

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ANÁLISIS, COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE
EDIFICACIONES CON AISLADORES DE PÉNDULO
FRICCIONAL**

ANEXOS

Tercer Cuerpo

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

Andrés Ignacio Martínez Colán

Carlos Jesús Melgar Cueva

Asesor: Marcos Tinman Behar

Lima, Setiembre del 2015

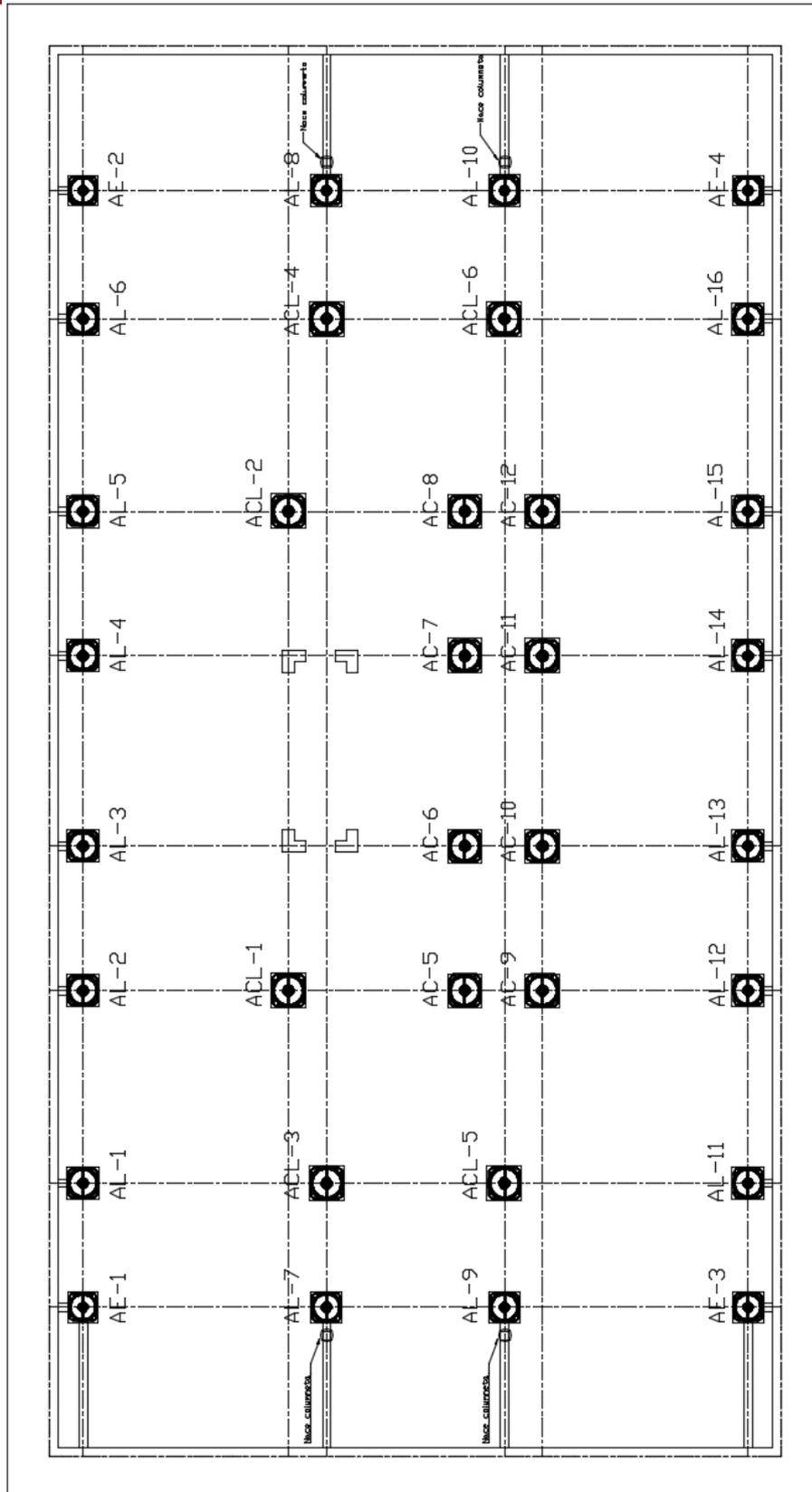


Fig. B.2.: Distribución de los aisladores en el SA según nombre de cada aislador.

TABLAS DERIVADAS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL

Tipo de aislador	Nombre del aislador	Desp. X-X (m)	Desp. Y-Y (m)
FPS-T1	ACL1	0.15	0.16
FPS-T1	ACL2	0.15	0.16
FPS-T1	ACL3	0.15	0.17
FPS-T1	ACL4	0.15	0.17
FPS-T1	ACL5	0.15	0.17
FPS-T1	ACL6	0.15	0.17
FPS-T2	AC1*	0.12	0.13
FPS-T2	AC2*	0.12	0.13
FPS-T2	AC3*	0.12	0.13
FPS-T2	AC4*	0.12	0.13
FPS-T2	AC5	0.15	0.16
FPS-T2	AC6	0.15	0.16
FPS-T2	AC7	0.15	0.16
FPS-T2	AC8	0.15	0.16
FPS-T2	AC9	0.15	0.16
FPS-T2	AC10	0.15	0.16
FPS-T2	AC11	0.15	0.16
FPS-T2	AC12	0.15	0.16
FPS-T3	AL1	0.16	0.17
FPS-T3	AL2	0.16	0.16
FPS-T3	AL3	0.16	0.16
FPS-T3	AL4	0.16	0.16
FPS-T3	AL5	0.16	0.16
FPS-T3	AL6	0.16	0.17
FPS-T3	AL7	0.15	0.18
FPS-T3	AL8	0.15	0.18
FPS-T3	AL9	0.15	0.18
FPS-T3	AL10	0.15	0.18
FPS-T3	AL11	0.16	0.17
FPS-T3	AL12	0.16	0.16
FPS-T3	AL13	0.16	0.16
FPS-T3	AL14	0.16	0.16
FPS-T3	AL15	0.16	0.16
FPS-T3	AL16	0.16	0.17
FPS-T4	AE1	0.16	0.18
FPS-T4	AE2	0.16	0.18
FPS-T4	AE3	0.16	0.18
FPS-T4	AE4	0.16	0.18

*Aisladores del ascensor

Tabla B.1: Desplazamientos de los aisladores en ambas direcciones (Sismo de diseño)

Tipo de aislador	Nombre del aislador	Desp. X-X (m)	Desp. Y-Y (m)
FPS-T1	ACL1	0.26	0.27
FPS-T1	ACL2	0.26	0.27
FPS-T1	ACL3	0.25	0.28
FPS-T1	ACL4	0.25	0.28
FPS-T1	ACL5	0.25	0.28
FPS-T1	ACL6	0.25	0.28
FPS-T2	AC1*	0.21	0.22
FPS-T2	AC2*	0.21	0.22
FPS-T2	AC3*	0.21	0.22
FPS-T2	AC4*	0.21	0.22
FPS-T2	AC5	0.25	0.27
FPS-T2	AC6	0.25	0.26
FPS-T2	AC7	0.25	0.26
FPS-T2	AC8	0.25	0.27
FPS-T2	AC9	0.25	0.27
FPS-T2	AC10	0.25	0.26
FPS-T2	AC11	0.25	0.26
FPS-T2	AC12	0.25	0.27
FPS-T3	AL1	0.26	0.28
FPS-T3	AL2	0.26	0.27
FPS-T3	AL3	0.26	0.26
FPS-T3	AL4	0.26	0.26
FPS-T3	AL5	0.26	0.27
FPS-T3	AL6	0.26	0.28
FPS-T3	AL7	0.25	0.29
FPS-T3	AL8	0.25	0.29
FPS-T3	AL9	0.25	0.29
FPS-T3	AL10	0.25	0.29
FPS-T3	AL11	0.26	0.28
FPS-T3	AL12	0.26	0.27
FPS-T3	AL13	0.26	0.26
FPS-T3	AL14	0.26	0.26
FPS-T3	AL15	0.26	0.27
FPS-T3	AL16	0.26	0.28
FPS-T4	AE1	0.26	0.29
FPS-T4	AE2	0.26	0.29
FPS-T4	AE3	0.26	0.29
FPS-T4	AE4	0.26	0.29

*Aisladores del ascensor

Tabla B.2: Desplazamientos de los aisladores en ambas direcciones (Sismo máximo)

TABLAS DERIVADAS DEL ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA

Dirección de Análisis X-X

Nivel de piso	ARTIF - 1		ARTIF - 4		ARTIF - 5		CHILE 2010		LIMA 1966		LIMA 1974		PISCO 2007	
	VX (ton)	VX/W (%)	VX (ton)	VX/W (%)	VX (ton)	VX/W (%)	VX (ton)	VX/W (%)	VX (ton)	VX/W (%)	VX (ton)	VX/W (%)	VX (ton)	VX/W (%)
T-AZOTEA	171.4	2.44	164.0	2.34	147.0	2.10	225.3	3.21	110.8	1.58	111.1	1.58	194.5	2.77
T-P7	432.3	6.16	394.9	5.63	385.3	5.49	588.9	8.39	231.5	3.30	289.6	4.13	501.0	7.14
T-P6	500.0	7.13	427.4	6.09	528.2	7.53	658.0	9.38	347.5	4.95	424.2	6.05	654.3	9.33
T-P5	551.7	7.86	474.3	6.76	552.7	7.88	643.3	9.17	447.8	6.38	409.6	5.84	634.1	9.04
T-P4	579.2	8.26	534.5	7.62	547.3	7.80	644.4	9.19	485.9	6.93	457.9	6.53	625.0	8.91
T-P3	586.6	8.36	616.0	8.78	629.7	8.98	663.7	9.46	503.7	7.18	507.2	7.23	604.2	8.61
T-P2	594.2	8.47	652.5	9.30	636.5	9.07	647.7	9.23	455.0	6.48	540.9	7.71	574.6	8.19
T-P1	560.3	7.99	609.7	8.69	570.8	8.14	672.9	9.59	459.8	6.55	494.9	7.05	568.6	8.10
T-S1	416.7	5.94	332.3	4.74	341.3	4.86	344.7	4.91	285.8	4.07	322.2	4.59	547.4	7.80

Tabla B.3: Valores de las fuerzas cortantes máximas por piso y cortantes basales, para el sismo de diseño (R=1)

Dirección de Análisis Y-Y

Nivel de piso	ARTIF - 1		ARTIF - 4		ARTIF - 5		CHILE 2010		LIMA 1966		LIMA 1974		PISCO 2007	
	VY (ton)	VY/W (%)	VY (ton)	VY/W (%)	VY (ton)	VY/W (%)	VY (ton)	VY/W (%)	VY (ton)	VY/W (%)	VY (ton)	VY/W (%)	VY (ton)	VY/W (%)
T-AZOTEA	133.1	1.90	142.2	2.03	138.1	1.97	184.7	2.63	99.0	1.41	107.4	1.53	147.3	2.10
T-P7	337.3	4.81	405.2	5.78	396.2	5.65	465.6	6.64	262.0	3.73	311.2	4.43	383.0	5.46
T-P6	531.0	7.57	515.2	7.34	551.8	7.86	642.5	9.16	369.9	5.27	422.3	6.02	522.7	7.45
T-P5	668.8	9.53	572.0	8.15	656.4	9.36	765.1	10.91	406.1	5.79	437.8	6.24	625.6	8.92
T-P4	684.4	9.75	570.8	8.14	683.1	9.74	926.8	13.21	427.3	6.09	414.7	5.91	721.8	10.29
T-P3	632.0	9.01	579.1	8.25	600.8	8.56	941.4	13.42	495.2	7.06	444.8	6.34	744.0	10.60
T-P2	616.2	8.78	637.9	9.09	653.4	9.31	872.7	12.44	567.1	8.08	495.3	7.06	695.7	9.92
T-P1	593.3	8.46	647.4	9.23	633.4	9.03	776.8	11.07	598.3	8.53	530.3	7.56	656.7	9.36
T-S1	478.4	6.82	376.8	5.37	340.4	4.85	327.0	4.66	429.5	6.12	307.1	4.38	624.6	8.90

Tabla B.4: Valores de las fuerzas cortantes máximas por piso y cortantes basales, para el sismo de diseño (R=1)

Dirección de Análisis X-X

Nivel de piso	ARTIF - 1		ARTIF - 4		ARTIF - 5		CHILE 2010		LIMA 1966		LIMA 1974		PISCO 2007	
	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1
T-AZOTEA	0.0020	1.50	0.0016	1.23	0.0018	1.36	0.0027	2.01	0.0012	0.91	0.0015	1.10	0.0025	1.86
T-P7	0.0029	2.18	0.0024	1.81	0.0029	2.17	0.0040	2.99	0.0020	1.46	0.0023	1.73	0.0037	2.77
T-P6	0.0036	2.71	0.0032	2.37	0.0037	2.76	0.0046	3.41	0.0026	1.93	0.0029	2.18	0.0045	3.37
T-P5	0.0041	3.05	0.0036	2.67	0.0038	2.85	0.0044	3.29	0.0031	2.34	0.0031	2.30	0.0044	3.33
T-P4	0.0042	3.18	0.0038	2.82	0.0039	2.95	0.0050	3.73	0.0034	2.55	0.0033	2.46	0.0046	3.43
T-P3	0.0041	3.05	0.0040	2.97	0.0042	3.17	0.0051	3.81	0.0032	2.42	0.0034	2.58	0.0044	3.27
T-P2	0.0037	2.80	0.0038	2.87	0.0038	2.88	0.0041	3.11	0.0029	2.17	0.0032	2.42	0.0038	2.88
T-P1	0.0024	1.80	0.0024	1.78	0.0023	1.74	0.0024	1.80	0.0018	1.36	0.0019	1.45	0.0023	1.74

Tabla B.5: Valores de las derivas máximas de entrepiso.

Dirección de Análisis Y-Y

Nivel de piso	ARTIF - 1		ARTIF - 4		ARTIF - 5		CHILE 2010		LIMA 1966		LIMA 1974		PISCO 2007	
	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1	Deriva	x0.75R1
T-AZOTEA	0.0012	0.89	0.0012	0.87	0.0012	0.88	0.0015	1.11	0.0009	0.67	0.0010	0.73	0.0012	0.90
T-P7	0.0017	1.31	0.0018	1.32	0.0017	1.31	0.0021	1.58	0.0013	0.98	0.0015	1.10	0.0018	1.33
T-P6	0.0025	1.84	0.0023	1.74	0.0022	1.68	0.0028	2.11	0.0017	1.26	0.0019	1.40	0.0023	1.74
T-P5	0.0029	2.19	0.0025	1.91	0.0028	2.10	0.0036	2.68	0.0018	1.37	0.0019	1.45	0.0028	2.07
T-P4	0.0029	2.21	0.0025	1.91	0.0029	2.14	0.0041	3.10	0.0020	1.47	0.0018	1.38	0.0031	2.33
T-P3	0.0027	2.00	0.0024	1.83	0.0026	1.92	0.0040	3.01	0.0021	1.58	0.0018	1.35	0.0030	2.28
T-P2	0.0025	1.88	0.0025	1.91	0.0026	1.97	0.0037	2.77	0.0023	1.71	0.0019	1.45	0.0028	2.11
T-P1	0.0020	1.48	0.0021	1.59	0.0021	1.59	0.0028	2.06	0.0020	1.47	0.0016	1.23	0.0022	1.64

Tabla B.6: Valores de las derivas máximas de entrepiso.

Dirección de Análisis X-X

Nivel de piso	ARTIF - 1		ARTIF - 4		ARTIF - 5		CHILE 2010		LIMA 1966		LIMA 1974		PISCO 2007	
	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)
T-AZOTEA	5.21	53.08%	5.11	52.11%	4.72	48.15%	6.88	70.14%	3.23	32.88%	3.41	34.71%	6.10	62.21%
T-P7	3.28	33.45%	3.01	30.70%	3.20	32.64%	4.53	46.17%	2.23	22.73%	2.50	25.49%	4.21	42.88%
T-P6	2.29	23.35%	1.97	20.03%	2.21	22.48%	2.74	27.97%	1.99	20.25%	1.91	19.43%	2.37	24.11%
T-P5	2.44	24.92%	2.43	24.80%	2.81	28.66%	3.27	33.32%	1.94	19.77%	1.91	19.52%	2.69	27.44%
T-P4	2.69	27.44%	3.55	36.18%	2.80	28.50%	4.21	42.91%	2.14	21.77%	1.97	20.07%	3.52	35.87%
T-P3	3.06	31.23%	3.12	31.80%	2.76	28.10%	4.40	44.87%	2.02	20.56%	1.99	20.30%	3.27	33.34%
T-P2	2.77	28.26%	2.70	27.49%	2.55	25.97%	3.28	33.42%	1.55	15.80%	1.95	19.84%	2.53	25.83%
T-P1	2.77	28.25%	2.44	24.87%	2.61	26.58%	3.58	36.48%	1.93	19.65%	1.98	20.19%	2.90	29.51%

Tabla B.7: Valores de las aceleraciones pico por nivel, en la dirección X-X.

F

Dirección de Análisis Y-Y

Nivel de piso	ARTIF - 1		ARTIF - 4		ARTIF - 5		CHILE 2010		LIMA 1966		LIMA 1974		PISCO 2007	
	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)	Acel. pico (m/s ²)	Acel. (%)
T-AZOTEA	4.07	41.49%	4.25	43.33%	4.22	43.05%	5.54	56.52%	2.96	30.21%	3.26	33.28%	4.59	46.76%
T-P7	2.95	30.04%	3.38	34.48%	3.26	33.25%	3.90	39.70%	2.17	22.14%	2.64	26.93%	3.18	32.41%
T-P6	2.62	26.72%	2.37	24.13%	3.09	31.54%	3.00	30.57%	1.66	16.93%	1.64	16.76%	2.56	26.08%
T-P5	2.25	22.93%	1.91	19.52%	2.82	28.73%	3.44	35.04%	1.61	16.42%	1.97	20.11%	3.06	31.19%
T-P4	2.41	24.53%	3.06	31.19%	3.49	35.53%	4.38	44.66%	1.60	16.33%	1.97	20.06%	2.21	22.57%
T-P3	2.56	26.12%	2.98	30.37%	3.26	33.26%	4.12	42.02%	2.34	23.84%	1.67	17.03%	2.53	25.77%
T-P2	2.51	25.59%	2.89	29.48%	3.10	31.58%	3.32	33.86%	2.14	21.77%	1.51	15.44%	2.96	30.15%
T-P1	2.55	26.00%	2.55	25.97%	2.72	27.68%	3.40	34.64%	1.69	17.19%	1.67	17.04%	2.33	23.72%

Tabla B.8: Valores de las aceleraciones pico por nivel, en la dirección Y-Y.

