

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



Título

**EVALUACIÓN DE MALLA DE CUERDAS SINTÉTICAS COMO
SISTEMA DE REFUERZO PARA VIVIENDAS DE ADOBE DE DOS
PISOS EN EL PERÚ MEDIANTE ENSAYOS DE SIMULACIÓN
SÍSMICA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA CIVIL**

AUTOR

Ramiro Rubén Yallico Luque

ASESOR

Dr. Jorge Marcial Blondet Saavedra

CO-ASESOR

Dr. Sabino Nicola Tarque Ruíz

Diciembre, 2020

RESUMEN

Las viviendas de adobe poseen propiedades acústicas y térmicas, que, al considerar su bajo costo, las hacen muy atractivas para las personas de escasos recursos económicos. Sin embargo, estas viviendas son altamente vulnerables a eventos sísmicos debido a su gran masa, deficientes conexiones y falta de continuidad de muros lo que conlleva a un severo agrietamiento, formación de bloques rígidos y, en muchas ocasiones, al colapso total de la vivienda. Aunque la población está optando por construir con material noble (ladrillo de arcilla cocida), todavía se sigue construyendo este tipo de viviendas de adobe. La situación se agrava en caso de viviendas de adobe de dos pisos.

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) ha venido investigando y desarrollando diversos sistemas de refuerzo para construcciones de tierra pero que solo han sido estudiados en viviendas de adobe de un solo piso. Por ello, este proyecto de investigación pretende contribuir en la mejora de la seguridad sísmica de las viviendas de adobe de dos pisos empleando un sistema de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas. Para lo cual se realizaron ensayos de simulación sísmica de cuatro modelos a escala reducida 1:2 de adobe de dos pisos, dos con y sin refuerzo, donde se analizó y comparó los resultados obtenidos de todos los modelos. De esta manera se evaluó la efectividad de la malla de cuerdas sintéticas como sistema de refuerzo en viviendas de adobe de dos pisos.

Los resultados mostraron las bondades de la malla de cuerdas sintéticas al mejorar el desempeño de los modelos reforzados en términos desplazamientos, energía disipada, razón de amortiguamiento, degradación de rigidez y sobre todo al evitar el colapso de la estructura.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo agradecer a mis padres y hermano por el apoyo incondicional que me brindaron para emprender este nuevo reto académico.

Asimismo, agradezco al Dr. Marcial Blondet por asumir la asesoría de este proyecto, orientándome y exigiendo siempre lo mejor de mí durante el desarrollo de esta investigación. Y por ser un referente académico que transmite sus enseñanzas predicando con el ejemplo.

De la misma manera, agradecer al Dr. Nicola Tarque por haber aceptado ser co-asesor de este proyecto de investigación. Por su vital e incondicional apoyo, siempre presto a ayudar y a aclarar las consultas que se fueron presentando en el camino. Agradecerle por ser un gran representante de nuestra alma mater.

Finalmente, agradezco a la oficina del Ing. Antonio Blanco Blasco, por las facilidades brindadas y por su total apoyo.

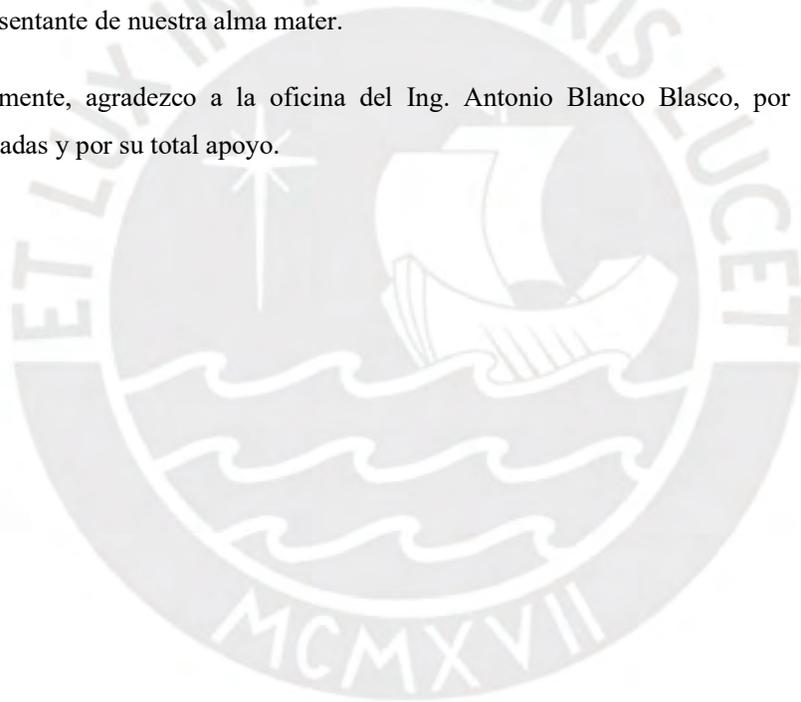


TABLA DE CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ANTECEDENTES	2
1.3	JUSTIFICACIÓN	2
1.4	OBJETIVOS	3
1.5	HIPÓTESIS.....	3
1.6	PLAN DE TRABAJO.....	3
2.	VIVIENDAS DE ADOBE EN EL PERÚ	6
2.1	VIVIENDAS EN LA ACTUALIDAD.....	6
2.2	PROTOTIPO DE VIVIENDAS.....	10
2.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	12
2.3.1	ADOBE.....	12
2.3.2	CUERDA SINTÉTICA.....	14
3.	TEORÍA DE MODELOS	16
3.1	MODELAMIENTO EXPERIMENTAL BASADO EN LA CONDICIONES DE SIMILITUD	16
3.2	ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	16
3.3	PRINCIPIO DE MODELAMIENTO A ESCALA.....	17
3.3.1	FACTORES DE ESCALA PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.....	18
3.3.2	NÚMEROS PI	19
3.3.3	MODELOS EN CONDICIONES DE SIMILITUD	21
4.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS	28
3.4	PROCESO CONSTRUCTIVO.....	30
5.	REFORZAMIENTO DE MODELOS	35
5.1	TÉCNICA DE REFORZAMIENTO	35
5.2	REFORZAMIENTO CON CUERDAS SINTÉTICAS.....	39
6.	ENSAYOS DE SIMULACIÓN SÍSMICA.....	43
6.1	SEÑAL DE COMANDO.....	43
6.2	INSTRUMENTACIÓN	44
6.3	DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS.....	48
6.3.1	MODELO URM-2S-1	49
6.3.2	MODELO URM-2S-2	54

6.3.3	MODELO SRM-2S-1	59
6.3.4	MODELO SRM-2S-2	64
7.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	67
7.1	PROPIEDADES DINÁMICAS	67
7.1.1	MODELO URM-2S-1	69
7.1.2	MODELO URM-2S-2	71
7.1.3	MODELO SRM-2S-1	72
7.1.4	MODELO SRM-2S-2	74
7.2	RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO	76
7.2.1	MODELO URM-2S-1	76
7.2.2	MODELO URM-2S-2	88
7.2.3	MODELO SRM-2S-1	98
7.2.4	MODELO SRM-2S-2	122
7.2.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	134
7.3	RESPUESTA DE ACELERACIÓN	135
7.3.1	MODELO URM-2S-1	135
7.3.2	MODELO URM-2S-2	143
7.3.3	MODELO SRM-2S-1	151
7.3.4	MODELO SRM-2S-2	167
7.4	CORTANTE EN LA BASE	175
7.4.1	MODELO URM-2S-1	176
7.4.2	MODELO URM-2S-2	177
7.4.3	MODELO SRM-2S-1	178
7.4.4	MODELO SRM-2S-2	179
7.5	FUERZA EN LAS CUERDAS	181
7.5.1	MODELO SRM-2S-1	181
7.5.2	MODELO SRM-2S-2	184
7.6	FUERZA CORTANTE vs DESPLAZAMIENTO	186
7.6.1	MODELO URM-2S-1	188
7.6.2	MODELO URM-2S-2	190
7.6.3	MODELO SRM-2S-1	192
7.6.4	MODELO SRM-2S-2	196
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	198
9.	BIBLIOGRAFÍA	201

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Viviendas en el Perú, según el material predominante - Censo 1993; 2007 y 2017 – INEI	7
Figura 2.4 Viviendas de adobe en el Perú, según departamento - Censo 2007 y 2017 – INEI8	
Figura 2.5 Viviendas de adobe en el Perú, según distrito - INEI.....	9
Figura 2.6 Configuración de vivienda de adobe, forma rectangular simple (Blondet, 2004).	10
Figura 2.7 Configuración de vivienda de adobe, forma L (Blondet, 2004).....	10
Figura 2.8 Configuración de vivienda de adobe, forma C (Ruiz, 2013).....	11
Figura 2.9 Dimensiones de las unidades de adobe: (a) Cuadrada; (b) Rectangular.....	12
Figura 2.10 Prueba de Cinta de barro (Valle, 2019)	13
Figura 2.11 Prueba de Resistencia seca: (a) Formación de bolitas de barro (Norma E.080); (b) Ejerciendo presión a la bolita de barro seca (Valle, 2019)	14
Figura 2.12 Cuerdas sintéticas como elemento de refuerzo.....	14
Figura 2.13 Detalle de nudos: (a) Nudo ocho; (b) Tensado y (c) Nudo simple.....	15
Figura 3.1 Prototipo y Modelo Homólogo de viga vibrante (Jha, 2004)	18
Figura 4.1 Modelo a escala reducida 1:2	28
Figura 4.2 Distribución de adobes en planta para hiladas par e impar (Pando, 2017).....	29
Figura 4.3 Vista en planta: (a) Viga collar, (b) Viguetas y (c) Entablado (Pando, 2017).....	29
Figura 4.4 Selección de tierra mediante zarandas	30
Figura 4.5 Control de relación tierra-arena mediante recipientes de lata.	30
Figura 4.6 Preparación del mortero 1:1, empleando una mezcladora mecánica.....	30
Figura 4.7 Consistencia deseada del mortero.....	30
Figura 4.8 Emplantillado y asentado de unidades de adobe.	31
Figura 4.9 Empleo de reglas de madera y cordel para el asentado de unidades de adobe.....	31
Figura 4.10 Instalación de caña carrizo en dinteles de ventanas y puerta.....	32
Figura 4.11 Altura completa de muros del primer nivel	32
Figura 4.12 Viga diafragma de madera – 1° Nivel: (a) Habilidad ; (b) Instalación.....	32
Figura 4.13 Asentado unidades de adobe correspondiente al segundo nivel.	33
Figura 4.14 Instalación de caña carrizo en dintel.....	33
Figura 4.15 Altura completa de los muros del segundo nivel.....	33
Figura 4.16 Viga diafragma de madera – 2° Nivel: (a) Habilidad ; (b) Instalación.....	34
Figura 4.17 Instalación de viga diafragma y viguetas de madera.....	34
Figura 4.18 Construcción del modelo finalizada	34
Figura 5.1 Nudo “E” para dotar de continuidad a las cuerdas verticales: (a) Ubicación, (b) Detalle.....	35
Figura 5.2 Detalle de instalación de cuerdas horizontales	36

Figura 5.3 Propuesta de refuerzo con malla de cuerdas sintéticas: (a) frontal y (b) posterior.	37
Figura 5.4 Propuesta de refuerzo con malla de cuerdas sintéticas: muro lateral (c) izquierdo y (d) derecho.	38
Figura 5.5 Perforación de puntos para la continuidad de las cuerdas.	39
Figura 5.6 Habilitación de cuerdas.	40
Figura 5.7 Instalación de cuerdas verticales en el primer y segundo nivel.	40
Figura 5.8 Instalación de cuerdas horizontales en primer y segundo nivel.	41
Figura 5.9 Instalación de cross-tie: (a) exterior y (b) interior.	42
Figura 5.10. Retiro y quemado de las puntas de las cuerdas exteriores e interiores de los muros.	42
Figura 5.11 Etapa final del reforzamiento con cuerdas sintéticas.	42
Figura 6.1 Señal de Comando escalada.	43
Figura 6.2 Detalle de instrumentación.	45
Figura 6.3 Vista isométrica de instrumentación del modelo.	46
Figura 6.4 Modelo de vivienda de adobe de dos pisos a escala reducida 1:2.	49
Figura 6.5 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 15 mm.	51
Figura 6.6 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 30 mm.	52
Figura 6.7 Formación de grietas, Fase 3 - Desplazamiento máximo 37.5 mm.	53
Figura 6.8 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 45 mm.	56
Figura 6.9 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 60 mm.	57
Figura 6.10 Colapso de vivienda, Fase 3- Desplazamiento máximo 90 mm.	58
Figura 6.11 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 15 mm.	60
Figura 6.12 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 30 mm.	61
Figura 6.13 Formación de grietas, Fase 3 - Desplazamiento máximo 60 mm.	62
Figura 6.14 Formación de grietas, Fase 4 - Desplazamiento máximo 60 mm.	63
Figura 6.15 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 60 mm.	65
Figura 6.16 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 60 mm.	66
Figura 7.1 Pulso rectangular, amplitud 1.5 mm.	67
Figura 7.2 Respuesta de aceleración total en vibración libre.	67
Figura 7.3 Método del Decremento Logaritmico.	68
Figura 7.4 Período Natural (s) – URM-2S-1.	70
Figura 7.5 Razón de Amortiguamiento ξ (%) - URM-2S-1.	70
Figura 7.6 Período Natural (s) – URM-2S-2.	72
Figura 7.7 Razón de Amortiguamiento ξ (%) - URM-2S-2.	72
Figura 7.8 Período Natural (s) – SRM-2S-1.	73
Figura 7.9 Razón de Amortiguamiento ξ (%) - SRM-2S-1.	73

Figura 7.10 Período Natural (s) – SRM-2S-2	75
Figura 7.11 Razón de Amortiguamiento ξ (%) - SRM-2S-2	75
Figura 7.12 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	77
Figura 7.13 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	78
Figura 7.14 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	79
Figura 7.15 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	80
Figura 7.16 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	81
Figura 7.17 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	83
Figura 7.18 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	84
Figura 7.19 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	85
Figura 7.20 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	86
Figura 7.21 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	87
Figura 7.22 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	89
Figura 7.23 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	90
Figura 7.24 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	91
Figura 7.25 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	92
Figura 7.26 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	93
Figura 7.27 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	95
Figura 7.28 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	96

Figura 7.29 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	97
Figura 7.30 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (15 mm) - SRM- 2S-1	99
Figura 7.31 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	100
Figura 7.32 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (15 mm) - SRM- 2S-1	101
Figura 7.33 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (15 mm) - SRM- 2S-1	102
Figura 7.34 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	103
Figura 7.35 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 2 (30 mm) - SRM- 2S-1	105
Figura 7.36 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	106
Figura 7.37 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 2 (30 mm) - SRM- 2S-1	107
Figura 7.38 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (30 mm) - SRM- 2S-1	108
Figura 7.39 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	109
Figura 7.40 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 3 (60 mm) - SRM- 2S-1	111
Figura 7.41 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	112
Figura 7.42 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 3 (60 mm) - SRM- 2S-1	113
Figura 7.43 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 3 (60 mm) -SRM- 2S-1	114
Figura 7.44 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	115
Figura 7.45 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 4 (60 mm) - SRM- 2S-1	117
Figura 7.46 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	118

Figura 7.47 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	119
Figura 7.48 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	120
Figura 7.49 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	121
Figura 7.50 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	123
Figura 7.51 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	124
Figura 7.52 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	125
Figura 7.53 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	126
Figura 7.54 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	127
Figura 7.55 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	129
Figura 7.56 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	130
Figura 7.57 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	131
Figura 7.58 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	132
Figura 7.59 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	133
Figura 7.60 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	136
Figura 7.61 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	137
Figura 7.62 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	138
Figura 7.63 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	140
Figura 7.64 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	141

Figura 7.65 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	142
Figura 7.66 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	144
Figura 7.67 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	145
Figura 7.68 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	146
Figura 7.69 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	148
Figura 7.70 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	149
Figura 7.71 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	150
Figura 7.72 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	152
Figura 7.73 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	153
Figura 7.74 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	154
Figura 7.75 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	156
Figura 7.76 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	157
Figura 7.77 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	158
Figura 7.78 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	160
Figura 7.79 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	161
Figura 7.80 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	162
Figura 7.81 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	164
Figura 7.82 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	165
Figura 7.83 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	166
Figura 7.84 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	168
Figura 7.85 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	169
Figura 7.86 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	170
Figura 7.87 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	172
Figura 7.88 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	173

Figura 7.89 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	174
Figura 7.90 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	176
Figura 7.91 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	176
Figura 7.92 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	177
Figura 7.93 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	177
Figura 7.94 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	178
Figura 7.95 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	178
Figura 7.96 Fuerza Cortante en la Base – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	179
Figura 7.97 Fuerza Cortante en la Base – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	179
Figura 7.98 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	180
Figura 7.99 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	180
Figura 7.100 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	182
Figura 7.101 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	182
Figura 7.102 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	183
Figura 7.103 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	183
Figura 7.104 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	183
Figura 7.105 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	183
Figura 7.106 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	184
Figura 7.107 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1	184
Figura 7.108 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	185
Figura 7.109 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2	185
Figura 7.110 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	185
Figura 7.111 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2	185
Figura 7.112 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 15 mm: a) URM-2S-1; b) SRM-2S-1	186
Figura 7.113 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1	188
Figura 7.114 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1	189
Figura 7.115 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2	190
Figura 7.116 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2	191
Figura 7.117 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1	192
Figura 7.118 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1	193
Figura 7.119 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1	194

Figura 7.120 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1 195
 Figura 7.121 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2 196
 Figura 7.122 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2 197

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Viviendas en el Perú según el tipo de material predominante en las paredes (INEI)	6
Tabla 2. Dimensiones de las cantidades medidas para el análisis dinámico.....	22
Tabla 3. Factores de escala para la respuesta sísmica de estructuras (Harry & Sabnis, 1999)	27
Tabla 4. Características de dispositivos	44
Tabla 5 Nomenclatura, posición de LVDT's y acelerómetros.....	47
Tabla 6 Nomenclatura y posición de celdas de carga	47
Tabla 7 Detalle de marcación de grietas por fase	48
Tabla 8 Propiedades Dinámicas del modelo URM-2S-1	69
Tabla 9 Propiedades Dinámicas del modelo URM-2S-2	71
Tabla 10 Propiedades Dinámicas del modelo SRM-2S-1	73
Tabla 11 Propiedades Dinámicas del modelo SRM-2S-2.....	74
Tabla 12 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), URM-2S-1	76
Tabla 13 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), URM-2S-2	88
Tabla 14 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), SRM-2S-1	98
Tabla 15 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), SRM-2S-2.....	122
Tabla 16 Evaluación del Sistema de Refuerzo según Desplazamientos (mm)	134
Tabla 17 Aceleraciones totales máximos (g), URM-2S-1	135
Tabla 18 Aceleraciones totales máximos (g), URM-2S-2	143
Tabla 19 Aceleraciones totales máximos (g), SRM-2S-1	151
Tabla 20 Aceleraciones totales máximos (g), SRM-2S-1	167
Tabla 21 Fuerza Cortante en la Base (KN), URM-2S-1	176
Tabla 22 Fuerza Cortante en la Base (KN), URM-2S-2	177
Tabla 23 Fuerza Cortante en la Base (KN), SRM-2S-1	178
Tabla 24 Fuerza Cortante en la Base (KN), SRM-2S-2.....	179
Tabla 25 Fuerzas en las celdas de carga L1 y L2 (N), SRM-2S-1	182
Tabla 26 Fuerzas en las celdas de carga L1 y L2 (N), SRM-2S-2.....	184
Tabla 27 Rigidez Lateral (kN/m) – Modelos Reforzados.....	187

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional que se viene dando en el Perú, conlleva a la demanda de adquisición de viviendas, para las cuales, se han venido empleando diversos materiales de construcción, siendo el adobe, material predominante, principalmente en las zonas rurales, e incluso en zonas de alto peligro sísmico. Según información del INEI censo nacional 2017, en el Perú, hay cerca de 2'150,000 viviendas construidas de adobe o tapial, lo que constituye el 28% del total de viviendas. Comparando estas cifras con las del INEI censo nacional 2007, existe una reducción del 3.6%, lo que demuestra que luego de transcurrido 10 años hay casi 9 millones de peruanos que aún habitan en viviendas de adobe.

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) ha venido investigando y desarrollando diversos sistemas de refuerzo para construcciones de tierra. Sin embargo, el conocimiento obtenido en el campo de investigación, no ha llegado a las personas para que hagan uso de estas tecnologías, generando que miles de familias peruanas se encuentren en un alto e inaceptable riesgo sísmico.

En 2012, se dio inicio a la investigación de malla de cuerdas de nylon (driza) como parte de una propuesta técnica de reparación y reforzamiento de monumentos históricos de tierra. La driza, debido a su bajo costo y fácil acceso, se convierte en un elemento de refuerzo sísmico idóneo para viviendas de adobe en zonas rurales. La instalación de este elemento de refuerzo en las técnicas de construcción tradicionales de las comunidades rurales peruanas, reduciría significativamente la vulnerabilidad sísmica de millones de viviendas de adobe y evitaría, potencialmente, la pérdida de millones de vidas.

La norma E.080 Adobe, comprende el uso de la tierra como material de construcción y está orientada al diseño, construcción, reparación y reforzamiento de éste tipo de edificaciones. Sin embargo, no permite construcciones de adobe de dos pisos en las zonas sísmicas 3 y 4.

Debido a que las investigaciones y propuestas de refuerzo que se han venido desarrollando en la PUCP solo han sido estudiadas en viviendas de adobe de un solo piso. Se pretende determinar la efectividad del refuerzo sísmico de malla de cuerdas sintéticas en viviendas de adobe de dos pisos. En el que se abarca la construcción, reforzamiento mediante un patrón propuesto y ensayos de simulación sísmica, de cuatro modelos de vivienda de adobe en dos

pisos, a escala reducida 1:2. Dos de ellos serán representativos de la construcción tradicional sin refuerzo y los dos restantes serán reforzados con cuerdas sintéticas.

1.2 ANTECEDENTES

El Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en más de 40 años de investigación de sistemas de refuerzo para las construcciones de adobe, ha desarrollado varias soluciones de refuerzo sismorresistente. Planteando como una solución ecológica y económica el utilizar la caña como material de refuerzo interior. Sin embargo, se evidenció un problema en la etapa de construcción de un gran número de viviendas que empleó este sistema, que fue la insuficiencia de la caña a utilizar. Otra solución de refuerzo que se desarrolló fue el empleo de malla electrosoldada cubierta con mortero de cemento como refuerzo exterior, siendo la deficiencia de este sistema de refuerzo que no siempre es económico.

En 2012, se inició la investigación de la malla de cuerdas de nylon como parte de una técnica de reparación y reforzamiento de monumentos históricos de tierra frente al efecto destructivo de los terremotos. La técnica consistió en la reparación de las grietas sísmicas mediante la inyección de barro líquido, combinada con el reforzamiento de los muros con mallas formadas por cuerdas sintéticas (drizas). Se realizaron ensayos de simulación sísmica en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP de modelos de un piso. También se llevó a cabo un procedimiento de análisis de movimiento de bloque rígido sometido a fuerzas de excitación sísmica y de interacción de drizas. Se concluyó que el refuerzo sísmico en los modelos de adobe fue indispensable para evitar el colapso de los muros, dado que varios bloques del muro se desprendieron durante los ensayos, pero no se voltearon, pues la malla de cuerdas los contuvo. Por lo tanto, ante eventos sísmicos severos, el refuerzo externo con malla de cuerdas sintéticas reduce significativamente la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe al mantener la integridad de la estructura.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las viviendas de adobe poseen propiedades acústicas y térmicas, que, al considerarse su bajo costo, las hacen muy atractivas para las personas de escasos recursos económicos. Sin embargo, estas viviendas son altamente vulnerables a eventos sísmicos debido a su gran masa, deficientes conexiones y falta de continuidad de muros lo que conlleva a un severo agrietamiento, formación de bloques rígidos y, en muchas ocasiones, al colapso total de la vivienda. Aunque la población está optando por construir con material noble (ladrillo de arcilla cocida), todavía se sigue construyendo este tipo de viviendas de adobe. La situación se agrava en caso de viviendas de adobe de dos pisos.

En las regiones rurales y en la sierra en general, la construcción con adobe se debe a dos motivos fundamentales; sus propiedades térmicas permiten mantener la vivienda cálida en zonas frías de clima alto andino y también el bajo costo del material, pues la tierra está a fácil acceso para el poblador.

La Norma técnica de construcción con adobe E.080 no contempla viviendas de adobe de dos pisos. Siendo estas viviendas una realidad en el país, debemos abordar esta problemática y plantear una solución, teniendo en consideración que la mayoría de investigaciones respecto a sistemas de refuerzo solo se han realizado en viviendas de adobe de un solo piso. Por ello, el presente proyecto de investigación tiene como finalidad contribuir a mejorar la seguridad sísmica de las viviendas de adobe de dos pisos mediante el uso de malla de refuerzo de cuerdas sintéticas.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo General

Contribuir en la mejora de la seguridad sísmica de las viviendas de adobe de dos pisos.

