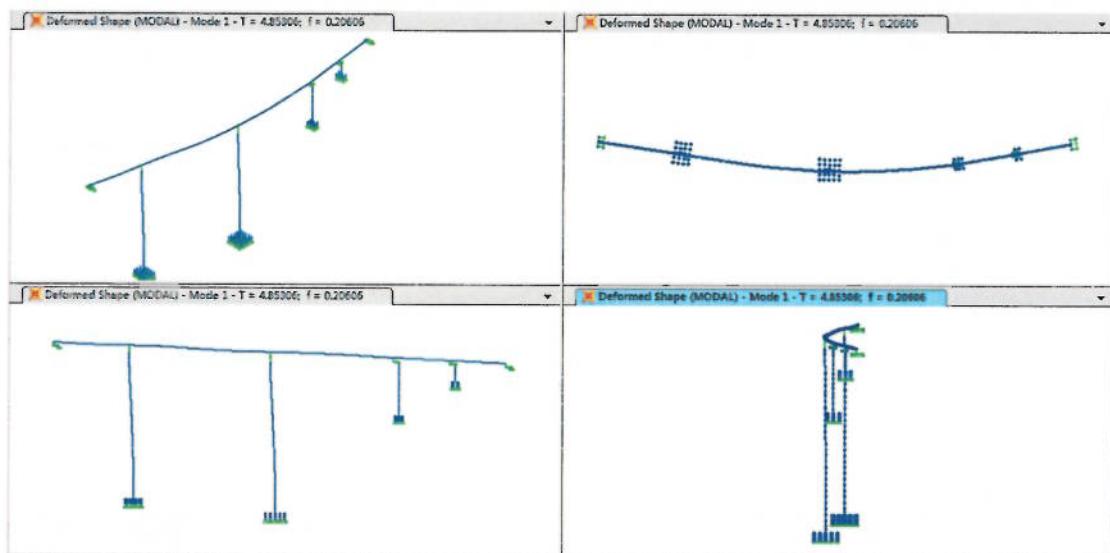


Figura 3- 2 Forma del 1er Modo

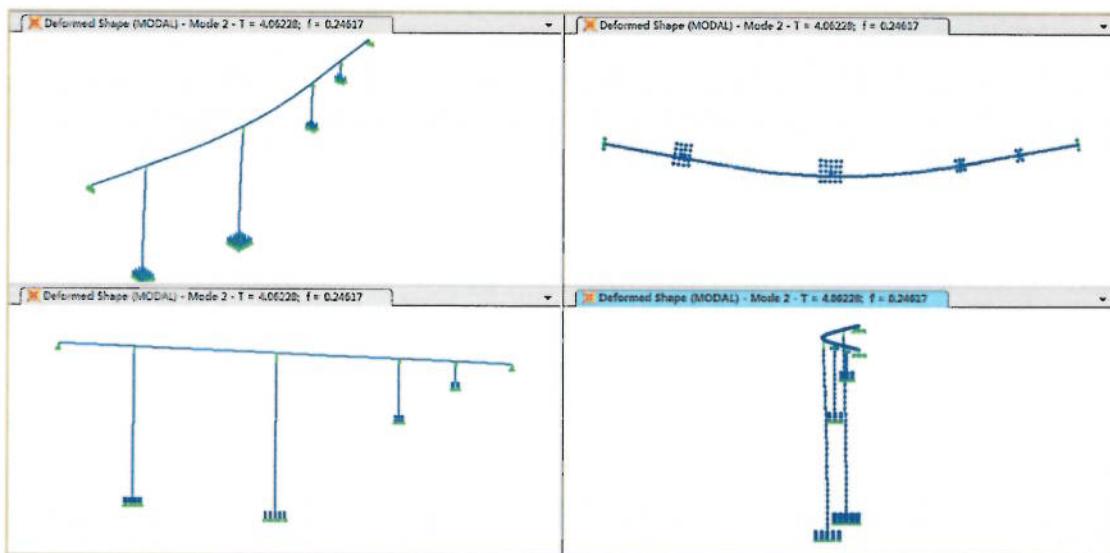


Figura 3- 3 Forma del 2do Modo

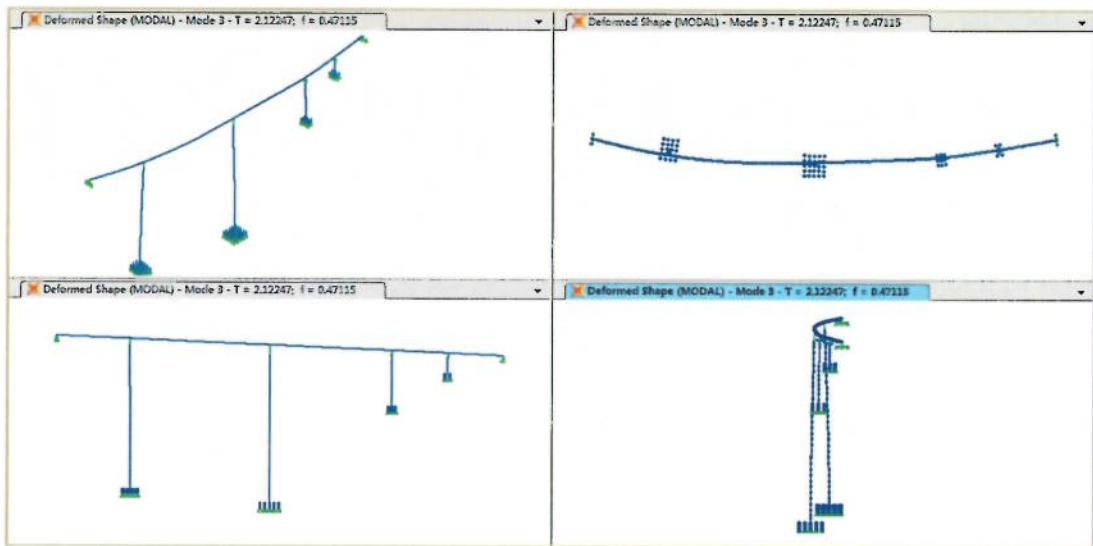


Figura 3- 4 Forma del 3er Modo

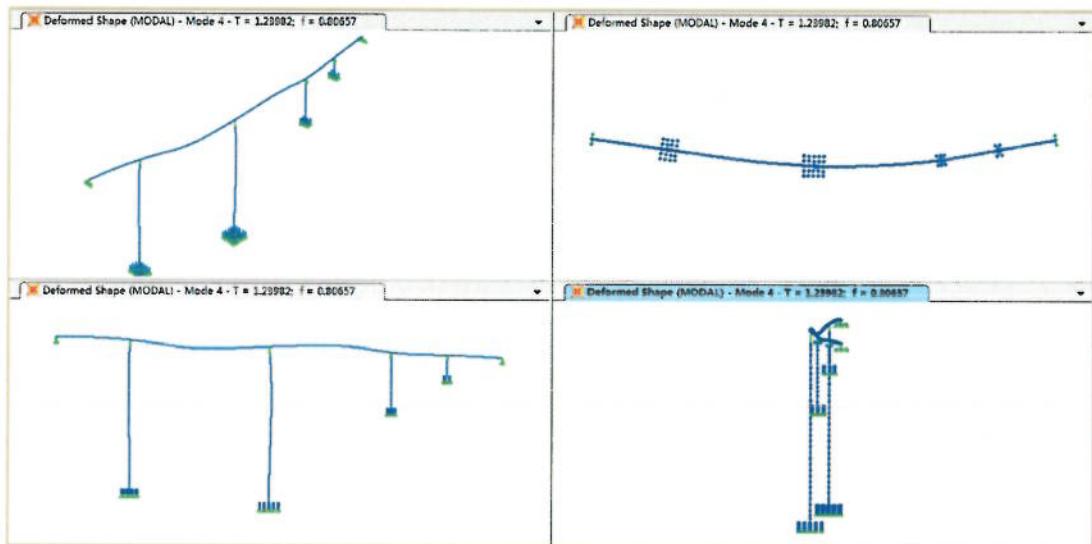


Figura 3- 5 Forma del 4to Modo

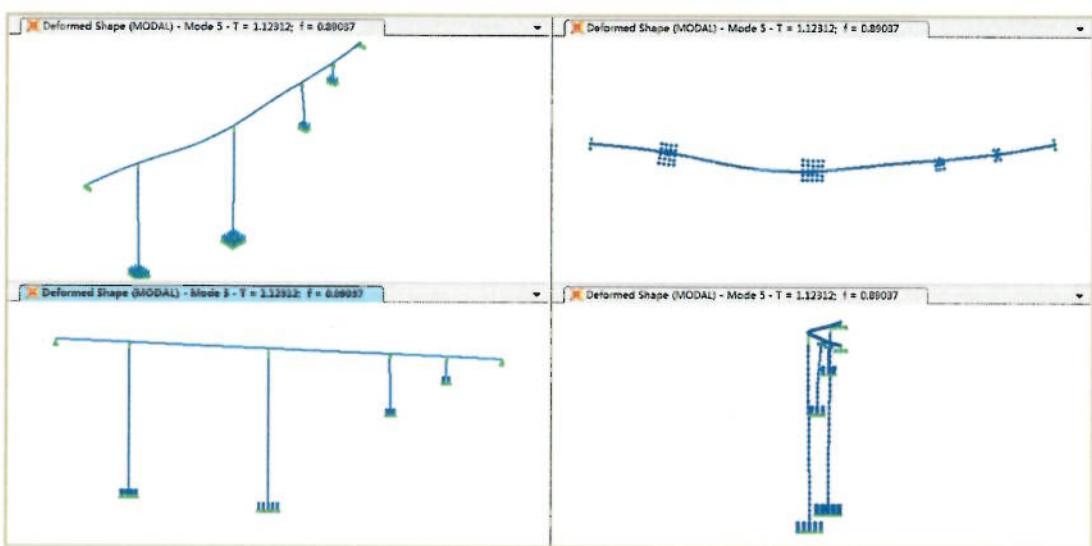


Figura 3- 6 Forma del 5to Modo

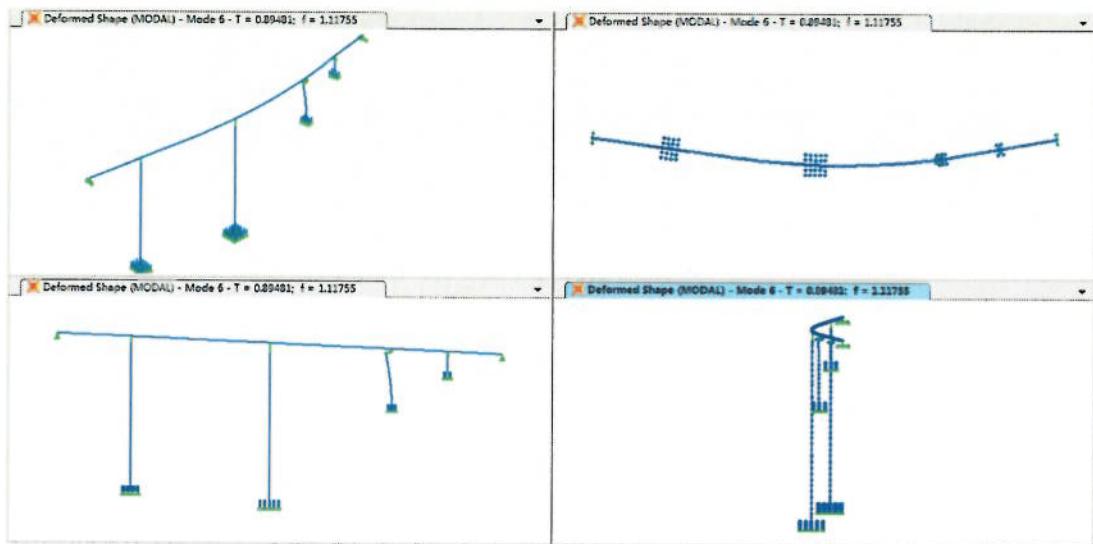


Figura 3- 7 Forma del 6to Modo

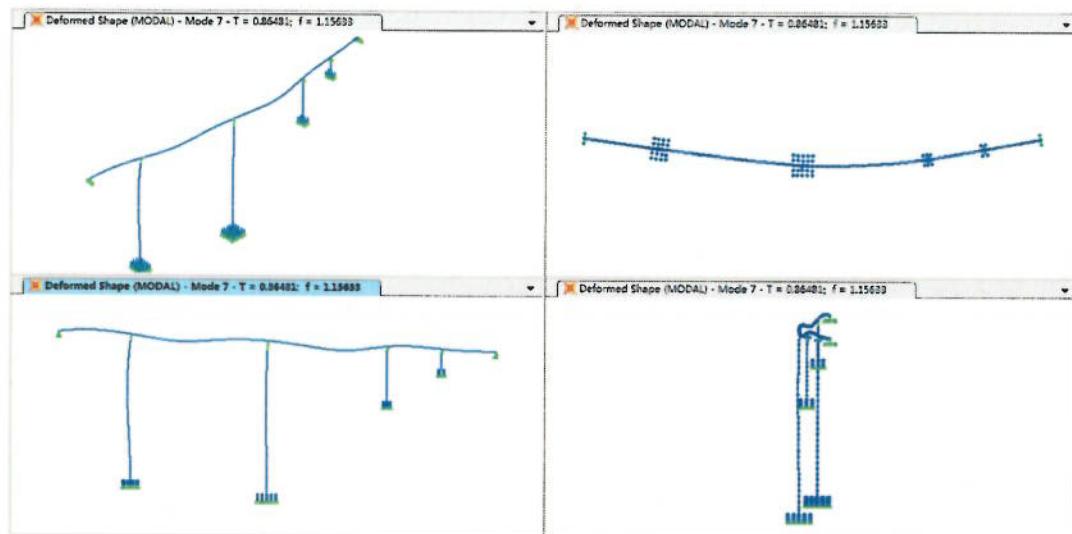


Figura 3- 8 Forma del 7mo Modo



Figura 3- 9 Forma del 8vo Modo

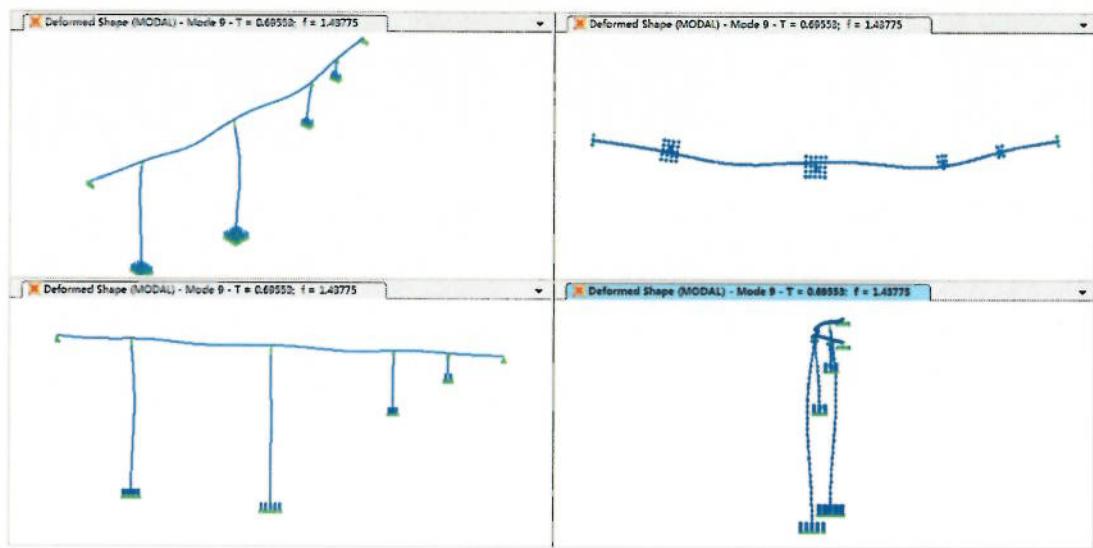


Figura 3- 10 Forma del 9no Modo

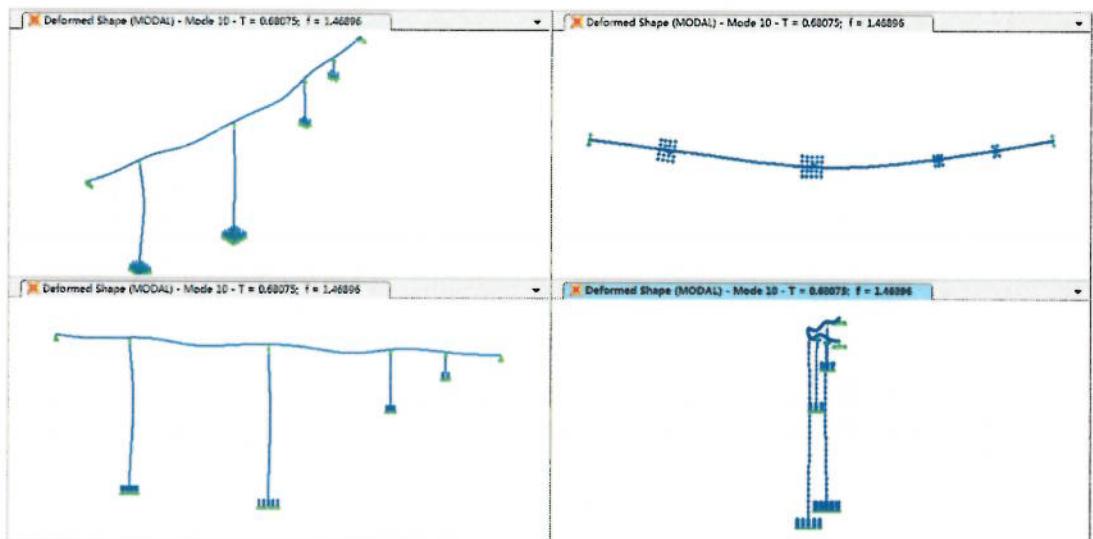


Figura 3- 11 Forma del 10mo Modo

4 Análisis Lineal del espectro de respuesta

De acuerdo al análisis de características dinámicas del modelo del elementos finitos, el nivel de SEE del sitio del puente y el ratio del amortiguador de 5% fueron introducidos en el análisis del espectro de respuesta del modelo, posteriormente se seleccionó los primeros 500 modos para su análisis. La información del sismo se ingresó de tres maneras: 1) Y; 2) Z; 3) X. El método de combinación de resultados del análisis se ingresó de tres formas: 1) $1,0X+0,3Y+0,3Z$; 2) $0,3X+1,0Y+0,3Z$; 3) $0,3X+0,3Y+1,0Z$. La combinación se hizo utilizando el método SRSS.

Las limitaciones de modelación con un programa de elementos finitos incluyen: relajación longitudinal y restricción transversal.