Nombre Aislador	Sismo en X-X		
	Desp. Promedio (cm)	Desp. Máx. (cm)	Registro asociado al desp. Máx
ACL-1	11.02	18.94	PISCO07
ACL-2	11.02	18.99	PISCO07
ACL-3	11.00	18.95	PISCO07
ACL-4	11.00	18.94	PISCO07
ACL-5	10.99	18.93	PISCO07
ACL-6	10.99	18.94	PISCO07
AC-1*	9.14	15.94	PISCO07
AC-2*	9.14	15.94	PISCO07
AC-3*	9.16	15.96	PISCO07
AC-4*	9.16	15.96	PISCO07
AC-5	10.99	18.91	PISCO07
AC-6	10.98	18.92	PISCO07
AC-7	10.98	18.93	PISCO07
AC-8	10.99	18.95	PISCO07
AC-9	10.98	18.90	PISCO07
AC-10	10.98	18.91	PISCO07
AC-11	10.97	18.91	PISCO07
AC-12	10.97	18.92	PISCO07
AL-1	11.06	19.07	PISCO07
AL-2	11.07	19.03	PISCO07
AL-3	11.07	19.03	PISCO07
AL-4	11.07	19.06	PISCO07
AL-5	11.07	19.06	PISCO07
AL-6	11.07	19.02	PISCO07
AL-7	11.00	18.96	PISCO07
AL-8	11.00	18.94	PISCO07
AL-9	10.97	18.92	PISCO07
AL-10	10.97	18.89	PISCO07
AL-11	10.96	18.91	PISCO07
AL-12	10.96	18.88	PISCO07
AL-13	10.97	18.88	PISCO07
AL-14	10.97	18.90	PISCO07
AL-15	10.96	18.90	PISCO07
AL-16	10.96	18.86	PISCO07
AE-1	11.04	19.05	PISCO07
AE-2	11.04	18.97	PISCO07
AE-3	10.93	18.89	PISCO07
AE-4	10.93	18.81	PISCO07

*Aisladores del ascensor

Tabla B.9: Desplazamientos de los aisladores en la dirección X-X (Sismo de diseño)

Nombre Aislador	Sismo en Y-Y		
	Desp. Promedio (cm)	Desp. Máx. (cm)	Registro asociado al desp. máx
ACL-1	11.09	17.39	PISCO07
ACL-2	11.09	17.41	PISCO07
ACL-3	11.09	17.35	PISCO07
ACL-4	11.08	17.39	PISCO07
ACL-5	11.09	17.35	PISCO07
ACL-6	11.08	17.39	PISCO07
AC-1	9.53	15.57	PISCO07
AC-2	9.53	15.59	PISCO07
AC-3	9.53	15.57	PISCO07
AC-4	9.53	15.59	PISCO07
AC-5	11.07	17.33	PISCO07
AC-6	11.09	17.35	PISCO07
AC-7	11.09	17.36	PISCO07
AC-8	11.07	17.35	PISCO07
AC-9	11.07	17.32	PISCO07
AC-10	11.07	17.32	PISCO07
AC-11	11.07	17.33	PISCO07
AC-12	11.06	17.34	PISCO07
AL-1	11.09	17.35	PISCO07
AL-2	11.09	17.37	PISCO07
AL-3	11.12	17.43	PISCO07
AL-4	11.12	17.44	PISCO07
AL-5	11.09	17.39	PISCO07
AL-6	11.08	17.38	PISCO07
AL-7	11.11	17.37	PISCO07
AL-8	11.11	17.42	PISCO07
AL-9	11.11	17.39	PISCO07
AL-10	11.11	17.44	PISCO07
AL-11	11.09	17.36	PISCO07
AL-12	11.10	17.37	PISCO07
AL-13	11.10	17.39	PISCO07
AL-14	11.10	17.40	PISCO07
AL-15	11.10	17.40	PISCO07
AL-16	11.08	17.39	PISCO07
AE-1	11.09	17.33	PISCO07
AE-2	11.08	17.38	PISCO07
AE-3	11.09	17.37	PISCO07
AE-4	11.08	17.41	PISCO07

*Aisladores del ascensor

Tabla B.10: Desplazamientos de los aisladores en la dirección Y-Y (Sismo de diseño)

Nombre Aislador	Sismo en X-X		
	Desp. Promedio (cm)	Desp. Máx. (cm)	Registro asociado al desp. máx
ACL-1	19.18	29.71	PISCO 2007
ACL-2	19.18	29.66	PISCO 2007
ACL-3	19.16	29.63	PISCO 2007
ACL-4	19.16	29.64	PISCO 2007
ACL-5	19.15	29.57	PISCO 2007
ACL-6	19.15	29.56	PISCO 2007
AC-1	16.43	25.59	PISCO 2007
AC-2	16.43	25.59	PISCO 2007
AC-3	16.45	25.60	PISCO 2007
AC-4	16.45	25.60	PISCO 2007
AC-5	19.14	29.59	PISCO 2007
AC-6	19.14	29.57	PISCO 2007
AC-7	19.14	29.55	PISCO 2007
AC-8	19.14	29.55	PISCO 2007
AC-9	19.13	29.53	PISCO 2007
AC-10	19.13	29.52	PISCO 2007
AC-11	19.12	29.51	PISCO 2007
AC-12	19.12	29.50	PISCO 2007
AL-1	19.25	29.83	PISCO 2007
AL-2	19.26	29.88	PISCO 2007
AL-3	19.26	29.88	PISCO 2007
AL-4	19.26	29.85	PISCO 2007
AL-5	19.25	29.85	PISCO 2007
AL-6	19.25	29.89	PISCO 2007
AL-7	19.16	29.63	PISCO 2007
AL-8	19.16	29.65	PISCO 2007
AL-9	19.11	29.50	PISCO 2007
AL-10	19.12	29.53	PISCO 2007
AL-11	19.11	29.39	PISCO 2007
AL-12	19.11	29.43	PISCO 2007
AL-13	19.11	29.43	PISCO 2007
AL-14	19.11	29.41	PISCO 2007
AL-15	19.11	29.40	PISCO 2007
AL-16	19.11	29.44	PISCO 2007
AE-1	19.21	29.76	PISCO 2007
AE-2	19.21	29.85	PISCO 2007
AE-3	19.07	29.31	PISCO 2007
AE-4	19.07	29.40	PISCO 2007

*Aisladores del ascensor

Tabla B.11: Desplazamientos de los aisladores en la dirección X-X (Sismo máximo)

.Nombre Aislador	Sismo en Y-Y		
	Desp. Promedio (cm)	Desp. Máx. (cm)	Registro asociado al desp. máx
ACL-1	19.84	29.48	PISCO 2007
ACL-2	19.83	29.48	PISCO 2007
ACL-3	19.84	29.48	PISCO 2007
ACL-4	19.81	29.48	PISCO 2007
ACL-5	19.84	29.47	PISCO 2007
ACL-6	19.81	29.47	PISCO 2007
AC-1	17.38	24.80	PISCO 2007
AC-2	17.37	24.80	PISCO 2007
AC-3	17.38	24.80	PISCO 2007
AC-4	17.37	24.80	PISCO 2007
AC-5	19.81	29.45	PISCO 2007
AC-6	19.83	29.51	PISCO 2007
AC-7	19.83	29.51	PISCO 2007
AC-8	19.79	29.44	PISCO 2007
AC-9	19.80	29.45	PISCO 2007
AC-10	19.80	29.46	PISCO 2007
AC-11	19.80	29.46	PISCO 2007
AC-12	19.79	29.44	PISCO 2007
AL-1	19.84	29.48	PISCO 2007
AL-2	19.84	29.49	PISCO 2007
AL-3	19.88	29.54	PISCO 2007
AL-4	19.88	29.54	PISCO 2007
AL-5	19.83	29.48	PISCO 2007
AL-6	19.81	29.48	PISCO 2007
AL-7	19.88	29.54	PISCO 2007
AL-8	19.85	29.53	PISCO 2007
AL-9	19.88	29.52	PISCO 2007
AL-10	19.85	29.51	PISCO 2007
AL-11	19.84	29.47	PISCO 2007
AL-12	19.86	29.53	PISCO 2007
AL-13	19.86	29.52	PISCO 2007
AL-14	19.85	29.52	PISCO 2007
AL-15	19.85	29.53	PISCO 2007
AL-16	19.81	29.47	PISCO 2007
AE-1	19.84	29.50	PISCO 2007
AE-2	19.81	29.49	PISCO 2007
AE-3	19.84	29.46	PISCO 2007
AE-4	19.81	29.46	PISCO 2007

*Aisladores del ascensor

Tabla B.12: Desplazamientos de los aisladores en la dirección Y-Y (Sismo máximo)

ANEXO C

REGISTROS SÍSMICOS

Para poder realizar el análisis tiempo-historia de una manera correcta es necesario seleccionar registros sísmicos que muestren un comportamiento similar al observado en la zona de estudio. Es por ello que se seleccionan los siguientes registros:

- Lima 1966
- Lima 1974
- Pisco 2007
- Chile 2010

Para poder ser utilizados, estos registros deben ser debidamente tratados, según se describe en los capítulos 16 y 17 del ASCE STANDARD 7-10 (2010).

Todos los registros utilizados siguen el procedimiento descrito:

Paso 1:

Todas las señales se escalan a una aceleración pico igual a 0.45g (4.41 m/s²) para el sismo de diseño (SD) y a 0.675g para el sismo máximo (SM), según el proyecto de Norma E0.30 (2014). Con el programa Excel se escalan los valores de manera sencilla.

Paso 2:

Las señales escaladas son sometidas a un ajuste, a través de las correcciones de línea base y un filtro para mitigar la presencia de frecuencias indeseadas. El software utilizado es el SeismoSignal V5.1. El filtro por defecto del programa es el de Butterworth en configuración "Bandpass", el que utilizaremos por presentar buenos resultados.

Se deben delimitar las frecuencias según el espectro de Fourier para establecer un rango de la corrección. Para todos los registros seleccionados el rango va entre 0.35 Hz y 10 Hz.

Paso 3:

Haciendo una adaptación de los requerimientos especificados en el capítulo 17 del ASCE 7-10 con la NTE 030, las señales escaladas y corregidas, deben encajar en un rango del periodo comprendido entre $0.5 T_D$ y $1.25 T_M$ del edificio aislado. Para el edificio en mención, estos valores corresponden a un rango del periodo entre 1.5 s y 4.0 s.

Para hacer este encaje (*match*) se utiliza el software SeismoMatch. Solamente se deben ingresar todos los archivos *.txt de las señales y colocar un espectro (el de la Norma) y el programa automáticamente hará el encaje.

Paso 4:

Ya que se necesitan 7 registros (ver acápite 4.9) se crean 3 registros artificiales con el programa SeismoArtif.

Primero se selecciona el tipo de registro a crear, seleccionamos “Synthetic Accelerogram Generation & Adjustment”. Luego se define el espectro “modelo”, en nuestro caso, el espectro del proyecto de Norma NTE 030 (2014). Se especifican los parámetros sísmicos: el régimen de falla (subducción - entre placas / lejos de una falla), la magnitud de momento que generaría una aceleración pico de 0.45g y la distancia de Joyner-Boore (distancia entre el epicentro y la estación de registro – 10 Km); y los parámetros de suelo: tipo de suelo (según el proyecto NTE 030 se usa “Generic Rock”). También se definen los intervalos de tiempo para los datos de entrada y salida, para después crear los 3 registros.

Finalmente se comprueban que los registros artificiales se asemejan a los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento del proyecto de Norma NTE 030. Se sugiere crear varios registros, para luego separar los que más se asemejan a las señales locales.

Los 7 registros están listos para el análisis en ambas direcciones (X-X e Y-Y).

En las siguientes figuras se muestra el orden de los pasos mencionados, con algunas marcaciones para la aclaración.

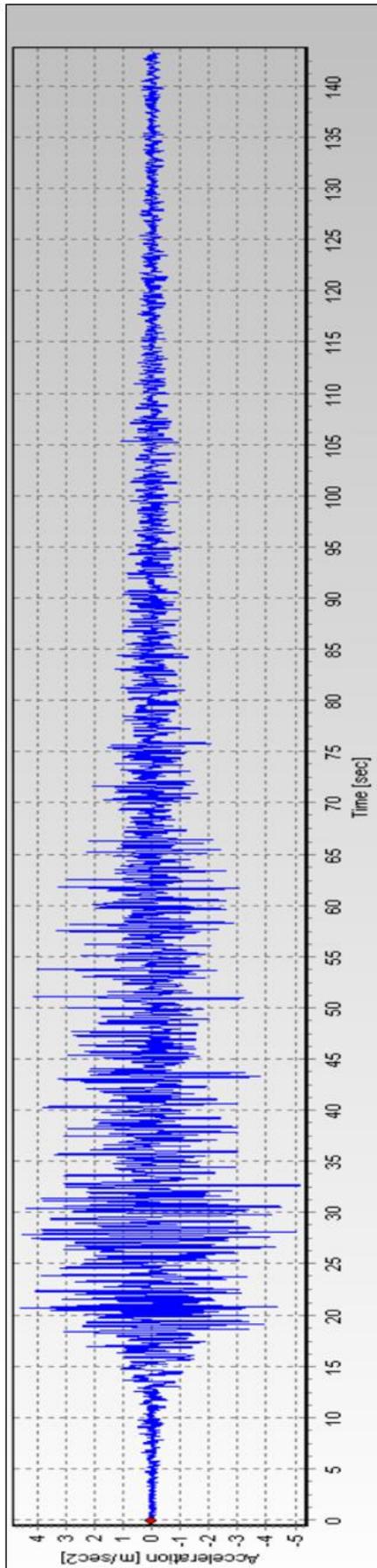


Fig. C.1. Registro original de aceleraciones del sismo de Chile 2010. (SeismoSignal)

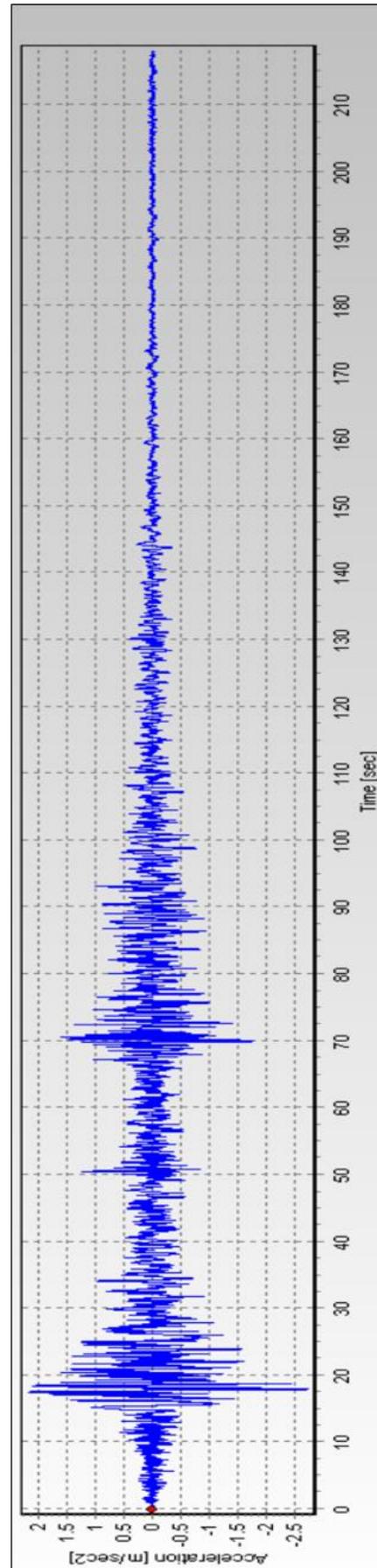


Fig. C.2. Registro original de aceleraciones del sismo de Pisco 2007 (SeismoSignal)

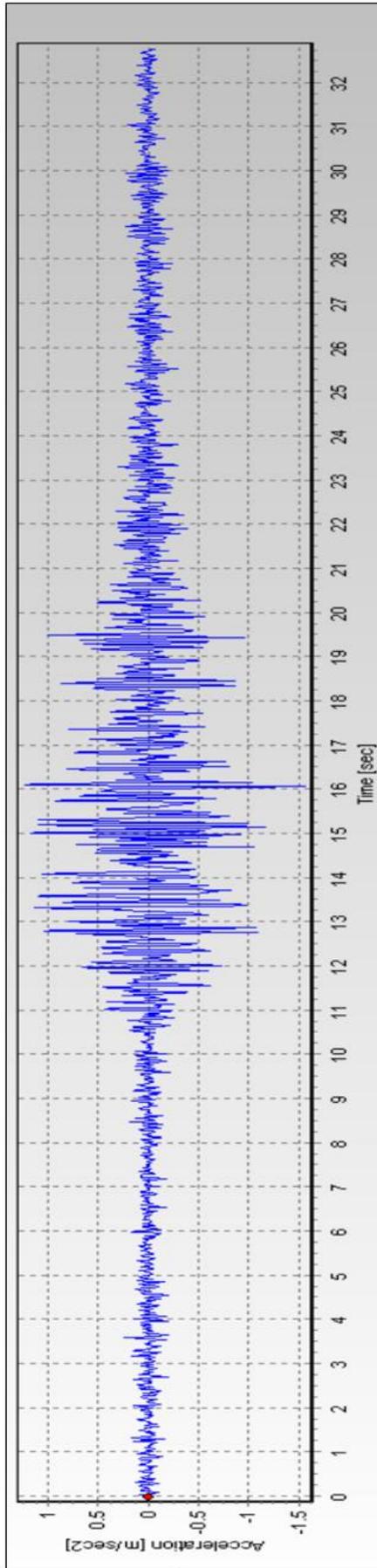


Fig. C.3. Registro original de aceleraciones del sismo de Lima 1974. (SeismoSignal)

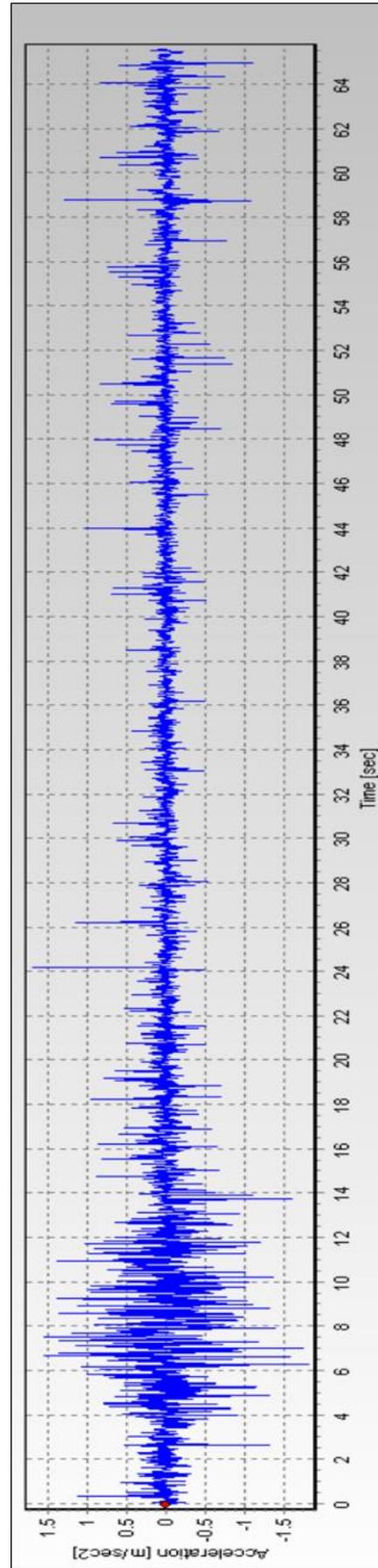


Fig. C.4. Registro original de aceleraciones del sismo de Lima 1966. (SeismoSignal)

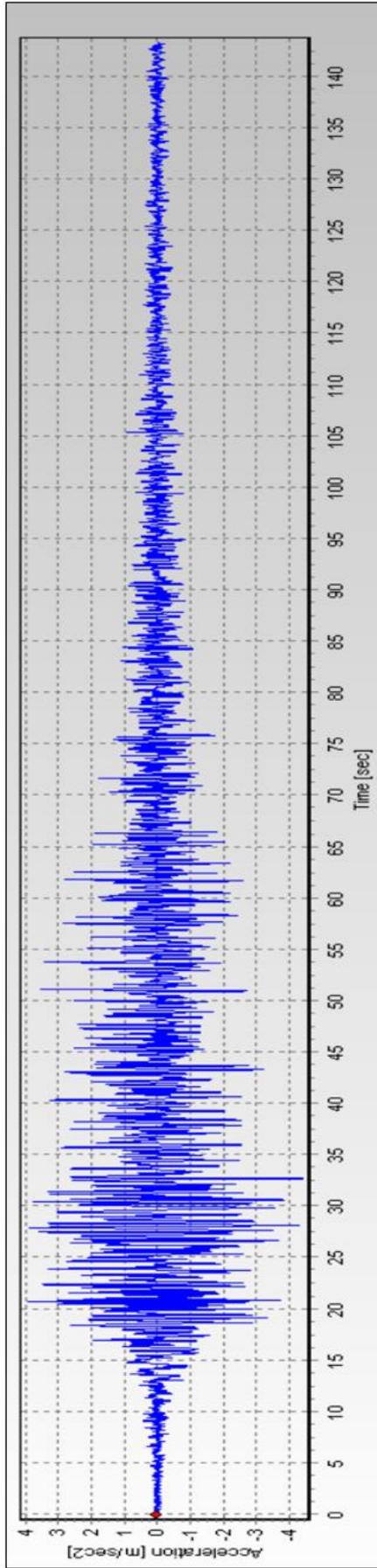


Fig. C.5. Registro de aceleraciones del sismo de Chile 2010 escalado a 0.45g. (SeismoSignal)