Objetivos Específicos

Evaluar la efectividad de una malla de cuerdas sintéticas como sistema de refuerzo sísmico para viviendas de adobe de dos pisos, mediante la comparación del desempeño observado de ensayos de simulación sísmica realizados a dos modelos a escala reducida con y sin refuerzo.

1.5 HIPÓTESIS

Es posible evaluar la efectividad de la malla de cuerdas sintéticas como sistema de refuerzo para viviendas de adobe de dos pisos en el Perú, mediante la comparación del desempeño observado de ensayos simulación sísmica de cuatro modelos a escala reducida, dos con y sin refuerzo.

1.6 PLAN DE TRABAJO

Investigación bibliográfica

La presente investigación realizó la búsqueda de información en portales web, trabajos de investigación, tesis de posgrado, etc. de las principales características que presentan las viviendas de adobe de 02 pisos en el Perú y los posibles sistemas de refuerzo que se pueden emplear.

Selección del Prototipo representativo

Se definió las características del Prototipo representativo teniendo en consideración que fuesen similares a las viviendas de adobe de 02 pisos que se construyen en Perú.

Definición de Modelo a escala reducida

Debido a las limitaciones de peso que presenta la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se realizó un estudio basado en la Teoría de Modelos, que permitió definir el Modelo a escala reducida, para que los resultados fuesen representativos para el Prototipo de viviendas de adobe de dos pisos.

Elaboración de planos de construcción

Se elaboraron los planos de construcción, donde se detallaba la distribución arquitectónica del modelo. A su vez, las dimensiones y detalles de la cimentación. Esto se empleó para la construcción de los 04 modelos.

Construcción del Modelo representativo

Definida las características y planos, se realizó la construcción de 04 modelos a escala reducida los que posteriormente fueron sometidos a ensayos de simulación sísmica, con la finalidad de poder evaluar la efectividad del refuerzo de malla de cuerdas sintéticas.

Señal de Comando e Instrumentación

Se definió que la señal sísmica “Ancash, Mayo de 1970” sería empleada en los ensayos. También se determinó la ubicación de la instrumentación (LVDT, acelerómetros, etc.) para la recopilación de datos.

Ensayos de simulación sísmica de modelos no reforzados

Consistió en la primera etapa experimental, donde se llevó a cabo los ensayos de simulación sísmica de dos de los modelos construidos sin usar un sistema de refuerzo para así poder identificar los mecanismos de falla. La señal de comando fue empleada en diferentes fases en donde para el primer modelo no reforzado se fue variando de forma gradual el desplazamiento máximo en la base. Mientras que el segundo modelo no reforzado fue sometido directamente a la mayor capacidad de desplazamiento de la mesa vibradora.

Propuesta de patrón de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas

Luego de haber realizado la primera etapa de los ensayos experimentales, se analizó el comportamiento de los dos modelos no reforzados, identificando el patrón de formación de bloques rígidos. Se evaluó los resultados obtenidos con la finalidad de proponer un patrón de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas.

Reforzamiento de modelos

Se realizó el reforzamiento con cuerdas sintéticas de los dos modelos, en base al patrón de refuerzo definido.

Ensayos de simulación sísmica de modelos reforzados

Los dos modelos reforzados fueron sometidos a las mismas fases de desplazamientos en la base que se empleó para los modelos no reforzados. Para la instrumentación, se incluyó la instalación de dos celdas de carga, los cuales registraron las fuerzas de tensión en el tiempo que se produjeron en las cuerdas para cada fase de ensayo.

Presentación, análisis y comparación de resultados

Se analizó y comparó los resultados obtenidos de los modelos no reforzados, con los modelos reforzados. De esta manera se evaluó la efectividad de la malla de cuerdas sintéticas como sistema de refuerzo en viviendas de adobe de dos pisos.

2. VIVIENDAS DE ADOBE EN EL PERÚ

2.1 VIVIENDAS EN LA ACTUALIDAD

La Tabla 1 detalla los resultados del Censo Nacional 2017 - INEI, la cual revela que cerca de 2'150,000 viviendas tienen como material predominante al adobe, que representa el 28% del total de viviendas que existen en el Perú.

Al comparar los resultados obtenidos de los censos de 2007 y 2017, se observa una reducción del porcentaje de viviendas de adobe del 35% al 28%, esto se debe a la construcción de nuevas viviendas con unidades de arcilla cocida y/o concreto armado, representando un crecimiento del 43.7% de este tipo de viviendas. Es importante mencionar que las viviendas de adobe tienen una variación intercensal negativa del 3.6%, lo cual señala que en un lapso de 10 años solo un ligero porcentaje ha cambiado sus viviendas de adobe por viviendas de material noble, esto constituye un enorme riesgo de perder millones de vidas humanas ante la eventualidad de un sismo de gran magnitud (Figura 2.1).

Tabla 1. Viviendas en el Perú según el tipo de material predominante en las paredes (INEI)

Material predominante en las paredes exteriores	Censo 2007	Censo 2017	Variación intercensal (2007-2017)	
			Absoluto	%
Ladrillo o bloque de cemento	2,991,627	4,298,274	1,306,647	43.7
Piedra o sillar con cal o cemento	33,939	43,170	9,231	27.2
Adobe o tapia	2,229,715	2,148,494	-81,221	-3.6
Madera (pona, tornillo, etc.)	617,742	727,778	110,036	17.8
Quincha (caña con barro)	183,862	164,538	-19,324	-10.5
Piedra con barro	106,823	77,593	-29,230	-27.4
Triplay, calamina, estera y otro	236,423	239,053	2,630	1.1
Total	6,400,131	7,698,900	1,298,769	20.3

A nivel departamental, Huancavelica tiene el mayor número de viviendas de adobe o tapial con un valor cerca de 85,000 que equivale al 82.4% de total de viviendas de este departamento, seguido de Apurímac con cerca de 92,000 viviendas (76.1%), Cajamarca con 264,000 viviendas (70.3%) y Cusco cerca de 218,000 viviendas (67.3%), que destacan entre los principales.

En cambio, los departamentos de Loreto con cerca de 1,500 viviendas de adobe que equivale al 0.7% del total de viviendas de este departamento, Ucayali con cerca de 1,100 viviendas (0.9%), la Provincia Constitucional del Callao con 4,500 (1.8%) y la Provincia de Lima con 52,300 viviendas (2.4%) son los que presentan menor proporción de viviendas de adobe (Figura 2.2).

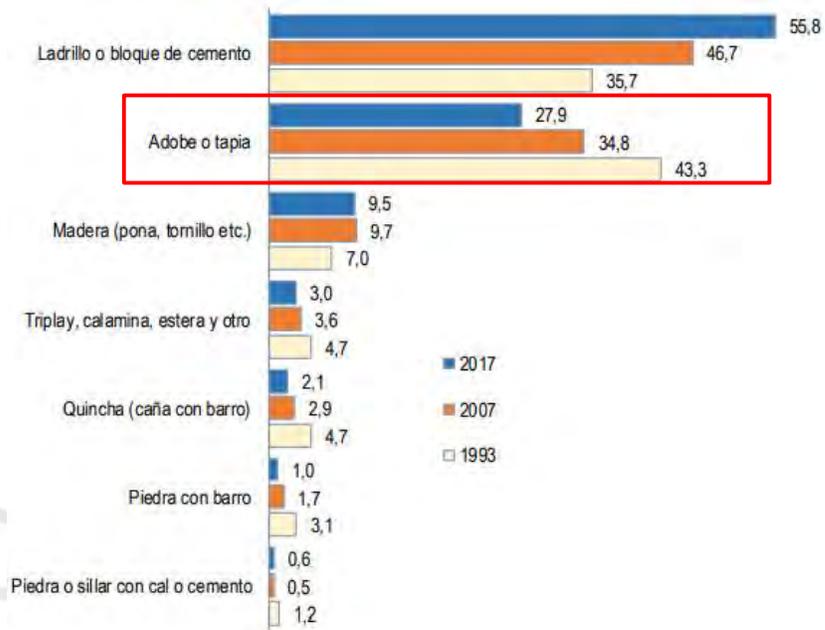


Figura 2.1 Viviendas en el Perú, según el material predominante - Censo 1993; 2007 y 2017 – INEI



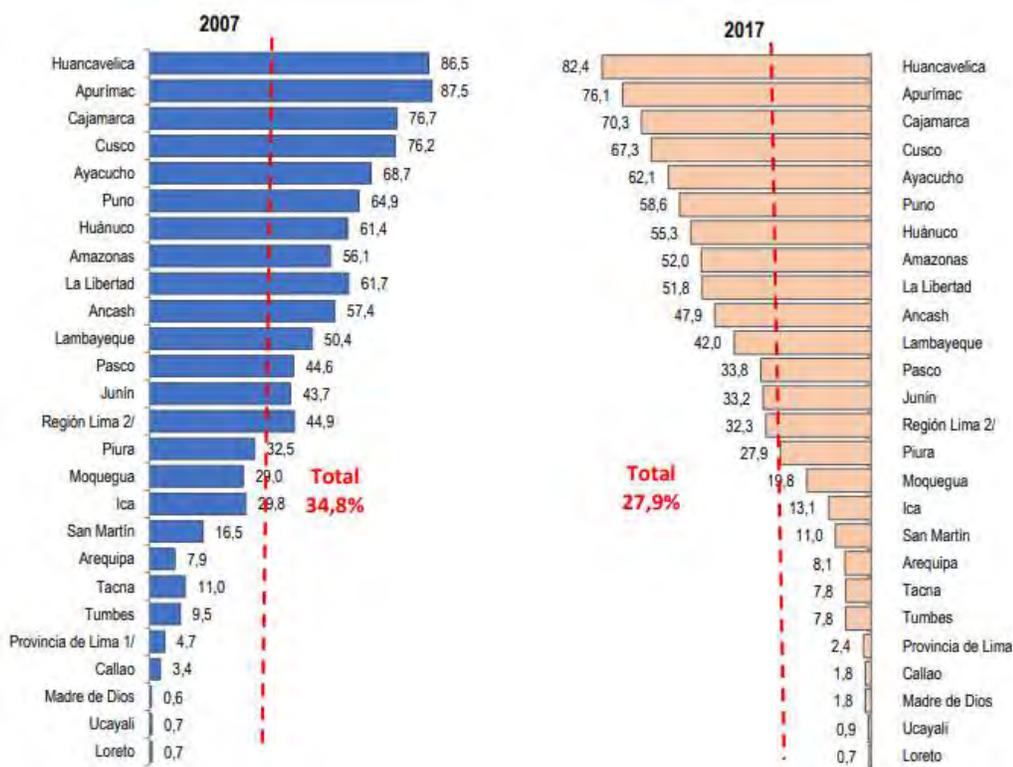


Figura 2.2 Viviendas de adobe en el Perú, según departamento - Censo 2007 y 2017 – INEI

En el Perú existen 1874 distritos, de los cuales, en 649 más del 90% (714,802) de sus viviendas son de adobe o tapial, destacando los distritos de Huacllan, Eleazar Guzmán Barrón, Cajamarquilla y Alfonso Ugarte, todos ellos situados en el departamento de Áncash. En el departamento de La Libertad destaca el distrito de Paranday donde el 100% de sus viviendas son de adobe.

En un rango de 70% a 90%, se ubican 430 distritos con 541,345 viviendas. Asimismo, en un rango de 50% a 70%, se encuentran 165 distritos con 282,912 viviendas. Finalmente, en un rango de 0% a 50%, se ubican 630 distritos con 609,435 viviendas de adobe o tapial (Figura 2.3).

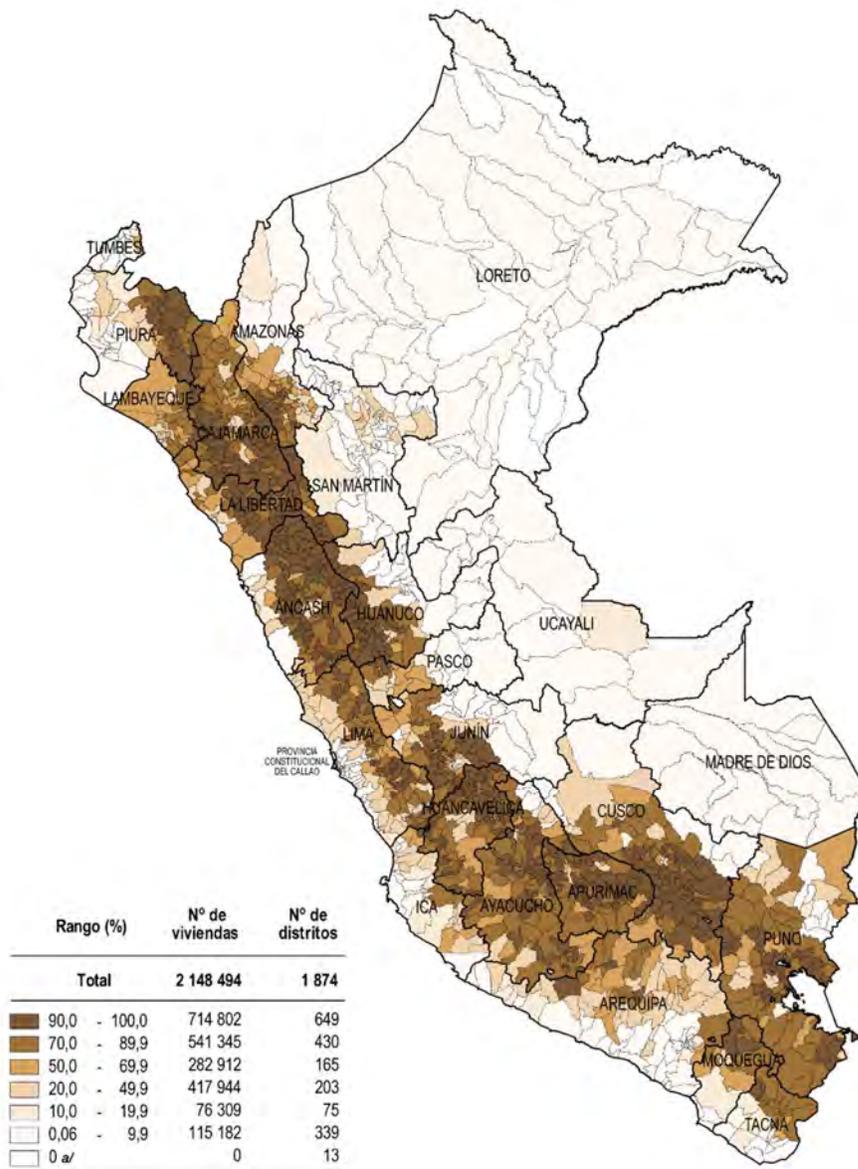


Figura 2.3 Viviendas de adobe en el Perú, según distrito - INEI

2.2 PROTOTIPO DE VIVIENDAS

Las viviendas de adobe de dos pisos en el Perú presentan configuraciones en planta de forma rectangular simple (Figura 2.4), en forma de L (Figura 2.5) o en forma de C.

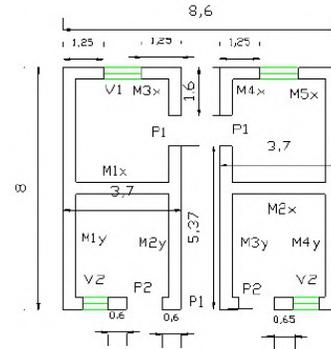


Figura 2.4 Configuración de vivienda de adobe, forma rectangular simple (Blondet, 2004)

Siendo el primer nivel utilizado como área social en el que la sala y el comedor pueden ser independientes o no, también cuentan con áreas para habitaciones cuyos ambientes se comunican a través de un pasillo que ocupa una posición central y/o lateral (Carazas, 2001). El segundo nivel mantiene las mismas dimensiones y está destinado solamente para habitaciones.

Los materiales y elementos que se utilizan para construir una casa son tradicionales y poco diversificados. Los principales son: el adobe, el eucalipto, la teja de arcilla cocida de forma acanalada, el yeso, la piedra y la paja.

Las viviendas de adobe de dos pisos presentan un techo inclinado, de una o dos aguas. El primer nivel presenta una altura promedio de 2.50 m y el segundo nivel de 2.30 a 2.40 m. En la parte más alta del tejado la casa puede alcanzar en promedio unos 7 m de altura.

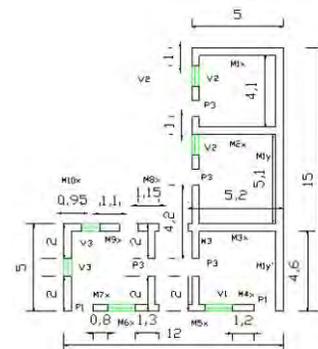


Figura 2.5 Configuración de vivienda de adobe, forma L (Blondet, 2004)

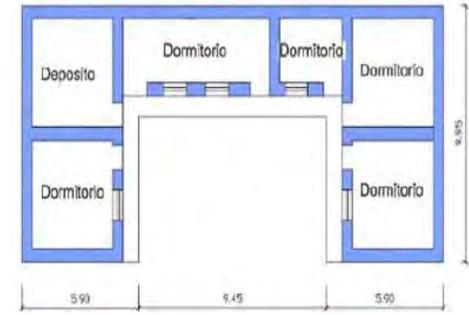


Figura 2.6 Configuración de vivienda de adobe, forma C (Ruiz, 2013)

Los cimientos cuya profundidad varían entre 0.50 a 0.80 m y cuyo ancho se determina en función del espesor del muro. En los cimientos las piedras más grandes se instalan en el fondo y las más pequeñas encima, siendo unidas con mortero de tierra.

El sobrecimiento tiene el espesor del muro y está hecho de piedras de talla mediana, en su mayoría planas, pegadas con mortero de tierra.

Los muros están hechos de ladrillos de adobe (tierra y paja), se encuentran unidos por mortero de la misma composición de los adobes. No presentan ningún refuerzo vertical ni horizontal.

Las vigas de entrepiso son de madera rolliza de eucalipto, redondas, de 0.20 m de diámetro. Se instalan directamente sobre el muro de adobe, a una separación aproximada de 0.80 m.

Las puertas y ventanas son de madera de mediana calidad. Las dimensiones de las ventanas pueden variar entre 1.00 a 1.50 m y las de las puertas pueden variar entre 1.90 a 2.30 m de altura.

El techo presenta una pendiente de 15 a 18°, y de 23° cuando es a dos aguas. La cubierta es de tejas acanaladas de arcilla cocida, colocadas sobre un mortero de tierra y paja, sostenido a su vez por una capa de cañas unidas y clavadas a correas de madera que se encuentran separadas unas de otras entre 0.80 m a 1.00 m. Sin embargo, en la actualidad se viene utilizando con mayor frecuencia calaminas en lugar de tejas cocidas.

Finalmente, en el primer nivel, el piso de madera de regular calidad se clava sobre viguetas de madera fijadas en tierra con estacas de madera y de piedra (Carazas, 2001).

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales que se emplean para la construcción de viviendas de adobe deben cumplir con las características que estipula la Norma E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada. Por ello, los materiales que se utilizaron para la presente investigación siguieron los mismos parámetros. A continuación, se detalla los requerimientos establecidos y las características de los materiales empleados para la construcción y refuerzo de los modelos de adobe a escala reducida.

2.3.1 ADOBE

Las unidades de adobe que se emplearon para el asentado de muros fueron de planta cuadrada. Se empleó también medias unidades o unidades rectangulares en las esquinas de los muros para el amarre entre hiladas. Las dimensiones de los bloques de adobe cuadrados fueron de 220 mm x 220 mm x 50 mm de altura (Figura 2.7a), mientras que los bloques rectangulares fueron de 110mm x 220 mm x 50 mm de altura (Figura 2.7b). Cabe mencionar que estas dimensiones corresponden para el modelo a escala reducida 1:2 por lo que, para un modelo a escala natural, las unidades de adobe presentarían el doble de dimensiones.

La norma E.080 estipula que las dimensiones del bloque de adobe cuadrado no deben sobrepasar los 400mm de lado y que la altura debe medir entre 8mm y 12mm. Mientras que el bloque de adobe rectangular debe tener un largo igual a dos veces su ancho. Por lo cual, las dimensiones de las unidades de adobe empleadas en la presente investigación cumplieron con los requerimientos de la norma.

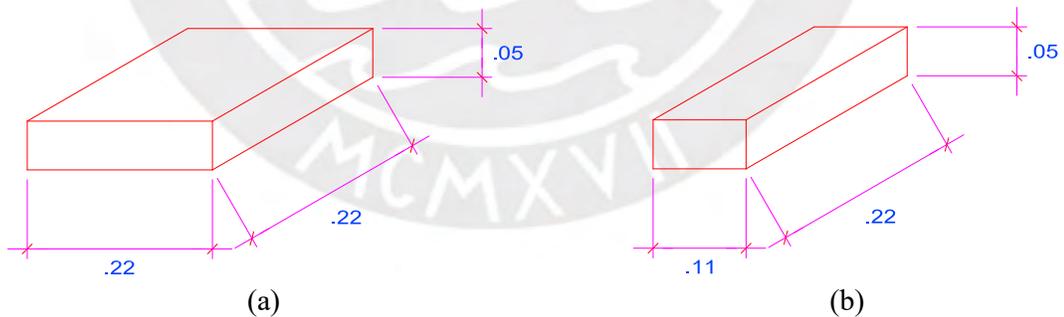


Figura 2.7 Dimensiones de las unidades de adobe: (a) Cuadrada; (b) Rectangular

Para determinar si la tierra seleccionada podía emplearse como material de construcción se realizaron las pruebas de “Cinta de barro” y de “Resistencia seca”, las cuales permiten tener una primera evaluación de la cantidad de arcilla en un suelo.

La prueba Cinta de barro consiste en humedecer una muestra de suelo hasta que sea posible moldear un cilindro de 12mm de diámetro. El cilindro se coloca en una mano y se va

moldeando lentamente hasta formar una cinta de 4mm de espesor. Luego se deja descolgar la cinta y procede a medir. Si la cinta se corta antes de los 100mm, significa que hay poco contenido de arcilla. Por el contrario, si la cinta llega a tener una longitud mayor a 200mm, nos indica que el contenido de arcilla es excesivo, esto implicaría una fuerte contracción al secarse. Por ello, la cantidad óptima de arcilla se presenta cuando la longitud de la cinta se encuentra entre los 100mm y 200mm. Cabe señalar, que la tierra empleada para la fabricación de las unidades de adobe presentó un óptimo contenido de arcilla ya que la cinta de barro alcanzó una longitud aproximada de 185mm (Figura 2.8).



Figura 2.8 Prueba de Cinta de barro (Valle, 2019)

La prueba de Resistencia seca consiste en agregar una cantidad mínima de agua a una muestra de suelo, de tal manera que se pueda formar cuatro bolitas sobre las palmas de las manos (Figura 2.9a), sin que éstas se deformen significativamente a simple vista. Luego las cuatro bolitas se dejan secar por 48 horas en un lugar que permita protegerlas del sol y de la lluvia. Una vez transcurrido el tiempo de secado, se debe presionar fuertemente cada una de las bolitas con el dedo pulgar y el dedo índice de una mano. En caso que luego de la prueba, se quiebre, rompa o agriete al menos una sola bolita se deberá volver a formar cuatro bolitas con los mismos materiales y se realizará el mismo procedimiento mencionado anteriormente. De ser el caso que luego de la prueba, no se quiebre o no se agriete ninguna de las cuatro bolitas, significa que dicha tierra puede emplearse como material de construcción. Para la presente tesis, cabe mencionar que de la muestra de tierra seleccionada se formaron seis bolitas de barro, que luego del tiempo de secado, se procedió a presionarlas con toda la fuerza posible, no logrando aplastar ninguna de las seis bolitas secas (Figura 2.9b). Con lo que se concluyó que el material seleccionado contaba con la resistencia suficiente para permitir la elaboración de las unidades de adobe.

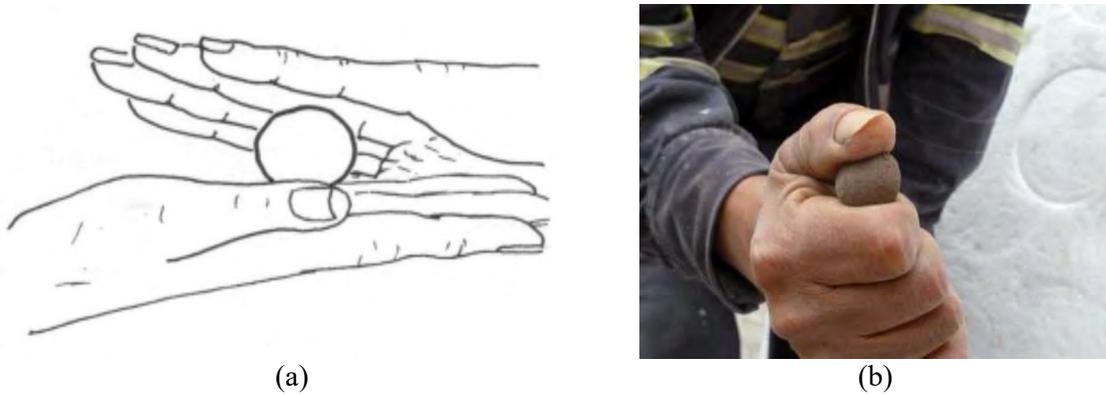


Figura 2.9 Prueba de Resistencia seca: (a) Formación de bolitas de barro (Norma E.080); (b) Ejerciendo presión a la bolita de barro seca (Valle, 2019)

Para la elaboración de las unidades de adobe se empleó una dosificación de tierra, arena gruesa y paja en una proporción de 5:1:1 en volumen. Se adicionó paja ya que ésta permite controlar la formación de fisuras y agrietamiento del adobe.