4.1 Localización de elementos principales

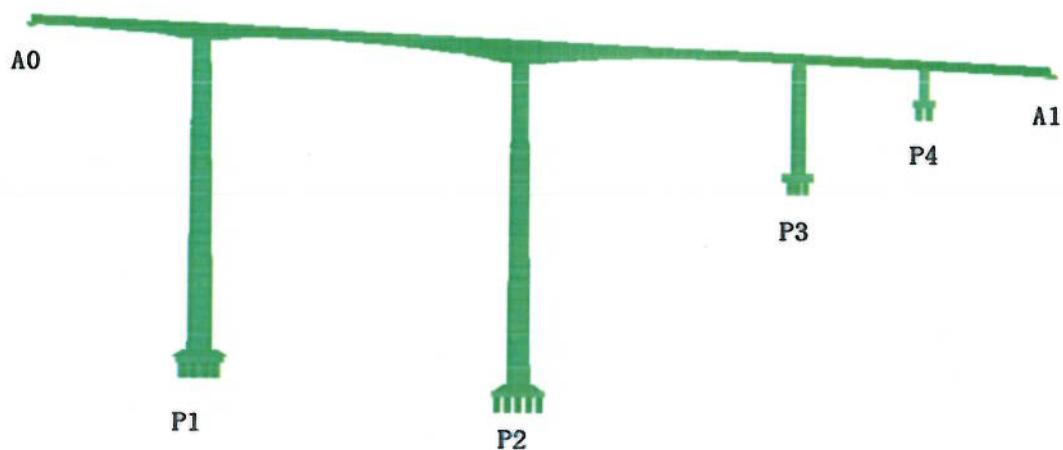


Figura 4- 1 Localización de elementos principales

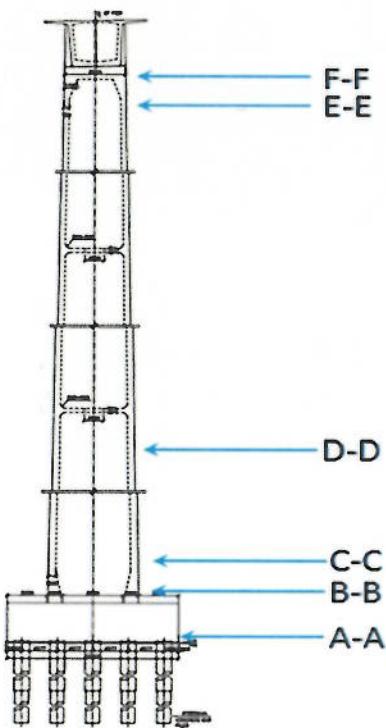


Figura 4- 2 Ubicación de elementos principales en P1 y P2

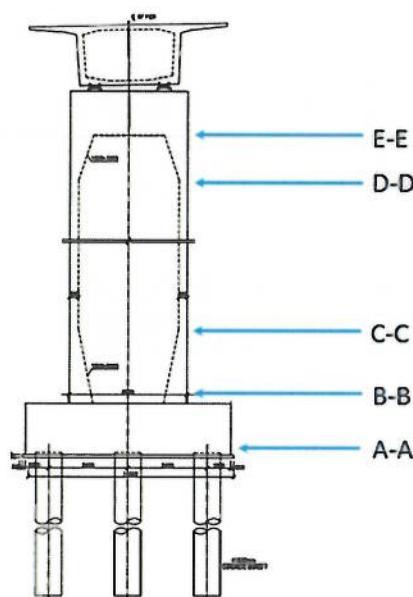


Figura 4- 3 Ubicación de elementos principales en P3

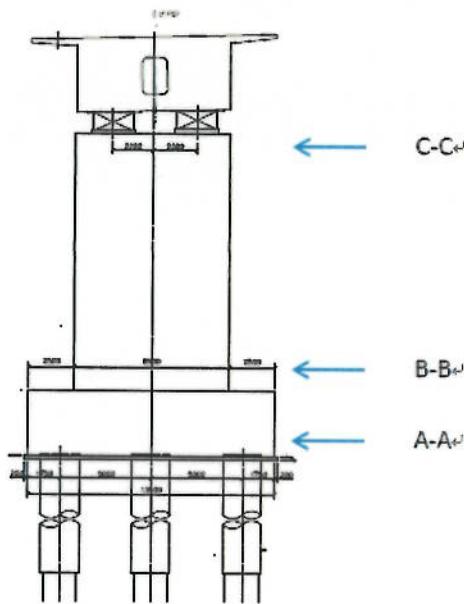


Figura 4- 4 Ubicación de elementos principales en P4

4.2 Respuesta para SEE

4.2.1 Formulas de combinación: $1,0X+0,3Y+0,3Z$

Tabla 4- 1 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante longitudinal	Fuerza cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	14963	26994	7551	37985	1075581
	E-E	15547	27563	7725	52967	1028815
	D-D	33377	42676	15473	966233	2246574
	C-C	36140	51180	19454	1233554	3034132
	B-B	36709	54061	20782	1312992	3255658
	A-A	40628	81456	32952	1428544	3560425
P2	F-F	26546	24427	9078	88795	1166397
	E-E	27119	25048	9306	113711	1121106
	D-D	44799	38710	17836	1287796	2193240
	C-C	47268	46915	20651	1603607	2903957
	B-B	47761	49796	21570	1692234	3105107
	A-A	51374	79495	30844	1812913	3387622
P3	E-E	15905	2114	10049	59835	6348
	D-D	16520	5404	10346	88875	22529
	C-C	19526	15246	11930	525240	483921
	B-B	19780	16274	12229	583781	559219
	A-A	20827	22272	14070	633172	629476
P4	C-C	9223	623	10691	57884	658

	B-B	9902	6965	12490	198658	57890
	A-A	10363	10652	13591	238491	89154

Tabla 4- 2 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	58441	5443	2364	7808	17561
P2	42566	4087	1560	5083	13714
P3	46368	3144	1790	4526	8127
P4	22061	2292	2431	6658	6174

Tabla 4- 3 Fuerza del Aislador

Número de Pila	Número	Fuerza Axial	Fuerza cortante longitudinal	Fuerza cortante transversal
		kN	kN	kN
A0	1	12421	0	2881
	2	15635	0	2892
P3	1	13670	0	4945
	2	8366	0	4941
P4	1	11579	0	5262
	2	13509	0	5262
A1	1	3792	0	1640
	2	3768	0	1639

Tabla 4- 4 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	1,161	0,000
	2	0,000	1,159	0,000
P3	1	0,000	1,209	0,000
	2	0,000	1,208	0,000
P4	1	0,000	1,180	0,000
	2	0,000	1,181	0,000
A1	1	0,000	1,184	0,000
	2	0,000	1,184	0,000

Tabla 4- 5 Desplazamiento del Tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	1,137	0,007	0,000
A1	1,182	0,001	0,000

4.2.2 Formulas de combinación: $0,3X+1,0Y+0,3Z$

Tabla 4- 6 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	12215	14996	14719	82823	602824
	E-E	12790	15347	15011	117600	576897
	D-D	30485	23510	32399	1725714	1236470
	C-C	33241	27030	42479	2271930	1682793
	B-B	33809	28160	45811	2442257	1804482
	A-A	37724	39068	75684	2701527	1965234
P2	F-F	20083	11078	18416	169892	556962
	E-E	20634	11377	18753	223054	536441
	D-D	37952	17451	38933	2288853	1044707
	C-C	40405	20042	47847	2945209	1373888
	B-B	40896	20936	50812	3139500	1463724
	A-A	44503	30197	80620	3419281	1584194
P3	E-E	10174	911	17770	100989	2754
	D-D	10783	2274	18504	151884	9497
	C-C	13770	6383	22660	952174	202345
	B-B	14023	6821	23472	1062497	233848
	A-A	15069	9371	28403	1157809	263317
P4	C-C	6804	335	23882	124122	626
	B-B	7481	3179	27828	447006	26834
	A-A	7943	4841	30241	536055	41020

Tabla 4- 7 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	51620	3937	5024	16745	12807
P2	40649	2028	4116	13726	6775
P3	50333	1325	3748	9826	3431
P4	35202	1040	5404	14782	2798

Tabla 4- 8 Fuerza del Aislador

Número de Pila	Número	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal
		kN	kN	kN
A0	1	23511	0	5581
	2	23322	0	5592
P3	1	15381	0	8692
	2	13114	0	8684
P4	1	22272	0	11756
	2	22600	0	11758
A1	1	7326	0	3587
	2	7291	0	3584

Tabla 4- 9 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	0,644	0,000
	2	0,000	0,603	0,000
P3	1	0,000	0,536	0,000
	2	0,000	0,537	0,000
P4	1	0,000	0,524	0,000
	2	0,000	0,524	0,000
A1	1	0,000	0,526	0,000
	2	0,000	0,526	0,000

Tabla 4- 10 Desplazamiento del Tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	0,609	0,003	0,000
A1	0,525	0,000	0,000

4.2.3 Formulas de combinación: $0,3X+0,3Y+1,0Z$

Tabla 4- 11 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	33717	18242	5432	30124	604362
	E-E	35620	18501	5523	42231	576464
	D-D	94377	27351	11505	633175	1005047
	C-C	103551	31346	14779	829942	1539214

	B-B	105443	32378	15857	889960	1684480
	A-A	118490	41644	25569	979366	1873041
P2	F-F	51372	9369	7319	91305	443954
	E-E	53179	9613	7430	108680	428386
	D-D	110446	15326	14614	862202	797269
	C-C	118600	17992	17415	1117193	1084684
	B-B	120236	18876	18318	1190446	1164322
	A-A	132250	27920	27368	1292554	1272549
P3	E-E	23349	700	6661	42797	2134
	D-D	25371	1774	6932	60696	7421
	C-C	35303	4994	8371	353301	158470
	B-B	36146	5333	8630	394146	183132
	A-A	39629	7306	10200	429080	206159
P4	C-C	17885	222	8318	43978	303
	B-B	20142	2342	9654	155183	19574
	A-A	21679	3577	10469	185972	30067

Tabla 4- 12 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m
	34955	2871	1739	5777	9117
P1	24129	1521	1379	4555	5074
P3	26263	1032	1323	3420	2668
P4	16384	769	1867	5106	2071

Tabla 4- 13 Fuerza del Aislador

Número de Pila	Número	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal
		kN	kN	kN
		12096	0	2057
A0	1	12734	0	2068
	2	16069	0	3260
P3	1	11971	0	3257
	2	14968	0	4096
P4	1	15226	0	4097
	2	4546	0	1252
A1	1	4517	0	1251
	2			

Tabla 4- 14 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	0,432	0,000
	2	0,000	0,422	0,000
P3	1	0,000	0,418	0,000
	2	0,000	0,418	0,000
P4	1	0,000	0,403	0,000
	2	0,000	0,403	0,000
A1	1	0,000	0,407	0,000
	2	0,000	0,407	0,000

Tabla 4- 15 Desplazamiento del Tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	0,412	0,002	0,000
A1	0,405	0,000	0,000

5 Análisis Lineal Time-History

De acuerdo al análisis de características dinámicas del modelo del elementos finitos, el nivel de SEE del sitio del puente y las curvas fueron introducidas en dos maneras: 1) longitudinal con vertical; 2) horizontal con vertical. El método del análisis se basa en el método integral de modo lineal, el ratio del amortiguador será de conformidad con el modelo del amortiguador Rayleigh. El primer modo será el modo de la estructura básica, y el segundo modo es el modo con mayor contribución de masa. Existen 7 ondas en cada dirección, y se debe seleccionar el valor promedio de las 7 para la respuesta sísmica final. Las limitaciones de modelación con elementos finitos incluyen: relajación longitudinal y restricción transversal.