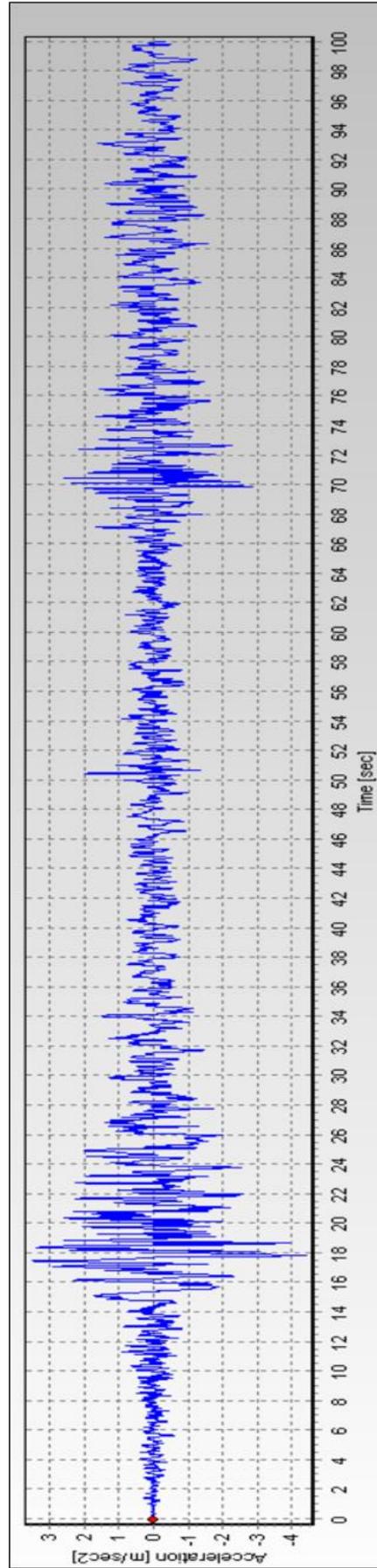


Fig. C.6. Registro de aceleraciones del sismo de Pisco 2007 escalado a 0.45g. (SeismoSignal)

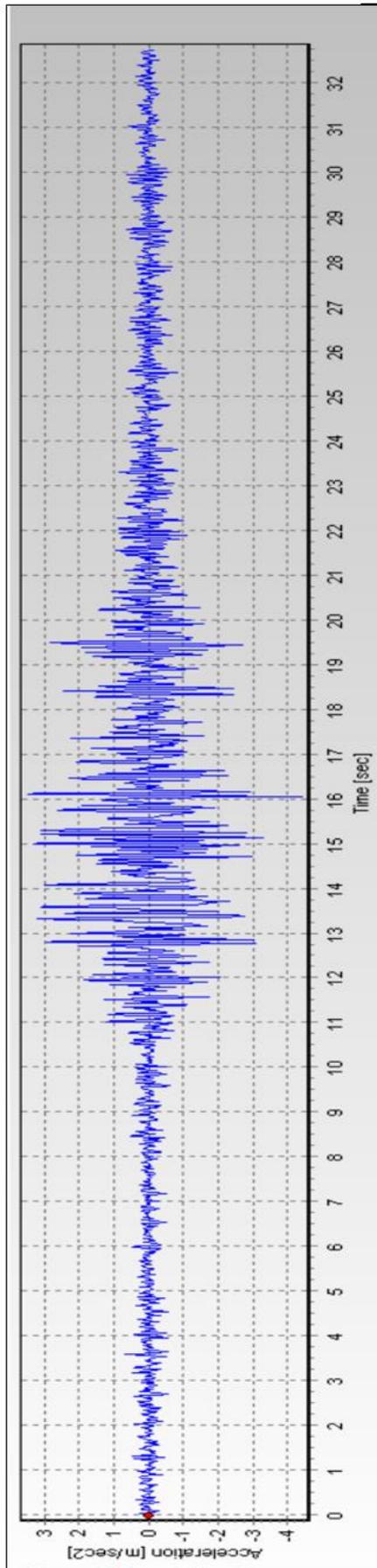


Fig. C.7. Registro de aceleraciones del sismo de Lima 1974 escalado a 0.45g. (SeismoSignal)

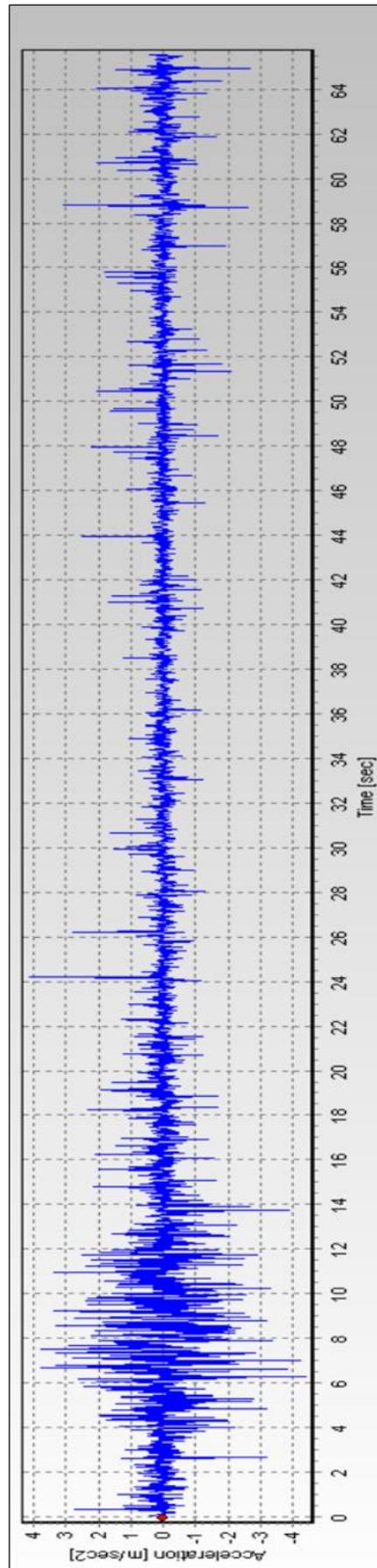


Fig. C.8. Registro de aceleraciones del sismo de Lima 1966 escalado a 0.45g. (SeismoSignal)

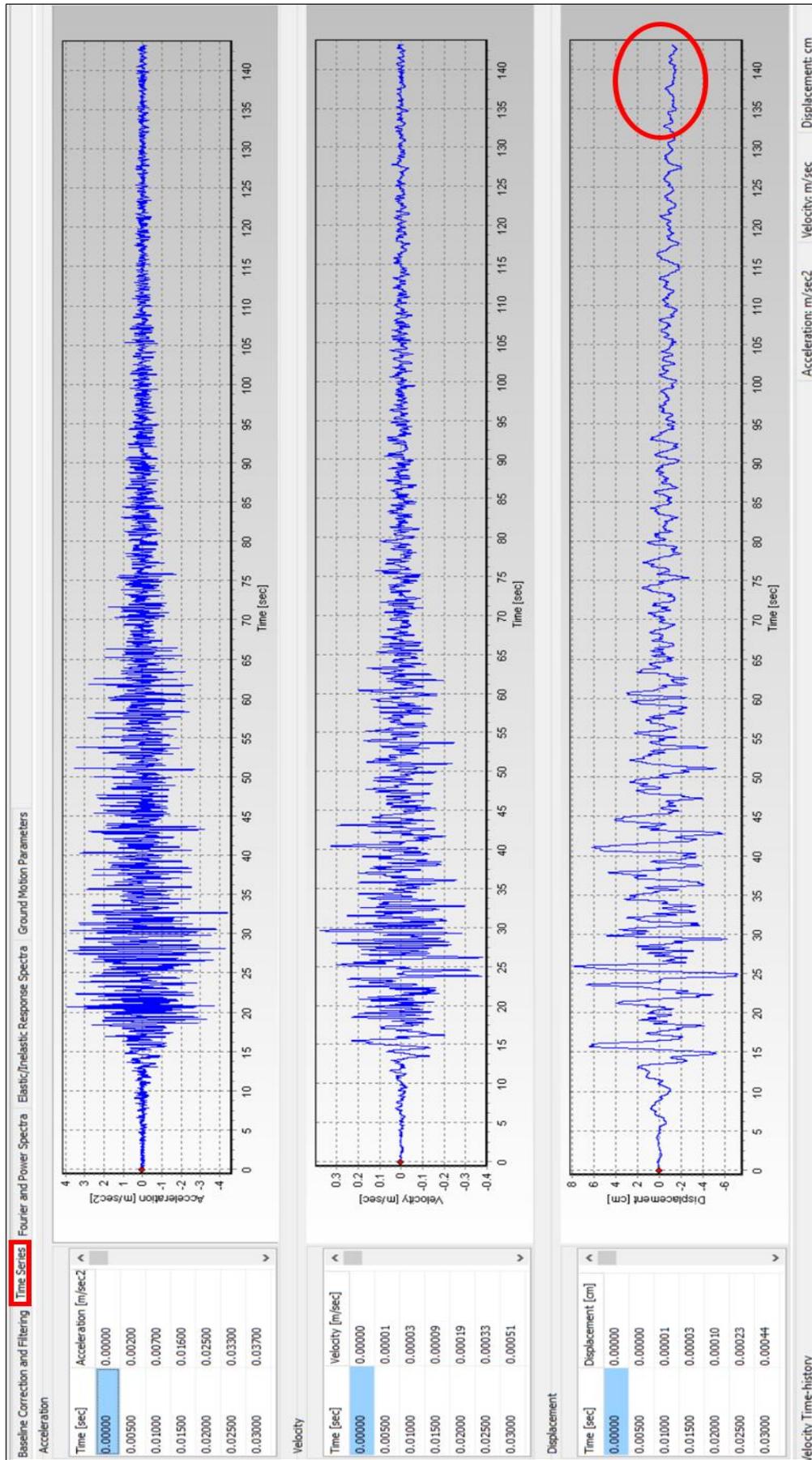


Fig. C.9: Registro escalado sin corregir del sismo de Chile 2010. Se observa que los desplazamientos no regresan al valor de cero. (SeismoSignal)

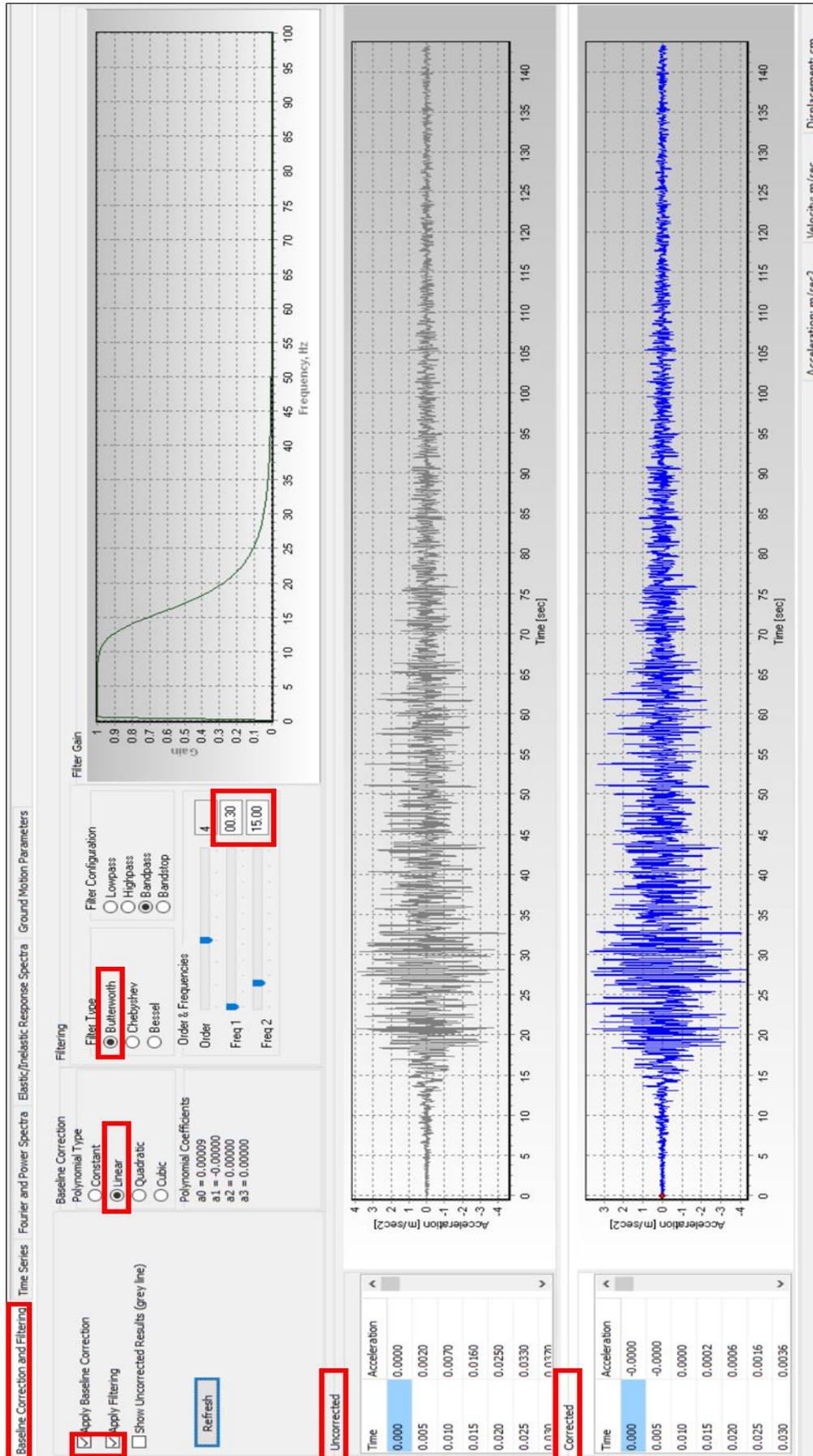


Fig. C.10: Procedimiento para la corrección del registro del sismo de Chile 2010. (SeismoSignal)

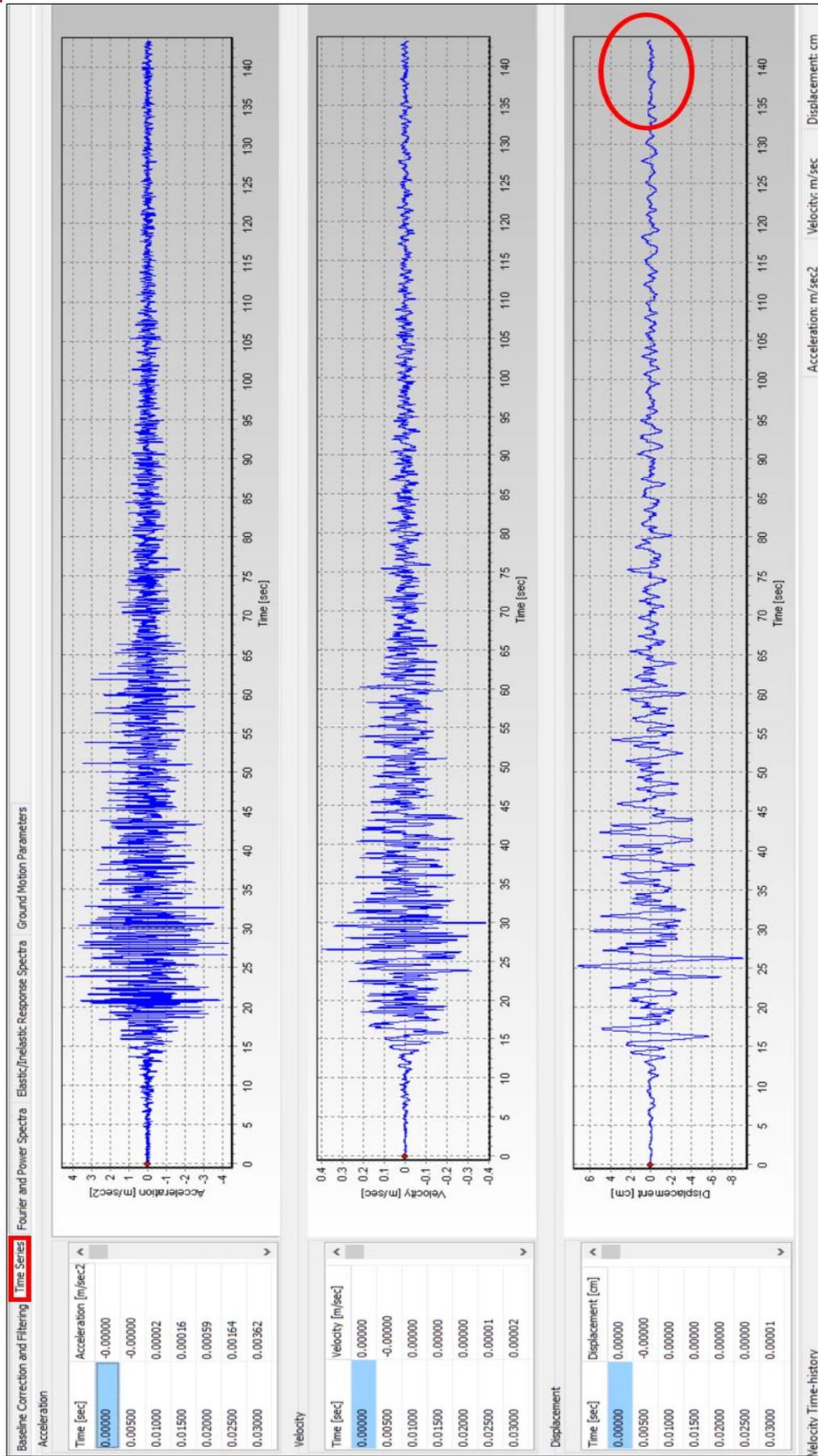


Fig. C.11: Registro escalado y corregido del sismo de Chile 2010. Se observa que los desplazamientos regresan al valor inicial de cero. (SeismoSignal)

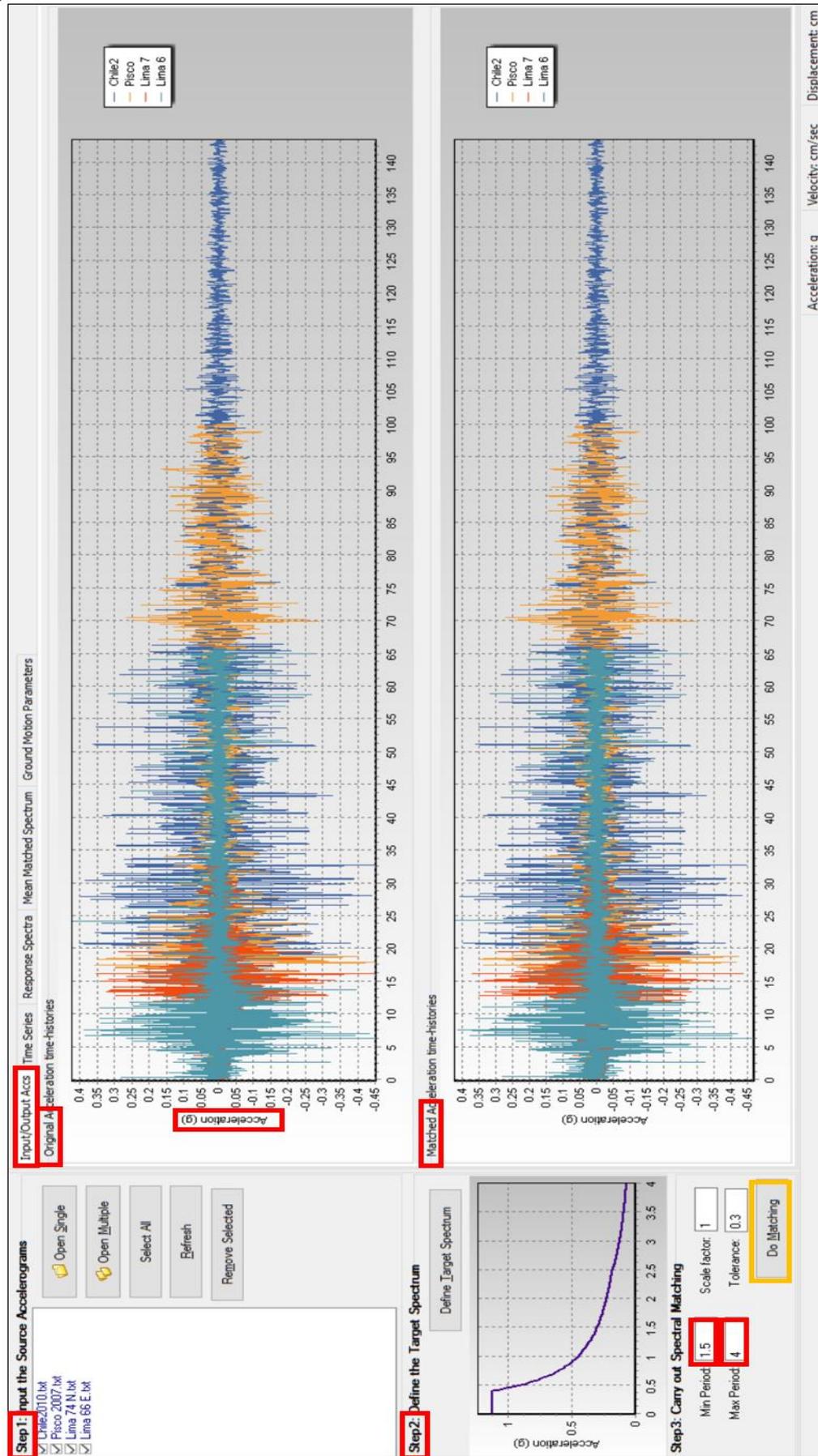


Fig. C.12: Todos los registros escalados y corregidos introducidos en el programa para obtener el encaje establecido en los códigos. (SeismoMatch)