De los ensayos realizados por Valle (2019), quien concluyó que la óptima dosificación para que el mortero de barro no presentará ningún tipo de agrietamiento o fisuras, era a partir de una relación de volumen de tierra y arena gruesa de 1:1. Por otra parte, también determinó que el módulo de elasticidad del adobe fue de 205MPa.

2.3.2 CUERDA SINTÉTICA

La cuerda sintética, también conocida como “driza”, fue el material que se empleó para los trabajos de reforzamiento de los modelos de las viviendas de adobe de dos pisos. Se detalla sus principales características:

Marca: Driza Fixser

Medida: 1/8”

Material: Polyester

Calibre: 3.2 mm

Tipo de trenzado: Diamante

Tipo: Hilado sintético de bajo estiramiento

Costo: S/. 0.30 por ml



Figura 2.10 Cuerdas sintéticas como elemento de refuerzo

De los ensayos realizados por Valle (2019), quien determinó que la driza $\phi = 1/8''$ presenta un módulo de elasticidad de 600MPa y una capacidad de carga de 1.3kN.

De la investigación realizada por Mattsson (2015), que consistió en un arduo estudio de diferentes combinaciones de nudos en cuerdas sintéticas, se concluyó que la más óptima fue la combinación del nudo 8 con dos nudos simples. En el presente proyecto de investigación se usó dicha combinación de nudos.

El nudo ocho consiste en dar a uno de los extremos de la cuerda la forma de un número ocho, para ello se toma la punta del extremo de la cuerda y se pasa por encima de la misma formando un pequeño círculo (primer círculo), para luego hacer que la punta pase por detrás de la cuerda y regrese por encima de la misma formando el segundo círculo, por último, se busca que la punta pase por el primer círculo (Figura 2.11a).

El nudo simple consiste en hacer que uno de los extremos de la cuerda pase por detrás de la misma formando un círculo y que dicha punta pase por el círculo ya formado.

Para el procedimiento de tensado se hace que el otro extremo de la cuerda pase siguiendo un sentido, de atrás hacia adelante, por el primer círculo formado, con lo cual se procede a tensar. (Figura 2.11b). Para evitar pérdidas de tensión en la cuerda se asegura haciendo dos nudos simples (Figura 2.11c).

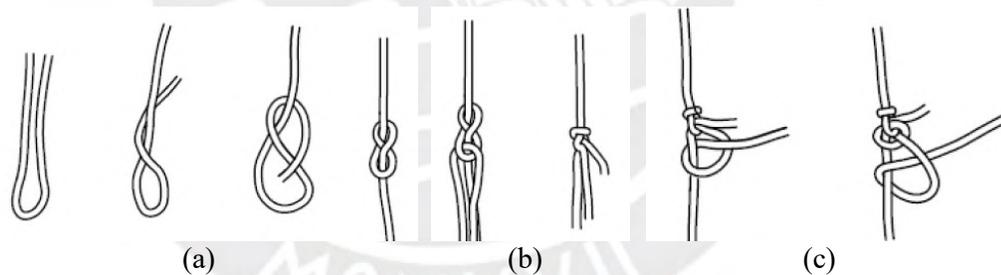


Figura 2.11 Detalle de nudos: (a) Nudo ocho; (b) Tensado y (c) Nudo simple

3. TEORÍA DE MODELOS

Debido a las limitaciones de peso (150 KN) que presenta la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, no fue posible ensayar a escala natural el Prototipo seleccionado como vivienda representativa de las construcciones existentes de adobe de dos pisos en el Perú, por lo que se decidió que la construcción de los modelos fuese a escala reducida.

Por ello, fue necesario recurrir a los fundamentos de la Teoría de Modelos para determinar el grupo de parámetros adimensionales que permitiesen cumplir con los requerimientos de similitud entre el modelo (escala reducida) y el prototipo (escala natural), teniendo como finalidad que los resultados que se obtuvieran de los ensayos fuesen datos representativos del comportamiento estructural de las viviendas de adobe de dos pisos cuando se encuentran frente a solicitaciones sísmicas.

3.1 MODELAMIENTO EXPERIMENTAL BASADO EN LA CONDICIONES DE SIMILITUD

El modelamiento experimental se basa en el hecho de que el modelo y el prototipo obedezcan a las mismas leyes físicas. El modelo deberá ser construido de tal manera que contenga todas las características relevantes del prototipo. La relación entre el modelo y el prototipo se conoce como similitud.

La condición de similitud se alcanza siguiendo el procedimiento denominado Análisis Dimensional. Este procedimiento se basa en que todas las relaciones generales se expresen mediante ecuaciones dimensionalmente homogéneas.

3.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es una operación matemática que involucra unidades o dimensiones. Cualquier situación puede ser descrita por ciertas cantidades físicas conocidas como dimensiones, por ejemplo: longitud, velocidad, área, volumen, aceleración, etc. Sin embargo, las dimensiones no son útiles sin que se adjunte una magnitud. Las dimensiones son propiedades que pueden ser medidas. Las unidades son elementos utilizados para cuantificar estas dimensiones.

En el análisis dimensional, solo se requieren tres cantidades físicas: Masa (M), Longitud (L) y Tiempo (T) para definir tanto la dimensión como la cantidad. Las cuales son definidas como cantidades básicas o cantidades primarias.

La dimensión y magnitud de todas las cantidades físicas se pueden expresar como el producto de las potencias de estas tres cantidades básicas L, T y M. Por ejemplo, la naturaleza de la velocidad, la aceleración y la fuerza se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} [v] &= [L * T^{-1}] \\ [a] &= [L * T^{-2}] \\ [F] &= [M * L * T^{-2}] \end{aligned}$$

Estos se leen como que la dimensión de la velocidad es la longitud dividida por el tiempo y así sucesivamente. Las cantidades derivadas, como la velocidad, la aceleración, la fuerza, etc., se denominan cantidades secundarias.

3.3 PRINCIPIO DE MODELAMIENTO A ESCALA

El modelamiento a escala se puede conceptualizar considerando elementos pequeños del prototipo y sus elementos correspondientes en el modelo. Al estudiar los elementos del prototipo, se tiene en cuenta los datos físicos de interés tales como la geometría, la presión, el peso, la tensión, la velocidad, la aceleración, la frecuencia, etc.

El comportamiento homólogo de los elementos correspondientes al modelo se asegura si cada cantidad del prototipo se puede transformar a la cantidad correspondiente de los elementos del modelo mediante una constante de proporcionalidad denominada factor de escala λ

$$\lambda_i = \frac{\text{Magnitud de } i^{th} \text{ variable del prototipo}}{\text{Magnitud de } i^{th} \text{ variable del modelo}} \quad (1)$$

Por lo tanto, la relación de las variables dimensionales correspondientes del prototipo y el modelo en los puntos correspondientes son constantes. Por ejemplo, el factor de escala de longitud se puede definir como:

$$\lambda_i = \frac{(L)_{prototipo}}{(L)_{modelo}} = \text{constante} \quad (2)$$

Si el factor de escala de longitud $\lambda_L = 2$, entonces todas las longitudes geométricas del modelo serán la mitad del prototipo. Sin embargo, las mediciones u observaciones sobre el prototipo y el modelo se realizan en puntos homólogos. La homología trata de la relación entre los puntos correspondientes, los eventos correspondientes y las variables correspondientes en cada sistema similar, es decir, la homología se aplica a la geometría, así como a otras características

físicas. Por lo tanto, en un diseño correctamente concebido, debe existir para cada punto en el modelo donde se toman las medidas, una posición única definida en el prototipo al que se aplican estas medidas. Por ejemplo, considere dos vigas estructurales, un prototipo y un modelo sujetos a cambios periódicos de carga, como se muestra en la Figura 3.1

Si todas las longitudes correspondientes están vinculadas por el factor de escala de longitud

$$\lambda_l = \frac{x_L}{x'_L} = \frac{x_1}{x'_1} = \frac{x_2}{x'_2} = \frac{y_2}{y'_2} = \frac{y_{2 \text{ máx}}}{y'_{2 \text{ máx}}}$$

Todo el tiempo correspondiente, están vinculadas por el factor de escala de tiempo

$$\lambda_t = \frac{t_1}{t'_1} = \frac{t_0}{t'_0}$$

Todas las fuerzas correspondientes, están vinculadas por el factor de escala de fuerza

$$\lambda_F = \frac{F_L}{F'_L} = \frac{F_A}{F'_A} = \frac{F_B}{F'_B} = \frac{F_{L \text{ máx}}}{F'_{L \text{ máx}}}$$

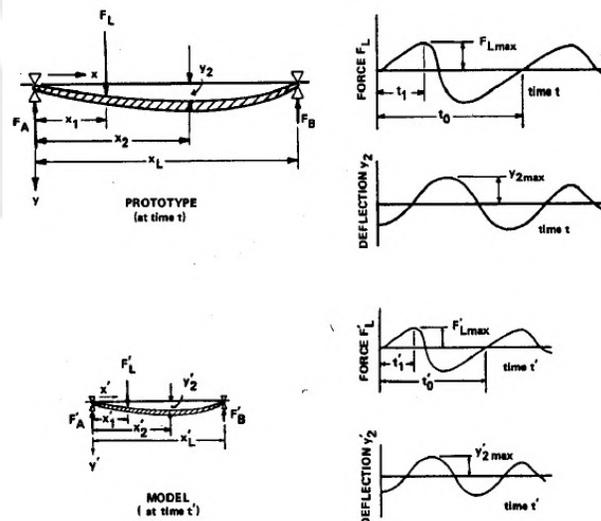


Figura 3.1 Prototipo y Modelo Homólogo de viga vibrante (Jha, 2004)

3.3.1 FACTORES DE ESCALA PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

En el modelamiento a escala, solo interesan cantidades definidas como producto de las tres cantidades primarias (M; L; T), cada una de ellas elevada a la potencia adecuada. Por lo tanto,

solo se deben tener en cuenta los factores de escala primarios de estas tres cantidades. Todos los demás factores de escala secundaria se derivan fácilmente de ellos. En los problemas de análisis dinámico, se deben decidir dos factores de escala primarios:

- Factor de escala de longitud λ_l
- Factor de escala de tiempo λ_t .

Por ejemplo, se puede derivar fácilmente el factor de escala para la velocidad λ_v que es secundario a partir de factores de escala primarios de longitud λ_l y tiempo λ_t . La velocidad se puede expresar como la primera derivada de longitud con respecto al tiempo, de modo que:

$$\lambda_v = \frac{V_p}{V_m} = \frac{dl_p/dt_p}{dl_m/dt_m}$$

La homología geométrica y temporal requiere, sin embargo, que:

$$l_p = \lambda_l * l_m \text{ y } t_p = \lambda_t * t_m$$

Así que: $\lambda_v = \lambda_l/\lambda_t$

De la misma manera, cualquier factor de escala secundario puede derivarse de dos o más factores primarios, tales como:

Factor de escala de Área: $\lambda_A = \lambda_l^2$

Factor de escala de Aceleración: $\lambda_a = \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2}$

Factor de escala de Momento: $\lambda_M = \lambda_F * \lambda_l$

3.3.2 NÚMEROS PI

En el modelamiento a escala, los productos adimensionales desempeñan un papel clave y se denominan "Número Pi" y se denotan por la letra griega π . Un número Pi es un número puro sin ninguna unidad física. Tal número se define típicamente como un producto o relación de cantidades que tienen unidades, de tal manera que el producto en sí es adimensional.

Por ejemplo, la relación antes mencionada puede expresarse por: $\pi = v * t/l$

Para tener un modelo escalado, el prototipo y el modelo deben seguir la misma ley de gobierno, y los números Pi pertinentes se derivan directamente de dichas leyes. Por ejemplo:

- La ley de Hooke describe la elasticidad. Suponiendo que la relación de Poisson, el esfuerzo y la deformación se pueden relacionar a través de

$$\sigma = E * \varepsilon$$

- La fuerza inercial en cualquier elemento se rige por la segunda ley de Newton

$$dF = dm * a$$

En cualquier problema, usualmente hay diversas variables $x_1, x_2, x_3 \dots x_k$, requeridas para describir los fenómenos físicos de interés. Un número de cantidades adimensionales pueden formarse por la combinación de variables de la forma $x_1^{n_1}, x_2^{n_2}, x_3^{n_3} \dots x_k^{n_k}$ donde los exponentes $n_1, n_2, n_3 \dots n_k$ se seleccionan para que el producto resultante sea adimensional.

Por lo tanto, si se asume una de las variables, digamos x_i tiene la dimensión básica $x_i = L^{a_i} * T^{b_i} * M^{c_i}$, el producto se puede expresar como $(L^{a_1} * T^{b_1} * M^{c_1})^{n_1} (L^{a_2} * T^{b_2} * M^{c_2})^{n_2} \dots (L^{a_k} * T^{b_k} * M^{c_k})^{n_k}$. Para tener el producto adimensional, los exponentes de las diversas dimensiones básicas deben combinarse para dar un valor cero para cada dimensión básica. Por lo tanto

$$\begin{aligned} a_1 n_1 + a_2 n_2 + \dots + a_k n_k &= 0 \\ b_1 n_1 + b_2 n_2 + \dots + b_k n_k &= 0 \\ c_1 n_1 + c_2 n_2 + \dots + c_k n_k &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Habrán tantas ecuaciones como el número de dimensiones básicas, digamos m, y k desconocidas, donde k es igual al número de variables originales en el problema. A partir de la teoría de las ecuaciones, se sabe que existe k- r soluciones linealmente independientes para las ecuaciones (3) donde r, es el rango de la matriz de coeficientes.

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_k \\ b_1 & b_2 & \dots & b_k \\ c_1 & c_2 & \dots & c_k \end{pmatrix}$$

La matriz se llama comúnmente matriz dimensional. Dado que el rango de una matriz es el orden más alto de determinante distinto de cero contenidos en la matriz, es evidente que el rango no puede exceder el número de ecuaciones, pero puede ser más pequeño. Por lo tanto, el número de productos adimensionales independientes que pueden formarse es igual a $k - r$. Este conjunto de productos adimensionales se denomina conjunto completo. Una vez que se encuentra un conjunto completo de productos adimensionales, todas las demás combinaciones posibles adimensionales se pueden formar como productos contenidos en el conjunto completo. Por lo tanto, el teorema de Buckingham Pi se puede afirmar de la siguiente manera:

Si una ecuación con k variables es dimensionalmente homogénea,

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_k) \quad (4)$$

se puede reducir a una relación entre $k - r$ productos adimensionales independientes,

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{k-r}) \quad (5)$$

Donde r es el rango de la matriz adimensional.

3.3.3 MODELOS EN CONDICIONES DE SIMILITUD

La similitud completa entre dos sistemas existe si los valores de todos los factores π correspondientes para prototipo y modelo son iguales. La similitud completa no requiere necesariamente una similitud geométrica. Dos sistemas pueden parecer diferentes en forma y tamaño, pero pueden ser completamente similares. La similitud completa requiere que

$$(\pi_i)_{prototipo} = (\pi_i)_{model} \quad (6)$$

El primer paso en el análisis es enumerar todas las variables relevantes y sus dimensiones básicas involucradas, descuidando el efecto de la relación de Poisson. Estas variables se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de las cantidades medidas para el análisis dinámico (Harry & Gajanan, 1999)

Símbolo	Cantidad	Dimensión
l	Longitud	L
ρ	Densidad	$M L^{-3}$
E	Módulo de Elasticidad	$M L^{-1} T^{-2}$
t	Tiempo	T
ω	Frecuencia	T^{-1}
σ	Esfuerzo	$M L^{-1} T^{-2}$
F	Fuerza	$M L T^{-2}$
a	Aceleración	$L T^{-2}$
c	Coefficiente de amortiguamiento	$M T^{-1}$

Para proceder con el análisis dimensional se forma el producto

$$l^{x_1} \rho^{x_2} E^{x_3} t^{x_4} \omega^{x_5} \sigma^{x_6} F^{x_7} a^{x_8} c^{x_9} \quad (7)$$

Sustituyendo la dimensión básica para cada variable se obtiene

$$(L)^{x_1} (ML^{-3})^{x_2} (ML^{-1}T^{-2})^{x_3} (T)^{x_4} (T^{-1})^{x_5} (ML^{-1}T^{-2})^{x_6} (MLT^{-2})^{x_7} (LT^{-2})^{x_8} (MT^{-1})^{x_9}$$

Igualando el exponente de las dimensiones básicas (M, L y T) a cero, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} M: & \quad 0 + x_2 + x_3 + 0 + 0 + x_6 + x_7 + 0 + x_9 = 0 \\ L: & \quad x_1 - 3x_2 - x_3 + 0 + 0 - x_6 + x_7 + x_8 + 0 = 0 \\ T: & \quad 0 + 0 - 2x_3 + x_4 - x_5 - 2x_6 - 2x_7 - 2x_8 - x_9 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

La matriz dimensional es:

	l	ρ	E	t	ω	σ	F	a	c
M	0	1	1	0	0	1	1	0	1
L	1	-3	-1	0	0	-1	1	1	0
T	0	0	-2	1	-1	-2	-2	-2	-1

Considerando la determinante formada por las últimas tres columnas de la matriz:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -2 & -2 & 1 \end{vmatrix} = 1$$

Dado que dicho valor distinto de cero, se sigue que el rango de la matriz dimensional es tres y según el teorema de Buckingham hay $9-3 = 6$ productos adimensionales necesarios para describir el problema.

Para encontrar el conjunto adecuado de productos adimensionales llamados Números Pi, los tres parámetros elegidos adecuadamente, como x_1 , x_2 y x_4 , se expresan en términos de x_3 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 y x_9 como

$$\begin{aligned} x_1 &= -2x_3 - 2x_6 - 4x_7 - x_8 - 3x_9 \\ x_2 &= -x_3 - x_6 - x_7 - x_9 \\ x_4 &= 2x_3 + x_5 + 2x_6 + 2x_7 + 2x_8 + x_9 \end{aligned} \quad (9)$$

Sustituyendo estos valores de x_1 , x_2 y x_4 de la ecuación (9) en (7)

$$l^{(-2x_3-2x_6-4x_7-x_8-3x_9)} \rho^{(-x_3-x_6-x_7-x_9)} E^{x_3} t^{(2x_3+x_5+2x_6+2x_7+2x_8+x_9)} \omega^{x_5} \sigma^{x_6} F^{x_7} a^{x_8} c^{x_9} \quad (10)$$

Combinando las potencias similares en la ecuación anterior obtenemos

$$\left(\frac{Et^2}{\rho l^2}\right)^{x_3} (t\omega)^{x_5} \left(\frac{t^2\sigma}{\rho l^2}\right)^{x_6} \left(\frac{Ft^2}{\rho l^4}\right)^{x_7} \left(\frac{t^2 a}{l}\right)^{x_8} \left(\frac{tc}{\rho l^3}\right)^{x_9} \quad (11)$$

Para tener un conjunto de números adimensionales x_3 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 y x_9 son asumidos para ser uno de los que lleva a seis números adimensionales de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{Et^2}{\rho l^2}; \pi_2 = t\omega; \pi_3 = \frac{t^2\sigma}{\rho l^2}; \pi_4 = \frac{Ft^2}{\rho l^4}; \\ \pi_5 &= \frac{t^2 a}{l}; y \pi_6 = \frac{tc}{\rho l^3} \end{aligned} \quad (12)$$

Las leyes de modelamiento ahora se pueden desarrollar fácilmente aplicando una condición de similitud en estos números Pi. Para tener la similitud entre el prototipo y el modelo, se supone que ambos sistemas se describen mediante ecuaciones

$$f_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \pi_{3p}, \pi_{4p}, \pi_{5p}, \pi_{6p}) = 0 \quad (\text{Prototipo}) \quad (13)$$

$$f_m(\pi_{1m}, \pi_{2m}, \pi_{3m}, \pi_{4m}, \pi_{5m}, \pi_{6m}) = 0 \quad (\text{Modelo}) \quad (14)$$

La función, f_p , para el prototipo es la misma que la función, f_m , para el modelo. Considerando esto, se puede concluir que:

$$\begin{aligned} \pi_{1p} = \pi_{1m}, \pi_{2p} = \pi_{2m}, \pi_{3p} = \pi_{3m}, \pi_{4p} = \pi_{4m}, \\ \pi_{5p} = \pi_{5m}, \text{ y } \pi_{6p} = \pi_{6m} \end{aligned} \quad (15)$$

Ahora se pueden extraer los factores de escala (asumiendo material diferente para el prototipo y el modelo) de la siguiente manera:

- $\pi_{1p} = \pi_{1m}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \left(\frac{Et^2}{\rho l^2} \right)_p &= \left(\frac{Et^2}{\rho l^2} \right)_m \\ \Rightarrow \frac{E_p}{E_m} &= \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{t_m}{t_p} \right)^2 \\ \Rightarrow \lambda_E &= \frac{\lambda_l^2 \lambda_\rho}{\lambda_t^2} \end{aligned} \quad (16)$$

- $\pi_{2p} = \pi_{2m}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (t\omega)_p &= (t\omega)_m \\ \Rightarrow \frac{\omega_p}{\omega_m} &= \frac{t_m}{t_p} \\ \Rightarrow \lambda_\omega &= \frac{1}{\lambda_t} \end{aligned} \quad (17)$$

- $\pi_{3p} = \pi_{3m}$

$$\Rightarrow \left(\frac{t^2 \sigma}{\rho l^2} \right)_p = \left(\frac{t^2 \sigma}{\rho l^2} \right)_m$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^2 \left(\frac{t_m}{t_p} \right)^2$$

$$\Rightarrow \lambda_\sigma = \frac{\lambda_\rho \lambda_l^2}{\lambda_t^2}$$

(18)

- $\pi_{4p} = \pi_{4m}$

$$\Rightarrow \left(\frac{F t^2}{\rho l^4} \right)_p = \left(\frac{F t^2}{\rho l^4} \right)_m$$

$$\Rightarrow \frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^4 \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left(\frac{t_m}{t_p} \right)^2$$

$$\Rightarrow \lambda_F = \frac{\lambda_l^4 \lambda_\rho}{\lambda_t^2}$$

(19)

- $\pi_{5p} = \pi_{5m}$

$$\Rightarrow \left(\frac{t^2 a}{l} \right)_p = \left(\frac{t^2 a}{l} \right)_m$$

$$\Rightarrow \left(\frac{t_p}{t_m} \right)^2 = \left(\frac{l_p}{l_m} \right) \left(\frac{a_m}{a_p} \right)$$

$$\Rightarrow \lambda_t = \sqrt{\lambda_l \lambda_a}$$

(20)

Si se descuida el efecto de la gravedad, el conflicto de escala en el análisis dinámico se puede resolver fácilmente. Se tiene que $\lambda_E = \frac{\lambda_l^2 \lambda_\rho}{\lambda_t^2}$ de la ecuación (17) y de la ecuación (18) se tiene $\lambda_\omega = \frac{1}{\lambda_t}$. Ahora sustituyendo $\lambda_t = \frac{1}{\lambda_\omega}$ en la ecuación (17) se tiene $\lambda_E = \lambda_l^2 \lambda_\rho \lambda_\omega^2$, de donde se puede reescribir el factor de escala de la frecuencia λ_ω como:

$$\lambda_{\omega} = \frac{1}{\lambda_l} \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_{\rho}}} \quad (21)$$

Por lo tanto, el factor de escala de tiempo de la ecuación (17) se convierte en

$$\lambda_t = \lambda_l \sqrt{\frac{\lambda_{\rho}}{\lambda_E}} \quad (22)$$

Sustituyendo el nuevo factor de escala de tiempo en la ecuación (18), el nuevo factor de esfuerzo se puede obtener como:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_E \quad (23)$$

Sustituyendo la ecuación (22) en la ecuación (19) proporcionando el nuevo factor de escala de fuerza como

$$\lambda_F = \lambda_l^2 \lambda_E \quad (24)$$

Luego sustituyendo la ecuación (22) en la ecuación (20) resulta en el siguiente factor de escala de aceleración que no es la unidad

$$\lambda_a = \frac{\lambda_l \lambda_{\rho}}{\lambda_E} \quad (25)$$

Para resumir cuándo se descuida el efecto de la gravedad, las leyes de escala para el análisis dinámico se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} i. \lambda_t &= \lambda_l \sqrt{\frac{\lambda_{\rho}}{\lambda_E}} \\ ii. \lambda_{\omega} &= \frac{1}{\lambda_l} \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_{\rho}}} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
 \text{iii. } \lambda_\sigma &= \lambda_E \\
 \text{iv. } \lambda_F &= \lambda_l^2 \lambda_E \\
 \text{v. } \lambda_a &= \frac{\lambda_l \lambda_\rho}{\lambda_E} \\
 \text{vi. } \lambda_c &= \lambda_l^2 \sqrt{\lambda_E \lambda_\rho}
 \end{aligned}$$

Para el presente proyecto de investigación se estableció que el factor de escala de longitud tendría un valor igual a 2. Con ello, se procedió a realizar la construcción del modelo a escala reducida 1:2.