5.1 Localización de elementos principales

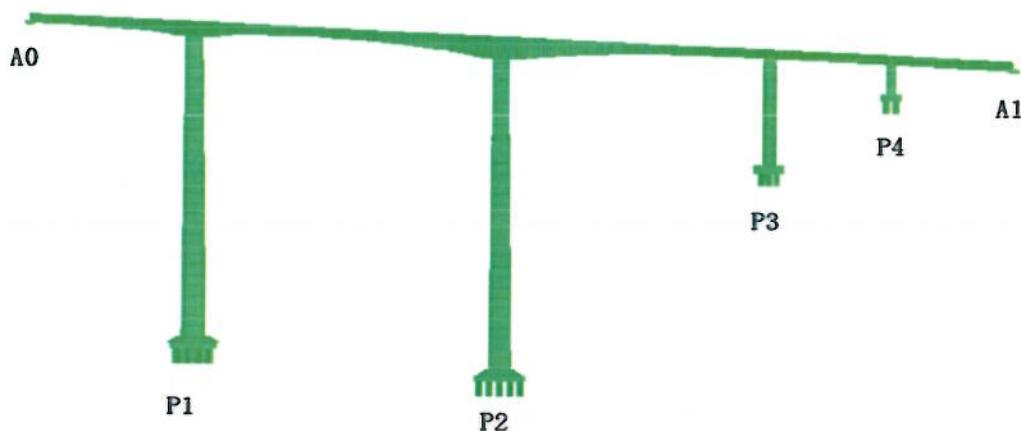


Figura 5- 1 Localización de elementos principales

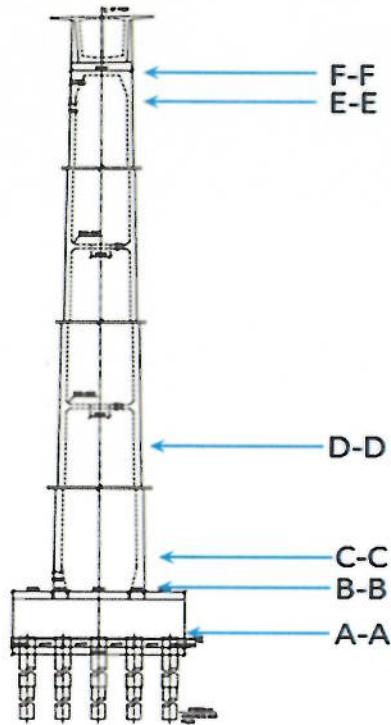


Figura 5- 2 Ubicación de elementos principales en P1 y P2

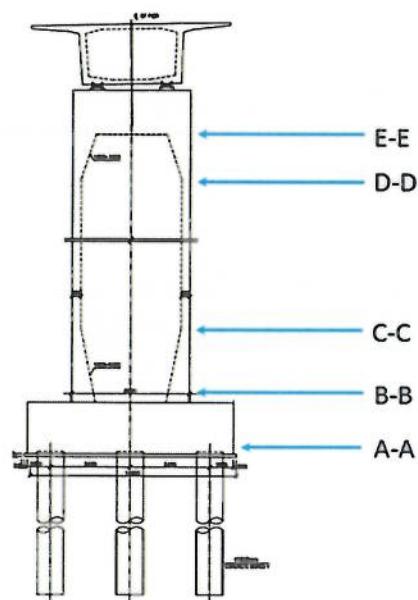


Figura 5- 3 Ubicación de elementos principales en P3

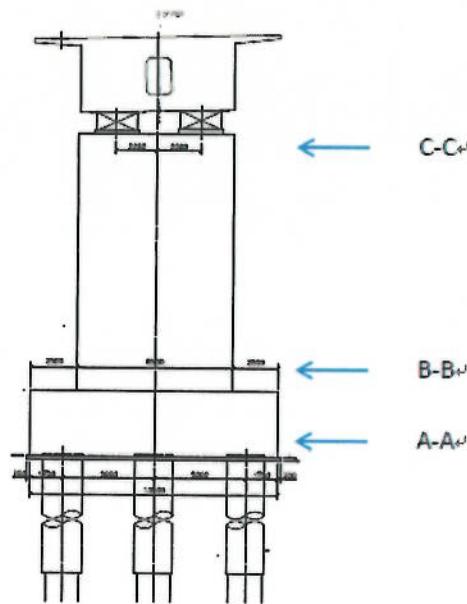


Figura 5- 4 Ubicación de elementos principales en P4

5.2 Respuesta longitudinal y vertical

Tabla 5- 1 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	18568	22178	2293	14907	952395
	E-E	19481	22611	2335	15578	918883
	D-D	48562	40154	5151	341891	2014198
	C-C	55426	49213	6085	442723	2765183
	B-B	57433	51900	6391	471232	2985626
	A-A	73823	73889	9377	511289	3315076
P2	F-F	26038	22627	2892	38900	1051072
	E-E	26926	23190	2880	46323	1009146
	D-D	55317	37288	4855	360589	2020877
	C-C	61888	45085	5103	458784	2739274
	B-B	63854	47579	5152	484107	2940201
	A-A	80914	70838	5636	515549	3239547
P3	E-E	12745	1854	3008	18435	5563
	D-D	13263	4715	3076	26718	19705
	C-C	17038	12219	3231	150645	393896
	B-B	17787	13067	3260	166425	450034
	A-A	21469	17889	3526	178984	503217
P4	C-C	11537	359	3433	15784	320
	B-B	13895	4586	4012	60820	37062
	A-A	15669	7449	4412	73600	58985

Tabla 5- 2 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN·m	kN·m
P1	49053	4406	755	2474	13603
P2	33362	3441	348	1090	11226
P3	26957	2484	439	1095	6230
P4	11730	1670	796	2198	4573

Tabla 5- 3 Fuerza del Aislador

Número de Pila			Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal
			kN	kN	kN
A0	1	máx	6009	0	1020
		min	-5824	0	-994
	2	máx	6038	0	989
		min	-5841	0	-986
P3	1	máx	5997	0	1351
		min	-6169	0	-1351
	2	máx	5991	0	1350
		min	-6161	0	-1351
P4	1	máx	6121	0	1551
		min	-6077	0	-1606
	2	máx	5803	0	1552
		min	-6199	0	-1606
A1	1	máx	2326	0	689
		min	-2435	0	-598
	2	máx	675	0	688
		min	-629	0	-598

Tabla 5- 4 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	0,993	0,000
	2	0,000	0,999	0,000
P3	1	0,000	1,086	0,000
	2	0,000	1,087	0,000
P4	1	0,000	1,023	0,000
	2	0,000	1,025	0,000
A1	1	0,000	1,025	0,000
	2	0,000	1,024	0,000

Tabla 5- 5 Desplazamiento del Tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	0,978	0,006	0,000
A1	1,023	0,001	0,000

5.3 Respuesta transversal y vertical

Tabla 5- 6 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	16698	7831	12539	69912	211139
	E-E	17589	7920	12827	98734	198312
	D-D	46947	10959	29543	1612158	318796
	C-C	54001	11895	37468	2163474	544877
	B-B	56075	12003	39957	2333169	604504
	A-A	72631	13117	61592	2587829	678339
P2	F-F	25657	2074	16501	156626	93124
	E-E	26575	2080	16670	206094	90350
	D-D	55974	2859	34391	1965353	167416
	C-C	62701	3027	42296	2635633	218412
	B-B	64667	3064	44865	2834880	231451
	A-A	81907	3569	68443	3119856	247229
P3	E-E	10429	307	17718	88803	986
	D-D	11420	688	18749	141237	2988
	C-C	17199	1677	22152	943159	54794
	B-B	18047	1800	22849	1048131	62439
	A-A	22061	2484	26769	1138071	69793
P4	C-C	10024	118	18648	110815	427
	B-B	12478	845	21813	360734	7236
	A-A	14342	1343	23954	431202	11205

Tabla 5- 7 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	33580	2233	4411	14583	7435
P2	29252	721	3596	11828	2473
P3	43062	349	3440	8678	877
P4	27690	300	4332	11870	817

Tabla 5- 8 Fuerza del Aislador

Número de Pila			Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal
			kN	kN	kN
A0	1	máx	18914	0	5115
		min	-18976	0	-5133
	2	máx	18700	0	5013
		min	-19109	0	-5004
P3	1	máx	11476	0	7319
		min	-11532	0	-7690
	2	máx	8552	0	7312
		min	-8901	0	-7683
P4	1	máx	16163	0	8939
		min	-16011	0	-8256
	2	máx	19750	0	8940
		min	-19501	0	-8258
A1	1	máx	4340	0	3378
		min	-4179	0	-3555
	2	máx	6860	0	3376
		min	-7022	0	-3553

Tabla 5- 9 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	0,149	0,000
	2	0,000	0,108	0,000
P3	1	0,000	0,147	0,000
	2	0,000	0,133	0,000
P4	1	0,000	0,139	0,000
	2	0,000	0,134	0,000
A1	1	0,000	0,135	0,000
	2	0,000	0,138	0,000

Tabla 5- 10 Desplazamiento del tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	0,123	0,001	0,000
A1	0,137	0,000	0,000

6 Análisis de parámetros del amortiguador longitudinal

6.1 Condición de análisis del parámetros

Para mejorar el problema de la tensión estructural y el desplazamiento del tablero del Puente Guayasamín se han colocado amortiguadores longitudinales en los extremos del tablero.

Para definir los parámetros razonables del amortiguador se estableció el nivel de SEE y el análisis paramétrico de la constante de amortiguamiento mediante el método de análisis No Lineal Time-History. Se indica la condición del análisis de estos parámetros en la Tabla 6-1. Se compara la fuerza interna de la pila inferior, el desplazamiento de la pila superior, el desplazamiento del tablero, la, fuerza de amortiguamiento, etc. Existen dos amortiguadores en cada extremo del tablero.

Tabla 6- 1 Condición de análisis de parámetros

Coeficiente de amortiguamiento	0	3000	6000	9000	12000	15000
Exponente de amortiguamiento	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

6.2 Resultados del análisis de parámetros

La relación entre los diferentes parámetros de amortiguamiento y las secciones o elementos principales de la estructura, se muestran en la siguiente figura.