Fig. C.13: Espectro de aceleraciones de los registros sin encajar. Se observa la dispersión de los valores en la zona de interés con respecto de la Norma (SeismoMatch)

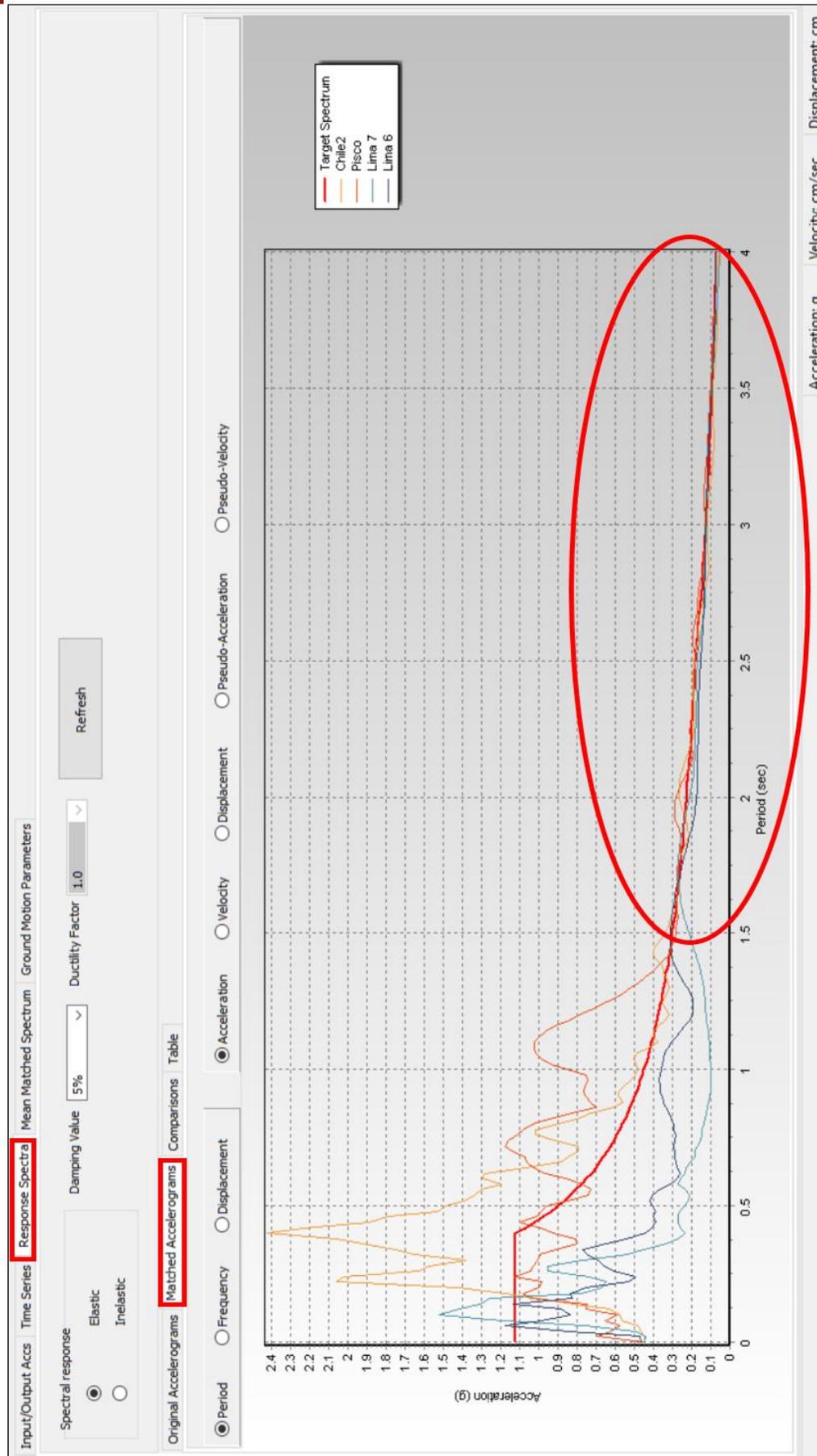


Fig. C.14: Espectro de aceleraciones de los registros encajados. Se observa que la dispersión de los valores en la zona de interés ahora es mínima. (SeismoMatch)

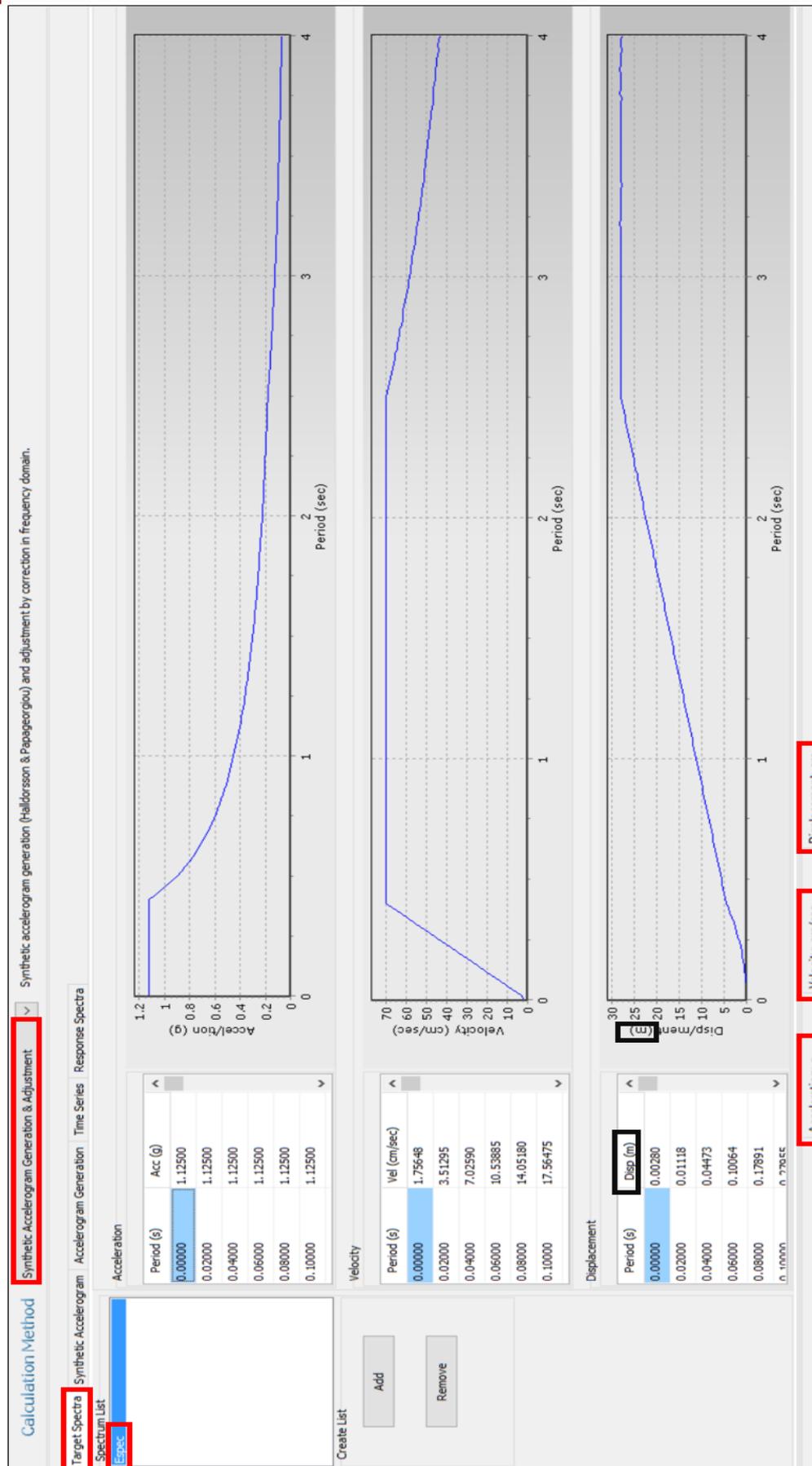


Fig. C.15: Se define el espectro del proyecto de Norma NTE 030. Verificar las unidades remarcaadas, ya que el programa presenta un defecto en estas. (SeismoArtif)

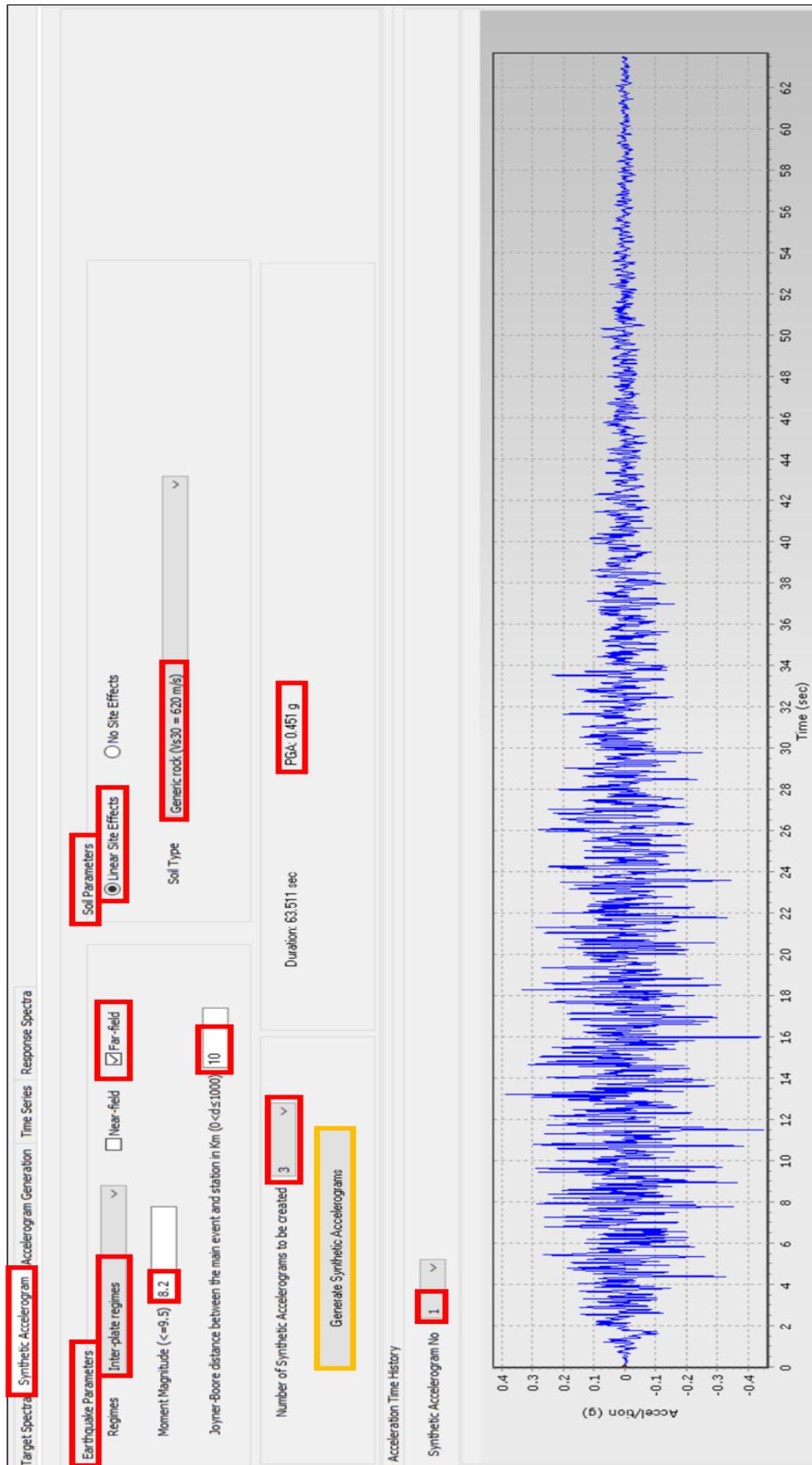


Fig. C.16: Se definen los parámetros remarcados en rojo, conforme a las disposiciones del Proy. Norma NTE 030 para la zona en estudio. (SeismoArtif)

Target Spectra
Synthetic Accelerogram
Accelerogram Generation
Time Series
Response Spectra

Choose a Spectrum from the list: Espec Spectrum Factor: 1.0

Number of Artificial Accelerograms to be created: 3

Spectrum Settings

Smallest Period of desired response spectrum (sec): 0.02

Largest Period of desired response spectrum (sec): 4

Accelerogram Settings

Damping (%): 5

Time-Step (sec): 0.02

Duration (sec): 63.511

Specify PGA: 0.45

Generate Artificial Accelerograms

Convergence achieved.

Acceleration: g
Velocity: cm/sec
Displacement: cm

Fig. C.17: Se definen los parámetros remarcados en rojo para generar los acelerogramas artificiales. (SeismoArtif)

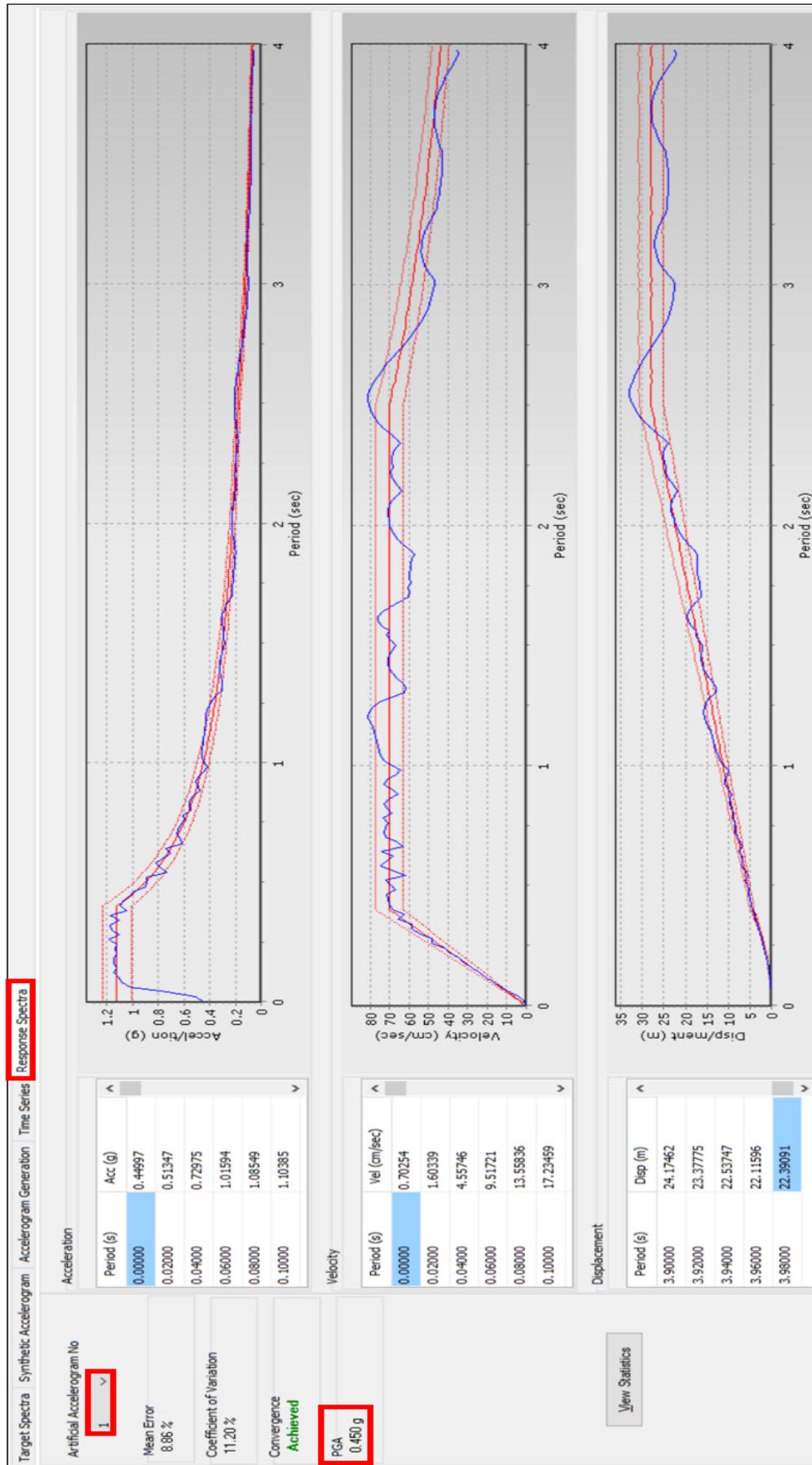


Fig. C.18: Se observa la correlación con los parámetros establecidos en el proyecto de Norma NTE 030. (SeismoArtif)

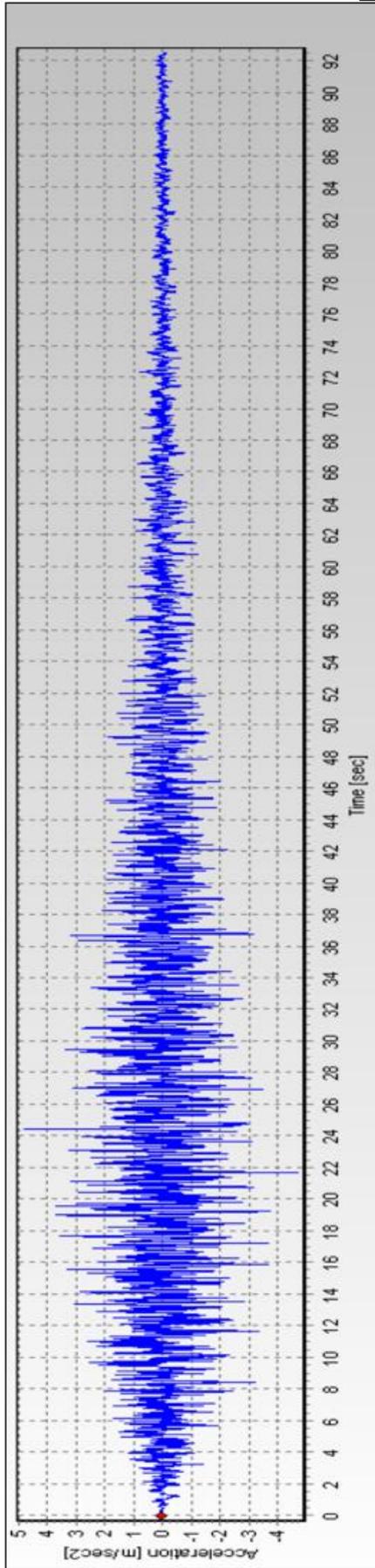


Fig. C.19. Registro artificial de aceleraciones ARTIF-1. (SeismoSignal)

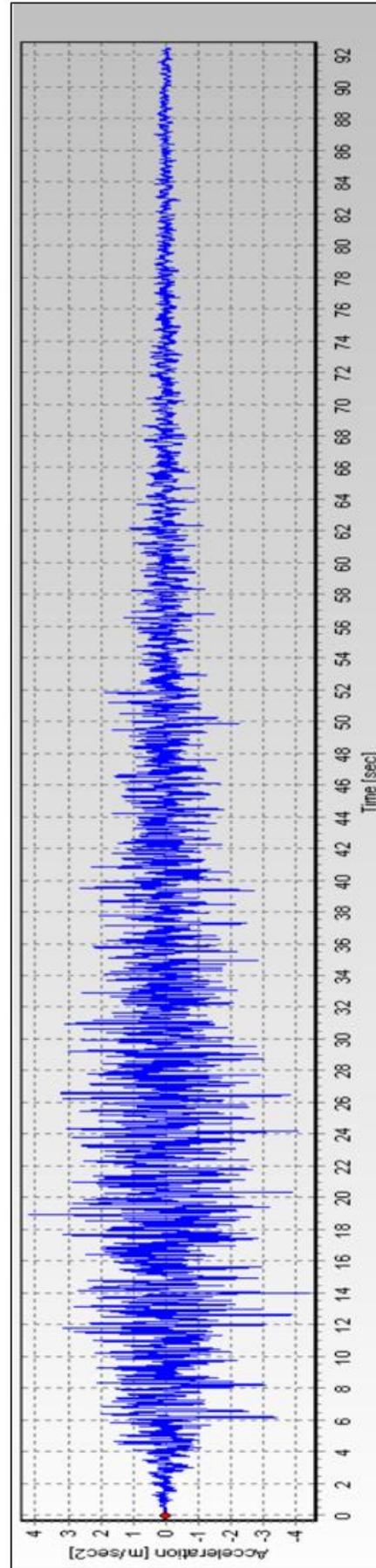


Fig. C.20. Registro artificial de aceleraciones ARTIF-4. (SeismoSignal)