Se decidió que el material empleado para la construcción del modelo sería el mismo que el del prototipo, por ende, los factores de escala de densidad de masa; módulo de elasticidad y esfuerzo del material tuvieron un valor igual a 1. En consecuencia, los factores de escala de área; de volumen y de peso fueron 4; 8 y 8, respectivamente. La Tabla 3 muestra la lista completa de los factores de escala obtenidos:

Tabla 3. Factores de escala para la respuesta sísmica de estructuras (Harry & Sabnis, 1999)

Grupo	Cantidad	Dimensión	Factor de escala (prototipo/modelo)	Factor de escala Tesis
Carga	Fuerza, F	F	λ_l^2	4
	Aceleración, a	LT ⁻²	λ_l^{-1}	1/2
	Gravedad, g	LT ⁻²	--	--
	Velocidad, v	LT ⁻¹	1	1
	Tiempo, t	T	λ_l	2
Geometría	Dimensión lineal, l	L	λ_l	2
	Desplazamiento, Δ	L	λ_l	2
Propiedades del material	Frecuencia, f	T ⁻¹	λ_l^{-1}	1/2
	Módulo, E	FL ⁻²	1	1
	Esfuerzo, σ	FL ⁻²	1	1
	Deformación, ε		1	1
	Relación de Poisson, μ		1	1
	Densidad de masa, ρ	FL ⁻⁴ T ²	1	1

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

Los cuatro modelos (dos con y sin refuerzo) se diseñaron a partir de las características típicas de las viviendas de adobe de dos pisos de la sierra del Perú. Por limitaciones de la mesa vibradora del laboratorio de la PUCP, los modelos se construyeron a escala reducida 1:2. (Figura 4.1)



Figura 4.1 Modelo a escala reducida 1:2

Los modelos a escala reducida presentaron una altura de 3.50 m, con dimensiones en planta de 2.06x1.86 m². Estaban conformados por dos niveles, cada piso contaba con muros de 1.33 m de altura y con un espesor de 0.22 m sin considerar revestimiento.

Los muros laterales tenían vanos de ventana de 0.50x0.60 m², tanto en el primer nivel como en el segundo. El muro frontal tenía un vano de ventana en el segundo nivel y un vano de puerta de 0.50x1.14 m² en el primero. El muro posterior no presentaba vanos. Para lograr una inclinación en el techo de 14° se incluyó un tímpano de adobe de 0.45m.

Los modelos contaban únicamente con un ambiente por nivel debido a las restricciones de tamaño y peso de la mesa vibradora. La densidad de muros en la dirección paralela a los muros laterales (izquierdo y derecho) fue de 0.16 m² de muros por m² de área techada, mientras que la densidad de muros en la dirección paralela a los muros frontal y posterior fue de 0.19m² de muros por m² de área techada.

La base de los modelos consistió de un anillo de cimentación de concreto armado de 2.20x2.00 m² y con sección transversal de 0.35x0.30 m, este fue concebido para realizar el izaje; transporte y fijación de los modelos a la plataforma de la mesa vibradora.

Las juntas horizontales y verticales entre adobes fueron de 8mm. Cada hilada de adobe tenía 58mm de altura, 50mm de altura de la unidad de adobe y 8mm correspondiente al mortero de tierra. (Figura 4.2)

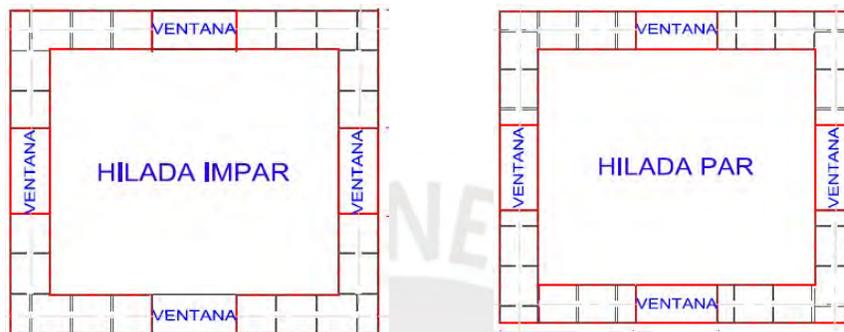


Figura 4.2 Distribución de adobes en planta para hiladas par e impar (Pando, 2017)

Para los dinteles de la puerta y ventanas se utilizó paquetes de caña amarradas por alambre N°16 para crear dinteles flexibles. Se colocaron vigas collares de madera en la parte superior de los muros como arriostre horizontal. Cada viga collar estuvo conformada por largueros y travesaños de 3"x2". La Figura 4.3a muestra la vista de la viga collar típica del modelo. La Figura 4.3b muestra la vista de las viguetas del primer y segundo piso del modelo.

Sobre la viga collar del primer y segundo piso se instalaron viguetas de 2"x3" a una distancia no mayor de 0.40m una de otra (Figura 4.3b). Sobre estas viguetas se colocó el entablado liviano de 1"x6" cuya función básica fue la de un elemento rígido que separa un piso de otro (Figura 4.3c).

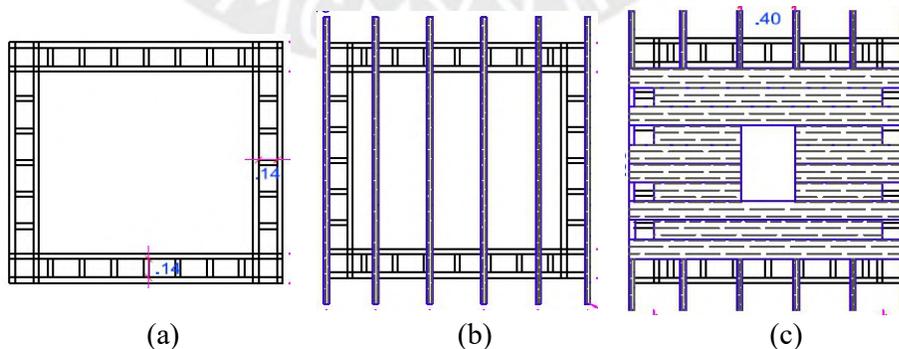


Figura 4.3 Vista en planta: (a) Viga collar, (b) Viguetas y (c) Entablado (Pando, 2017)

3.4 PROCESO CONSTRUCTIVO

Para la construcción de los 04 modelos a escala reducida, se empleó mortero de tierra que fue elaborado con una proporción tierra:arena de 1:1. La tierra fue seleccionada mediante zarandas (Figura 4.4). Para controlar la proporción, se emplearon recipientes de lata (Figura 4.5). La preparación del mortero se realizó en una mezcladora mecánica, durante un tiempo aproximado de 1 min hasta que alcanzara la consistencia deseada (Figura 4.6 y Figura 4.7).



Figura 4.4 Selección de tierra mediante zarandas



Figura 4.5 Control de relación tierra-arena mediante recipientes de lata.



Figura 4.6 Preparación del mortero 1:1, empleando una mezcladora mecánica.



Figura 4.7 Consistencia deseada del mortero.

Se detalla la descripción de los trabajos realizados como parte del proceso constructivo de los 04 modelos de adobe a escala reducida.

Se realizó el emplantillado de los ladrillos de adobe, la junta de mortero horizontal y vertical que se consideró fue 1cm. Por proceso constructivo se consideró que el asentado de las unidades de adobe fuese de 05 hiladas por día (Figura 4.8)



Figura 4.8 Emplantillado y asentado de unidades de adobe.

Se utilizó reglas de madera y cordel en los extremos para un correcto alineamiento y verticalidad en el asentado de los muros (Figura 4.9).



Figura 4.9 Empleo de reglas de madera y cordel para el asentado de unidades de adobe

Se empleó caña carrizo chancada como dintel de los vanos de ventanas y puerta (Figura 4.10). Una vez instalado el dintel, se procedió con el asentado de unidades de adobe para completar la altura de los muros del primer nivel. (Figura 4.11).

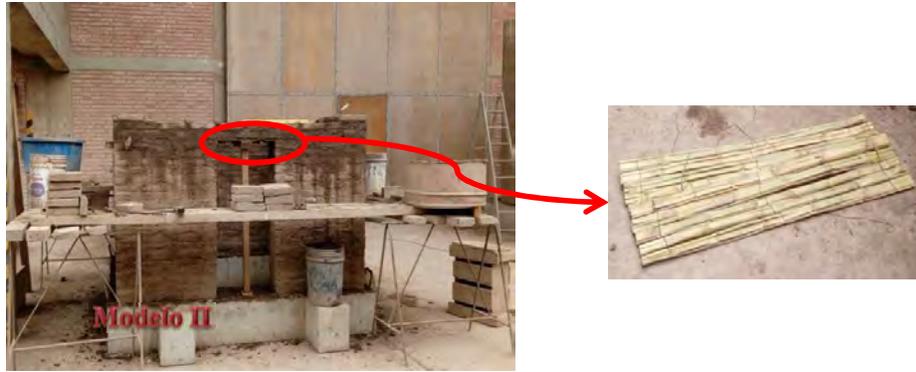


Figura 4.10 *Instalación de caña carrizo en dinteles de ventanas y puerta*



Figura 4.11 *Altura completa de muros del primer nivel*

Al haber alcanzado la altura de los muros del primer nivel, se realizó la habilitación de la viga diafragma de madera y viguetas de madera 2"x3" (Figura 4.12a). Durante su instalación, se humedecieron los muros y se aplicó una capa de mortero de tierra para alcanzar una buena adherencia entre el muro y la viga diafragma. Se rellenaron los espacios de la viga diafragma con medios adobes y mortero, para continuar con el asentado de muros del segundo nivel (Figura 4.12b).



(a)



(b)

Figura 4.12 *Viga diafragma de madera – 1º Nivel: (a) Habilitación ; (b) Instalación*

Posteriormente, se continuó con el asentado de unidades de adobe correspondiente al segundo nivel. Se empleó reglas de madera, cordel y nivel de mano para asegurar una correcta plomada de los muros (Figura 4.13).



Figura 4.13 Asentado unidades de adobe correspondiente al segundo nivel.

De la misma manera que en el primer nivel, se instaló una capa de caña carrizo chancada como dintel en los vanos de ventanas y puerta (Figura 4.14). Se continuó con el asentado de unidades de adobe para completar la altura de los muros del segundo nivel (Figura 4.15)



Figura 4.14 Instalación de caña carrizo en dintel



Figura 4.15 Altura completa de los muros del segundo nivel

Al completar la altura de los muros del segundo nivel, se procedió con la habilitación e instalación de la viga diafragma de madera y viguetas de madera 2"x3" (Figura 4.16a). Se humedecieron los muros y se aplicó una capa de mortero de tierra para alcanzar una buena adherencia entre el muro y la viga diafragma (Figura 4.16b).



(a)



(b)

Figura 4.16 Viga diafragma de madera – 2° Nivel: (a) Habilitación ; (b) Instalación

Se procedió a asentar las unidades de adobe del tímpano, para luego instalar la última viga diafragma y viguetas de madera (Figura 4.17). De esta manera se completó la construcción de los modelos de dos pisos (Figura 4.18).



Figura 4.17 Instalación de viga diafragma y viguetas de madera



Figura 4.18 Construcción del modelo finalizada

5. REFORZAMIENTO DE MODELOS

5.1 TÉCNICA DE REFORZAMIENTO

De la revisión de diversas fuentes bibliográficas e investigaciones realizadas en la PUCP, se identificó que las viviendas de adobe cuando son sometidas a sismos reflejan la presencia de daño mediante la formación de bloques rígidos, si la separación entre estos es excesiva conllevaría al colapso de la estructura.

Por ello, se definió como propuesta de refuerzo la instalación de cuerdas sintéticas (drizas) $\phi=1/8''$ en dirección vertical y horizontal, adquiriendo la forma de una malla de cuerdas que envuelve a los muros del modelo con el objetivo de reducir el desplazamiento y tambaleo de los bloques rígidos.

La propuesta de refuerzo considera la instalación de cuerdas verticales que recorren el perímetro de cada muro, siguiendo un patrón de 02 cuerdas por cada ladrillo de adobe asentado, que para el modelo a escala reducida correspondía a un espaciamiento de 11 cm (Figura 5.1a). Para dotar de continuidad a la driza vertical que envuelve al muro del primer piso con la del muro del segundo piso se unieron mediante el Nudo "E" (Figura 5.1b)

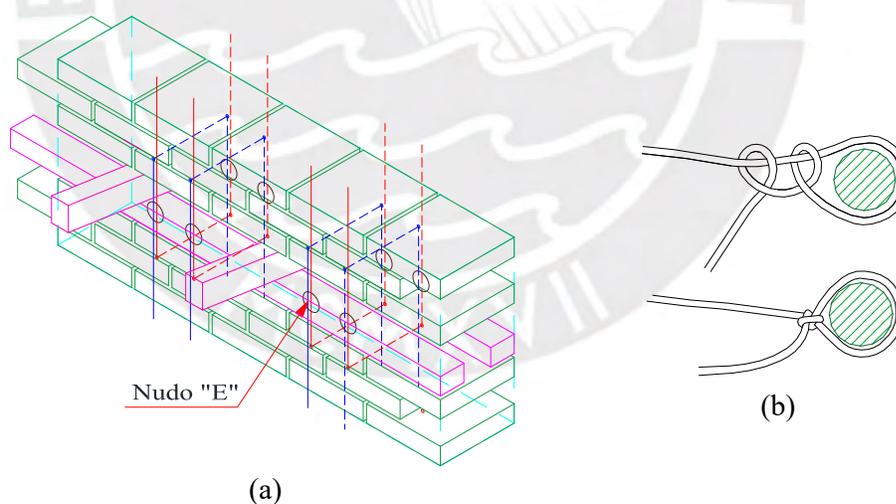


Figura 5.1 Nudo "E" para dotar de continuidad a las cuerdas verticales: (a) Ubicación, (b) Detalle

Por otra parte, para el refuerzo horizontal se consideró la instalación de doble cuerda, cuyo recorrido se dio a la mitad de altura del ladrillo de adobe, es decir un patrón de cuerda cada dos hiladas (Figura 5.2).

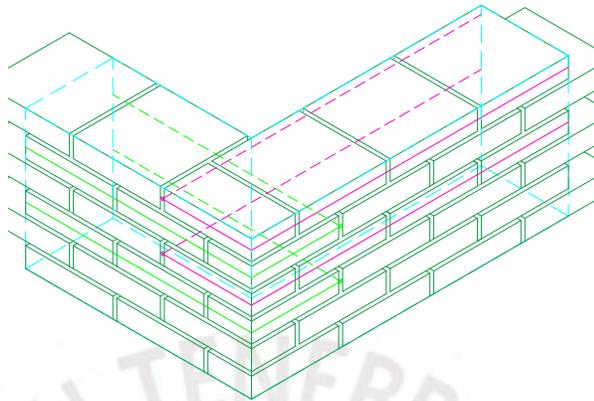
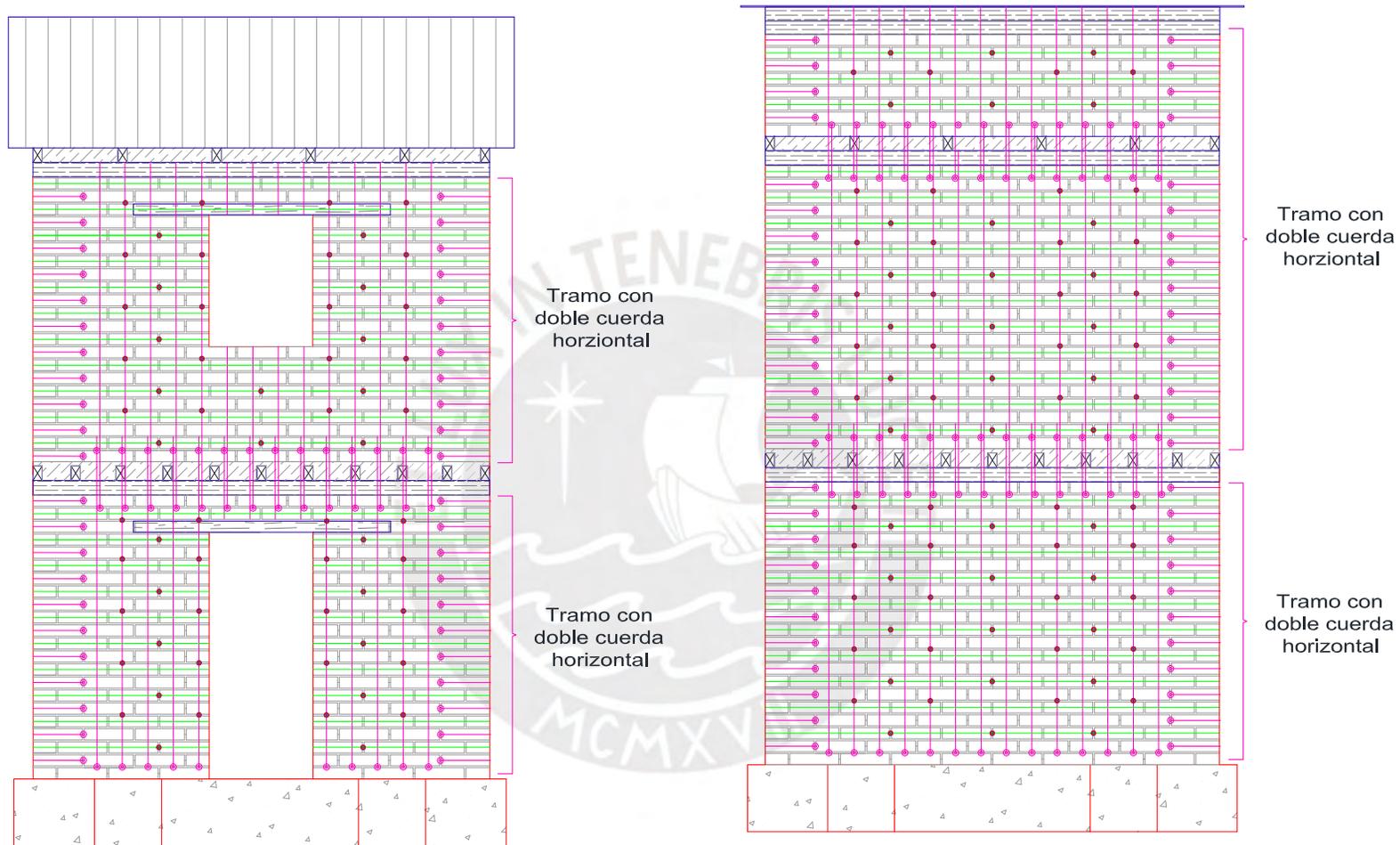


Figura 5.2 *Detalle de instalación de cuerdas horizontales*

Las Figuras 5.3 y Figura 5.4 muestran las vistas frontal-posterior y vistas laterales respectivamente, en las que se aprecia una conexión entre las cuerdas verticales del primer y segundo nivel a la altura del primer entrepiso para asegurar la continuidad de las mismas. Así mismo, se observa la ubicación de los Cross-Tie que cumplen la función de conectar la malla de cuerdas exterior con la malla interior generando que se encuentren más cercanas a los muros de adobe.



(a)

(b)

Figura 5.3 Propuesta de refuerzo con malla de cuerdas sintéticas: (a) frontal y (b) posterior.

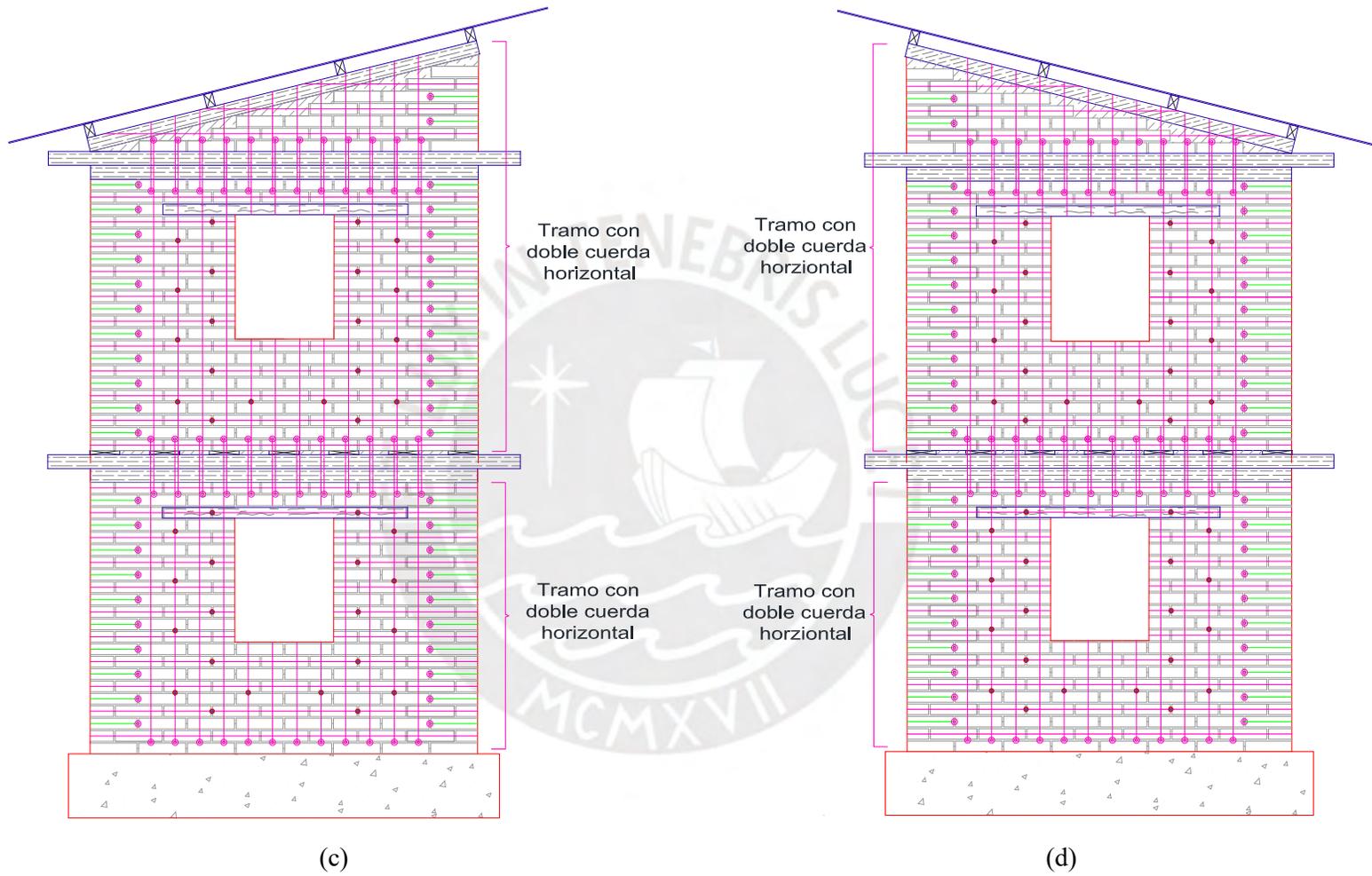


Figura 5.4 Propuesta de refuerzo con malla de cuerdas sintéticas: muro lateral (c) izquierdo y (d) derecho.

5.2 REFORZAMIENTO CON CUERDAS SINTÉTICAS

Los trabajos se iniciaron realizando perforaciones en las juntas de mortero de tierra, en los puntos señalados en los planos de reforzamiento, permitiendo que las cuerdas atraviesen los muros y los envuelvan en todo su perímetro. Para no presentar dificultades durante la instalación de las cuerdas y evitar daños en las juntas de asentado de los muros, el diámetro de las perforaciones se realizó con una broca de diámetro comercial inmediato superior ($\phi = 1/4''$) al diámetro de las cuerdas ($\phi = 1/8''$).

Las perforaciones se realizaron principalmente en las juntas verticales ubicadas en las zonas próximas a las esquinas de los muros para la instalación de las cuerdas horizontales (Figura 5.5).



Figura 5.5 Perforación de puntos para la continuidad de las cuerdas.

También se perforó las juntas horizontales ubicadas en las zonas próximas a los entrepisos para para la instalación de cuerdas verticales. A su vez, se realizaron perforaciones en las caras de los muros, cuyos puntos al unirse imaginariamente toman la forma de un rombo, esto se dio para la instalación de los Cross-Tie.

A la par de las perforaciones, se realizó la habilitación de las drizas en base a las medidas tomadas en campo adicionándole 20 cm que fueron considerados para hacer los nudos y para una mayor facilidad al momento de realizar el tensado de las cuerdas (Figura 5.6).