De la Figura 6- 1 sabemos que la fuerza axial de la Pila P1 disminuye con el incremento de la constante de amortiguamiento; la fuerza axial de la Pila P2 incrementa con el incremento de la constante de amortiguamiento; la fuerza axial de las Pilas P3 y P4 tienen un efecto mínimo con el incremento de la constante de amortiguamiento, por lo tanto esta constante no marca gran diferencia en la fuerza axial de la pila.

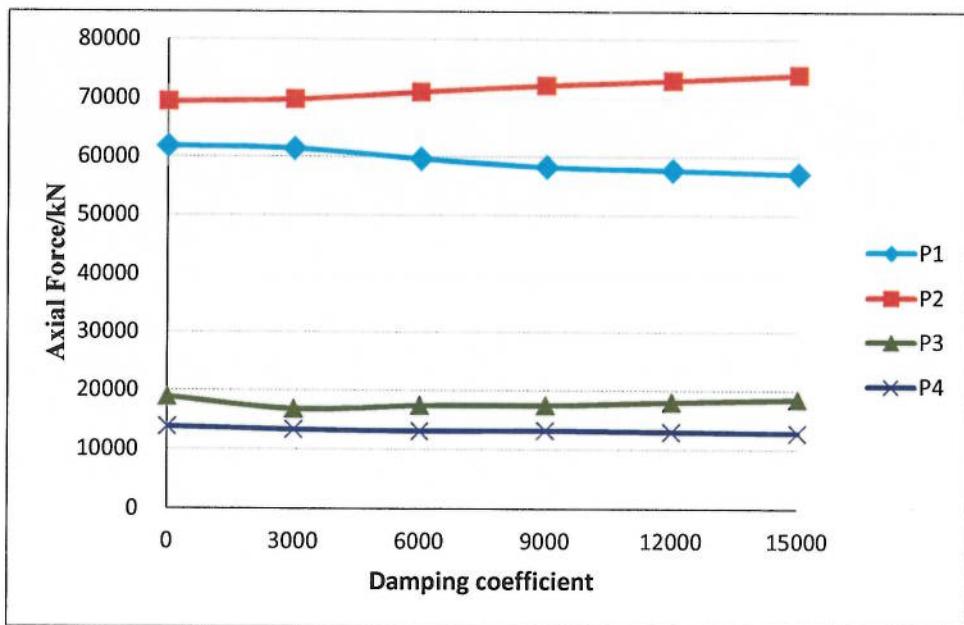


Figura 6- 1 Relación entre los parámetros del amortiguador y la fuerza axial de la parte inferior de la pila

De la Figura 6- 2 sabemos que la fuerza cortante longitudinal del inferior de las Pilas P1 y P2 disminuye con el incremento de la constante de amortiguamiento. Cuando la constante de amortiguamiento llega a 12000, el corte de la pila muestra una tendencia incremental. El cortante longitudinal de las Pilas P3 y P4 tiene un efecto menor con el incremento de la constante de amortiguamiento.

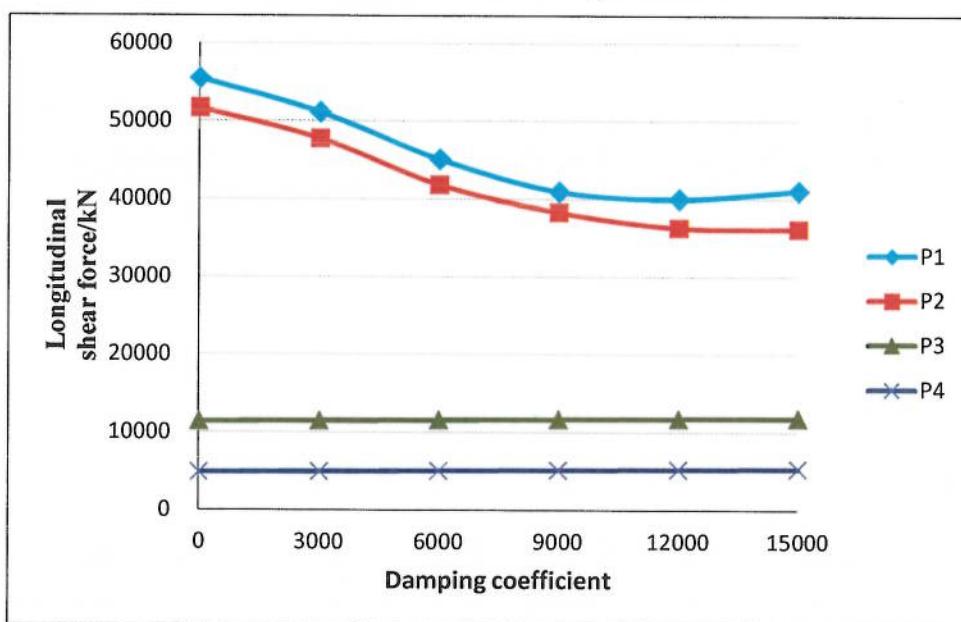


Figura 6- 2 Relación entre los parámetros del amortiguador y la fuerza de corte longitudinal en la parte inferior de la pila

De la Figura 6- 3 observamos que el momento longitudinal del inferior de las Pilas P1 y P2 disminuye con el incremento de la constante de amortiguamiento. Cuando la constante de amortiguamiento alcanzó 12000, el momento de la pila muestra cierta tendencia de decrecimiento. El momento longitudinal de las Pilas P3 y P4 tiene ha sido afectado de menor manera con el incremento de la constante de amortiguamiento.

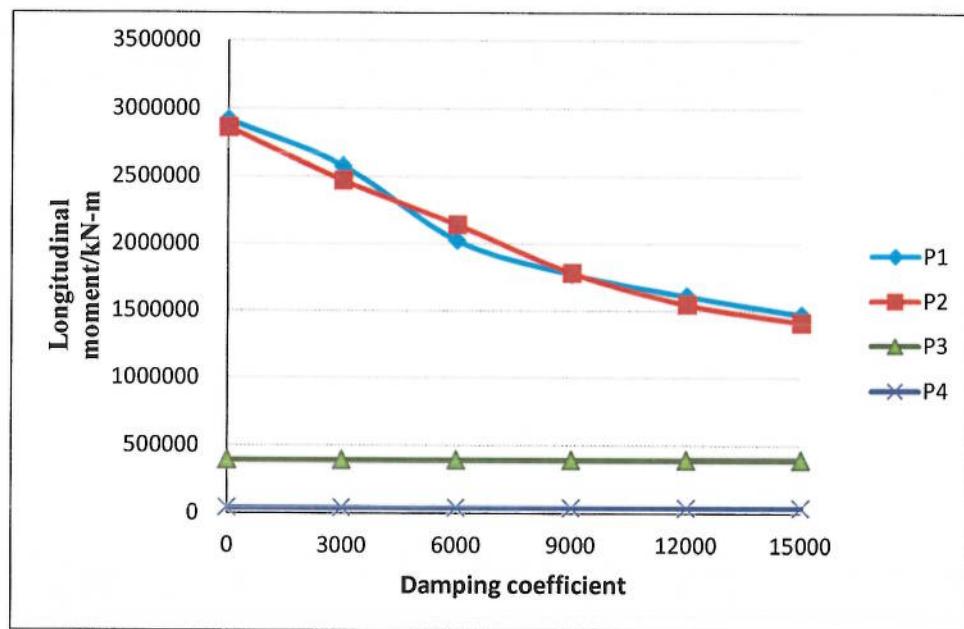


Figura 6- 3 Relación entre los parámetros del amortiguador y el momento Longitudinal del inferior de la pila

De la Figura 6- 4 podemos ver que el desplazamiento del tablero disminuye con el incremento de la constante de amortiguamiento. Cuando la constante de amortiguamiento alcanzó 12000, el desplazamiento del tablero empezó a disminuir.

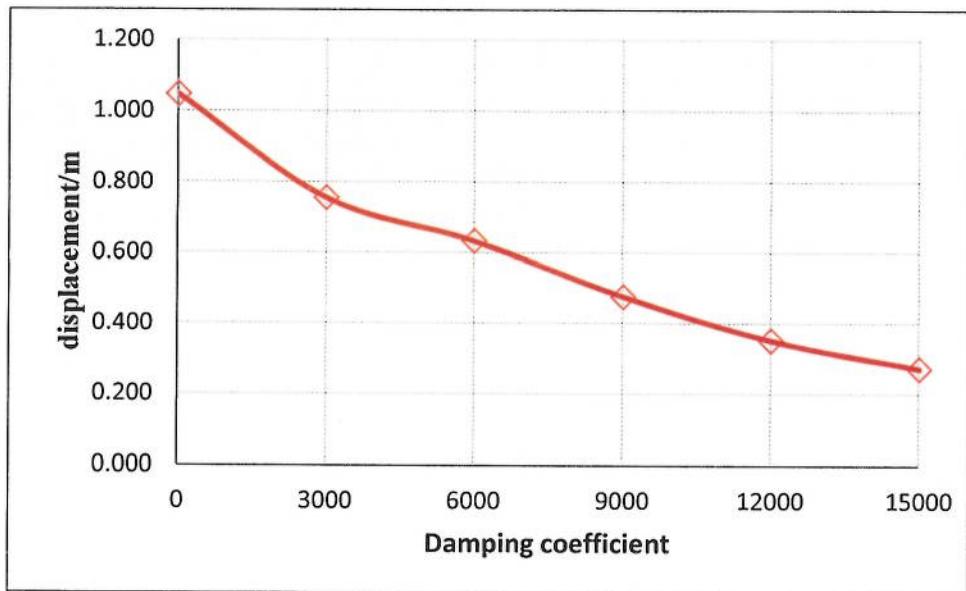


Figura 6- 4 Relación entre los parámetros del amortiguador y el desplazamiento del tablero

De la Figura 6- 5 vemos que el desplazamiento del Aislador disminuye con el incremento de la constante de amortiguamiento.