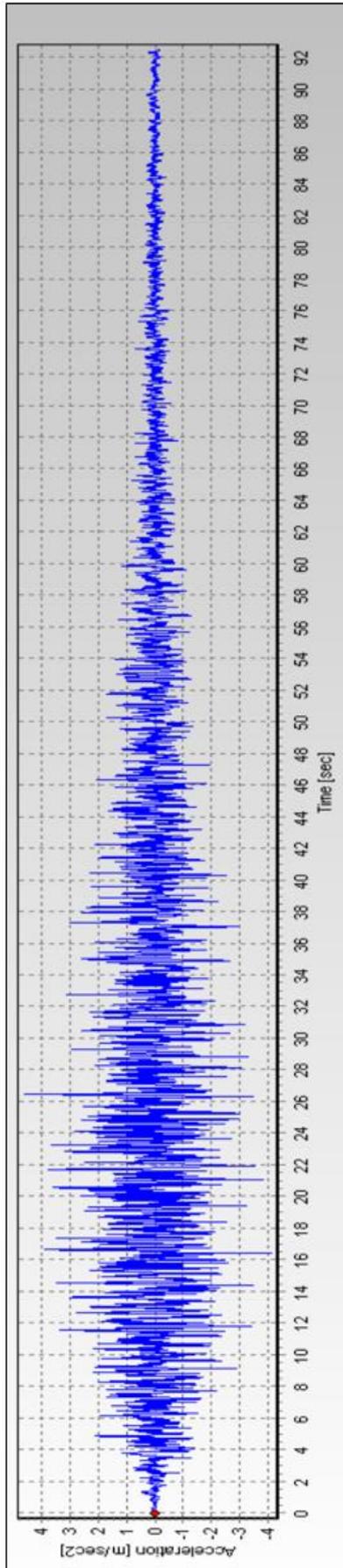


Fig. C.21. Registro artificial de aceleraciones ARTIF-5. (SeismoSignal)

ANEXO D

DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE DESEMPEÑO, UTILIZANDO LAS TABLAS DEL HAZUS® MH 2.1 Y DEL FEMA

1. Definir un nivel de desempeño, según la Tabla 10.4.1, o según los parámetros del SEAOC:

Nivel de desempeño del edificio	Daño esperado luego del sismo	Nivel de desempeño estructural	Nivel de desempeño no-estructural
Nivel operativo	Los servicios de resguardo mantienen su función, pequeño daño estructural o daño no estructural	Ocupación inmediata	Operativo
Ocupación Inmediata	El edificio permanece seguro para la ocupación, cualquier daño estructural y no estructural requiere de una reparación menor	Ocupación inmediata	Ocupación inmediata
Nivel Intermedio		Control del daño	
Resguardo de la vida	La estructura permanece estable y tiene una significativa reserva de capacidad; el riesgo ocasionado por el daño de los elementos NE es controlado	Resguardo de la vida	Resguardo de la vida
Nivel Intermedio		Seguridad Limitada	Riesgo reducido
Prevención del colapso	La estructura permanece en pie, pero a duras penas, el edificio puede tener severos daños estructurales y no estructurales	Prevención del colapso	Sin consideración

Tabla D.1.: Asignación del nivel de desempeño que considera tanto a los elementos estructurales, como a los elementos no estructurales (FEMA E-74)

Parámetros del SEAOC, de acuerdo a la capacidad del material a utilizar (concreto armado)

- Totalmente operacional (SP-1): no se interrumpe el funcionamiento de las instalaciones, se tiene un daño despreciable.
- Operacional (SP-2): las instalaciones continúan en operación con un daño leve y una leve interrupción de los servicios no esenciales.
- Resguardo de la vida (SP-3): no hay pérdida de vidas y la estructura tiene un daño considerable, se tienen grandes incursiones en el rasgo inelástico.
- Cerca al colapso (SP-4): el daño estructural es severo, la seguridad de las personas se encuentra en peligro.

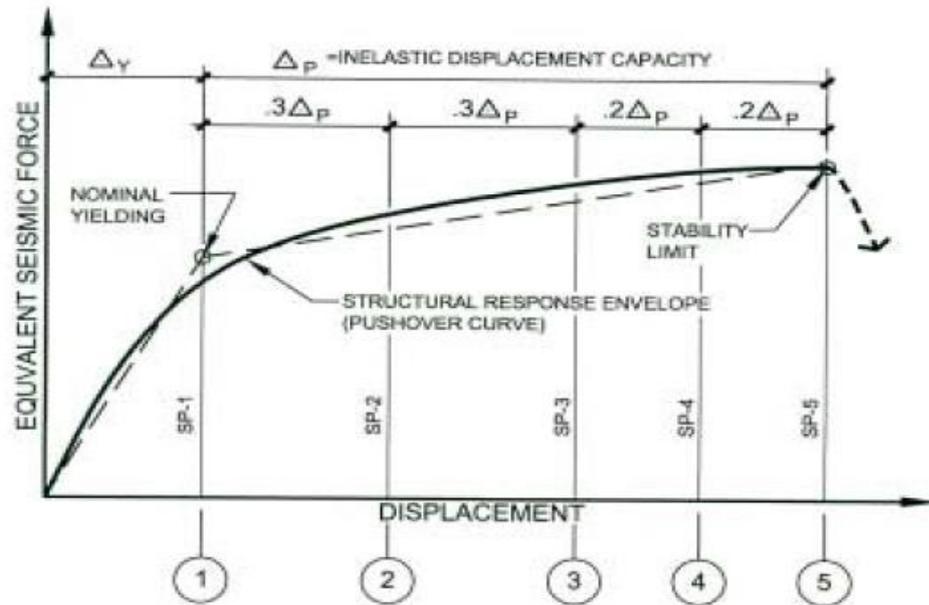


Fig. D.1: Gráfico Fuerza vs Desplazamiento para los distintos niveles de desempeño (SEAOC 2000)

2. Definir el peligro sísmico apropiado

Para utilizar el HAZUS 2.1 debidamente, se busca una equivalencia de las zonas consideradas por el UBC con la norma NTE 0.30 para poder emplear los parámetros del HAZUS.

Factor de zona sísmica	0.075g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
E.030	---	Zona 1	---	Zona 2	Zona 3
UBC	Zona 1	Zona 2A	Zona 2B	Zona 3	Zona 4

Tabla D.2: Comparación entre la NTE 030 y la UBC para los parámetros de zona. (Fuente: UBC, HAZUS)

Luego se selecciona el tipo de código del HAZUS de acuerdo con la zona en estudio:

UBC Seismic Zone (NEHRP Map Area)	Post-1975	1941 - 1975	Pre-1941
Zone 4 (Map Area 7)	High-Code	Moderate-Code	Pre-Code (W1 = Moderate-Code)
Zone 3 (Map Area 6)	Moderate-Code	Moderate-Code	Pre-Code (W1 = Moderate-Code)
Zone 2B (Map Area 5)	Moderate-Code	Low-Code	Pre-Code (W1 = Low-Code)
Zone 2A (Map Area 4)	Low-Code	Low-Code	Pre-Code (W1 = Low-Code)
Zone 1 (Map Area 2/3)	Low-Code	Pre-Code (W1 = Low-Code)	Pre-Code (W1 = Low-Code)
Zone 0 (Map Area 1)	Pre-Code (W1 = Low-Code)	Pre-Code (W1 = Low-Code)	Pre-Code (W1 = Low-Code)

Tabla D.3: Lineamientos para seleccionar las funciones de daño asociadas a edificaciones típicas basadas en la clasificación de la UBC y el tiempo de vida útil de las mismas.

En el caso de Lima se tienen dos definiciones para la sismicidad en la zona (HAZUS)

2.6.3.1 Zones of High Seismicity

Buildings located on sites for which the 10%/50 year, design short-period response acceleration, S_{XS} , is equal to or greater than 0.5g, or for which the 10%/50 year design one-second period response acceleration, S_{X1} , is equal to or greater than 0.2g shall be considered to be located within zones of high seismicity.

2.6.3.2 Zones of Moderate Seismicity

Buildings located on sites for which the 10%/50 year, design short-period response acceleration, S_{XS} , is equal to or greater than 0.167g but is less than 0.5g, or for which the 10%/50 year, design one-second period response acceleration, S_{X1} , is equal to or greater than 0.067g but less than 0.2g shall be considered to be located within zones of moderate seismicity.

Fig. D.2: Definiciones del peligro sísmico de acuerdo al 10% de excedencia en 50 años de vida útil.

3. Se define el sistema estructural a utilizar

De acuerdo al HAZUS, se tiene la siguiente codificación:

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame ($\leq 5,000$ sq. ft.)		1 - 2	1	14
2	W2	Wood, Commercial and Industrial ($>5,000$ sq. ft.)		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4 - 7	5	60 156
15	S5H		High-Rise	8+	13	
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM2M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1 - 3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1 - 2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

Tabla D.4: Tipos de edificaciones (NIBS y FEMA 2003)

4. Se define una deriva objetivo o un desplazamiento objetivo

De acuerdo al tipo de uso de la edificación y la ubicación del lugar en estudio, el HAZUS define derivas objetivo.

Para el caso de Lima y edificaciones esenciales se tiene:

PARA EDIFICACIONES COMUNES:

Table 5.8 Typical Drift Ratios Used to Define Median Values of Structural Damage

Seismic Design Level	Building Type (Low-Rise)	Drift Ratio at the Threshold of Structural Damage			
		Slight	Moderate	Extensive	Complete
High-Code	W1/W2	0.004	0.012	0.040	0.100
	C1L, S2L	0.005	0.010	0.030	0.080
	RM1L/RM2L, PC1/PC2L	0.004	0.008	0.024	0.070
Moderate-Code	W1/W2	0.004	0.010	0.031	0.075
	C1L, S2L	0.005	0.009	0.023	0.060
	RM1L/RM2L, PC1/PC2L	0.004	0.007	0.019	0.053
Low-Code	W1/W2	0.004	0.010	0.031	0.075
	C1L, S2L	0.005	0.008	0.020	0.050
	RM1L/RM2L, PC1/PC2L	0.004	0.006	0.016	0.044
	URML, C3L, S5L	0.003	0.006	0.015	0.035
Pre-Code	W1/W2	0.003	0.008	0.025	0.060
	C1L, S2L	0.004	0.006	0.016	0.040
	RM1L/RM2L, PC1/PC2L	0.003	0.005	0.013	0.035
	URML, C3L, S5L	0.002	0.005	0.012	0.028

Tabla D.5. Tabla con los valores promedio de las derivas de la estructura, según la zona de sismo y el tipo de estructura.

Building Properties			Interstory Drift at Threshold of Damage State				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Slight	Moderate	Extensive	Complete	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal					Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0040	0.0120	0.0400	0.1000	0.50	0.80	1.51	0.81	5.04	0.85	12.60	0.97
W2	288	216	0.0040	0.0120	0.0400	0.1000	0.86	0.81	2.59	0.88	8.64	0.90	21.60	0.83
S1L	288	216	0.0060	0.0120	0.0300	0.0800	1.30	0.80	2.59	0.76	6.48	0.69	17.28	0.72
S1M	720	540	0.0040	0.0080	0.0200	0.0533	2.16	0.65	4.32	0.66	10.80	0.67	28.80	0.74
S1H	1872	1123	0.0030	0.0060	0.0150	0.0400	3.37	0.64	6.74	0.64	16.85	0.65	44.93	0.67
S2L	288	216	0.0050	0.0100	0.0300	0.0800	1.08	0.81	2.16	0.89	6.48	0.94	17.28	0.83
S2M	720	540	0.0033	0.0067	0.0200	0.0533	1.80	0.67	3.60	0.67	10.80	0.68	28.80	0.79
S2H	1872	1123	0.0025	0.0050	0.0150	0.0400	2.81	0.63	5.62	0.63	16.85	0.64	44.93	0.71
S3	180	135	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.54	0.81	1.08	0.82	3.24	0.91	9.45	0.90
S4L	288	216	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.86	0.89	1.73	0.89	5.18	0.98	15.12	0.87
S4M	720	540	0.0027	0.0053	0.0160	0.0467	1.44	0.77	2.88	0.72	8.64	0.70	25.20	0.89
S4H	1872	1123	0.0020	0.0040	0.0120	0.0350	2.25	0.64	4.49	0.66	13.48	0.69	39.31	0.77
S5L														
S5M														
S5H														
C1L	240	180	0.0050	0.0100	0.0300	0.0800	0.90	0.81	1.80	0.84	5.40	0.86	14.40	0.81
C1M	600	450	0.0033	0.0067	0.0200	0.0533	1.50	0.68	3.00	0.67	9.00	0.68	24.00	0.81
C1H	1440	864	0.0025	0.0050	0.0150	0.0400	2.16	0.66	4.32	0.64	12.96	0.67	34.56	0.78
C2L	240	180	0.0040	0.0100	0.0300	0.0800	0.72	0.81	1.80	0.84	5.40	0.93	14.40	0.92
C2M	600	450	0.0027	0.0067	0.0200	0.0533	1.20	0.74	3.00	0.77	9.00	0.68	24.00	0.77
C2H	1440	864	0.0020	0.0050	0.0150	0.0400	1.73	0.68	4.32	0.65	12.96	0.66	34.56	0.75
C3L														
C3M														
C3H														
PC1	180	135	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.54	0.76	1.08	0.86	3.24	0.88	9.45	0.99
PC2L	240	180	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.72	0.84	1.44	0.88	4.32	0.98	12.60	0.94
PC2M	600	450	0.0027	0.0053	0.0160	0.0467	1.20	0.77	2.40	0.81	7.20	0.70	21.00	0.82
PC2H	1440	864	0.0020	0.0040	0.0120	0.0350	1.73	0.64	3.46	0.66	10.37	0.68	30.24	0.81
RM1L	240	180	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.72	0.84	1.44	0.86	4.32	0.92	12.60	1.01
RM1M	600	450	0.0027	0.0053	0.0160	0.0467	1.20	0.71	2.40	0.81	7.20	0.76	21.00	0.75
RM2L	240	180	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.72	0.80	1.44	0.81	4.32	0.91	12.60	0.98
RM2M	600	450	0.0027	0.0053	0.0160	0.0467	1.20	0.71	2.40	0.79	7.20	0.70	21.00	0.73
RM2H	1440	864	0.0020	0.0040	0.0120	0.0350	1.73	0.66	3.46	0.65	10.37	0.66	30.24	0.72
URML														
URMM														
MH	120	120	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.48	0.91	0.96	1.00	2.88	1.03	8.40	0.92

Tabla D.6. Tabla con los valores para definir una deriva objetivo. Para una zona de alto peligro sísmico.

Building Properties Type	Height (inches)		Interstory Drift at Threshold of Damage State				Spectral Displacement (inches)							
			Slight	Moderate	Extensive	Complete	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal					Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750	0.50	0.84	1.25	0.86	3.86	0.89	9.45	1.04
W2	288	216	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750	0.86	0.89	2.14	0.95	6.62	0.95	16.20	0.92
S1L	288	216	0.0060	0.0104	0.0235	0.0600	1.30	0.80	2.24	0.75	5.08	0.74	12.96	0.88
S1M	720	540	0.0040	0.0069	0.0157	0.0400	2.16	0.65	3.74	0.68	8.46	0.69	21.60	0.87
S1H	1872	1123	0.0030	0.0052	0.0118	0.0300	3.37	0.64	5.83	0.64	13.21	0.71	33.70	0.83
S2L	288	216	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600	1.08	0.93	1.87	0.92	5.04	0.93	12.96	0.93
S2M	720	540	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400	1.80	0.70	3.12	0.69	8.40	0.69	21.60	0.89
S2H	1872	1123	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300	2.81	0.66	4.87	0.64	13.10	0.69	33.70	0.80
S3	180	135	0.0040	0.0070	0.0187	0.0525	0.54	0.88	0.94	0.92	2.52	0.97	7.09	0.89
S4L	288	216	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525	0.86	0.96	1.50	1.00	4.04	1.03	11.34	0.92
S4M	720	540	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350	1.44	0.75	2.50	0.72	6.73	0.72	18.90	0.94
S4H	1872	1123	0.0020	0.0035	0.0093	0.0262	2.25	0.66	3.90	0.67	10.50	0.70	29.48	0.90
S5L														
S5M														
S5H														
C1L	240	180	0.0050	0.0087	0.0233	0.0600	0.90	0.89	1.56	0.90	4.20	0.90	10.80	0.89
C1M	600	450	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400	1.50	0.70	2.60	0.70	7.00	0.70	18.00	0.89
C1H	1440	864	0.0025	0.0043	0.0117	0.0300	2.16	0.66	3.74	0.66	10.08	0.76	25.92	0.91
C2L	240	180	0.0040	0.0084	0.0232	0.0600	0.72	0.91	1.52	0.97	4.17	1.03	10.80	0.87
C2M	600	450	0.0027	0.0056	0.0154	0.0400	1.20	0.81	2.53	0.77	6.95	0.73	18.00	0.91
C2H	1440	864	0.0020	0.0042	0.0116	0.0300	1.73	0.66	3.64	0.68	10.00	0.70	25.92	0.87
C3L														
C3M														
C3H														
PC1	180	135	0.0040	0.0070	0.0187	0.0525	0.54	0.89	0.94	0.92	2.52	0.97	7.09	1.04
PC2L	240	180	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525	0.72	0.96	1.25	1.00	3.37	1.03	9.45	0.88
PC2M	600	450	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350	1.20	0.82	2.08	0.79	5.61	0.75	15.75	0.93
PC2H	1440	864	0.0020	0.0035	0.0094	0.0263	1.73	0.68	3.00	0.69	8.08	0.77	22.68	0.89
RM1L	240	180	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525	0.72	0.96	1.25	0.99	3.37	1.05	9.45	0.94
RM1M	600	450	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350	1.20	0.81	2.08	0.82	5.61	0.80	15.75	0.89
RM2L	240	180	0.0040	0.0069	0.0187	0.0525	0.72	0.91	1.25	0.96	3.37	1.02	9.45	0.93
RM2M	600	450	0.0027	0.0046	0.0125	0.0350	1.20	0.81	2.08	0.80	5.61	0.75	15.75	0.88
RM2H	1440	864	0.0020	0.0035	0.0094	0.0263	1.73	0.67	3.00	0.69	8.08	0.70	22.68	0.86
URML														
URMM														
MH	120	120	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.48	0.91	0.96	1.00	2.88	1.03	8.40	0.92

Tabla D.7. Tabla con los valores para definir una deriva objetivo. Para una zona de moderado peligro sísmico.