Figura 5.6 **Habilitación de cuerdas.**

Durante el proceso de instalación de las cuerdas verticales se aseguró la continuidad entre las cuerdas del primer piso con las del segundo, para ello se empleó el nudo E tanto en la cara interior como exterior del muro. Posteriormente, se unió el inicio de las cuerdas con la parte final de éstas empleando el “nudo ocho”. Se empleó una herramienta de mano (alicate y/o retazo de madera circular) que facilitó la aplicación directa de la fuerza humana necesaria para el tensado de las cuerdas, como referencia para evaluar el nivel de tensión óptimo que debían presentar las cuerdas, estas eran ligeramente desplazadas lateralmente y se dejaban soltar para ver la forma de su vibración libre, si presentaban una vibración similar al de una cuerda de guitarra era un buen indicativo del nivel de tensado de las cuerdas. Luego de tensadas las cuerdas eran aseguradas con dos nudos simples para evitar pérdidas de tensión (Figura 5.7).



Figura 5.7 **Instalación de cuerdas verticales en el primer y segundo nivel.**

Debido a la gran longitud que presentaron los muros a comparación de su altura, el refuerzo horizontal estuvo compuesto por dos cuerdas que fueron instaladas en los extremos, las que se unían a la mitad de la longitud del muro empleando el “nudo ocho”. Las cuerdas horizontales siguieron un patrón de instalación que consistió en pasar de manera alternada por delante y por detrás de las cuerdas verticales, formando así, una malla de cuerdas que envolvió a los muros. El tensado de las dos cuerdas horizontales se realizó en un mismo sentido. Durante este proceso, si se llegaba a escuchar un crujido de la cuerda similar al de una madera, esto era un indicativo de que la cuerda presentaba una adecuada tensión. Posteriormente, se empleaba dos “nudos simples” para evitar pérdidas de tensión (Figura 5.8).



Figura 5.8 Instalación de cuerdas horizontales en primer y segundo nivel.

Para que la malla de cuerdas formada mantenga un mayor contacto con los muros, se instalaron cuerdas que atravesaban a estos, y se unían mediante un nudo simple al encuentro más próximo de una cuerda vertical con una horizontal en los lados interior y exterior del muro, y de esta manera establecer una conexión entre las mallas interior y exterior del muro. Este detalle se denomina Cross-Tie (Figura 5.9).

Posteriormente, se procedió a retirar la parte sobrante de las cuerdas y a quemar las puntas para evitar que el núcleo de la driza se corra (Figura 5.10).

La Figura 5.11 muestra la etapa final del proceso de reforzamiento de los modelos a escala reducida con cuerdas sintéticas.



(a)



(b)

Figura 5.9 Instalación de cross-tie: (a) exterior y (b) interior



Figura 5.10. Retiro y quemado de las puntas de las cuerdas exteriores e interiores de los muros.



Figura 5.11 Etapa final del reforzamiento con cuerdas sintéticas.

6. ENSAYOS DE SIMULACIÓN SÍSMICA

Se realizaron ensayos de simulación sísmica unidireccionales de cuatro modelos a escala reducida, en dos de ellos no se utilizó ningún sistema de refuerzo con el fin de visualizar y obtener una idea más cercana a la realidad del comportamiento de las viviendas de adobe de dos pisos frente a un evento sísmico. En los otros dos restantes sí se empleó el refuerzo de malla de cuerdas sintéticas con la finalidad de evaluar la efectividad de dicho sistema de reforzamiento en las viviendas de adobe de dos pisos.

Se propuso que los modelos reforzados como los no reforzados fuesen sometidos a distintas fases de desplazamiento, en una primera etapa que las amplitudes de desplazamiento se fueran dando de manera incremental y una segunda etapa en las que los modelos fuesen sometidos a la máxima amplitud de desplazamiento que pudiese ejercer la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP.

6.1 SEÑAL DE COMANDO

La señal sísmica que se empleó para los ensayos fue Áncash, 31 de mayo de 1970 (Figura 6.1). Para establecer comparaciones que permitiesen evaluar la efectividad de las cuerdas sintéticas se estableció que los modelos tanto reforzados como no reforzados fuesen sometidos a 04 señales principales cuyas amplitudes de desplazamiento máximo fueron: 15mm; 30mm; 45mm y 60mm. Con el objetivo de que los datos obtenidos de la instrumentación fuesen valores representativos para el prototipo de viviendas de adobe de dos pisos, se recurrió a la Teoría de Modelos con la que se determinó que la duración de la señal de comando fuese de 15 segundos.

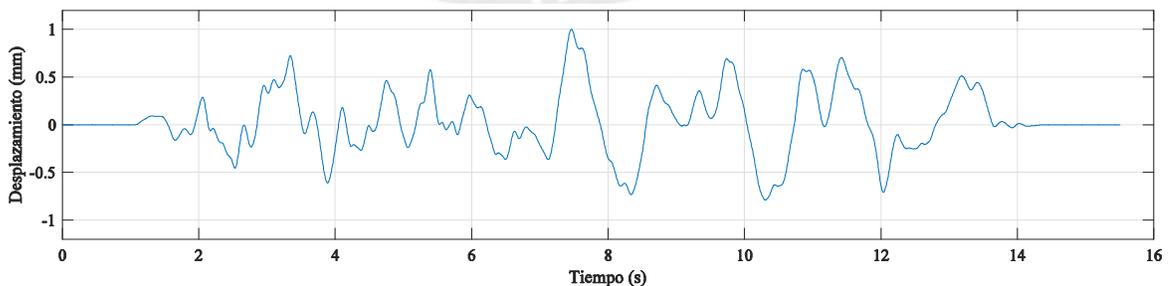


Figura 6.1 Señal de Comando escalada.

6.2 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación que se empleó estuvo conformada por 11 sensores de desplazamiento (LVDT's); 10 acelerómetros y 02 celdas de carga. La Tabla 4 detalla las características y especificaciones de dichos dispositivos.

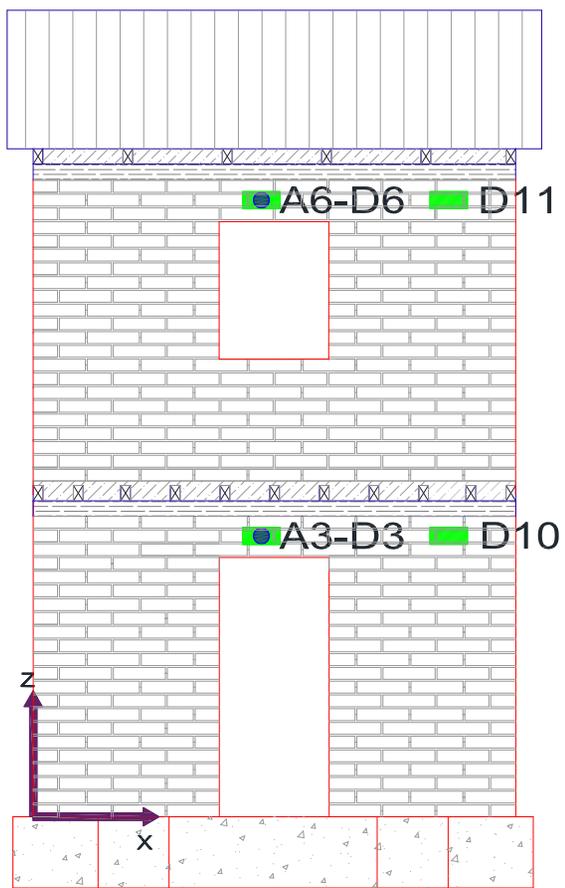
Se instalaron dos celdas de carga, una en cada nivel, las que estuvieron sujetadas a un doble refuerzo horizontal (drizas), siendo ubicadas a la altura de los dinteles de las ventanas del muro lateral derecho, con la finalidad de recopilar la historia de las fuerzas (tensión) a las que fueron sometidas las drizas horizontales durante los ensayos de simulación sísmica.

Se instaló un acelerómetro y un LVDT en los dinteles de las ventanas y de la puerta, ya que son puntos próximos a los entrepisos, con la finalidad de recopilar la historia de respuestas de aceleraciones y desplazamientos (absoluto y relativo) en dichos puntos del modelo (muro frontal y lateral derecho). A su vez, se consideró la instalación de acelerómetros a la mitad de la altura de los muros del primer y segundo piso. (Figura 6.2 y Figura 6.3)

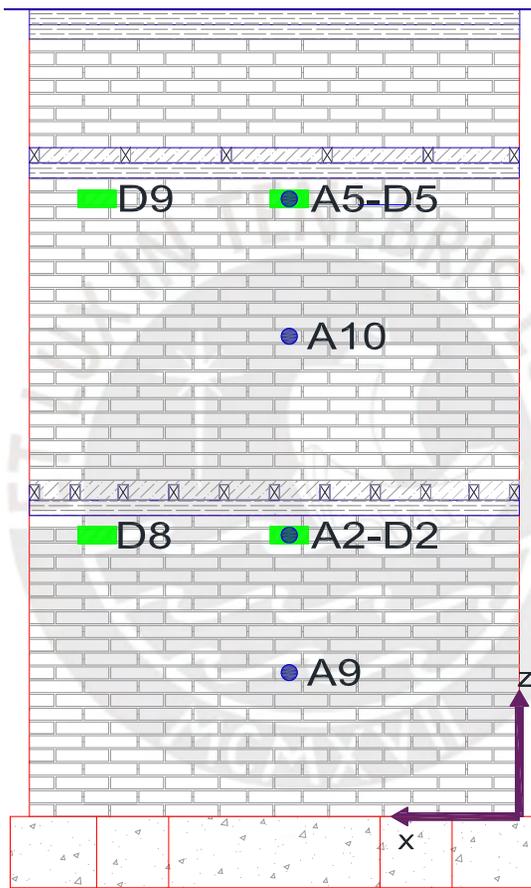
Tabla 4. Características de dispositivos

Acelerómetros (A)	
Marca	HBM
Tipo	Viscoelástico - Inductivo
Rango (g)	±5
Frecuencia de muestreo (Hz = muestras/s)	200
Resolución (V) [2000 V = 1g]	0.0005
Resolución (g) [2000 V = 1g]	2.50E-07
Sensores de desplazamiento (D)	
Marca	HBM
Tipo	LVDT & WA*
Rango (mm)	±100, ±200 o ±250
Frecuencia de muestreo (Hz = muestras/s)	200
Resolución (mm)	0.0005
Longitud de LVDT locales (mm)	375
Celdas de carga (L)	
Modelo	TS-A
Capacidad (kN)	10.19
Salida (mV/V)	1.9997
Seguridad de sobrecarga (%)	150
Rango de temperatura de operación (°C)	-30 @ +70

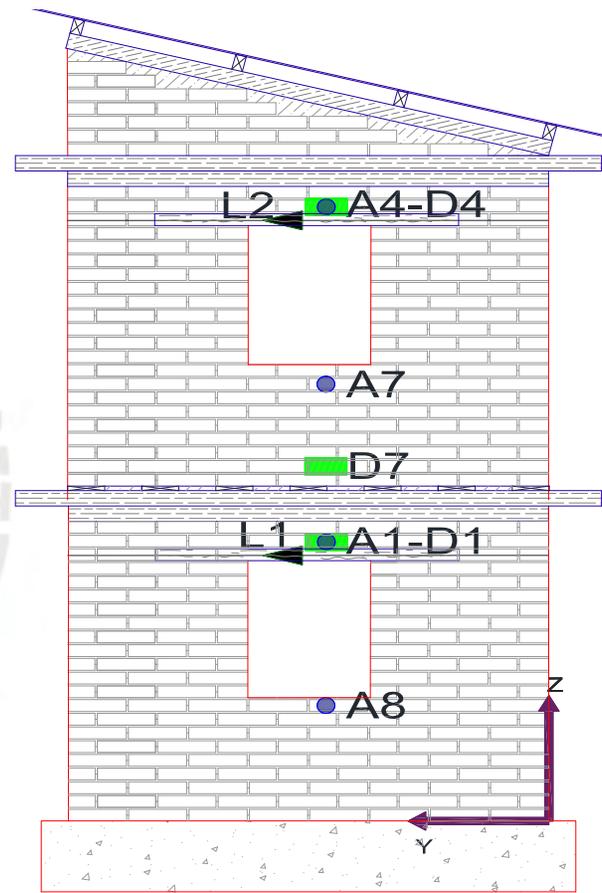
WA* es nueva generación de LVDT de la marca HBM



(a)



(b)



(c)

Figura 6.2 Detalle de instrumentación.

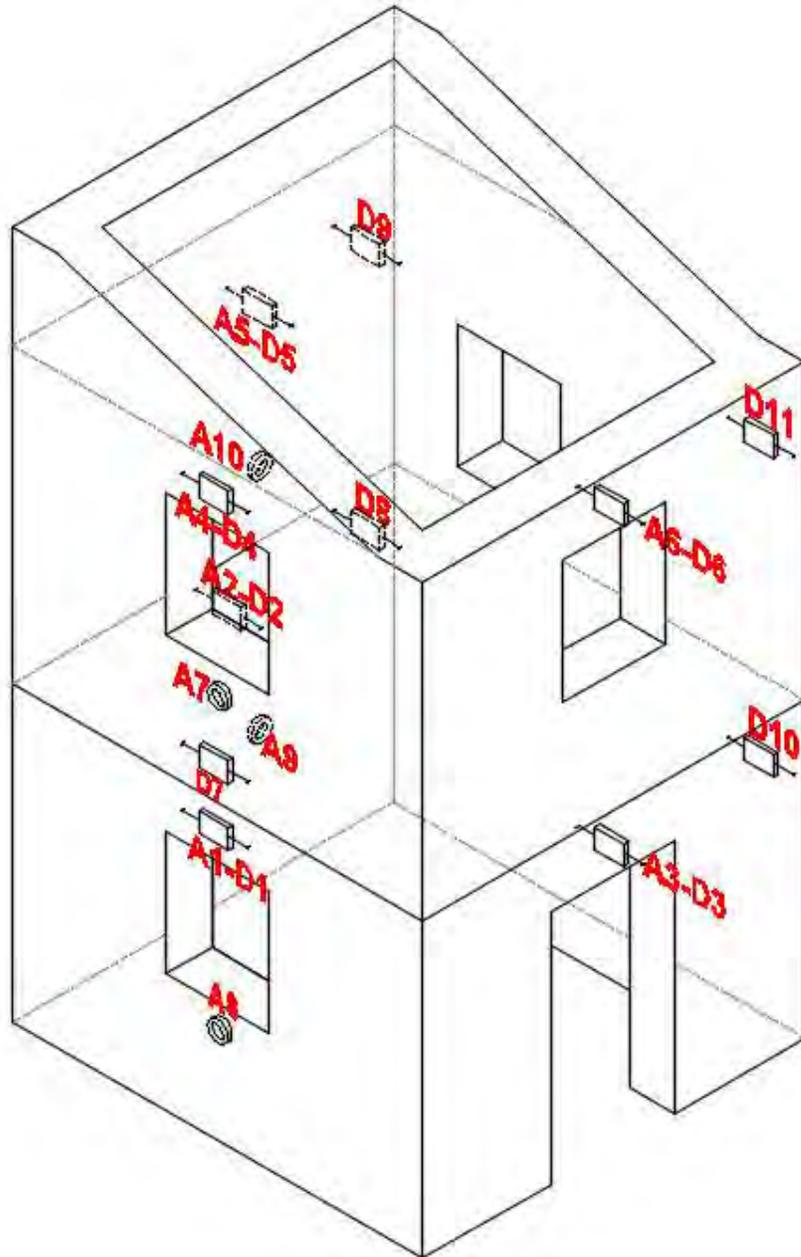


Figura 6.3 Vista isométrica de instrumentación del modelo

La Tabla 5 detalla la posición de los dispositivos LVDT's y acelerómetros que se instalaron en los modelos a escala reducida. La Tabla 6 muestra la posición de las celdas de carga para la recopilación de fuerzas de tensión en las cuerdas.

Tabla 5 Nomenclatura, posición de LVDT's y acelerómetros

Ubicación		Registro de desplazamiento		Posición (mm)			
		Nomenclatura	Instrumento	X	Y	Z	
Primer piso	Muro Frontal	A3	Acelerómetro	1 035	-	1 185	
		D3	LDVT ± 100 mm	1 035	-	1 185	
		D10	LDVT ± 100 mm	1 750	-	1 185	
	Muro Lateral Derecho	A1	Acelerómetro	-	835	1 240	
		D1	LDVT ± 100 mm	-	835	1 240	
		A8	Acelerómetro	-	835	510	
	Muro Posterior	A2	Acelerómetro	1 035	1 860	1 185	
		D2	LDVT ± 100 mm	1 035	1 860	1 185	
		D8	LDVT ± 100 mm	1 750	1 860	1 185	
		A9	Acelerómetro	1 035	1 860	685	
	Segundo Piso	Muro Frontal	A6	Acelerómetro	1 035	-	2 705
			D6	LDVT ± 250 mm	1 035	-	2 705
D11			LDVT ± 200 mm	1 750	-	2 705	
Muro Lateral Derecho		A4	Acelerómetro	-	835	2 630	
		D4	LDVT ± 200 mm	-	835	2 630	
		A7	Acelerómetro	-	835	1 910	
		D7	LDVT ± 200 mm	-	835	1 545	
Muro Posterior		A5	Acelerómetro	1 060	1 860	2 705	
		D5	LDVT ± 250 mm	1 060	1 860	2 705	
		D9	LDVT ± 200 mm	1 750	1 860	2 705	
	A10	Acelerómetro	1 035	1 860	2 090		

Tabla 6 Nomenclatura y posición de celdas de carga

Ubicación		Registro de Fuerza		Posición (mm)		
		Nomenclatura	Instrumento	X	Y	Z
1° Piso	Muro Lateral Derecho	L1	Celda de carga	-	900	1 170
2° Piso	Muro Lateral Derecho	L2	Celda de carga	-	900	2 670

6.3 DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

Los primeros modelos ensayados fueron los no reforzados, para así poder analizar el comportamiento estructural y visualizar los mecanismos de falla que se presentaron durante el ensayo de simulación sísmica.

Para los modelos no reforzados se empleó la nomenclatura URM-2S por sus siglas en inglés “Unreinforced Masonry – Two Stories”, mientras que para los modelos reforzados se empleó la nomenclatura SRM-2S por sus siglas en inglés “String Reinforced Masonry – Two Stories”.

La Tabla 7 muestra la programación de fases a las que fue sometido cada modelo para realizar la comparación de resultados obtenidos. También detalla los colores de los trazos que se realizaron para remarcar el recorrido de las fisuras que se presentaron en el modelo para cada una de las fases de ensayo.

Para identificar la secuencia de como que se fue dando la formación de fisuras y/o grietas en el modelo estas se procedieron a enumerar. Cabe mencionar que para las primeras fases cuyo desplazamiento máximo en la base fue 15 mm estas no se enumeraron debido a que las fisuras fueron superficiales y solo se presentaron en el tarrajeo.

Tabla 7 Detalle de marcación de grietas por fase

Fase	Color	URM-2S-1	URM-2S-2	SRM-2S-1	SRM-2S-1
$\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$	Azul	✓		✓	
$\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$	Verde	✓		✓	
$\Delta_{\text{máx}} = 37.5 \text{ mm}$	Amarillo	✓			
$\Delta_{\text{máx}} = 45 \text{ mm}$	Naranja		✓		
$\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm}$	Rojo		✓	✓	✓
$\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm (2)}$	Azul Oscuro			✓	✓
$\Delta_{\text{máx}} = 90 \text{ mm}$	-		✓		

Se estableció una nominación para los muros para que sean fácilmente identificados, los cuales son: Muro Frontal, Muro Lateral Derecho, Muro Lateral Izquierdo y Muro Posterior (Figura 6.4).



Figura 6.4 Modelo de vivienda de adobe de dos pisos a escala reducida 1:2.

6.3.1 MODELO URM-2S-1

El modelo URM-2S-1 fue sometido a un ensayo de simulación sísmica que se llevó a cabo en tres fases, a cada fase se le asignó la señal comando con un desplazamiento máximo en la base, el cual se fue aumentando de forma gradual. Siendo los desplazamientos máximos para las tres fases 15 mm; 30 mm y 37.5 mm, respectivamente.

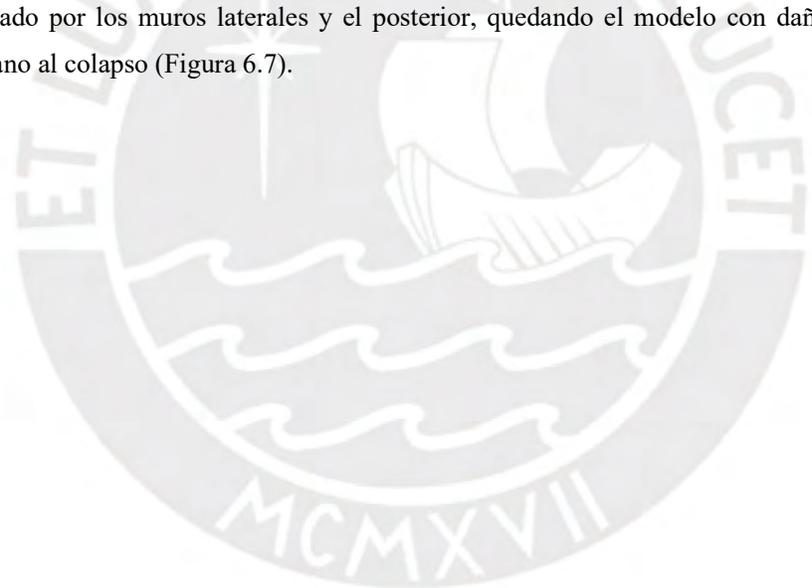
En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15$ mm) el modelo mostró un comportamiento lineal, es decir, no presentó ningún tipo de daño. Solo se observó la formación de fisuras superficiales en el tarrajeo (Figura 6.5), las que no fueron consideradas en la identificación y numeración de grietas.

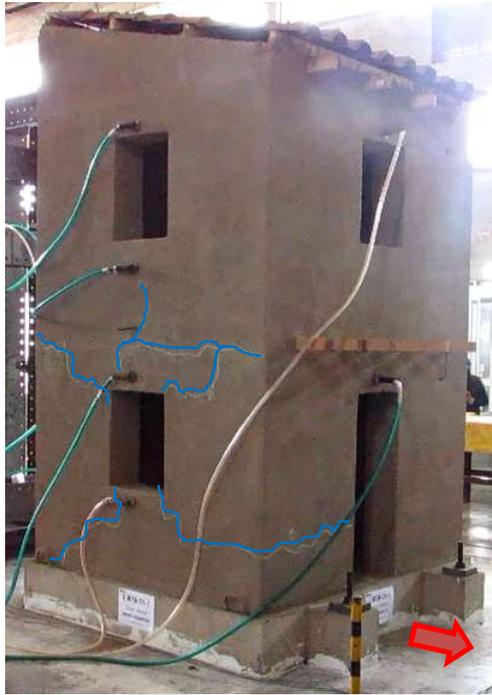
En la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30$ mm) se observó que en el segundo nivel del modelo se produjo dos grietas horizontales a la altura del vano de la ventana del muro frontal que se extendieron hacia los muros laterales (grietas 1 y 2). Asimismo, se formó una grieta horizontal en toda la longitud del muro frontal en la zona próxima al segundo entrecimso y que se extendió hasta los dinteles de las ventanas laterales, lo que conllevó a la separación del muro frontal con el diafragma de madera (grieta 3). También se produjo una grieta en forma de “X” debajo de cada ventana lateral del segundo nivel (grietas 9 y 11). Por otra parte, en el primer nivel del modelo se formó dos grietas horizontales cercanas a la base del muro frontal (grietas 4 y 5) y una grieta horizontal que recorrió toda la longitud del muro posterior a la altura del primer entrecimso generando la separación de este muro con el diafragma de madera de dicho nivel

(grieta 8). A su vez, se observó que en los muros laterales de los dos niveles del modelo se formaron grietas diagonales que nacían de los vanos de las ventanas y que se extendieron hasta los extremos de dichos muros (grietas 6, 7, 10, 12 y 13). La numeración e identificación de cada grieta se encuentra detallada en la Figura 6.6.

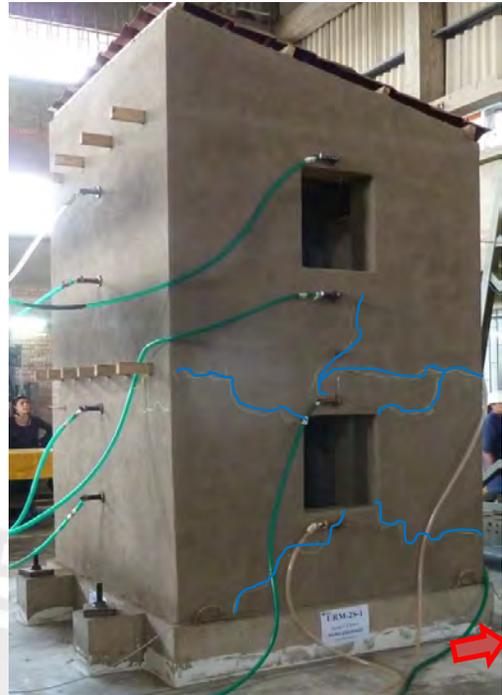
Por otro lado, inicialmente se había programado que, en la tercera fase de ensayo, el modelo sería sometido a un desplazamiento máximo en la base de 60 mm, pero al ver el nivel de daño muy próximo al colapso que presentaba el modelo después de la segunda fase, se optó por someterlo a un desplazamiento máximo en la base de 37.5mm.