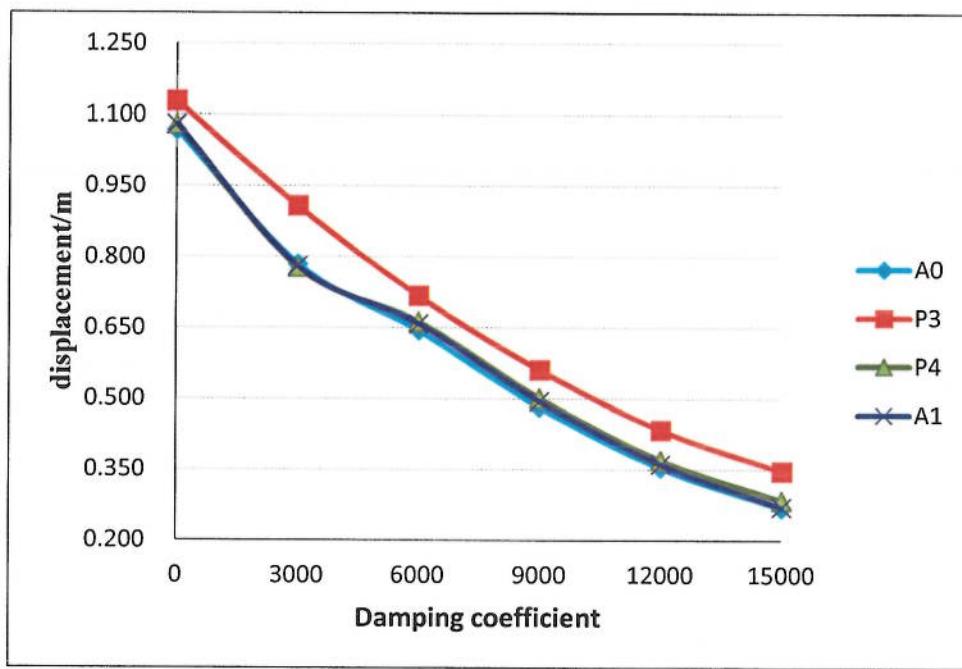


Figura 6- 5 Relación entre los parámetros del amortiguador y el desplazamiento del aislador

De la Figura 6- 6 sabemos que la fuerza de amortiguamiento aumenta con el incremento de la constante de amortiguamiento.

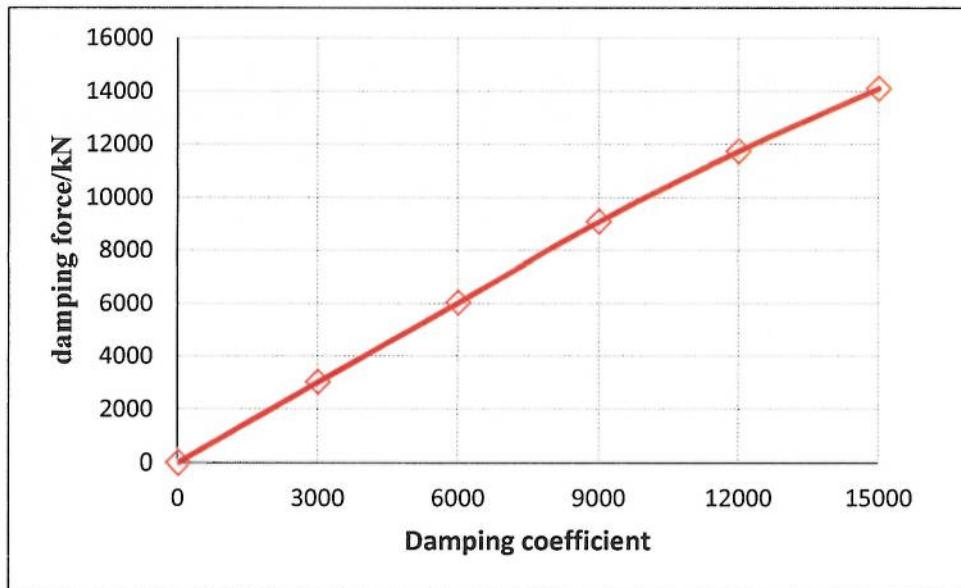


Figura 6- 6 Relación entre los parámetros del amortiguador y la fuerza de amortiguamiento

De la Figura 6- 7 observamos que el desplazamiento del amortiguamiento disminuye con el incremento de la constante de amortiguamiento.

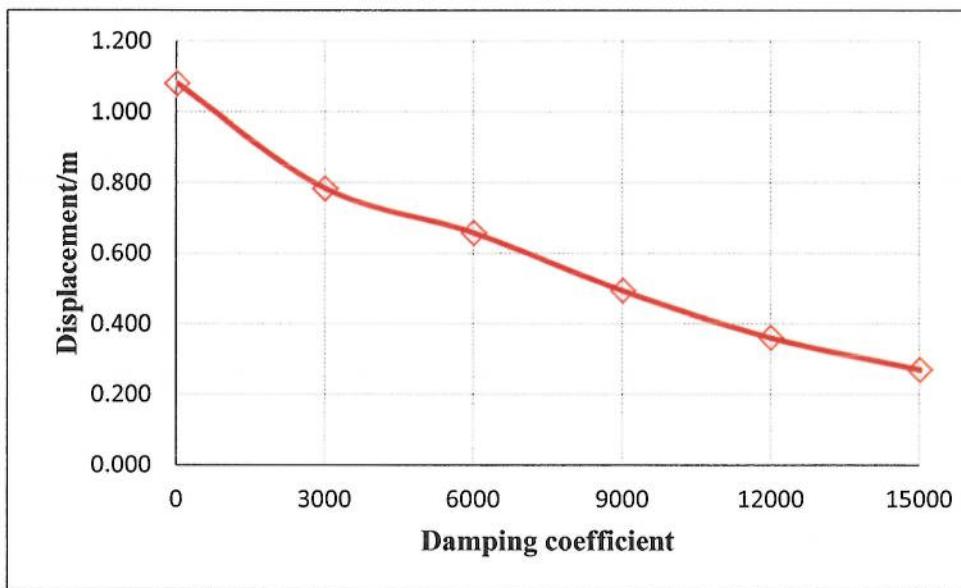


Figura 6- 7 Relación entre los parámetros del amortiguador y el desplazamiento del amortiguamiento

En base al análisis anterior la constante de amortiguamiento tiene una gran influencia sobre el momento longitudinal del inferior de la pila, el desplazamiento del tablero y el desplazamiento del amortiguamiento; por lo tanto se utilizan, el momento longitudinal de la parte inferior de la pila, el desplazamiento del tablero y el desplazamiento del amortiguamiento como indicadores de evaluación. Se sugiere

utilizar la constante de amortiguamiento de 12000, y el exponente de amortiguamiento de 0,3.

6.3 Resultados de la optimización del parámetro de amortiguamiento

En función del análisis anterior la constante de amortiguamiento tiene una gran influencia sobre el momento longitudinal del inferior de la pila, el desplazamiento del tablero y el desplazamiento del amortiguamiento. Entonces, se utilizan el momento longitudinal de la pila, el desplazamiento del tablero y el desplazamiento del amortiguamiento como indicadores de evaluación. Se sugiere utilizar la constante de amortiguamiento a 12000, y el exponente de amortiguamiento de 0,3. Considerando la producción de la capacidad del amortiguador, se colocan 6 amortiguadores en los dos extremos de cada tablero, con la constante de amortiguamiento $C=4000$ y el exponente de amortiguamiento =0,3.

7 Análisis No Lineal Time-History (Período de retorno 1035 años)

Conforme con los resultados optimizados de los parámetros de amortiguamiento en el capítulo anterior se realiza un análisis No Lineal tipo Time-History, tomando en cuenta los efectos P-delta y efectos de hundimiento. Las vigas de los extremos del Puente Guayasamín tienen 6 amortiguadores viscosos, con un coeficiente de amortiguamiento de 4000 y un exponente de amortiguamiento de 0,3.