Building Properties			Interstory Drift at				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Threshold of Damage State				Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750	0.50	0.93	1.25	0.98	3.86	1.02	9.45	0.99
W2	288	216	0.0040	0.0099	0.0306	0.0750	0.86	0.97	2.14	0.90	6.62	0.89	16.20	0.99
S1L	288	216	0.0060	0.0096	0.0203	0.0500	1.30	0.77	2.07	0.78	4.38	0.78	10.80	0.96
S1M	720	540	0.0040	0.0064	0.0135	0.0333	2.16	0.68	3.44	0.78	7.30	0.85	18.00	0.98
S1H	1872	1123	0.0030	0.0048	0.0101	0.0250	3.37	0.66	5.37	0.70	11.38	0.76	28.08	0.92
S2L	288	216	0.0050	0.0080	0.0200	0.0500	1.08	0.96	1.73	0.89	4.32	0.86	10.80	0.98
S2M	720	540	0.0033	0.0053	0.0133	0.0333	1.80	0.70	2.88	0.73	7.20	0.85	18.00	0.98
S2H	1872	1123	0.0025	0.0040	0.0100	0.0250	2.81	0.66	4.49	0.67	11.23	0.74	28.08	0.92
S3	180	135	0.0040	0.0064	0.0161	0.0438	0.54	0.98	0.87	0.99	2.17	1.01	5.91	0.90
S4L	288	216	0.0040	0.0064	0.0161	0.0438	0.86	1.05	1.38	0.98	3.47	0.89	9.45	0.98
S4M	720	540	0.0027	0.0043	0.0107	0.0292	1.44	0.76	2.31	0.78	5.78	0.90	15.75	0.99
S4H	1872	1123	0.0020	0.0032	0.0080	0.0219	2.25	0.70	3.60	0.75	9.01	0.90	24.57	0.98
S5L	288	216	0.0030	0.0060	0.0150	0.0350	0.65	1.11	1.30	1.04	3.24	0.99	7.56	0.95
S5M	720	540	0.0020	0.0040	0.0100	0.0233	1.08	0.77	2.16	0.79	5.40	0.87	12.60	0.98
S5H	1872	1123	0.0015	0.0030	0.0075	0.0175	1.68	0.70	3.37	0.73	8.42	0.89	19.66	0.97
C1L	240	180	0.0050	0.0080	0.0200	0.0500	0.90	0.95	1.44	0.91	3.60	0.85	9.00	0.97
C1M	600	450	0.0033	0.0053	0.0133	0.0333	1.50	0.70	2.40	0.74	6.00	0.86	15.00	0.98
C1H	1440	864	0.0025	0.0040	0.0100	0.0250	2.16	0.70	3.46	0.81	8.64	0.89	21.60	0.98
C2L	240	180	0.0040	0.0076	0.0197	0.0500	0.72	1.04	1.37	1.02	3.55	0.99	9.00	0.95
C2M	600	450	0.0027	0.0051	0.0132	0.0333	1.20	0.82	2.29	0.81	5.92	0.81	15.00	0.99
C2H	1440	864	0.0020	0.0038	0.0099	0.0250	1.73	0.68	3.30	0.73	8.53	0.84	21.60	0.95
C3L	240	180	0.0030	0.0060	0.0150	0.0350	0.54	1.09	1.08	1.07	2.70	1.08	6.30	0.91
C3M	600	450	0.0020	0.0040	0.0100	0.0233	0.90	0.85	1.80	0.83	4.50	0.79	10.50	0.98
C3H	1440	864	0.0015	0.0030	0.0075	0.0175	1.30	0.71	2.59	0.74	6.48	0.90	15.12	0.97
PC1	180	135	0.0040	0.0064	0.0161	0.0438	0.54	1.00	0.87	1.05	2.17	1.12	5.91	0.89
PC2L	240	180	0.0040	0.0064	0.0161	0.0438	0.72	1.08	1.15	1.03	2.89	0.98	7.88	0.96
PC2M	600	450	0.0027	0.0043	0.0107	0.0292	1.20	0.81	1.92	0.79	4.81	0.84	13.12	0.99
PC2H	1440	864	0.0020	0.0032	0.0080	0.0219	1.73	0.71	2.77	0.75	6.93	0.89	18.90	0.98
RM1L	240	180	0.0040	0.0064	0.0161	0.0438	0.72	1.11	1.15	1.10	2.89	1.10	7.88	0.92
RM1M	600	450	0.0027	0.0043	0.0107	0.0292	1.20	0.87	1.92	0.84	4.81	0.79	13.12	0.96
RM2L	240	180	0.0040	0.0064	0.0161	0.0438	0.72	1.05	1.15	1.07	2.89	1.09	7.88	0.91
RM2M	600	450	0.0027	0.0043	0.0107	0.0292	1.20	0.84	1.92	0.81	4.81	0.77	13.12	0.96
RM2H	1440	864	0.0020	0.0032	0.0080	0.0219	1.73	0.69	2.77	0.72	6.93	0.87	18.90	0.96
URML	180	135	0.0030	0.0060	0.0150	0.0350	0.41	0.99	0.81	1.05	2.03	1.10	4.73	1.08
URMM	420	315	0.0020	0.0040	0.0100	0.0233	0.63	0.91	1.26	0.92	3.15	0.87	7.35	0.91
MH	120	120	0.0040	0.0080	0.0240	0.0700	0.48	0.91	0.96	1.00	2.88	1.03	8.40	0.92

Tabla D.8. Tabla con los valores para definir una deriva objetivo. Para una zona de bajo peligro sísmico.

Building Properties			Interstory Drift at				Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Threshold of Damage State				Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Slight	Moderate	Extensive	Complete	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.0032	0.0079	0.0245	0.0600	0.40	1.01	1.00	1.05	3.09	1.07	7.56	1.06
W2	288	216	0.0032	0.0079	0.0245	0.0600	0.69	1.04	1.71	0.97	5.29	0.90	12.96	0.99
S1L	288	216	0.0048	0.0076	0.0162	0.0400	1.04	0.85	1.65	0.82	3.50	0.80	8.64	0.95
S1M	720	540	0.0032	0.0051	0.0108	0.0267	1.73	0.70	2.76	0.75	5.84	0.81	14.40	0.98
S1H	1872	1123	0.0024	0.0038	0.0081	0.0200	2.70	0.69	4.30	0.71	9.11	0.85	22.46	0.93
S2L	288	216	0.0040	0.0064	0.0160	0.0400	0.86	1.01	1.38	0.96	3.46	0.88	8.64	0.98
S2M	720	540	0.0027	0.0043	0.0107	0.0267	1.44	0.73	2.30	0.75	5.76	0.80	14.40	0.98
S2H	1872	1123	0.0020	0.0032	0.0080	0.0200	2.25	0.70	3.59	0.70	8.99	0.84	22.46	0.91
S3	180	135	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.43	1.06	0.69	1.03	1.73	1.07	4.73	0.89
S4L	288	216	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.69	1.11	1.11	1.03	2.77	0.99	7.56	0.98
S4M	720	540	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	1.15	0.81	1.85	0.80	4.62	0.94	12.60	1.00
S4H	1872	1123	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175	1.80	0.73	2.88	0.75	7.21	0.90	19.66	0.97
S5L	288	216	0.0024	0.0048	0.0120	0.0280	0.52	1.20	1.04	1.11	2.59	1.08	6.05	0.95
S5M	720	540	0.0016	0.0032	0.0080	0.0187	0.86	0.85	1.73	0.83	4.32	0.94	10.08	0.99
S5H	1872	1123	0.0012	0.0024	0.0060	0.0140	1.35	0.72	2.70	0.75	6.74	0.92	15.72	0.96
C1L	240	180	0.0040	0.0064	0.0160	0.0400	0.72	0.98	1.15	0.94	2.88	0.90	7.20	0.97
C1M	600	450	0.0027	0.0043	0.0107	0.0267	1.20	0.73	1.92	0.77	4.80	0.83	12.00	0.98
C1H	1440	864	0.0020	0.0032	0.0080	0.0200	1.73	0.71	2.76	0.80	6.91	0.94	17.28	1.01
C2L	240	180	0.0032	0.0061	0.0158	0.0400	0.58	1.11	1.10	1.09	2.84	1.07	7.20	0.93
C2M	600	450	0.0021	0.0041	0.0105	0.0267	0.96	0.86	1.83	0.83	4.74	0.80	12.00	0.98
C2H	1440	864	0.0016	0.0031	0.0079	0.0200	1.38	0.73	2.64	0.75	6.82	0.92	17.28	0.97
C3L	240	180	0.0024	0.0048	0.0120	0.0280	0.43	1.19	0.86	1.15	2.16	1.15	5.04	0.92
C3M	600	450	0.0016	0.0032	0.0080	0.0187	0.72	0.90	1.44	0.86	3.60	0.90	8.40	0.96
C3H	1440	864	0.0012	0.0024	0.0060	0.0140	1.04	0.73	2.07	0.75	5.18	0.90	12.10	0.95
PC1	180	135	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.43	1.14	0.69	1.14	1.73	1.17	4.73	0.98
PC2L	240	180	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.58	1.14	0.92	1.10	2.31	1.10	6.30	0.93
PC2M	600	450	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	0.96	0.87	1.54	0.83	3.85	0.91	10.50	1.00
PC2H	1440	864	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175	1.38	0.74	2.21	0.75	5.55	0.91	15.12	0.96
RM1L	240	180	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.58	1.20	0.92	1.17	2.31	1.17	6.30	0.94
RM1M	600	450	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	0.96	0.91	1.54	0.89	3.85	0.89	10.50	0.96
RM2L	240	180	0.0032	0.0051	0.0128	0.0350	0.58	1.14	0.92	1.10	2.31	1.15	6.30	0.92
RM2M	600	450	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233	0.96	0.89	1.54	0.87	3.85	0.87	10.50	0.96
RM2H	1440	864	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175	1.38	0.75	2.21	0.75	5.55	0.84	15.12	0.94
URML	180	135	0.0024	0.0048	0.0120	0.0280	0.32	1.15	0.65	1.19	1.62	1.20	3.78	1.18
URMM	420	315	0.0016	0.0032	0.0080	0.0187	0.50	0.99	1.01	0.97	2.52	0.90	5.88	0.88
MH	120	120	0.0032	0.0064	0.0192	0.0560	0.38	1.11	0.77	1.10	2.30	0.95	6.72	0.97

Tabla D.9. Tabla con los valores para definir una deriva objetivo. Para una zona de muy leve peligro sísmico.

El HAZUS establece unos límites promedio para poder cuantificar el daño en los elementos no estructurales esperado en términos de leve, moderado, extenso y completo (Slight, Moderate, Extensive y Complete)

- a. Elementos susceptibles a las derivas de entrepiso:

Nonstructural Drift-Sensitive Components

Drift Ratio at the Threshold of Nonstructural Damage			
Slight	Moderate	Extensive	Complete
0.004	0.008	0.025	0.050

Tabla D.10: Valores promedio de la deriva usados para cuantificar el daño de los elementos NE susceptibles a las deformaciones

b. Elementos susceptibles a las aceleraciones del piso:

Nonstructural Acceleration-Sensitive Components

Seismic Design Level	Floor Acceleration at the Threshold of Nonstructural Damage (g)			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
High-Code	0.30	0.60	1.20	2.40
Moderate-Code	0.25	0.50	1.00	2.00
Low-Code	0.20	0.40	0.80	1.60
Pre-Code	0.20	0.40	0.80	1.60

Tabla D.11: Valores promedio de las aceleraciones de piso usados para cuantificar el daño de los elementos NE susceptibles a las aceleraciones



ANEXO E

OTROS TIPOS DE AISLADORES E INFORMACIÓN HISTÓRICA

AISLADOR DE PÉNDULO DE FRICCIÓN DOBLE (DPB)

El aislador de péndulo doble (DPB) es una adaptación del aislador de péndulo simple (FPS) visto en el capítulo 3, pero que permite mayores desplazamientos laterales. La principal ventaja de este dispositivo es que, para un mismo desplazamiento máximo, tiene menores dimensiones que un FPS, lo que lo vuelve más económico.

Los orígenes del DPB se remontan al año 1870 cuando Jules Touaillon presenta la primera propuesta de aislamiento sísmico: un sistema de apoyos esféricos entre dos losas con concavidades. Un esquema de la patente se muestra a continuación:

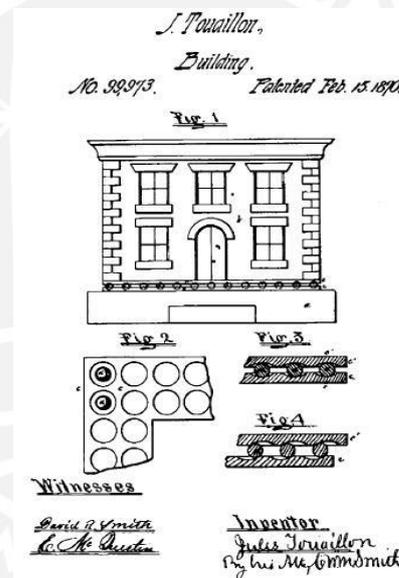


Fig. E.1: Esquema de la patente presentada por J. Touaillon en 1870
(Touaillon, 1870)

El aislador consiste en dos superficies cóncavas, que pueden tener distintos radios de curvatura y coeficientes de fricción, unidos por un deslizador articulado con cobertura no metálica. Este elemento es necesario pues permite acomodar los distintos desplazamientos entre la superficie cóncava superior y la inferior.

La figura muestra un DPB en 3 fases de desplazamiento. En (a) se muestra al aislador en posición de equilibrio. La figura (b) muestra al aislador cuando ha ocurrido deslizamiento en la superficie inferior pero no en la superior. Lo anterior solo ocurre cuando el coeficiente de fricción es mayor en la superficie superior. La figura c)

muestra al aislador en la posición de desplazamiento máximo posible, que es igual a la suma de los máximos desplazamientos posibles en cada superficie, es decir, $2d$.

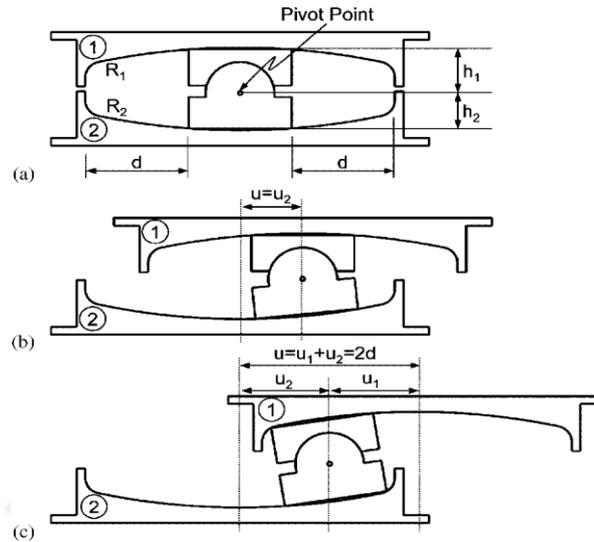


Fig. E.2: DPS en 3 fases de desplazamiento
(Fenz y Constantinou, 2006)

COMPORTAMIENTO Y MODELO MATEMÁTICO

Para obtener la relación fuerza-desplazamiento de este dispositivo se hace un equilibrio de fuerzas en los platos cóncavos por separado y luego, por compatibilidad, se obtiene la relación global. La figura E.3 muestra el diagrama del cuerpo libre de la superficie superior (1) para un giro θ_1 . S_1 y F_{f1} son las fuerzas normal y de fricción en la superficie superior del deslizador, mientras que W es la carga vertical en el aislador y F_1 la fuerza restitutiva lateral. Adicionalmente, se observa que hay fricción interna en el deslizador. Esto solo ocurre cuando hay deslizamiento relativo entre las dos superficies, es decir, cuando los coeficientes de fricción μ son distintos.

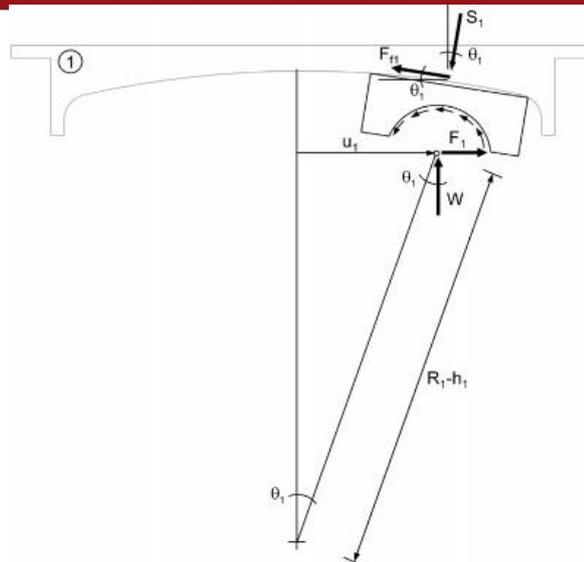


Figura E.3: DCL del plato superior del aislador
(Fenz y Constantinou, 2006)

Haciendo equilibrio en los ejes X e Y tenemos:

$$F_1 - S_1 \sin \theta_1 - F_{f1} \cos \theta_1 = 0$$

$$W - S_1 \cos \theta_1 + F_{f1} \sin \theta_1 = 0$$

Además, por simple geometría, el desplazamiento del elemento con respecto a su centro de curvatura es:

$$u_1 = (R_1 - h_1) \sin \theta_1$$

Uniendo las ecuaciones anteriores y tomando el valor de $\cos \theta_1 \approx 1$ se obtiene la relación fuerza desplazamiento para el plato superior:

$$F_1 = \frac{W}{(R_1 - h_1)} u_1 + F_{f1}$$

Siguiendo el mismo procedimiento para la superficie inferior:

$$F_2 = \frac{W}{(R_2 - h_2)} u_2 + F_{f2}$$

Por compatibilidad, el desplazamiento total será la suma de los desplazamientos superior e inferior:

$$u = u_1 + u_2$$

Adicionalmente, por equilibrio en el deslizador articulado y despreciando las fuerzas de inercia del dispositivo obtenemos que:

$$F = F_1 = F_2$$

Si se combinan las ecuaciones anteriores se obtiene la siguiente relación fuerza desplazamiento global:

$$F = \left(\frac{u}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \right) W + \frac{\mu_1(R_1 - h_1) + \mu_2(R_2 - h_2)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} W$$

El primer componente corresponde a la fuerza restitutiva debida a la geometría pendular y el segundo componente es la componente friccional del elemento. La ecuación anterior solo es válida cuando el deslizamiento ocurre en ambas superficies. Cuando solo una superficie desliza, el aislador se comportará como un FPS con coeficiente de fricción μ_1 y radio de curvatura $R_1 - h_1$, si es que $\mu_2 > \mu_1$. El deslizamiento en la segunda superficie ocurrirá para el desplazamiento u^* según la siguiente fórmula:

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1)(R_1 - h_1)$$

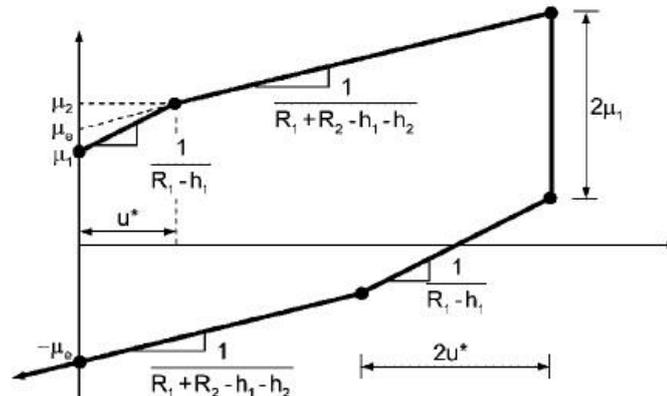


Fig. E.4: Fuerza normalizada entre el peso vs desplazamiento lateral en DPS (Fenz y Constantinou, 2006)

Si el coeficiente de fricción de cada superficie deslizante es el mismo, se tiene:

$$\dot{u} = \frac{L_1 \dot{u}_1 + L_2 \dot{u}_2}{L_1 + L_2}$$

Por compatibilidad se tiene:

$$\dot{u}_1 = \frac{L_1 \dot{u}_1}{L_1 + L_2}, \quad \dot{u}_2 = \frac{L_2 \dot{u}_2}{L_1 + L_2}$$

En general, cuando un aislador DPB con igual radio de curvatura superior e inferior, e igual coeficiente de fricción, cada superficie se desliza a una velocidad exactamente igual a la mitad de la velocidad total de deslizamiento. Esto implica una correcta elección para los valores de α para la elaboración del modelo y el análisis en los programas computacionales.

TRANSMISIÓN DE LOS MOMENTOS POR EFECTO P- Δ

A diferencia de lo que ocurre con lo que ocurre con los aisladores de péndulo simple (FPS), que concentran el efecto P- Δ en una de las dos superficies, los aisladores de péndulo doble dividen el momento transferido en ambas superficies, según las siguientes ecuaciones:

$$M_1 = Pu_1 \quad M_2 = Pu_2$$

Siendo P la carga vertical, M_1 y M_2 los momentos transferidos a la superestructura y subestructura, respectivamente, y, u_1 y u_2 los desplazamientos en cada superficie. Para aisladores con iguales coeficientes de fricción y radios de curvatura (más precisamente, $R_1 - h_1 = R_2 - h_2$), los momentos transferidos serán iguales ($M = \frac{1}{2} P\Delta$).

MODELAMIENTO

Tal y como ocurre con los FPS, el modelamiento de la fricción en los DPS debe tomar en cuenta la variación de la fricción con respecto a la velocidad, según la bien conocida ecuación:

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min})e^{-\alpha/|\dot{u}|}$$

Cuando los radios y los coeficientes de fricción en ambas superficies son iguales, el DPS puede modelarse como un FPS con R igual a $R_1 + R_2 - h_1 - h_2$. Además, dado que las velocidades de deslizamientos son la mitad de la velocidad global del dispositivo, el valor de alfa deberá ser la mitad de lo que se tomaría para un FPS.

Para el caso general, el DPS se puede modelar como dos FPS en serie unidos por una articulación. Esto es posible pues la relación fuerza desplazamiento del elemento es la suma de ambos platos. En este caso, no es necesario modificar el coeficiente alfa con respecto a los valores típicos del FPS.

COMENTARIOS

- El comportamiento del DPS es esencialmente histerético bilineal para coeficientes de fricción distintos y se comporta como un FPS para coeficientes iguales.
- La altura del aislador afecta el comportamiento del DPS, pues el radio efectivo es igual a R_1+R_2-h , lo que quiere decir que a mayor altura, menor efectividad.
- Los desplazamientos permanentes luego de un sismo severo, pueden ser más importantes que en el FPS puesto que la fricción ocurre en ambas superficies; sin embargo, dado que los terremotos suelen terminar con vibraciones de baja intensidad, estos efectos no son demasiado severos.
- En la mayoría de casos, los DPB usan los mismos radios de curvatura y coeficientes de fricción en las dos superficies; sin embargo, se cree que al combinar adecuadamente distintos radios y coeficientes se puede mejorar el comportamiento de la estructura y los elementos no estructurales.
- Para mayor información sobre el comportamiento, resultados experimentales y la obtención de las relaciones fuerza-desplazamiento consultar el reporte técnico de Fenz y Constantinou (2004).