En la tercera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 37.5$ mm), se observó el aumento de la longitud así como el grosor de la mayoría de las grietas formadas en la fase anterior. Asimismo, se apreció la formación de una nueva grieta vertical en el muro posterior del segundo nivel que se ramificaba hacia sus extremos laterales (grieta 14). A su vez, se pudo observar el tambaleo producido entre los bloques rígidos formados y la manera de como se fue dando la separación de estos, específicamente en el segundo nivel, entre el bloque formado por el muro frontal y el bloque formado por los muros laterales y el posterior, quedando el modelo con daño severo muy cercano al colapso (Figura 6.7).

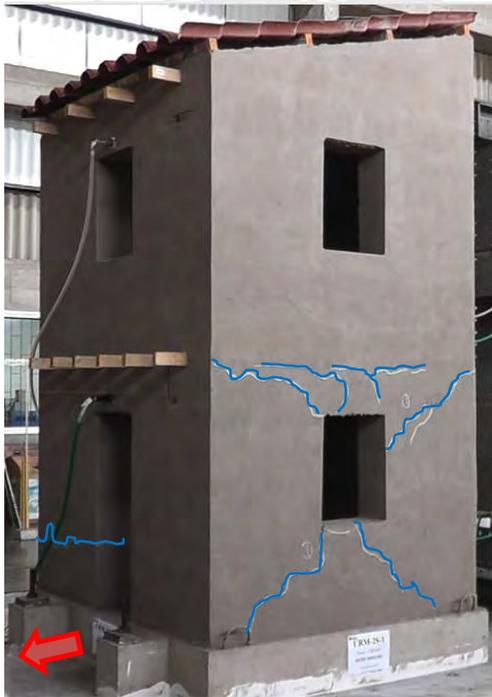




(a)



(b)

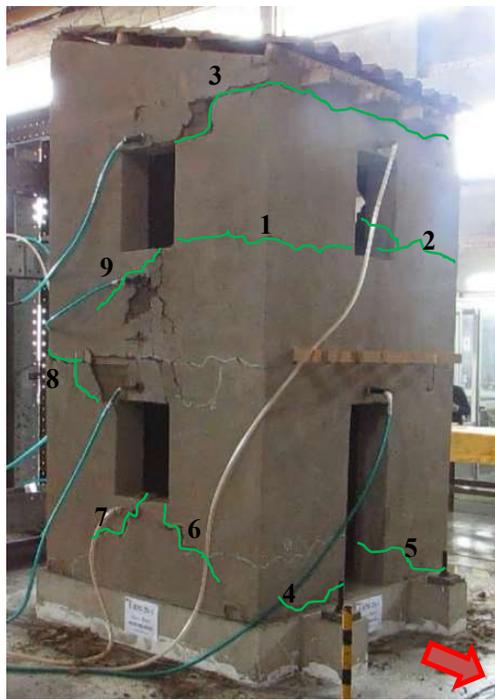


(c)

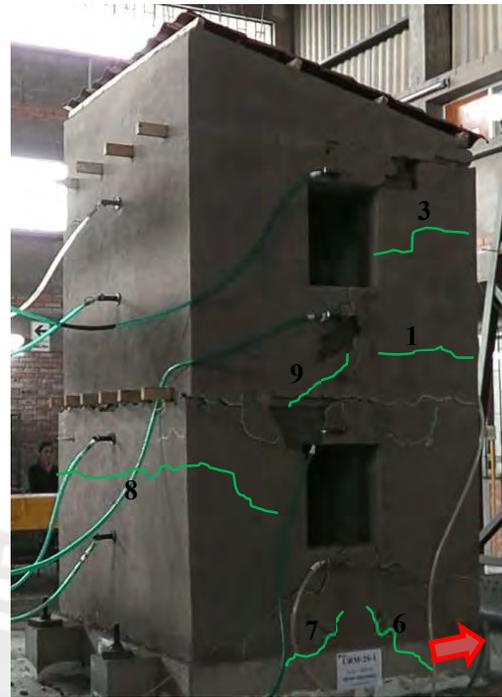


(d)

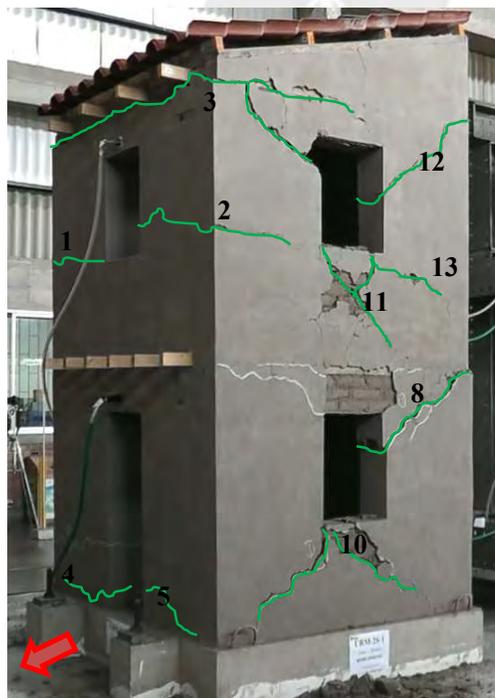
Figura 6.5 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 15 mm.



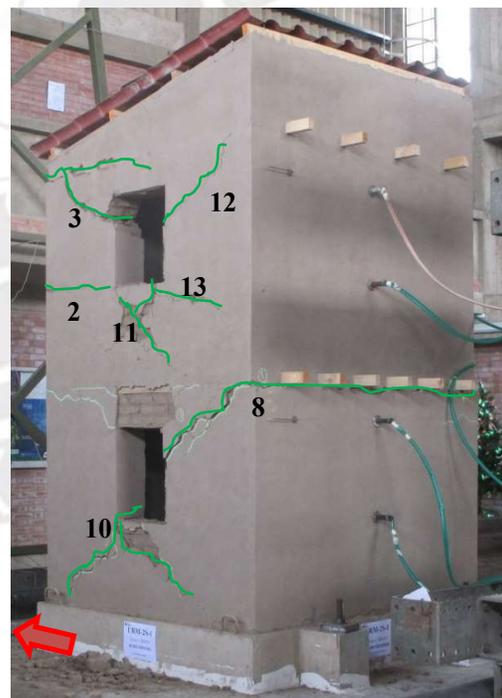
(a)



(b)

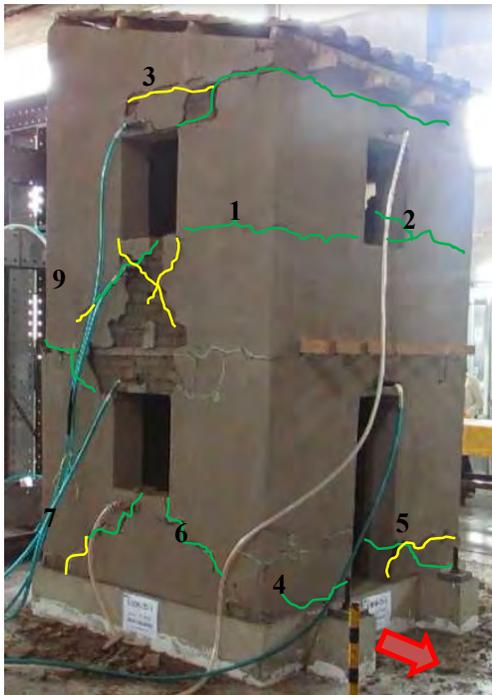


(c)

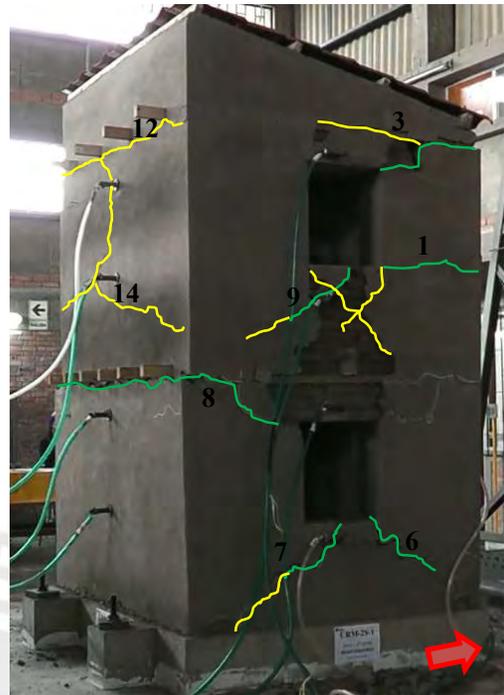


(d)

Figura 6.6 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 30 mm.



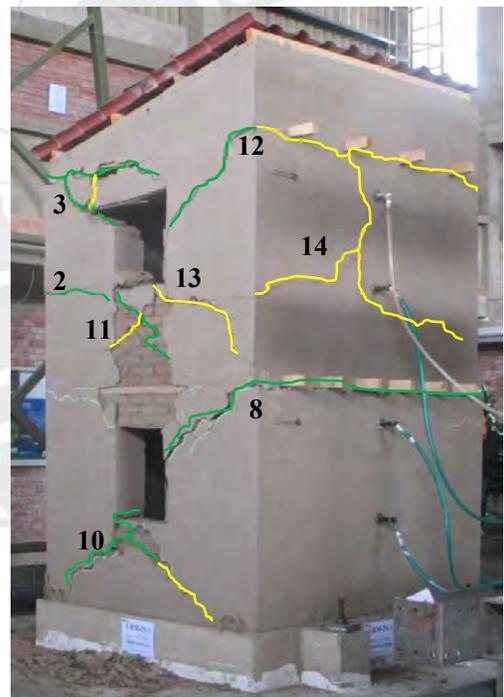
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.7 Formación de grietas, Fase 3 - Desplazamiento máximo 37.5 mm.

6.3.2 MODELO URM-2S-2

Se tenía proyectado que el modelo URM-2S-2 sería sometido al máximo desplazamiento en la base que pudiese ejercer la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP. Pero debido al nivel de daño que presentó el modelo URM-2S-1 durante el ensayo de simulación sísmica anterior, se tenía la incertidumbre si el modelo URM-2S-2 fuese capaz de soportar las fuerzas inerciales debido a dicho desplazamiento máximo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60$ mm). Finalmente se optó que el ensayo constaría de tres fases cuyos desplazamientos máximos en la base fueron de 45 mm; 60 mm y 90 mm, respectivamente.

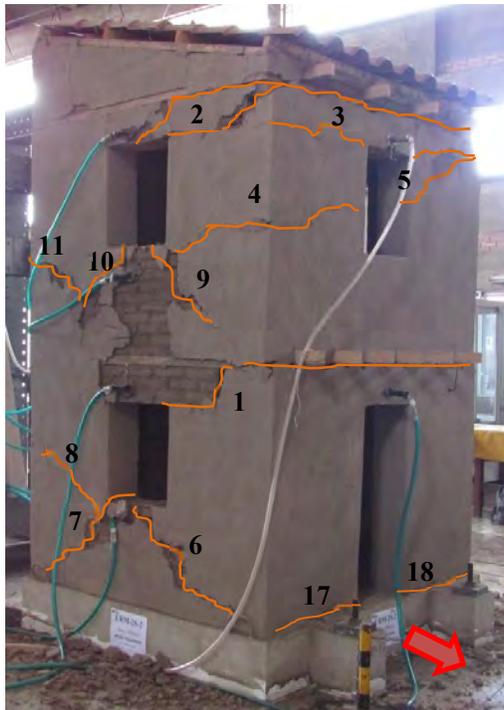
En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 45$ mm) se produjo una grieta horizontal en el muro frontal ubicada en la zona próxima de cada entrepiso, lo que provocó la separación de este muro con el diafragma de madera de cada nivel, dichas grietas se extendieron hacia los dinteles de las ventanas laterales (grietas 1 y 2). Asimismo, en el segundo piso se formaron grietas horizontales a la altura del dintel de la ventana del muro frontal (grietas 3 y 5) y una a la mitad de la altura de esta ventana, la cual se extendió hasta el muro lateral (grieta 4). También se aprecia las grietas horizontales que se formaron en la base del muro frontal del primer nivel, las que permiten el tambaleo de dicho muro (grietas 17 y 18). Por otra parte, en los dos niveles de los muros laterales se formaron grietas diagonales que nacían de las esquinas de los vanos de las ventanas y se extendían hacia sus extremos (grietas 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15 y 16). A su vez, a la mitad de la altura del muro posterior del primer nivel, se formó una grieta horizontal que recorría toda su longitud y que permitía el tambaleo de dicho muro (grieta 8), mientras que en el segundo nivel se produjo una grieta cercana a la zona de conexión del muro posterior y del muro lateral derecho (grieta 11). La numeración e identificación de cada grieta se encuentra detallada en la Figura 6.8.

En la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60$ mm) se observó el aumento de la longitud y del grosor de la mayoría de grietas formadas durante la fase anterior. También se pudo apreciar grietas en la zona próxima al encuentro entre el muro posterior y el muro lateral derecho del segundo nivel, lo cual da formación a un nuevo bloque rígido (grieta 19). A su vez, se observó el tambaleo entre sí de los bloques rígidos y la manera como se fue aumentando la separación entre estos, ocasionando que los muros frontal y posterior de los dos niveles terminen con una inclinación considerable, quedando el modelo al borde del colapso (Figura 6.9).

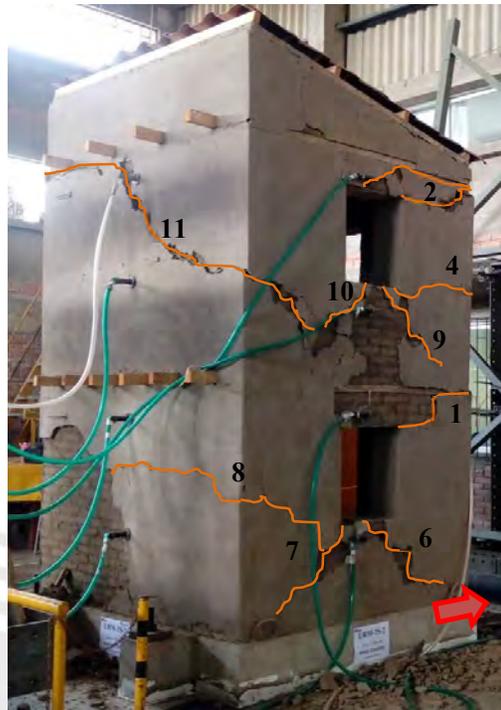
En la tercera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 90$ mm), debido al inminente colapso del modelo se creyó por conveniente retirar los dispositivos de medición de datos (LVDT's y acelerómetros). A su vez, se detectó que la mesa vibradora presentaba dificultades y limitaciones para representar

adecuadamente las aceleraciones en la base correspondientes a la señal con desplazamiento máximo de 90mm. La Figura 6.10a muestra el instante en el que en el segundo piso se produce la caída de uno de los bloques rígidos formados en el muro frontal, así como un bloque rígido formado en la esquina de encuentro del muro posterior con el muro lateral derecho. Mientras que la Figura 6.10b detalla el instante de la caída de uno de los bloques rígidos en las esquinas de encuentro del muro posterior con los dos muros laterales del primer nivel, esto conlleva a que los entrepisos sean inestables y posteriormente se produce el colapso total de la estructura tal como lo muestra la Figura 6.10c.





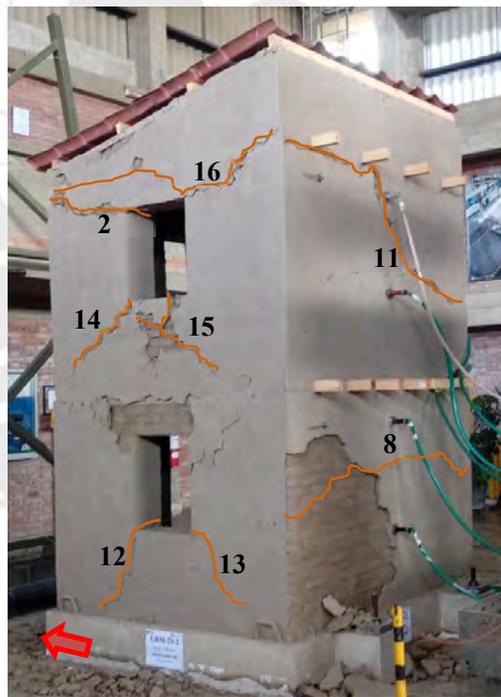
(a)



(b)

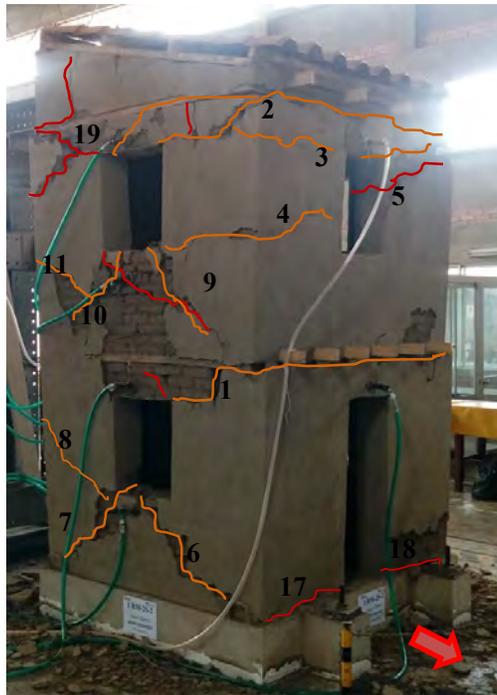


(c)

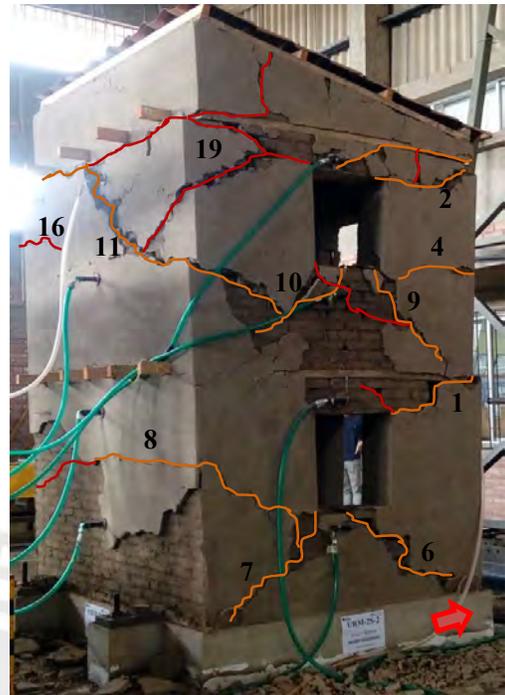


(d)

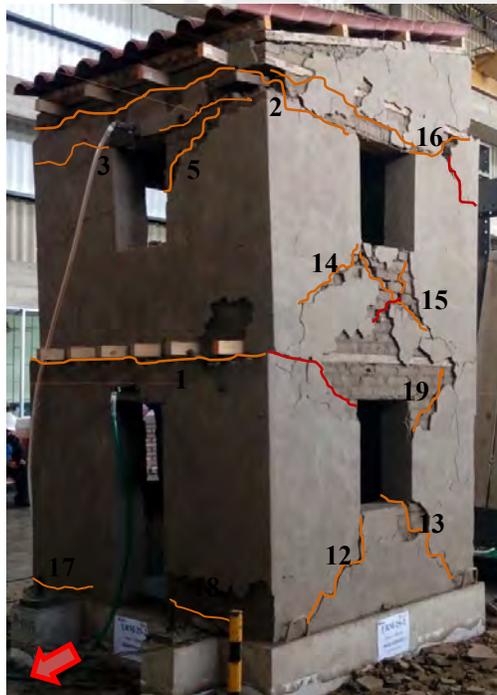
Figura 6.8 Formación de grietas, Fase I - Desplazamiento máximo 45 mm.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.9 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 60 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.10 Colapso de vivienda, Fase 3- Desplazamiento máximo 90 mm.

6.3.3 MODELO SRM-2S-1

El modelo SRM-2S-1 fue sometido a un ensayo de simulación sísmica que se llevó a cabo en cuatro fases, a cada fase se le asignó una señal comando con un desplazamiento máximo en la base, el cual se fue aumentando de forma gradual. Los desplazamientos máximos para las cuatro fases son 15 mm; 30 mm; 60 mm y 60 mm, respectivamente.

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$) el modelo mostró un comportamiento lineal, es decir, no presentó ningún tipo de daño. Se observó la formación de fisuras superficiales en el tarrajeo (Figura 6.11), las que no fueron consideradas en la identificación y numeración de grietas.

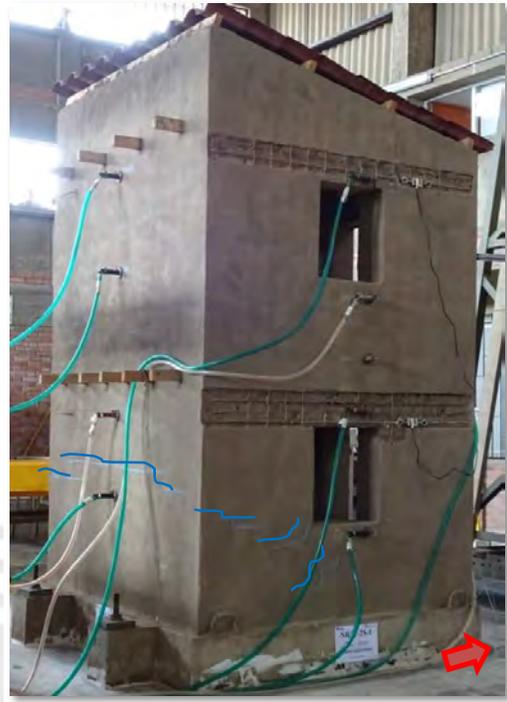
En la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$), se observó que en el muro frontal se formaron grietas horizontales a la mitad de la altura del vano de la puerta del primer nivel (grietas 1 y 2), así también en la parte baja del vano de la ventana del segundo piso (grietas 3 y 4). A su vez, se formó una grieta horizontal a los dos tercios de la altura del muro posterior y que se fue extendiendo hacia los muros laterales presentando un recorrido escalonado en la zona de conexión de estos muros (grieta 7). Por otro lado, en los muros laterales se presentaron grietas diagonales que nacieron de las esquinas de la parte baja de los vanos de las ventanas del primer nivel y que se extendieron en dirección hacia sus extremos (grietas 5, 6 y 8). La numeración e identificación de cada grieta se encuentra detallada en la Figura 6.12.

En la tercera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$) se pudo observar como a partir de las grietas de la fase anterior se dio origen a la formación de bloques rígidos, y que durante esta fase, se produjo el tambaleo de estos, lo cual contribuyó a la disipación de energía por medio de la fricción producida por el contacto entre sí de los bloques rígidos. Por otra parte, se apreció la formación de una grieta horizontal a la mitad de la altura del muro posterior del segundo nivel (grieta 15). Asimismo, se produjeron grietas diagonales que nacieron de una de las esquinas de cada vano de ventana de los muros laterales del segundo piso y que se extendieron hacia el muro frontal a la altura del segundo entrepiso (grietas 11 y 12). La numeración e identificación de cada grieta se encuentra detallada en la Figura 6.13.

En la cuarta fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), se siguió observando el tambaleo entre sí de los bloques rígidos. Asimismo, se pudo apreciar que gran parte de las grietas formadas en las fases anteriores se extendieron. Finalmente, se formó una grieta horizontal que nació del dintel de la ventana del muro lateral derecho del primer piso y que se extendió hasta el muro frontal (grieta 21), lo que generó un deslizamiento relativo entre este bloque rígido y los muros del segundo nivel (Figura 6.14).