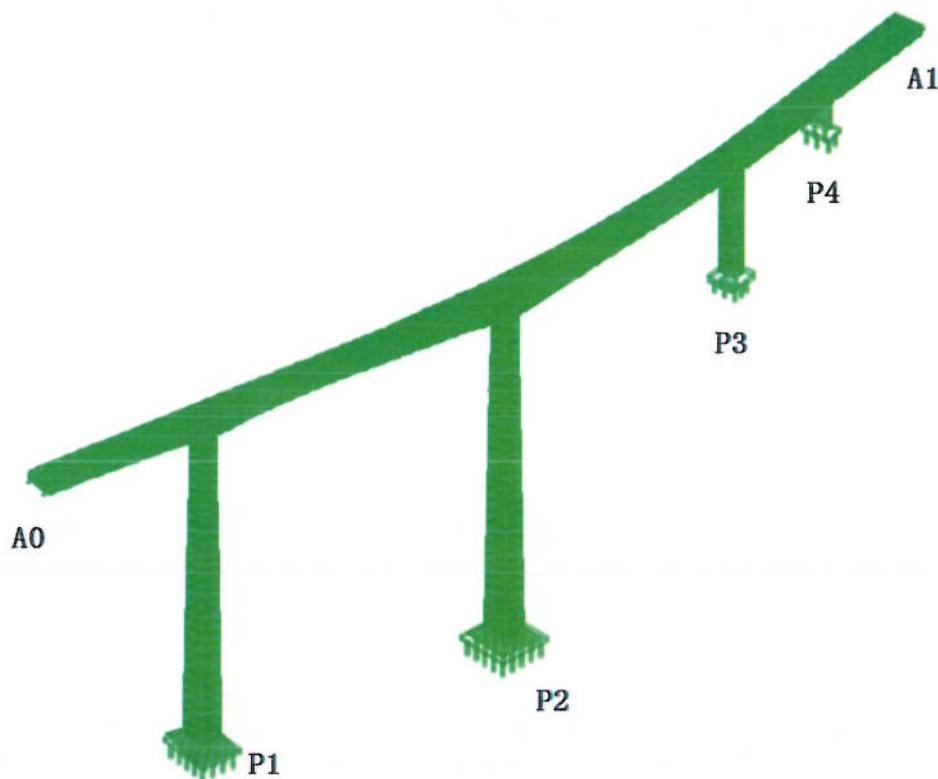


Figura 7- 1 Modelo del análisis dimensional

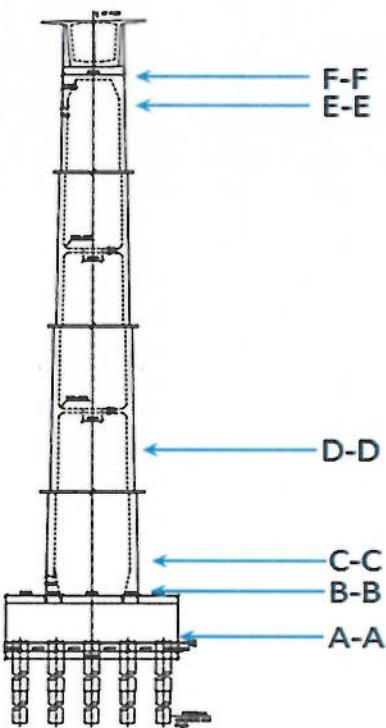


Figura 7- 2 Ubicación de elementos principales en P1 y P2

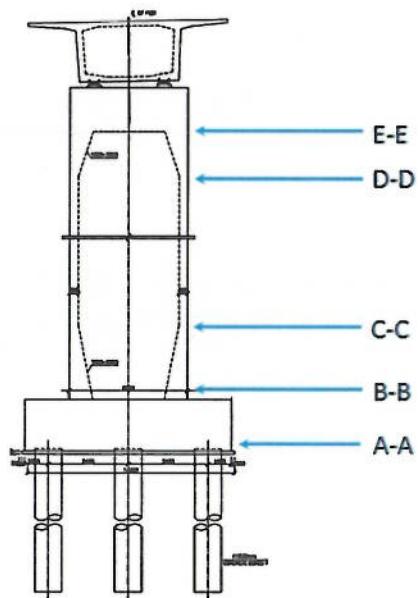


Figura 7- 3 Ubicación de elementos principales en P3

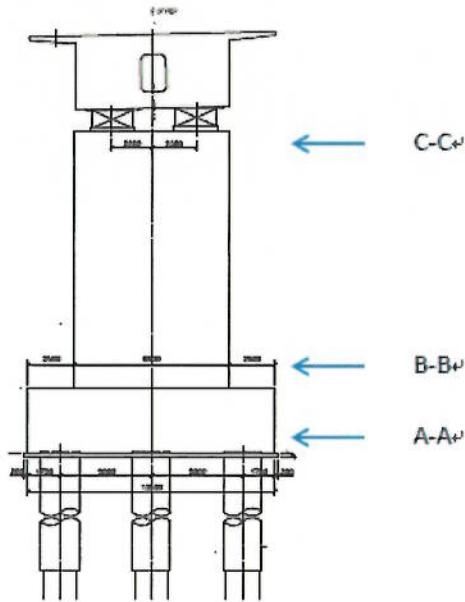


Figura 7- 4 Ubicación de elementos principales en P4

El modo de coacción del aislador es una limitación horizontal y una relajación longitudinal.

Tabla 7- 1 Parámetros del diseño del Aislador

Número de Pila		Capacidad del aislador	Coeficiente de fricción	Número	Longitudinal				Transversal
					Rigidez inicial	Rigidez de fluencia	Tensión de fluencia	Límite	
	kN	--	--		kN-m	kN-m	kN	m	
A0	A0-1	3080	0,02	1	30800	0,01	61,6	—	Restricción
	A0-2	3080	0,02	1	30800	0,01	61,6	—	Restricción
P3	P3-1	13665	0,02	1	136650	0,01	273,3	—	Restricción
	P3-2	13665	0,02	1	136650	0,01	273,3	—	Restricción
P4	P4-1	9375	0,02	1	93750	0,01	187,5	—	Restricción
	P4-2	9375	0,02	1	93750	0,01	187,5	—	Restricción
A1	A1-1	3895	0,02	1	38950	0,01	77,9	—	Restricción
	A1-2	3895	0,02	1	38950	0,01	77,9	—	Restricción

Se introduce el sismo de dos maneras: 1) longitudinal con vertical; 2) horizontal con vertical. El método de análisis se basa en el método integral del modo No Lineal, el ratio del amortiguador estará de acuerdo al modelo de amortiguador de Rayleigh. El primer modo será el de la estructura básica, y el segundo, el de mayor contribución de masa. Existen 7 ondas en cada dirección, y se debe seleccionar el valor promedio de

las 7 para la respuesta sismica final. Las limitaciones del modelo de elementos finitos incluyen: relajación longitudinal y restricción transversal.

7.1 Respuesta Longitudinal y vertical

Tabla 7- 2 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	16961	14377	1672	16860	383049
	E-E	17828	13956	1672	18432	378926
	D-D	48739	27817	4367	235294	897613
	C-C	55696	34695	5316	321818	1432733
	B-B	57766	36665	5727	345626	1597687
	A-A	71008	57496	8748	378683	1837723
P2	F-F	26907	16028	1576	31374	458521
	E-E	27801	15800	1467	33938	432380
	D-D	58002	24116	3183	159374	814192
	C-C	64901	31247	3380	218965	1284440
	B-B	65037	33808	3396	234681	1430057
	A-A	78050	56765	3722	254114	1656165
P3	E-E	11518	1964	3011	9711	5782
	D-D	11905	4160	3193	18454	18213
	C-C	19302	10016	3595	155391	320451
	B-B	18614	10819	3641	172790	369239
	A-A	21717	15557	4606	188474	412479
P4	C-C	10711	756	3813	20704	760
	B-B	12692	4918	4323	73943	43666
	A-A	14609	7680	4535	87315	65919

Tabla 7- 3 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	28688	3427	548	1807	11208
P2	18303	2838	240	780	9622
P3	24878	2260	518	1287	5884
P4	13079	1704	843	2323	4635

Tabla 7- 4 Fuerza del Aislador

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal
	kN	kN	kN

A0	1	máx	5234	159	1081
		min	-5200	-153	-1070
	2	máx	6001	160	1094
		min	-5934	-154	-1077
P3	1	máx	6080	743	1250
		min	-6053	-710	-1425
	2	máx	5197	745	1249
		min	-4847	-712	-1424
P4	1	máx	6798	488	1690
		min	-7082	-468	-1610
	2	máx	4696	489	1690
		min	-5049	-469	-1610
A1	1	máx	4714	202	763
		min	-4746	-194	-686
	2	máx	3490	202	762
		min	-3271	-194	-685

Tabla 7- 5 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	0,328	0,000
	2	0,000	0,333	0,000
P3	1	0,000	0,360	0,000
	2	0,000	0,361	0,000
P4	1	0,000	0,334	0,000
	2	0,000	0,335	0,000
A1	1	0,000	0,333	0,000
	2	0,000	0,332	0,000

Tabla 7- 6 Desplazamiento del Tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	0,330	0,002	0,000
A1	0,334	0,000	0,000

Tabla 7- 7 Respuesta de amortiguador

Propiedades de amortiguación	Respuesta
Fuerza máxima del amortiguador (kN)	3652
Deformación máxima (m)	0,335

7.2 Respuesta transversal y vertical

Tabla 7- 8 Respuesta en elementos principales

Número de Pila	Posición	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	F-F	16052	6722	12020	68769	172512
	E-E	16947	6616	12413	95698	162551
	D-D	46417	9344	28268	1466171	265013
	C-C	53643	10240	36130	1994808	449307
	B-B	55659	10361	38685	2158150	498463
	A-A	72116	12245	61245	2403430	560126
P2	F-F	25342	1865	14642	146118	56404
	E-E	26222	1735	14886	190017	54839
	D-D	55613	2324	32403	1712549	70681
	C-C	62086	2571	40311	2330517	115107
	B-B	64108	2629	42895	2513187	127216
	A-A	81193	3318	65897	2790724	142857
P3	E-E	10589	750	15553	76672	2330
	D-D	11649	1169	16626	122398	5784
	C-C	17153	1705	20547	852029	58782
	B-B	17974	1867	21384	950246	67003
	A-A	23306	2509	25510	1032464	74772
P4	C-C	9905	435	18883	109134	701
	B-B	12317	1240	21980	364441	13355
	A-A	14249	1736	24130	435512	18464

Tabla 7- 9 Respuesta en elementos principales (parte superior del pilote)

Número de Pila	Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal	Momento Transversal	Momento Longitudinal
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m
P1	31812	1981	4237	14039	6609
P2	27160	706	3482	11507	2425
P3	40374	360	3317	8448	907
P4	27968	361	4364	11946	948

Tabla 7- 10 Fuerza del Aislador

Número de Pila			Fuerza Axial	Fuerza Cortante Longitudinal	Fuerza Cortante Transversal
			kN	kN	kN
A0	1	máx	16697	96	4842
		min	-16688	-95	-5007



	2	máx	17632	83	4855
		min	-18574	-82	-5014
P3	1	máx	10621	364	6742
		min	-10724	-368	-6581
	2	máx	8193	339	6735
		min	-8541	-346	-6575
P4	1	máx	15258	250	9049
		min	-15228	-256	-8442
	2	máx	19438	246	9051
		min	-19602	-252	-8444
A1	1	máx	4910	103	3267
		min	-4568	-105	-3379
	2	máx	6686	103	3265
		min	-6655	-106	-3376

Tabla 7- 11 Desplazamiento del Aislador

Número de Pila	Número	Vertical	Longitudinal	Transversal
		m	m	m
A0	1	0,000	0,120	0,000
	2	0,000	0,075	0,000
P3	1	0,000	0,080	0,000
	2	0,000	0,062	0,000
P4	1	0,000	0,082	0,000
	2	0,000	0,076	0,000
A1	1	0,000	0,078	0,000
	2	0,000	0,080	0,000

Tabla 7- 12 Desplazamiento del Tablero

Número de Pila	Longitudinal	Transversal	Vertical
	m	m	m
A0	0,096	0,000	0,000
A1	0,080	0,000	0,000

Tabla 7- 13 Respuesta del amortiguador

Propiedades del amortiguador	Respuesta
Fuerza máxima del amortiguador (kN)	2577
Deformación máxima (m)	0,120

7.3 Comparación de la fuerza interna

1) Momento longitudinal del inferior de la Pila

De la Figura 7-3 podemos ver que se redujo el momento longitudinal en la parte inferior de la pila con el modelo de amortiguamiento establecido, y el momento longitudinal de las Pilas P1 y P2 se redujo en un 50%.