AISLADOR DE PÉNDULO DE FRICCIÓN TRIPLE (TPB)

El aislador de triple péndulo es introducido al mercado por la empresa EPS Inc. y está formado por cuatro superficies cóncavas que generan tres mecanismos pendulares independientes. (Morgan y Mahin 2005).

Cada mecanismo pendular tiene características diferentes de funcionamiento y las propiedades seleccionadas para el diseño dependen del objetivo de desempeño deseado para optimizar la respuesta de la estructura a diferentes fuerzas sísmicas y frecuencias. (Grisacol 2011)

El TPB ofrece el mejor desempeño sísmico entre todos los apoyos deslizantes y permite reducir los costos en comparación de las tecnologías convencionales de aislamiento, y también permite reducir las dimensiones de los apoyos (TPBs). Por consiguiente, las propiedades de cada péndulo independiente deberán ser escogidas de tal manera que se obtenga un mecanismo de respuesta secuencial a diferentes intensidades de fuerza.

A medida que las aceleraciones en el suelo incrementan, se produce un incremento en la fuerza entrante que deriva en un mayor desplazamiento. A mayores desplazamientos, la longitud efectiva del péndulo se alarga y el amortiguamiento efectivo aumenta, de manera que se consiguen reducir las fuerzas y los desplazamientos del apoyo.

DESCRIPCIÓN DEL AISLADOR

El apoyo de triple péndulo está formado por tres mecanismos pendulares independientes. El primer mecanismo consiste de dos superficies cóncavas apoyadas sobre ambos lados de un deslizador interno (*inner slider*) con bajo coeficiente de fricción. Este mecanismo define las propiedades del sistema de aislamiento para bajos niveles de excitación. (Morgan y Mahin 2011). Este péndulo interior sirve para minimizar la participación de los modos superiores y reducir las fuerzas cortantes de los sismos frecuentes.

Los otros dos mecanismos están formados por los dos deslizadores cóncavos del primer péndulo (o péndulo interior) y las dos plataformas deslizantes cóncavas exteriores (principales), formando algo similar a un péndulo doble. El segundo mecanismo está asociado a la superficie inferior del péndulo interior y el tercer mecanismo está asociado a la superficie superior cóncava.

El segundo péndulo define las propiedades de aislación para niveles de excitación moderados. El tercer péndulo debe tener un coeficiente de fricción lo suficientemente grande para prevenir el deslizamiento hasta que ocurran niveles de excitación elevados. Las propiedades de estos tres péndulos deben ser seleccionados para optimizar el desempeño de la estructura aislada considerando múltiples niveles de riesgo sísmico. (Morgan y Mahin 2011)

COMPORTAMIENTO INICIAL Y MODELO MATEMÁTICO

Sección típica de un aislador de triple péndulo y deslizador interno:

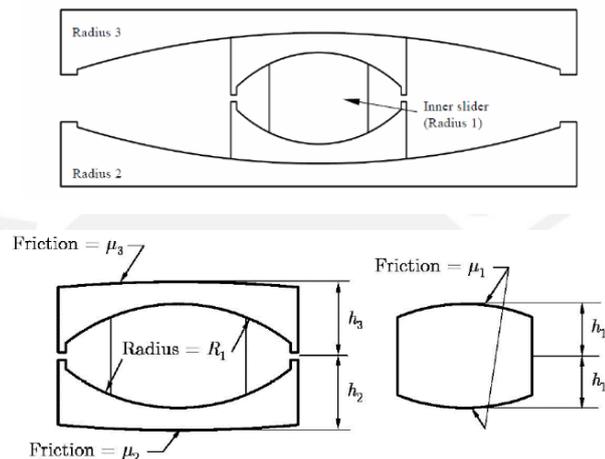


Fig. E.5: Esquema de un TPB (Morgan y Mahin, 2011)

Para el modelo se consideran las siguientes longitudes efectivas asociadas a tres radios de curvatura:

$$L_1 = R_1 - h_1, L_2 = R_2 - h_2, L_3 = R_3 - h_3$$

Esquema general de las estaciones de movimiento:

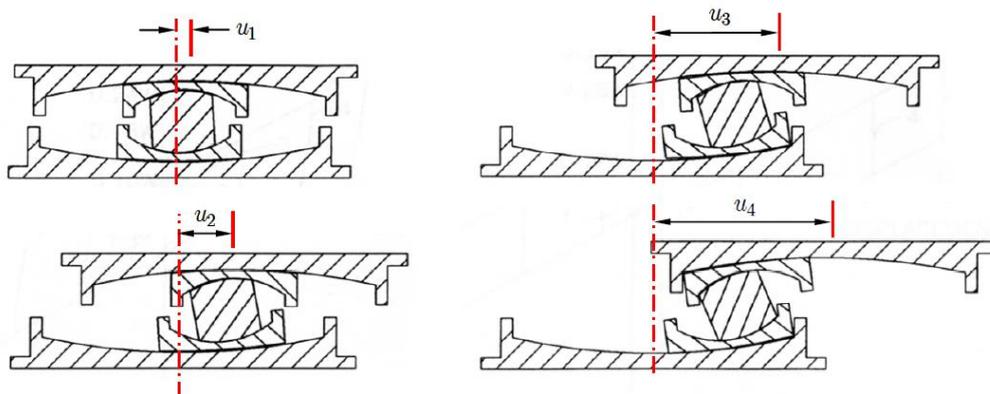


Fig. E.6: Esquema de las diferentes estaciones de movimiento (Morgan y Mahin, 2011)

Donde se observa que $u_4 > u_3 > u_2 > u_1$

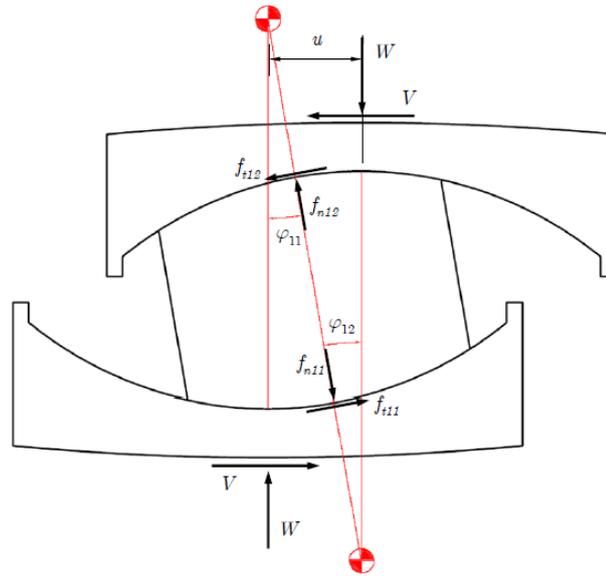


Fig. E.7: Diagrama del deslizador interno (Morgan y Mahin, 2011)

De las condiciones de equilibrio en ese instante:

$$\begin{pmatrix} V \\ W \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{11} & \sin \varphi_{11} \\ -\sin \varphi_{11} & \cos \varphi_{11} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{t11} \\ f_{n11} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{12} & \sin \varphi_{12} \\ -\sin \varphi_{12} & \cos \varphi_{12} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{t12} \\ f_{n12} \end{pmatrix}$$

Asumiendo:

$$f_{t11} = \mu_1 f_{n11}, f_{t12} = \mu_2 f_{n12} \text{ y } \tilde{V} = \frac{V}{W}$$

Se tiene:

$$\tilde{V} = \frac{\sin \varphi_{11} + \mu_1 \cos \varphi_{11}}{\cos \varphi_{11} - \mu_1 \sin \varphi_{11}} = \frac{\sin \varphi_{12} + \mu_2 \cos \varphi_{12}}{\cos \varphi_{12} - \mu_2 \sin \varphi_{12}}$$

Asumiendo desplazamientos pequeños y estimando los ángulos de rotación:

$$\varphi_{11} = \varphi_{12} = \frac{\tilde{V} - \mu_1}{1 - \mu_1 \tilde{V}}$$

Generalmente puede asumirse: $1 - \mu_1 \tilde{V} \approx 1$ ya que el coeficiente de fricción es por lo general menor a 0.05 y la cortante normalizada rara vez excede el 40%, es decir, el producto da un valor del alrededor del 2%. Las rotaciones del deslizador pueden aproximarse entonces a: $\varphi_{11} = \varphi_{12} = \tilde{V} - \mu_1$ (Morgan y Mahin 2011).

De la geometría:

$$u = L_1 \varphi_{11} + L_2 \varphi_{12}$$

Por lo tanto, la ecuación que describe el movimiento para la primera fase de movimiento viene dada por:

$$u = 2L_1(\tilde{V} - \mu_1), \text{ siendo los valores de los coeficientes: } \mu_1 < \tilde{V} < \mu_2$$

Luego de iniciado el movimiento del deslizador interno, suceden combinaciones de deslizamiento variadas, las cuales no serán tema de estudio del presente anexo.

El objetivo es ilustrar la importancia que tiene la geometría de los mecanismos pendulares y dar una idea de la gran importancia del uso adecuado de los valores de los coeficientes de fricción para el diseño del aislador y sus diferentes niveles de desempeño aplicado a diferentes zonas de riesgo sísmico.

Con las fases mencionadas al inicio se obtiene la siguiente gráfica de fuerza normalizada y desplazamiento:

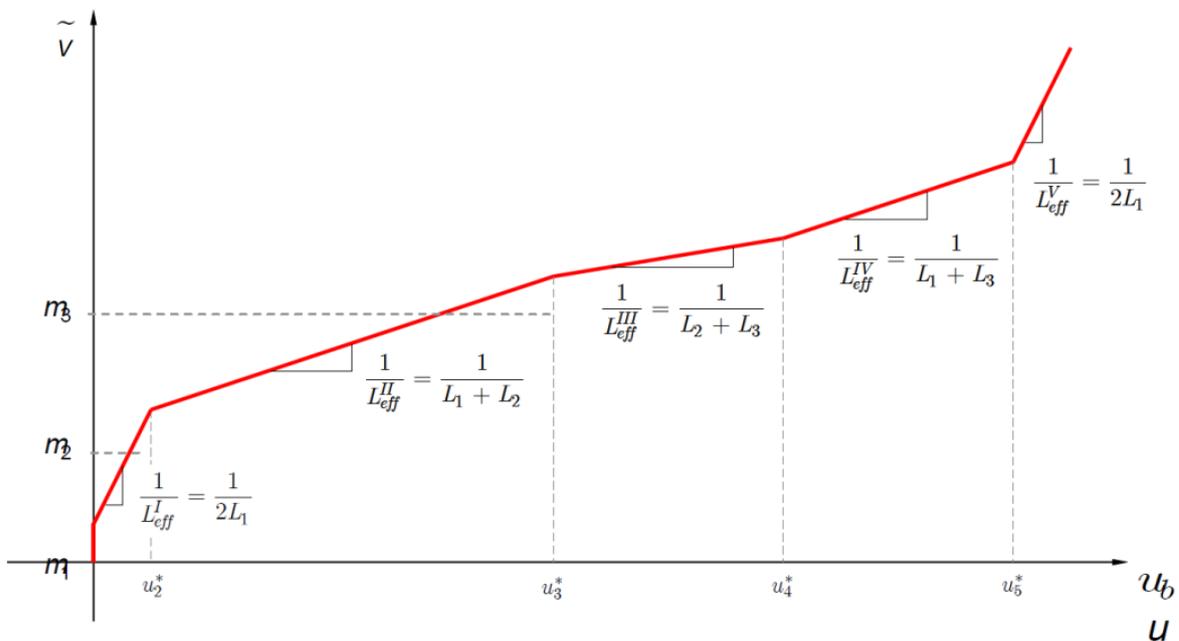


Fig.E.8: Curva fuerza desplazamiento de un TPB (Morgan y Mahin, 2011)

A modo ilustrativo se presenta un ciclo de histéresis obtenido de ensayos (modelo escalado), para diferentes niveles de excitación del suelo:

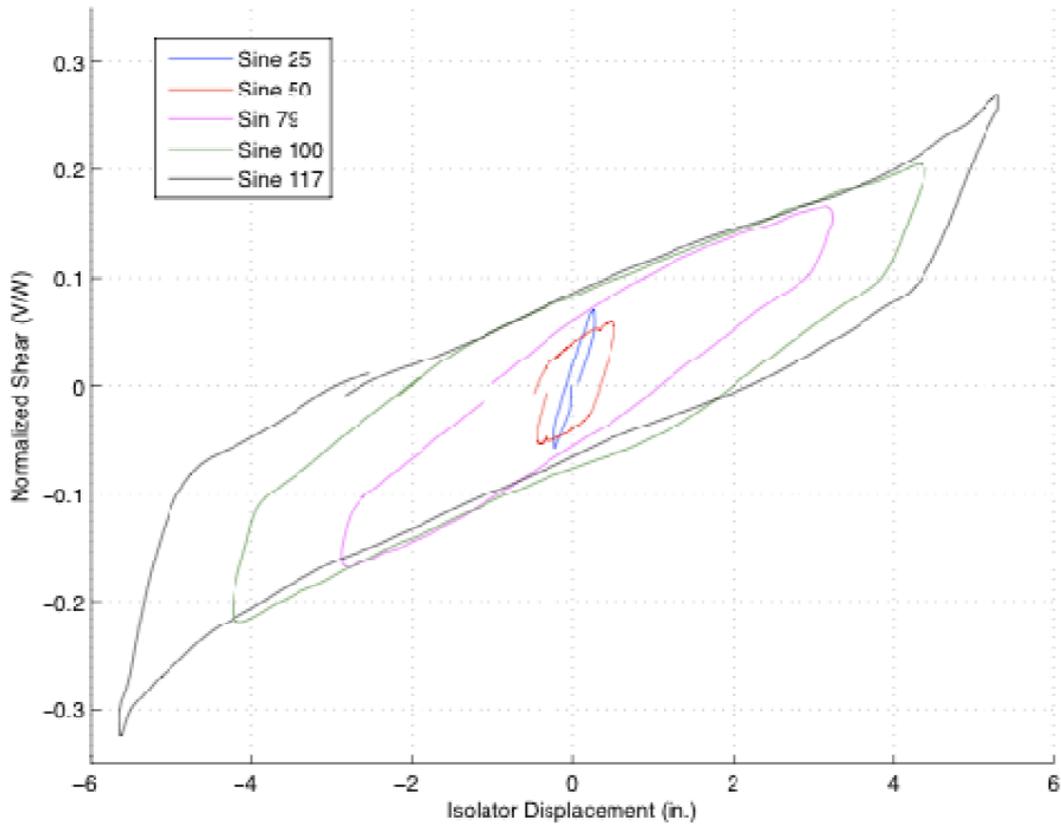


Fig. E.9: Lazo histerético de un solo ciclo de movimiento (Morgan y Mahin, 2011)

Para mayor detalle de los mecanismos pendulares del TPB, consultar el libro *The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives* (Morgan y Mahin 2011)

AISLADOR DE PÉNDULO RESISTENTE A LA TRACCIÓN (XY-FP)

DESCRIPCIÓN DEL AISLADOR

El modelo del aislador estudiado está compuesto por dos plataformas cóncavas (vigas) interconectadas por un elemento que soporta la tensión desarrollada en el apoyo, previniendo el levantamiento.

Algunas de las propiedades de este aislador incluyen: una efectiva restricción al levantamiento sin importar el desplazamiento generado en el apoyo, el desacoplamiento del movimiento bidireccional en dos movimientos ortogonales, la capacidad de proveer distinta rigidez y distinta capacidad de disipación de energía a través de las dos direcciones principales del apoyo. Esta última resulta de gran utilidad en puentes, donde se presentan diferentes respuestas de desplazamiento a lo largo de las dos direcciones transversales y longitudinales.

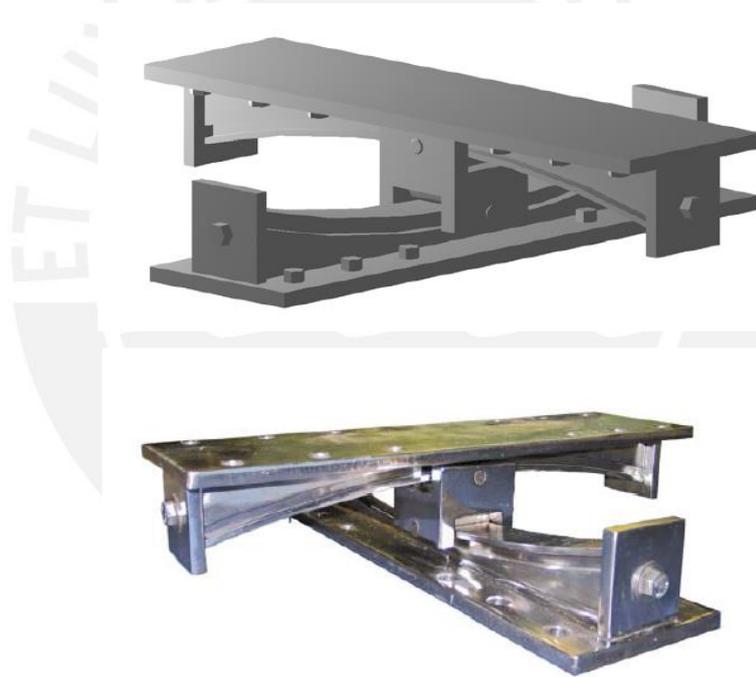


Fig. E.10: Esquema del XY-FP y una foto real (Roussis y Constantinou, 2005)

Se aprecia en las imágenes la posibilidad de movimiento en dos direcciones perpendiculares entre sí, acopladas por un elemento resistente a la tracción.

A continuación se presenta un esquema que deriva al análisis matemático. Donde los ejes 1 y 2 corresponden a los ejes principales de desplazamiento de la superficie superior y la superficie inferior respectivamente. (Roussis y Constantinou 2005).