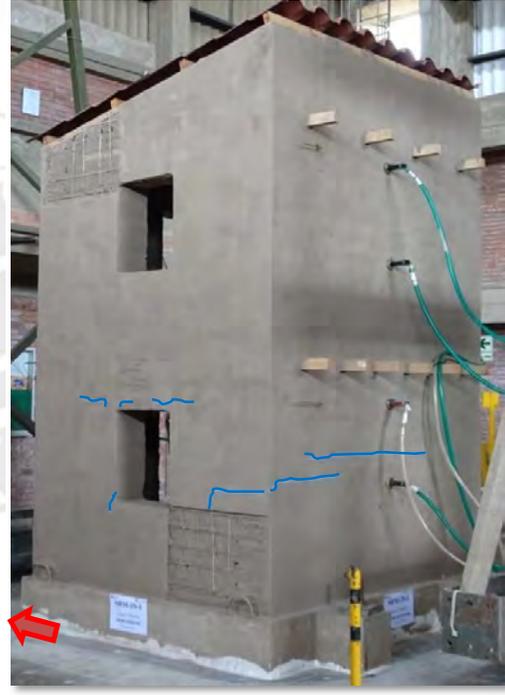
(a)



(b)

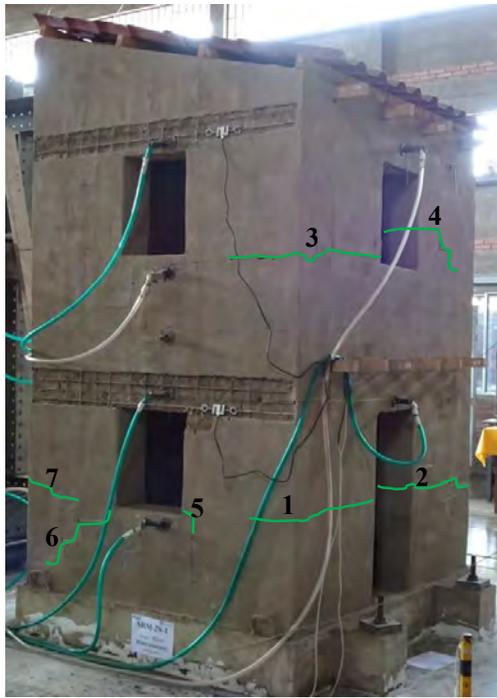


(c)

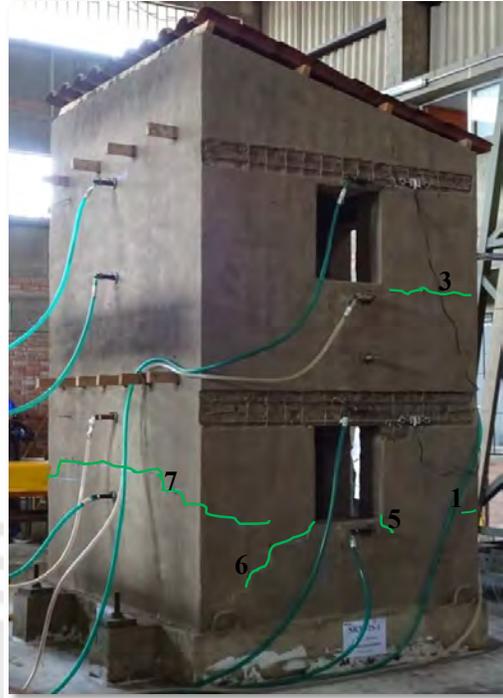


(d)

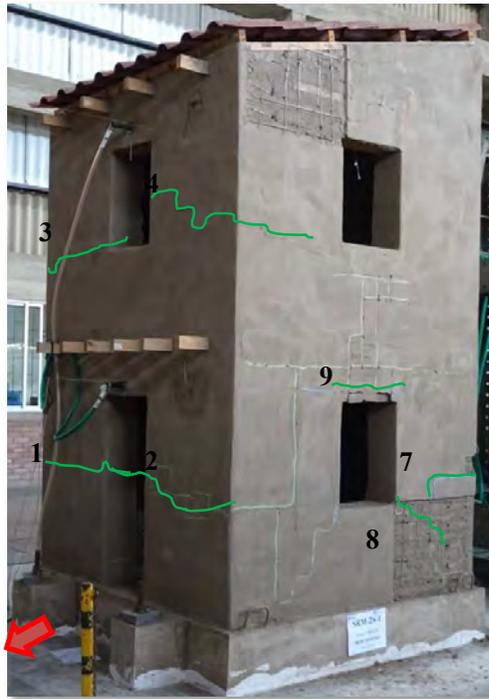
Figura 6.11 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 15 mm.



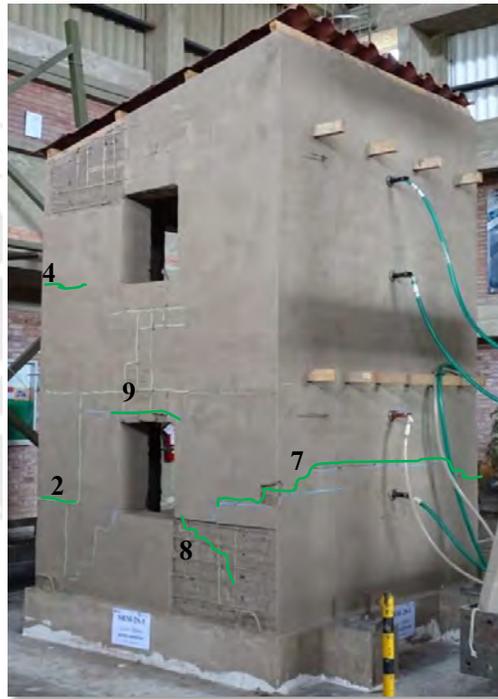
(a)



(b)

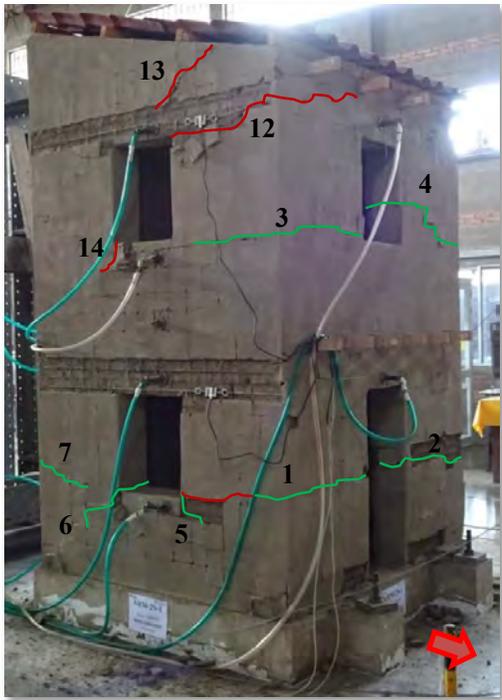


(c)

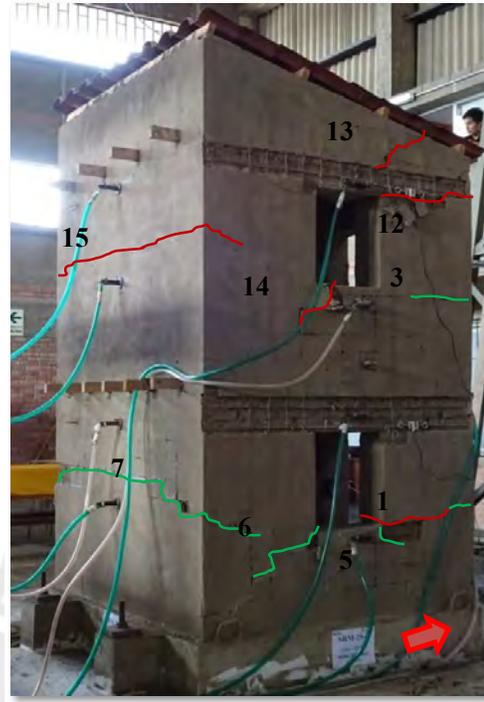


(d)

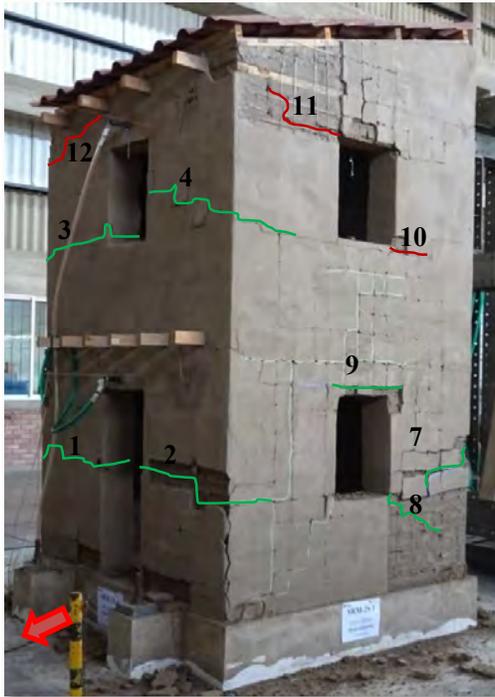
Figura 6.12 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 30 mm.



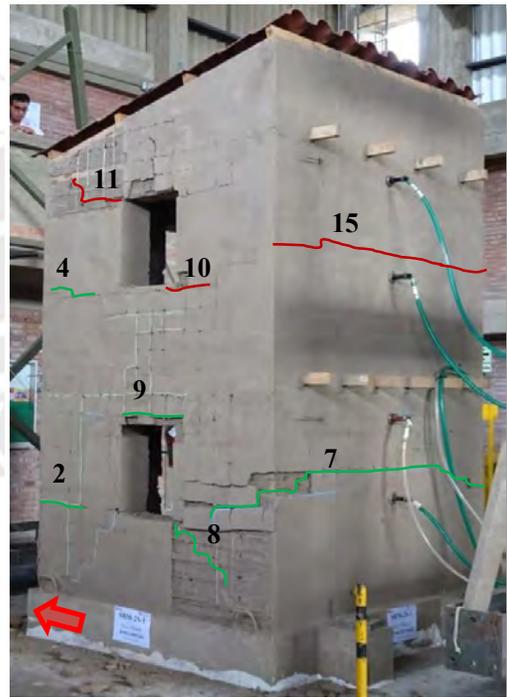
(a)



(b)

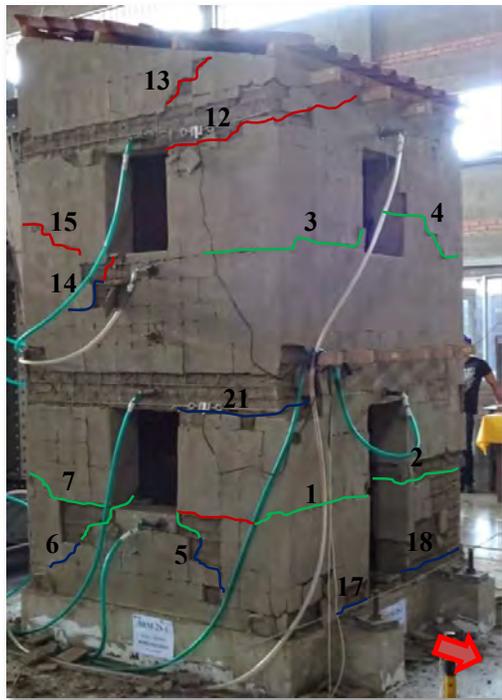


(c)

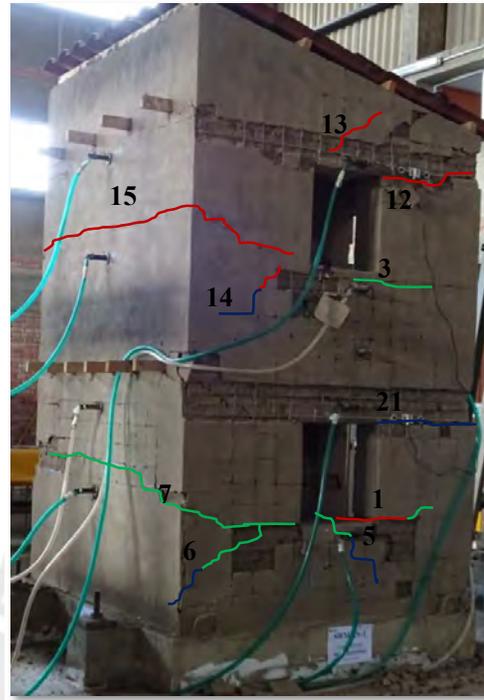


(d)

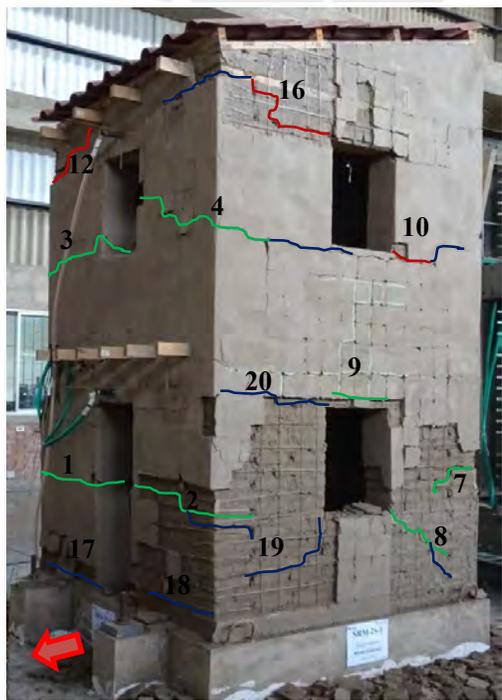
Figura 6.13 Formación de grietas, Fase 3 - Desplazamiento máximo 60 mm.



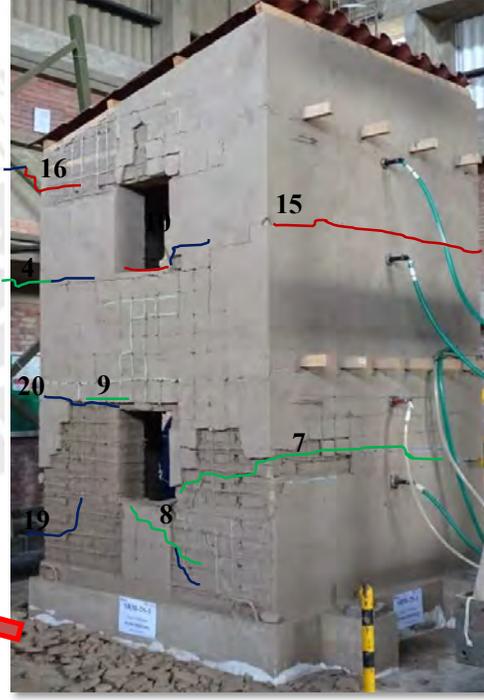
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.14 Formación de grietas, Fase 4 - Desplazamiento máximo 60 mm.

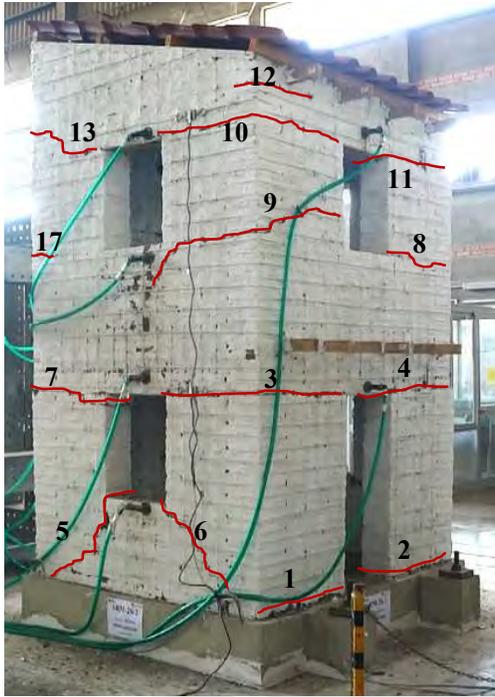
6.3.4 MODELO SRM-2S-2

El modelo SRM-2S-2 fue sometido al máximo desplazamiento en la base que puede ejercer la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP. El ensayo constó de dos fases con desplazamiento máximo en la base de 60mm.

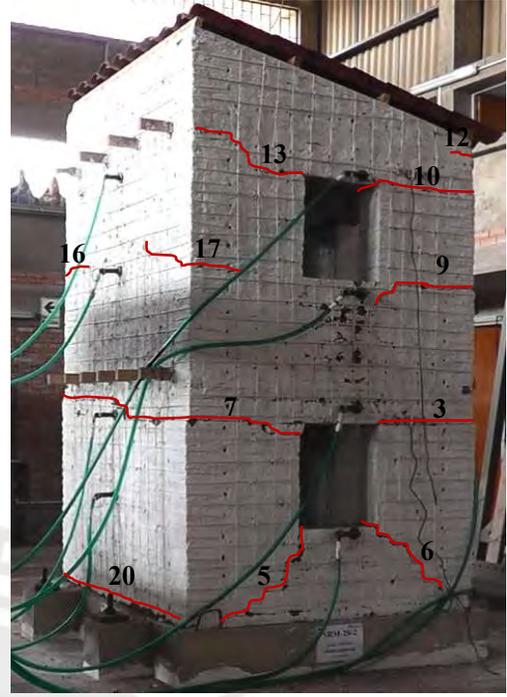
En la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), las primeras grietas que se formaron recorrieron en dirección horizontal las zonas cercanas a la base del modelo en los muros frontal y posterior (grietas 1, 2 y 20). A su vez, se generó un plano horizontal de falla en todos los muros del modelo, ubicado a la altura del dintel de los vanos de ventanas y puerta (grietas 3, 4 y 7). Asimismo, se produjeron grietas horizontales que nacieron de las esquinas del vano de ventana del muro frontal del segundo nivel y que se extendieron hacia los vanos de ventanas de los muros laterales (grietas 8, 9, 10 y 11). De igual manera, a la mitad de la altura del muro posterior del segundo nivel, se produjeron grietas horizontales que se extendieron hacia los muros laterales (grietas 16 y 17). También se formó pequeñas grietas horizontales en el muro frontal cerca a la zona del tímpano (grietas 12 y 19). Por otra parte, en los dos niveles de los muros laterales se observó la formación de grietas diagonales que nacieron de las esquinas de los vanos de ventanas que se extendieron hacia sus extremos (grietas 5, 6, 13, 14, 15 y 18). Es importante mencionar, que parte de las grietas del primer nivel generaron la formación de bloques rígidos lo que ayudó a la disipación de energía debido a la fricción durante el tambaleo de estos. Hecho que se corroboró ya que el segundo nivel del modelo presentó un menor nivel de daño en comparación al primer piso. Ver Figura 6.15.

En la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), se pudo seguir apreciando el tambaleo entre bloques rígidos. A su vez, se produjo un notorio deslizamiento en el plano de falla anteriormente mencionado, entre el muro frontal del primer nivel con el resto de muros de la estructura. Se observó la formación de nuevas grietas horizontales en la base de los muros laterales (grieta 23 y extensión de la grieta 5), en las zonas próximas al primer y segundo entrepiso (grietas 24 y 25) y grietas diagonales en la zona ubicada debajo de los vanos de ventanas laterales (grietas 21 y 22). Ver Figura 6.16.

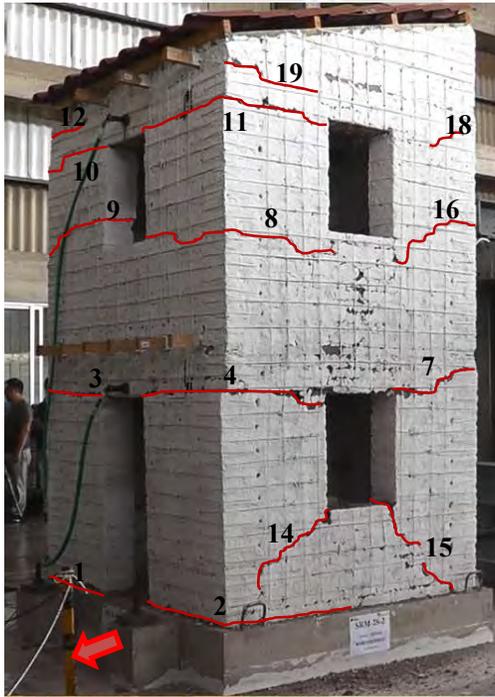
Los ensayos de simulación sísmica permitieron visualizar e identificar el gran aporte que brinda el refuerzo de malla de cuerdas sintéticas ya que, si bien no evita la formación de grietas, si contribuye a reducir el tambaleo y separación entre bloques rígidos, por ende, evita el colapso del modelo. Finalmente, se pudo determinar que el modelo reforzado tiene la capacidad de soportar dos movimientos sísmicos con desplazamiento máximo en la base de 60mm.



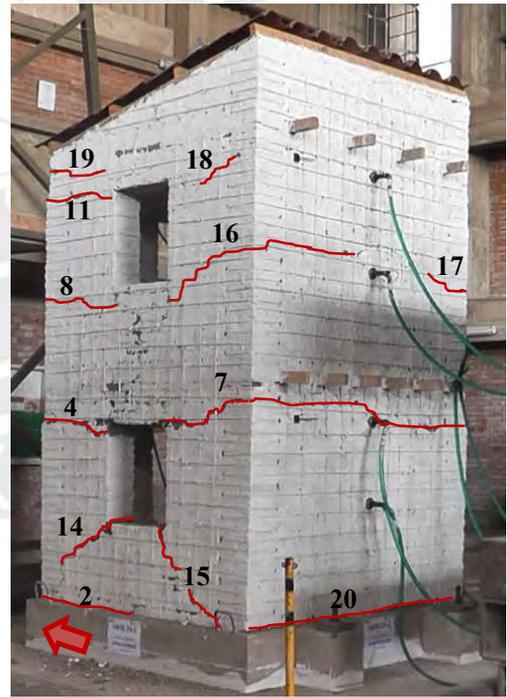
(a)



(b)

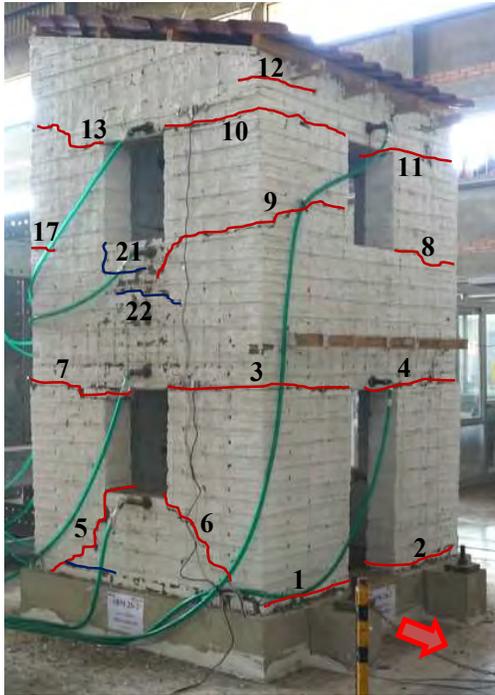


(c)

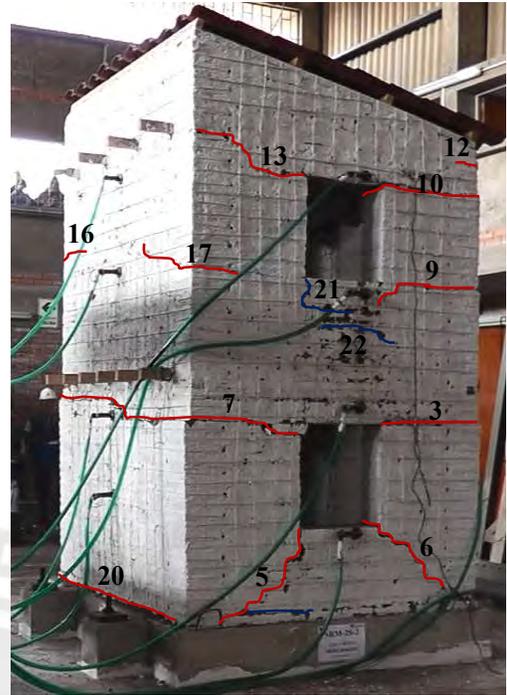


(d)

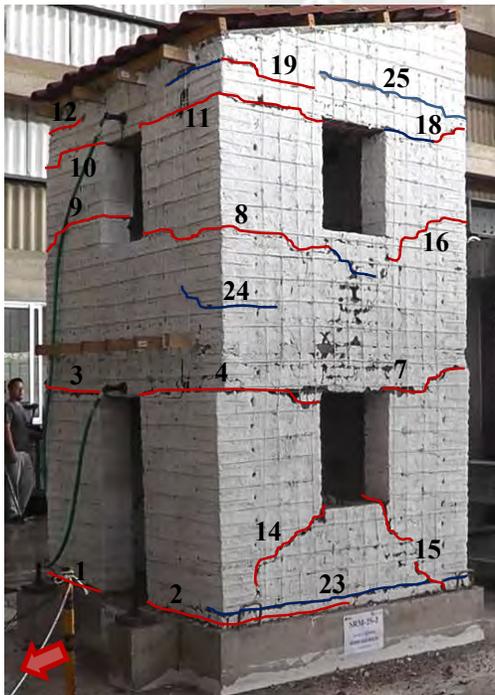
Figura 6.15 Formación de grietas, Fase 1 - Desplazamiento máximo 60 mm.



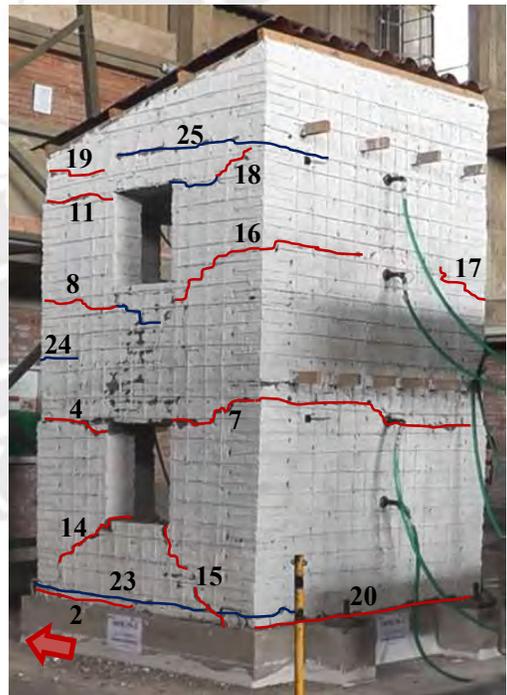
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.16 Formación de grietas, Fase 2 - Desplazamiento máximo 60 mm.