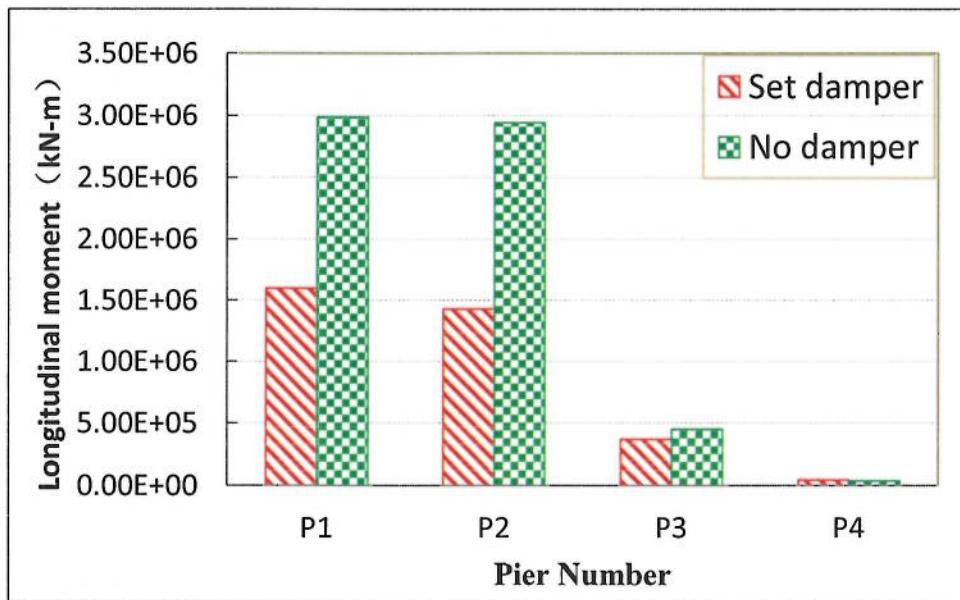


Figura 7- 5 Momento longitudinal de la Pila

2) Fuerza cortante longitudinal inferior de la Pila

De la Figura 7-4 observamos que se redujo la fuerza cortante longitudinal en la parte inferior de la pila con el modelo de amortiguamiento establecido, y la fuerza cortante longitudinal de las Pilas P1 y P2 se redujo en un 29%.

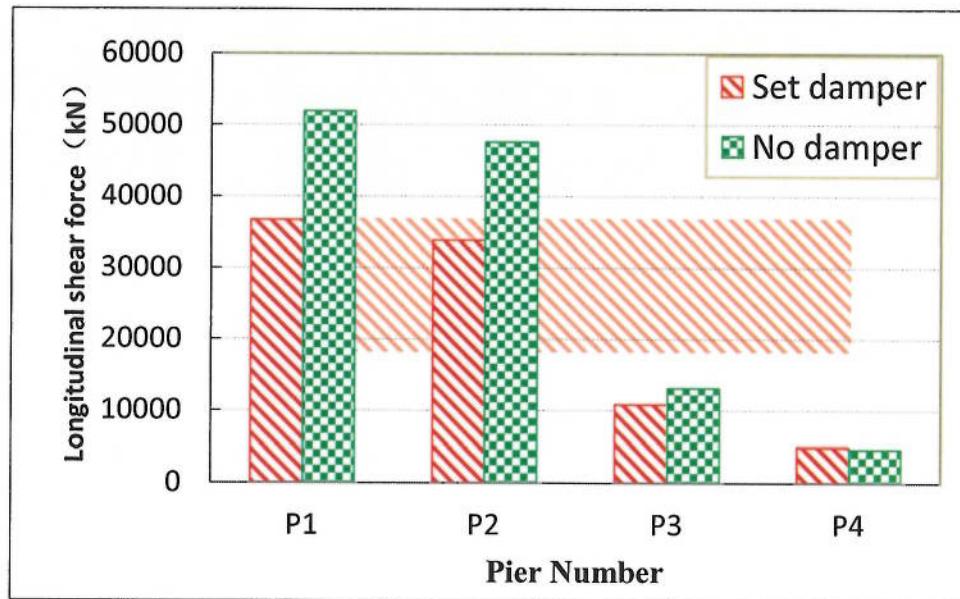


Figura 7- 6 Fuerza cortante longitudinal inferior de la Pila

3) Desplazamiento longitudinal del tablero

De la Figura 7-5 es evidente que se redujo el desplazamiento longitudinal del tablero con el modelo de amortiguamiento establecido, y el desplazamiento longitudinal del tablero se redujo en un 67%.

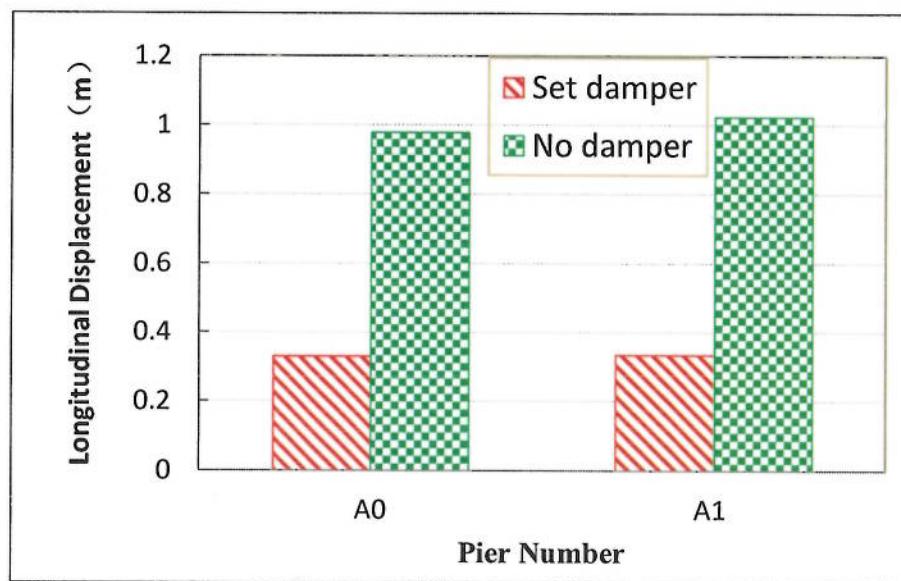


Figura 7- 7 Desplazamiento longitudinal del tablero

4) Desplazamiento longitudinal de los aisladores

De la Figura 7-6 concluimos que se redujo el desplazamiento longitudinal de los aisladores con el modelo de amortiguamiento establecido, y el desplazamiento longitudinal de los aisladores se redujo en un 66%.

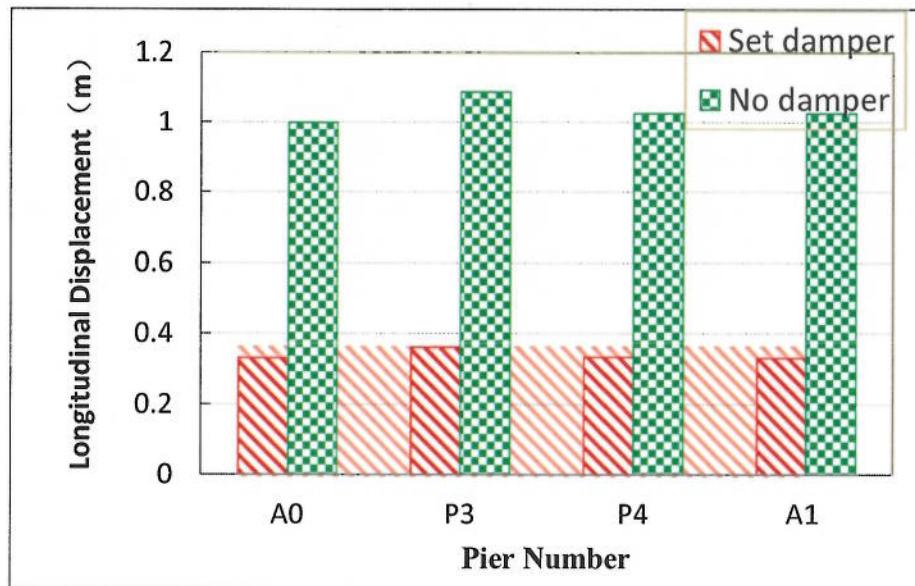


Figura 7- 8 Desplazamiento longitudinal de los aisladores

8 Conclusiones

En el modelo del Puente Guayasamín, se ha estudiado las características dinámicas de la estructura mediante modelos establecidos de análisis dinámico Lineal y No Lineal. Por medio del espectro de respuesta, análisis Time-History Lineal y No Lineal, análisis de parámetros del amortiguador longitudinal y aislamiento sísmico de la estructura rígida del puente, se tienen las siguientes conclusiones:

- 1) El amortiguador redujo la respuesta del desplazamiento longitudinal del tablero de manera efectiva.

En el análisis Lineal Time-History, la respuesta del desplazamiento longitudinal máxima del tablero es 1,023m al nivel de SEE; en el análisis No Lineal Time-History del amortiguador, el desplazamiento longitudinal máximo del tablero es 0,334m, y se redujo el desplazamiento del tablero en un 67% .

- 2) El amortiguador redujo la respuesta del momento longitudinal de la pila de manera efectiva.

En el análisis Lineal Time-History la respuesta máxima del momento longitudinal de la pila es 3315076kN-m a nivel de SEE; en el análisis No Lineal Time-History del amortiguador, el momento longitudinal máximo de la pila es 1837723 kN-m, y se redujo el momento de la pila en un 45% .

De acuerdo a los resultados del análisis se colocarán 6 amortiguadores en los dos extremos de cada tablero, con una constante de amortiguamiento de $C=4000$ y un exponente de amortiguamiento de $=0,3$. La fuerza máxima de amortiguamiento es de $\pm 3652\text{KN}$, y el desplazamiento es de $\pm 0,335\text{m}$ (debido a la combinación de temperatura y desplazamiento de la viga, el golpe del amortiguador es de 0,40m).



ING. EDISSON MORALES
GERENTE TÉCNICO
CHINA ROAD AND BRIDGE CORPORATION SUCURSAL ECUADOR