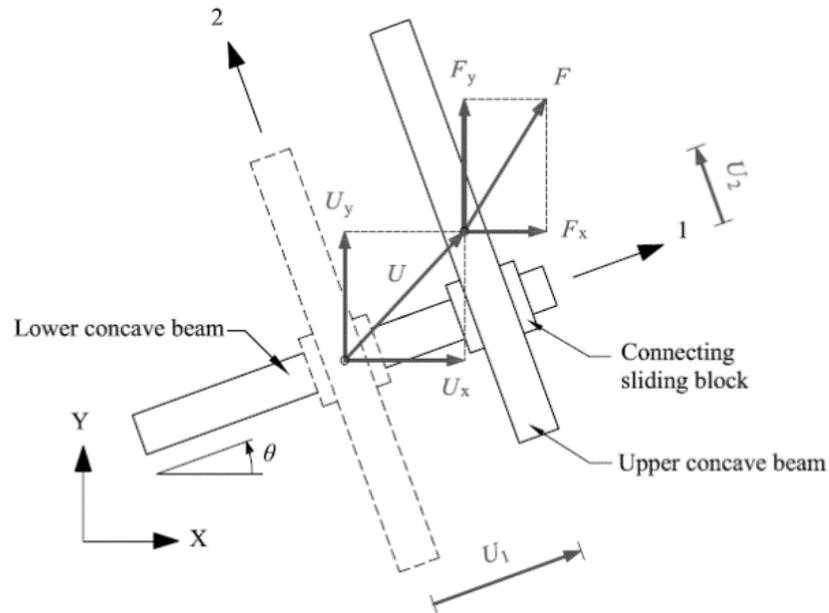


Fig. E.11: Diagrama del XY-FP en movimiento en las dos direcciones principales (Roussis y Constantinou, 2005)

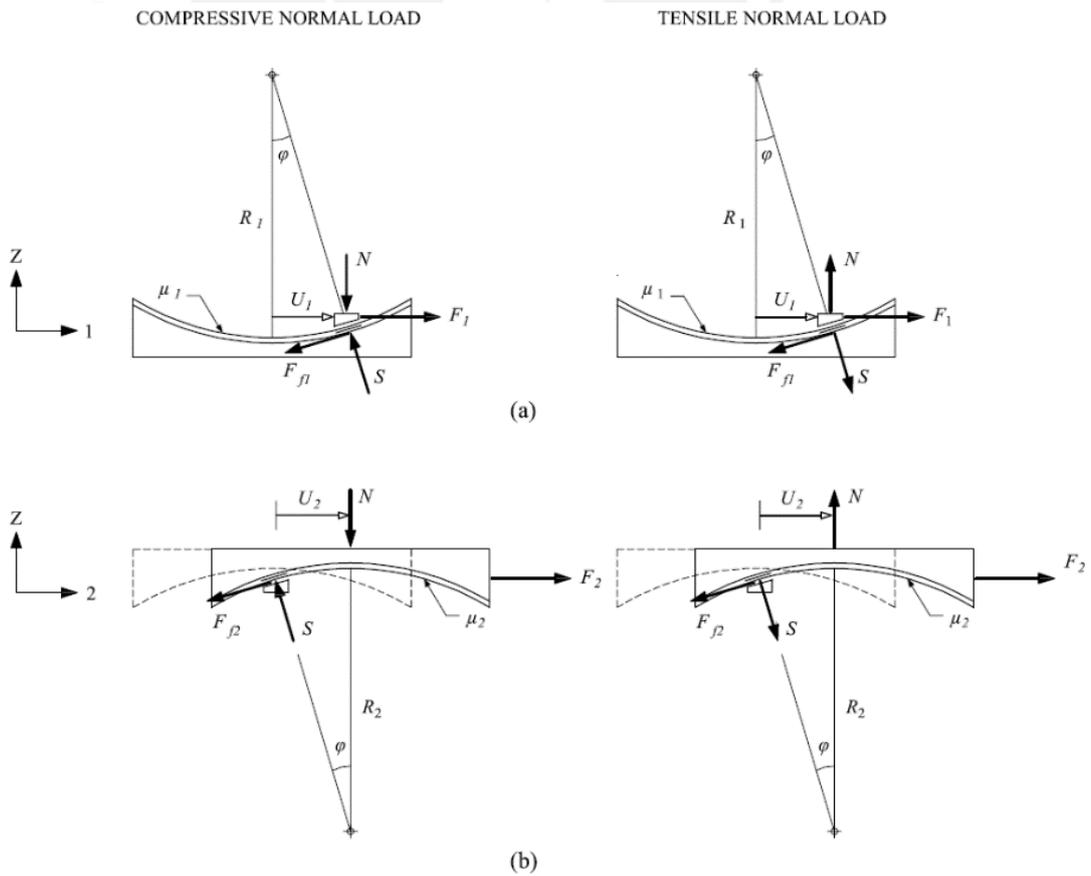


Fig. E.12: Diagrama de fuerzas en compresión y en tracción (Roussis y Constantinou, 2005)

MODELO MATEMÁTICO

El desplazamiento de los ejes 1 y 2 correspondiente a los diferentes movimientos:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix}$$

Del equilibrio de fuerzas, para cada eje "i":

$$F_i - F_{fi} \cos \varphi - S \sin \varphi = 0$$

$$-N - F_{fi} \sin \varphi + S \cos \varphi = 0$$

Combinando las ecuaciones:

$$F_i = N \tan \varphi + \frac{F_{fi}}{\cos \varphi}$$

Asumiendo desplazamientos pequeños respecto del radio de curvatura:

$$F_i = \frac{N}{R_i} U_i + F_{fi} : i = 1,2$$

Donde la variación para este caso resulta en la fuerza de fricción para las dos superficies cóncavas, descrita por:

$$F_{f1} = \mu_1 |N| \operatorname{sgn}(\dot{U}_1) + \mu_{side} \left| \frac{N}{R_2} U_2 + \mu_2 |N| \operatorname{sgn}(\dot{U}_2) \right| \operatorname{sgn}(\dot{U}_1)$$

$$F_{f2} = \mu_2 |N| \operatorname{sgn}(\dot{U}_2) + \mu_{side} \left| \frac{N}{R_1} U_1 + \mu_1 |N| \operatorname{sgn}(\dot{U}_1) \right| \operatorname{sgn}(\dot{U}_2)$$

Donde μ_1 y μ_2 representan a los coeficientes de fricción de las plataformas inferior y superior respectivamente, μ_{side} representa el coeficiente de fricción asociado a la superficie de contacto entre el bloque y las vigas (conector).

Se observa la contribución de las fuerzas laterales de las vigas (plataformas) a las fuerzas de fricción. Para un instante dado, cuando la plataforma superior se desplaza a lo largo de la dirección 2 (movimiento perpendicular a la dirección de la plataforma inferior) se produce una transferencia de la fuerza lateral F_2 , generándose una fuerza normal equivalente próximamente a $|F_2|$ produciéndose un incremento en la fuerza de fricción en la plataforma inferior, originando el movimiento en la dirección 1. Se produce un efecto análogo con las fuerzas F_1 y F_{f2} . (Roussis y Constantinou 2005).

Luego, haciendo un análisis simple, ya que $\mu_{side} \cdot \mu_1 \cdot |N|$ resulta ser muy pequeño en comparación y los desplazamientos de diseño generalmente son del orden de $U < 0.2R$, multiplicándose por μ_{side} , resultan ser valores despreciables para los objetivos de análisis.

Las fuerzas necesarias para inducir el desplazamiento en los aisladores XY-FP, despreciando el efecto de las fuerzas laterales a la fricción:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} N/R_1 & 0 \\ 0 & N/R_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_1 |N| & 0 \\ 0 & \mu_2 |N| \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \text{sgn}(\dot{U}_1) \\ \text{sgn}(\dot{U}_2) \end{pmatrix}$$

Teniendo la fuerza normal de la expresión:

$$N = W \left(1 + \frac{\ddot{u}_{gv}}{g} + \frac{N_{OM}}{W} \right)$$

Donde, W representa el peso soportado por el aislador, \ddot{u}_{gv} representa la aceleración vertical del suelo y N_{OM} la normal generada debido a los momentos de volteo, siendo positiva cuando está en compresión.

Evaluando el comportamiento de la fuerza normal generada en este tipo de aislador se puede apreciar que la rigidez es negativa cuando se genera tensión en el aislador; sin embargo, esto no implica la inestabilidad del sistema, ya que es imposible que todos los aisladores estén en tracción al mismo tiempo.

Definiéndose el periodo:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\left(\frac{W}{R_i} g\right)}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_i}{g}}$$

Para cada dirección principal del aislador se obtienen las relaciones constitutivas de fuerza asociadas al desplazamiento global:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}$$

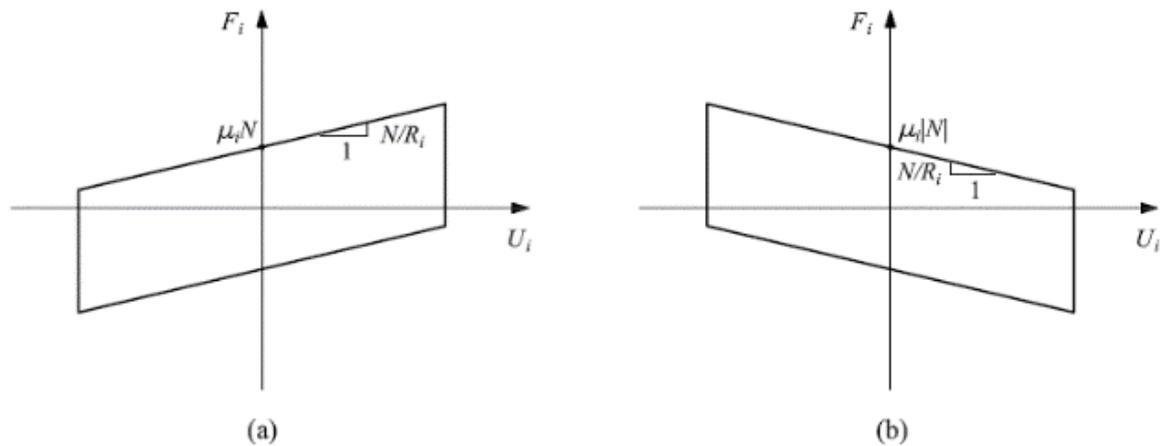


Fig. E.13: Lazos histeréticos en compresión a la izquierda y en tracción a la derecha (Roussis y Constantinou, 2005)

MODELAMIENTO

El coeficiente de fricción deriva de la expresión conocida para FPS:

$$\mu_s = f_{max} - (f_{max} - f_{min})e^{-a*|u|}$$

Se describe la variación del parámetro f_{max} con la presión (f_{max0} el valor máximo a presión cero y f_{maxp} a altas presiones):

$$f_{max} = f_{max0} - (f_{max0} - f_{maxp}) \tanh(\varepsilon p)$$

Donde p es la presión y ε es la constante que controla la variación entre bajas y altas presiones.

COMENTARIOS

- Los aisladores XY-FP resultan ser más baratos que los aisladores FPS convencionales, debido a su menor dimensión y bajo costo de producción.
- El control de calidad para colocar los aisladores debe ser tal que todos deben ir alineados respecto a los ejes sobre los cuales fueron diseñados. Esto implica muchas complicaciones ya que un desfase menor ocasionaría momentos adicionales sobre los aisladores.
- Resultan ser muy útiles cuando se precise desacoplar los movimientos ortogonales del plano de movimiento, como en el caso de puentes.

- Estudios demuestran que el levantamiento promedio producido en los aisladores, producto de las aceleraciones verticales, está por debajo del 15% del total de aisladores, es decir que no afecta a la estabilidad total del sistema.
- Al ser un sistema nuevo, la capacidad de predecir su comportamiento está limitada. Por lo que el nivel de implementación de este sistema es reducido respecto a los FPS.
- Para mayor información del modelo matemático y de las pruebas experimentales estudiadas consultar *Experimental And Analytical Studies Of Structures Seismically Isolated With An Uplift-Restraint Isolation System* (Roussis y Constantinou 2005)



CASOS HISTÓRICOS

RESERVORIO DE GAS NATURAL PARA LNG PERÚ, MELCHORITA

En el año 2008, en el marco del desarrollo del proyecto de exportación de gas natural licuado LNG Perú en Melchorita, se construyeron dos tanques de almacenamiento de gas protegidos con aislamiento sísmico. Cada tanque tiene una capacidad de 130 000 m³ y está apoyado sobre 256 aisladores de péndulo de fricción triple (TPS).



Foto E.1: Foto del reservorio de gas natural
(Earthquake protection systems, 2011)

Como se sabe, el gas natural licuado se almacena en tanques a -165°C , por lo que representa una gran cantidad de energía química almacenada. Las fallas en tanques pueden ocasionar explosiones, incendios y grandes daños ambientales; en consecuencia, los requisitos de desempeño sísmico suelen ser mucho más severos de lo normal. Históricamente, los tanques de almacenamiento han tenido un mal comportamiento en terremotos debido a la combinación entre las fuerzas inerciales del tanque y las presiones hidrodinámicas. Es por ello que el aislamiento sísmico es una opción cada vez más usada en este tipo de proyectos.

El uso de los aisladores de péndulo triple en Melchorita redujo los cortantes basales en los tanques hasta en 85%, generando un gran ahorro en materiales. La ingeniería, procura y construcción del proyecto fueron realizadas por CB&I y los aisladores fueron fabricados por Earthquake Protection Systems (EPS).



Foto E.2: Foto de uno de los aisladores usados
(Earthquake protection systems, 2011)

Este proyecto representa un hito especialmente importante en nuestro país pues constituye no solo la primera estructura con aisladores sísmicos, sino que además, es hasta la fecha la única ocasión en que el aislamiento sísmico se usó fuera del rubro de edificaciones.

TRIBUNAL DE APELACIONES DE SAN FRANCISCO

El tribunal de apelaciones del 9no circuito en San Francisco, California, es un edificio de valor histórico y arquitectónico inaugurado en el año 1905 y que fue declarado monumento histórico nacional en el año 2012.



Foto E.3: Foto de la esquina del edificio del Tribunal, San Francisco (Earthquake protection systems, 2011)

Durante el terremoto de Loma Prieta en 1989, el edificio sufrió daños importantes por lo que tuvo que ser clausurado. En 1995, luego de una serie de estudios técnicos y económicos, se inició la reparación del edificio que incluía el refuerzo de la superestructura y la instalación de aislamiento sísmico en la base (sistema de péndulo de fricción).

La edificación original, que tenía forma de “U”, fue inaugurada en 1905 y soportó sin problemas el terremoto de San Francisco en 1906. En 1933 se agregó una cuarta ala al edificio, dándole así la configuración rectangular que lleva actualmente el edificio.

El edificio tiene dimensiones en planta de 100m x 85m y posee una altura de 25m en 5 pisos. Se calcula que el peso total tomando en cuenta cargas vivas y muertas es

de 54 000 toneladas. Los acabados interiores y exteriores son extremadamente elaborados con muchos tallados de mármol.

Se hicieron muchos estudios previos y se presentaron 4 alternativas para la ubicación de aisladores que cumplieran los requisitos arquitectónicos, estructurales y funcionales:

- Alternativa 1: Sobre la cimentación y debajo del sótano. Requiere vigas de unión a nivel de los aisladores.
- Alternativa 2: Sobre el piso del sótano. Requiere nuevos pedestales de concreto.
- Alternativa 3: A la mitad de las columnas del sótano. Requiere reforzamiento de columnas hasta el nivel de los aisladores.
- Alternativa 4: Sobre las columnas del sótano. Requiere reforzamiento total en las columnas

Para la selección se generó una compleja matriz de costos que tenía en cuenta movimientos de tierra, constructabilidad, impacto y el nivel de reforzamiento que requeriría la superestructura para cada alternativa.

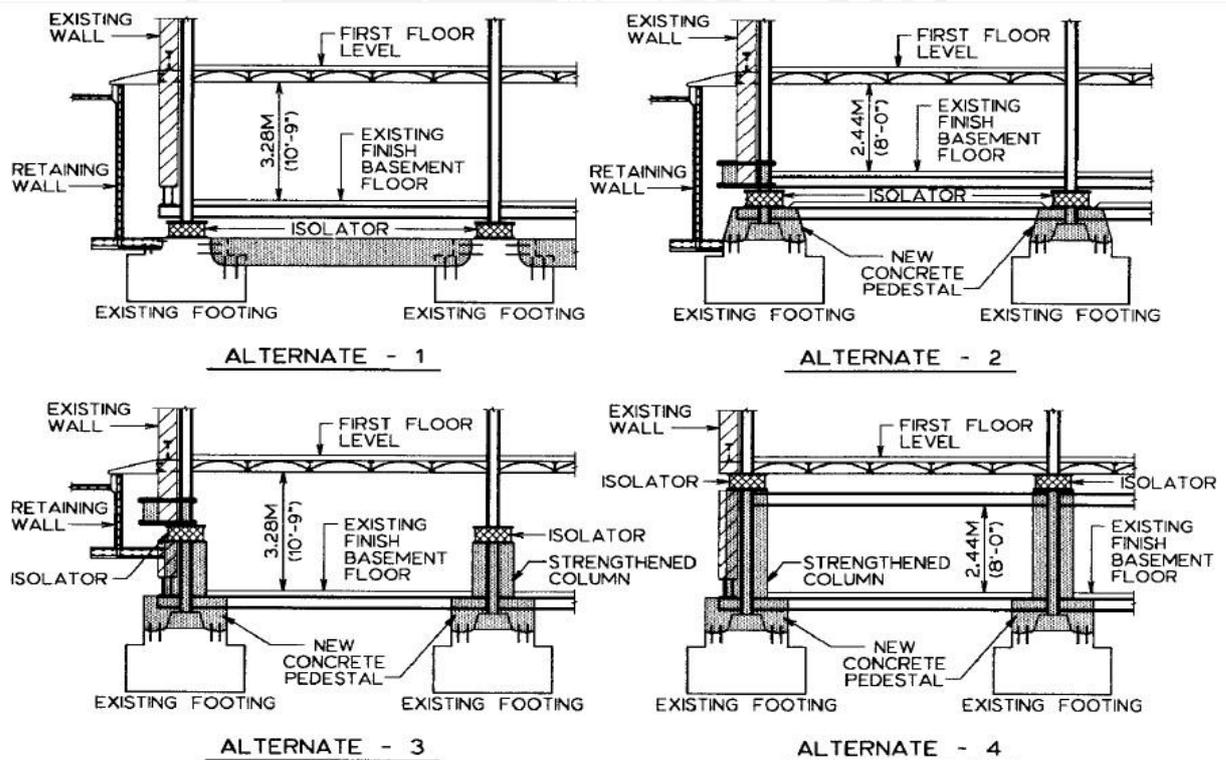


Fig. E.1: Alternativas evaluadas para la ubicación de los aisladores
(Earthquake protection systems, 2011)

Al final, se decidió optar por la primera por ser la que dejaba mayor altura libre en el sótano, además que requería menos reforzamiento de la superestructura y menor tiempo de construcción. Para uniformizar los movimientos en los aisladores se colocaron vigas de amarre y se construyó una nueva losa para que sirva de diafragma rígido.

Una vez elegida la ubicación, debía seleccionarse el sistema de aislamiento más adecuado. Se evaluaron aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento, amortiguadores de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo y aisladores de péndulo de fricción (FPS). Los últimos fueron los elegidos puesto que presentaban menor altura. Si se optaba por las otras opciones se hubiera tenido que rebajar los pads de concreto, aumentando notablemente los costos. Adicionalmente, los aisladores de péndulo tenían la ventaja de trasladar los momentos por efectos P-Delta a la superestructura o subestructura según la orientación, entonces, si se colocaba el roller en la parte inferior se evitarían excentricidades (sobrecargas) en la cimentación, evitando así refuerzos adicionales.

Parameters (1)	Calculated response (2)	Performance criteria for isolated structure (3)
Structure shear force (% of weight)	20.30	≤16.00
Peak interstory drift ratio (% of column height)	0.53	≤0.20
Maximum floor acceleration (g)	0.48	≤0.40

Tabla E.1: Parámetros calculados para la estructura con base fija vs objetivos de desempeño (Earthquake protection systems, 2011)

Event (1)	Low level earthquake (2)				Design level earthquake (3)		Maximum capable earthquake (4)
	LP	LP	1.5 LP	2 LP	DL	DL	
Earthquake	0.10	0.10	0.15	0.20	0.40	0.40	1.2 DL
Peak ground acceleration (g)	Fixed	Isolated	Isolated	Isolated	Fixed	Isolated	0.48
Structure							Isolated
Maximum structure shear (% of weight)	20.30	7.78	9.46	11.11	81.30	15.60	20.30
Maximum floor acceleration (g)	0.48	0.19	0.23	0.23	2.27	0.35	0.47
Maximum interstory drift ratio (% of column height)	0.53	0.07	0.08	0.08	0.80	0.11	0.12
Maximum bearing displacement (mm)	—	41.9	88.9	139.7	—	268.5	344.9

Note: LP = Loma Prieta Earthquake and DL = Design-Level Earthquake.

Tabla E.2: Parámetros de respuesta de la estructura aislada y con base fija (Earthquake protection systems, 2011)

TERMINAL DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE SAN FRANCISCO

El terminal del aeropuerto internacional de San Francisco es hasta la fecha la estructura más grande en el mundo con aislamiento en la base, la cual incluye un lobby expansivo con dimensiones de 140mx20m en planta y una altura de piso de 19m. Adicionalmente, el edificio se extiende sobre la principal autopista de acceso al resto del aeropuerto.



Foto. E.4: Foto de la terminal del aeropuerto
(Earthquake protection systems, 2011)

Se usaron 267 aisladores de péndulo de fricción (FPS) para proteger la estructura de los movimientos sísmicos que pueden ocurrir en este lugar, pues está ubicado a 16km de la Falla de San Andrés.

El objetivo de desempeño fue que la estructura permanezca sin daño y que los daños arquitectónicos sean mínimos durante un terremoto de 8 grados de magnitud. El factor crítico de diseño fue el desplazamiento máximo de entrepiso admisible en los muros de vidrio (25cm).

Se evaluaron las siguientes alternativas estructurales:

- Pórticos arriostrados de acero
- Pórticos arriostrados de acero con amortiguadores viscosos
- Pórticos resistentes a momentos de acero

- Pórticos resistentes a momentos de acero con amortiguadores viscosos.
- Pórticos resistentes a momentos de acero con aislamiento en la base.

La única alternativa viable para satisfacer los objetivos de diseño resultó ser el aislamiento en la base. Se hicieron diseños tentativos para aisladores de alto amortiguamiento, de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo y de péndulo de fricción.

Los aisladores de péndulo de fricción representaron la opción más económica, principalmente por que las cargas verticales se mantienen alineadas con la superestructura cuando se coloca la superficie cóncava en la parte inferior. Esto devino en un ahorro de 680 toneladas de acero estructural con respecto a los aisladores elastoméricos. Otras ventajas de estos aisladores con respecto a los otros fue que presentaron mayores factores de seguridad frente a cargas verticales, además de tener un inherente buen comportamiento frente a incendios por ser de metal pesado.

Las propiedades seleccionadas fueron 6% de fricción, 45cm de capacidad de desplazamiento y periodo de 3 segundos. Los aisladores se colocaron sobre los muros que soportan a la estructura sobre la autopista y sobre las zapatas para los dos lados de la estructura adyacentes a la autopista.



Foto E.5 Foto con la ubicación de los aisladores
(Earthquake protection systems, 2011)