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

7.1 PROPIEDADES DINÁMICAS

Para determinar las propiedades dinámicas de los modelos a escala reducida, se les sometió a ensayos de vibración libre, en el que se les aplicó cuatro pulsos rectangulares con amplitud de 1.5 mm y que tuvo una duración de 20 segundos (Figura 7.1).

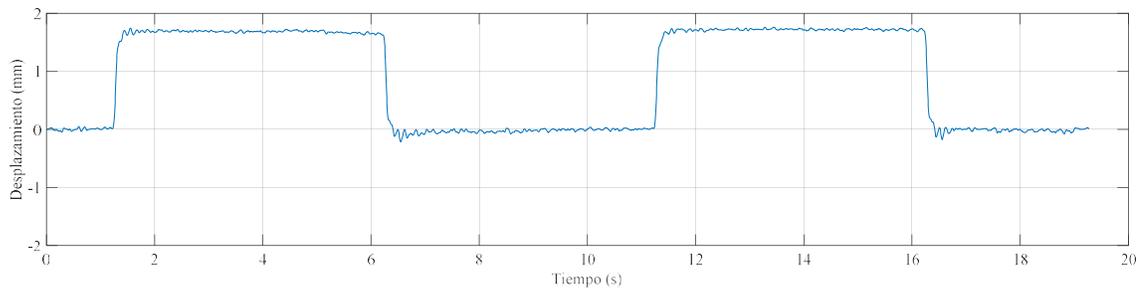


Figura 7.1 Pulso rectangular, amplitud 1.5 mm.

Los ensayos de vibración libre se realizaron en dos instancias: La primera, cuando el modelo se encontraba en su estado natural, es decir, sin haber sido sometido a fuerzas inerciales. La segunda, después de cada fase de ensayo de simulación sísmica a la que fue sometido. De esta manera se logró identificar la variación de las propiedades dinámicas del modelo ante la existencia de daño.

Para determinar los valores del período natural y la razón de amortiguamiento se trabajó con la respuesta total de aceleración (Figura 7.2) y se empleó el método de decremento logarítmico, el cual se define como el logaritmo natural de la razón de dos amplitudes sucesivas en un sistema sub-amortiguado en vibración libre (Figura 7.3).

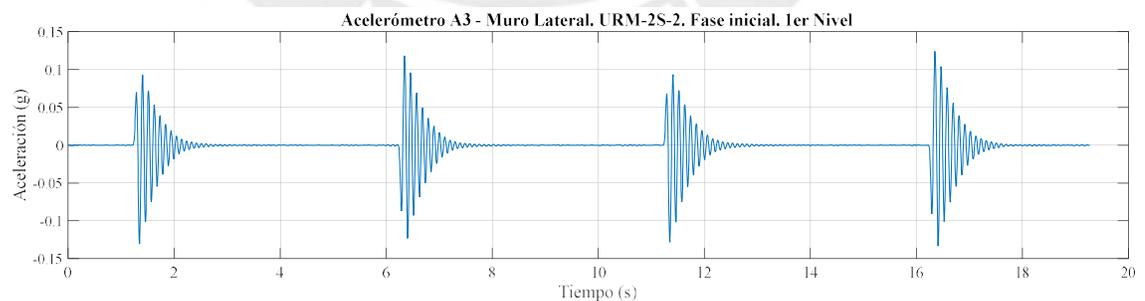


Figura 7.2 Respuesta de aceleración total en vibración libre.

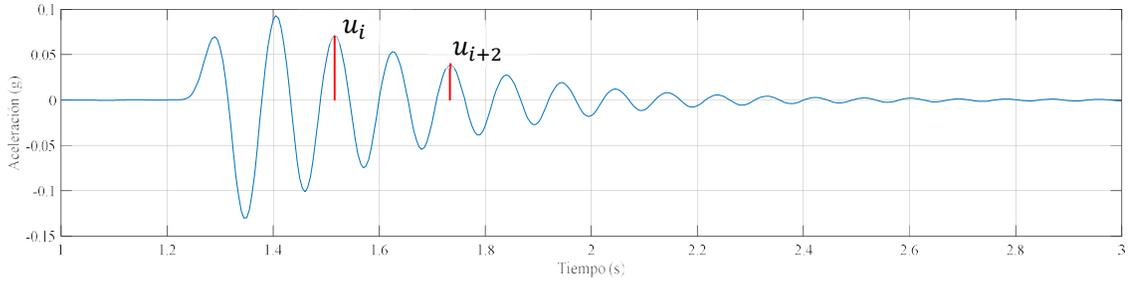


Figura 7.3 Método del Decremento Logarítmico.

La ecuación para calcular el coeficiente de amortiguamiento es:

$$\delta = \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+1}}\right) = 2n\pi\xi \quad (27)$$

Donde:

δ = Decremento logarítmico.

n = Número de ciclos entre picos.

u_i = Amplitud de desplazamiento o aceleración en un pico.

ξ = Coeficiente de amortiguamiento.

La frecuencia amortiguada, la frecuencia natural de vibración y el periodo natural de vibración se relacionan entre sí mediante las siguientes ecuaciones:

$$f_d = f\sqrt{1 - \xi^2} \quad f_n = \frac{1}{T_n} \quad (28)$$

Donde:

f_d = Frecuencia amortiguada.

f_n = Frecuencia natural de vibración.

ξ = Razón de amortiguada.

T_n = Periodo natural del sistema.

7.1.1 MODELO URM-2S-1

La Tabla 8, muestra que el modelo en estado inicial presentó un período natural de 0.11s y una razón de amortiguamiento de 6.3%. Después de la primera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$), el período natural y la razón de amortiguamiento del modelo presentaron valores similares al del estado inicial, esto fue debido a que durante la primera fase sólo se produjeron fisuras superficiales en el tarrajeo.

Posterior a la segunda fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$), el período natural del modelo aumentó a 0.29s y la razón de amortiguamiento aumentó a 11.3% y 7.5% para el primer y segundo nivel, respectivamente.

Después de la tercera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 37.5\text{mm}$) el modelo presentó un período natural de 0.36s y una razón de amortiguamiento de 15.8% y 8.6% para el primer y segundo nivel, respectivamente.

Es posible determinar los períodos naturales de vibración para el modelo a escala natural, a partir de las propiedades dinámicas del modelo a escala reducida, multiplicando los períodos de este último por el factor de escala del tiempo, de valor 2 (ver Tabla 3), obteniéndose así, para el estado inicial y las tres fases de ensayos, períodos naturales de vibración de 0.22s; 0.22s; 0.58s y 0.72s, respectivamente. En referencia a las razones de amortiguamiento para el modelo a escala natural, son los mismos del modelo a escala reducida ya que estos son valores adimensionales.

Tabla 8 Propiedades Dinámicas del modelo URM-2S-1

Acelerómetro	Fase Inicial		Post - Fase 1 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15 \text{ mm}$)		Post- Fase 2 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30 \text{ mm}$)		Fase Final ($\Delta_{m\acute{a}x} = 37.5 \text{ mm}$)		
	ξ (%)	T_n (s)	ξ (%)	T_n (s)	ξ (%)	T_n (s)	ξ (%)	T_n (s)	
1er Nivel	A1	8.82	0.14	8.82	0.14	8.08	0.09	5.96	0.11
	A2	5.69	0.11	5.84	0.11	9.46	0.33	18.45	0.37
	A3	5.33	0.12	5.33	0.12	7.80	0.09	7.63	0.11
	A8	7.19	0.11	4.02	0.11	8.07	0.07	11.54	0.08
	A9	6.02	0.11	5.34	0.11	13.07	0.33	13.22	0.36
2do Nivel	A4	7.21	0.11	6.11	0.11	7.01	0.28	7.81	0.35
	A5	5.29	0.11	6.26	0.11	7.18	0.28	9.98	0.37
	A6	5.40	0.11	5.17	0.11	7.18	0.29	9.10	0.38
	A7	6.12	0.11	5.74	0.11	9.17	0.27	8.06	0.36
	A10	5.59	0.11	4.93	0.11	6.80	0.28	8.13	0.35

Asimismo, se interpreta que, a mayor presencia de daño, aumenta el período natural de vibración del modelo. Para este caso, dicho aumento se da de manera proporcional al desplazamiento máximo en la base al que fue sometido, esto rige a partir de la primera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$).

La Figura 7.4 y Figura 7.5, permiten visualizar los valores de las propiedades dinámicas, que se obtuvieron a partir de los datos recopilados por cada acelerómetro instalado en el modelo a escala reducida. Se logró identificar que el período natural de vibración presentó valores casi uniformes y similares en todos los muros del modelo, a excepción de los dispositivos A1; A3 y A8 cuyos valores fueron incongruentes respecto a los otros, esto posiblemente se debió a la formación de severas grietas cercanas a donde se habían instalado dichos dispositivos. Respecto a la razón de amortiguamiento, este presentó una mayor dispersión, donde se marcó una diferencia entre los valores del segundo nivel y los del primero.

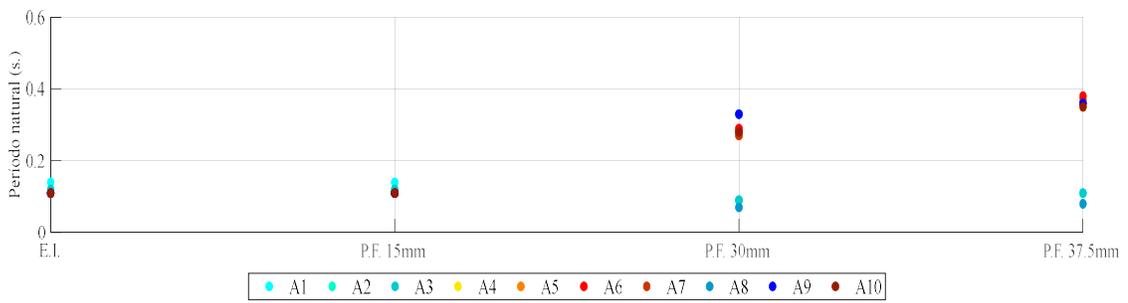


Figura 7.4 Período Natural (s) – URM-2S-1.

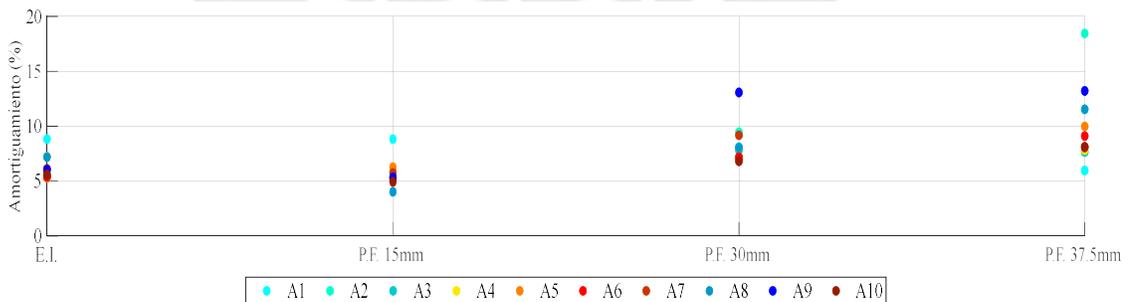


Figura 7.5 Razón de Amortiguamiento ξ (%) - URM-2S-1

7.1.2 MODELO URM-2S-2

La Tabla 9, muestra que el modelo en su estado inicial presentó un período natural de 0.10s y una razón de amortiguamiento de 5.6%. Después de la primera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 45$ mm), el período natural aumentó a 0.36s y la razón de amortiguamiento fue de 8.6%.

Posterior a la segunda fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60$ mm), el período natural del modelo aumentó a 0.48s y la razón de amortiguamiento aumentó a 9.3%.

Por otra parte, es posible determinar los períodos naturales de vibración para el modelo a escala natural, a partir de las propiedades dinámicas del modelo a escala reducida, tal como se detalló para el modelo URM-2S-1, obteniéndose así, para el estado inicial y las dos fases de ensayos, períodos naturales de vibración de 0.20s; 0.72s y 0.96s, respectivamente. En referencia a las razones de amortiguamiento para el modelo a escala natural, son los mismos del modelo a escala reducida ya que estos son valores adimensionales.

Tabla 9 Propiedades Dinámicas del modelo URM-2S-2

Acelerómetro	Fase Inicial		Post - Fase 1 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 45$ mm)		Fase Final ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60$ mm)		
	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	
1er Nivel	A1	5.70	0.10	3.54	0.12	9.42	0.17
	A2	5.40	0.10	9.41	0.37	11.02	0.52
	A3	5.47	0.11	8.31	0.35	10.36	0.46
	A8	6.81	0.11	8.46	0.06	12.45	0.07
	A9	5.50	0.10	8.01	0.40	9.89	0.51
2do Nivel	A4	5.36	0.10	8.69	0.35	8.33	0.46
	A5	5.21	0.10	8.35	0.34	8.51	0.46
	A6	5.27	0.10	10.67	0.39	10.14	0.47
	A7	5.61	0.10	7.88	0.36	8.20	0.49
	A10	5.27	0.10	7.82	0.35	8.05	0.47

La Figura 7.6 y Figura 7.7, permite identificar que el período natural de vibración presentó valores uniformes y similares en todos los muros del modelo, a excepción de los acelerómetros A1 y A8 cuyos valores fueron incongruentes respecto a los otros dispositivos, esto posiblemente se debió a la formación de severas grietas cercanas a la posición de dichos dispositivos ubicados en el muro lateral derecho del primer piso. De la misma manera, la razón de amortiguamiento presenta valores casi uniformes en todos los muros a comparación de lo observado en el modelo URMS-2S-1 anteriormente ensayado.

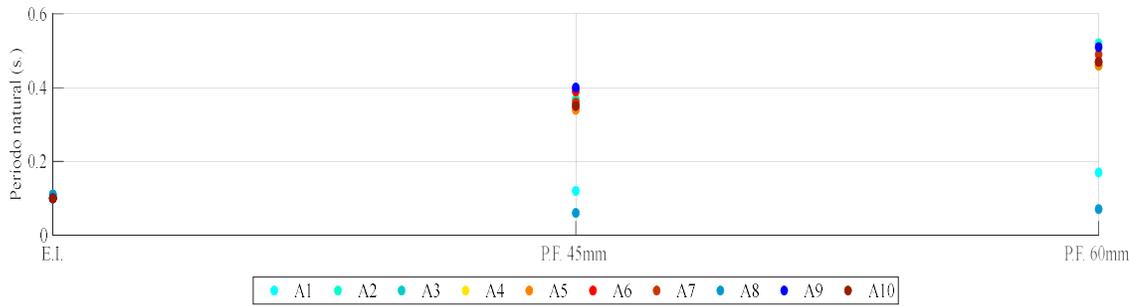


Figura 7.6 Período Natural (s) – URM-2S-2

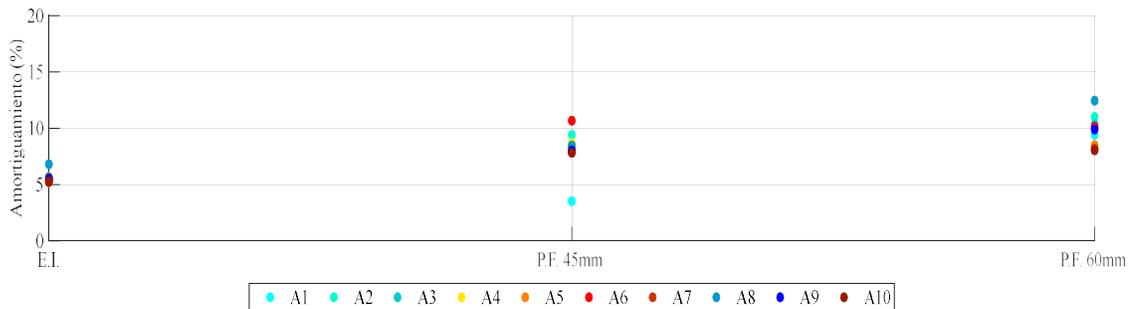


Figura 7.7 Razón de Amortiguamiento ζ (%) - URM-2S-2

7.1.3 MODELO SRM-2S-1

La Tabla 10, muestra que el modelo en estado inicial presentó un período natural de 0.11s y una razón de amortiguamiento de 5.6%. Posterior a la primera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$), el período natural aumentó a 0.13s y la razón de amortiguamiento fue de 8.1%.

Después de realizar la segunda fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$), el período natural del modelo aumentó a 0.22s y la razón de amortiguamiento aumentó a 11.3%. Realizada la tercera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), el período natural aumentó a 0.32s y la razón de amortiguamiento fue de 11.6%. Posterior a la cuarta fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), el período natural aumentó a 0.39s y la razón de amortiguamiento fue 10.5%.

Asimismo, es posible determinar los períodos naturales de vibración para el modelo a escala natural, a partir de las propiedades dinámicas del modelo a escala reducida, obteniéndose así, para el estado inicial y las 04 fases de ensayos, períodos naturales de vibración de 0.22s; 0.26s; 0.44s; 0.64s y 0.78s, respectivamente. En referencia a las razones de amortiguamiento para el modelo a escala natural, son los mismos del modelo a escala reducida ya que estos son valores adimensionales.

Tabla 10 Propiedades Dinámicas del modelo SRM-2S-1

Acelerómetro	Fase Inicial		Post - Fase 1 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$)		Post- Fase 2 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$)		Post- Fase 3 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$)		Fase Final ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$)		
	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	
1er Nivel	A1	5.05	0.11	8.84	0.14	15.75	0.25	14.10	0.36	10.57	0.44
	A2	6.18	0.11	12.88	0.14	11.33	0.21	13.98	0.29	11.59	0.42
	A3	5.18	0.11	7.34	0.13	12.21	0.22	15.60	0.38	17.40	0.51
	A8	5.73	0.12	10.84	0.13	13.03	0.07	8.69	0.07	10.69	0.06
	A9	5.54	0.11	6.36	0.12	8.03	0.20	11.20	0.31	11.42	0.37
2do Nivel	A4	5.47	0.11	7.27	0.12	10.61	0.25	7.25	0.32	6.98	0.38
	A5	5.37	0.11	7.06	0.12	10.31	0.21	9.78	0.29	9.28	0.34
	A6	5.55	0.11	7.20	0.12	11.36	0.23	10.10	0.29	9.32	0.34
	A7	5.99	0.11	6.69	0.12	11.13	0.20	12.09	0.32	10.40	0.37
	A10	5.74	0.11	6.64	0.12	11.27	0.22	10.09	0.30	7.23	0.34

De la Figura 7.8 y Figura 7.9 se puede determinar que el período natural de vibración presentó valores similares en todos los muros del modelo, a excepción del acelerómetro A8 cuyo valor varía enormemente de los datos obtenidos por los otros dispositivos. En referencia a las razones de amortiguamiento de los muros, posterior a cada fase de ensayo estos presentaron una ligera dispersión, cabe mencionar que presentaron valores muy similares entre la fase de desplazamiento en la base de 30mm con las dos fases de desplazamiento de 60mm.

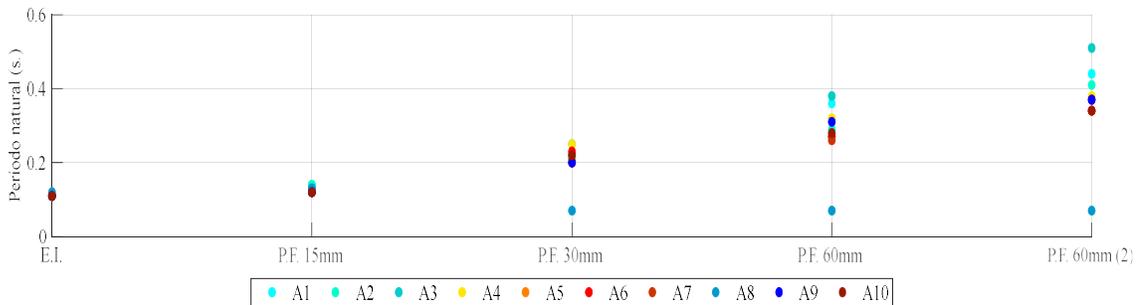


Figura 7.8 Período Natural (s) – SRM-2S-1

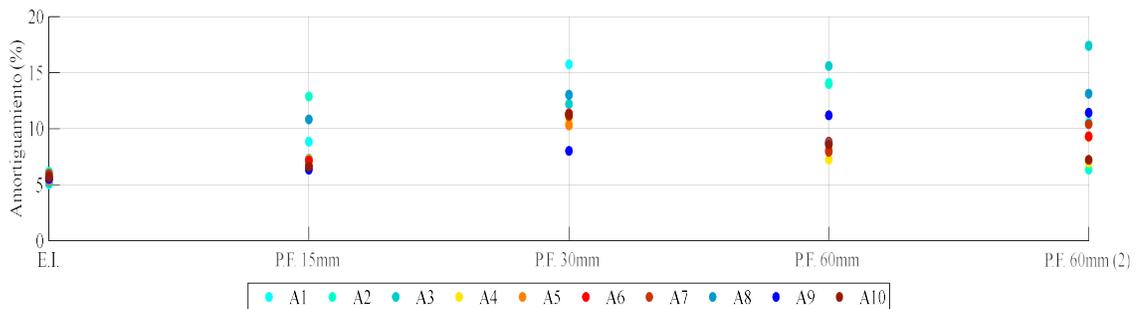


Figura 7.9 Razón de Amortiguamiento ξ (%) - SRM-2S-1

7.1.4 MODELO SRM-2S-2

La Tabla 11, señala que el modelo en su estado inicial presentó un período natural de 0.09s y una razón de amortiguamiento de 7.3%. Después de la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), el período natural aumentó a 0.28s y la razón de amortiguamiento fue de 8.6%. Posterior a la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), el período natural del modelo aumentó ligeramente a 0.30s y la razón de amortiguamiento aumentó a 10.9%.

Por otra parte, se puede determinar los períodos naturales de vibración para el modelo a escala natural, a partir de las propiedades dinámicas del modelo a escala reducida, obteniéndose así, para el estado inicial y las dos fases de ensayos, períodos naturales de vibración de 0.18s; 0.56s y 0.60s, respectivamente. En referencia a las razones de amortiguamiento para el modelo a escala natural, son los mismos del modelo a escala reducida ya que estos son valores adimensionales.

Tabla 11 Propiedades Dinámicas del modelo SRM-2S-2

Acelerómetro	Fase Inicial		Post - Fase 1 ($\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm}$)		Fase Final ($\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm}$)		
	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	ξ (%)	Tn (s)	
1er Nivel	A1	7.56	0.09	12.89	0.31	17.66	0.30
	A2	7.27	0.09	7.10	0.27	9.39	0.29
	A3	7.31	0.09	7.59	0.27	11.73	0.31
	A8	6.55	0.09	8.95	0.08	9.25	0.06
	A9	7.88	0.09	7.59	0.28	8.85	0.29
2do Nivel	A4	7.39	0.09	8.94	0.28	9.73	0.30
	A5	7.20	0.09	8.18	0.27	10.59	0.30
	A6	7.43	0.09	9.12	0.29	9.16	0.29
	A7	7.45	0.09	7.60	0.29	10.06	0.31

De la Figura 7.10 y Figura 7.11 se puede interpretar que el modelo reforzado con malla de cuerdas al ser sometido directamente al sismo más severo con un desplazamiento máximo en la base de 60 mm, mantuvo el mismo período de 0.30s al ser sometido a una segunda fase con el mismo desplazamiento en la base. Así también se observa un ligero aumento en el nivel de daño.

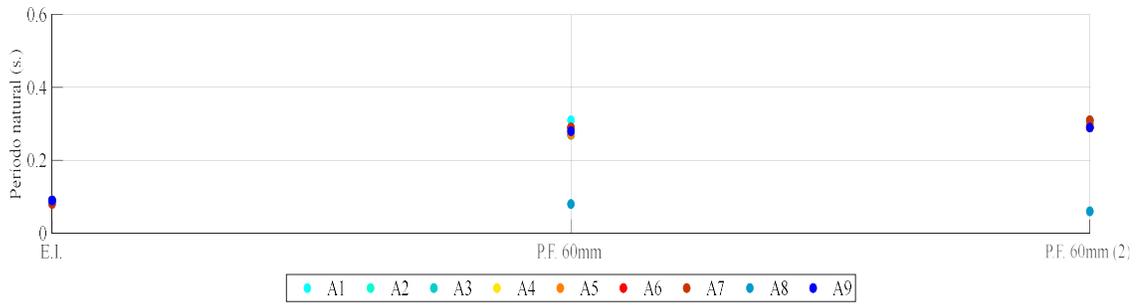


Figura 7.10 Período Natural (s) – SRM-2S-2

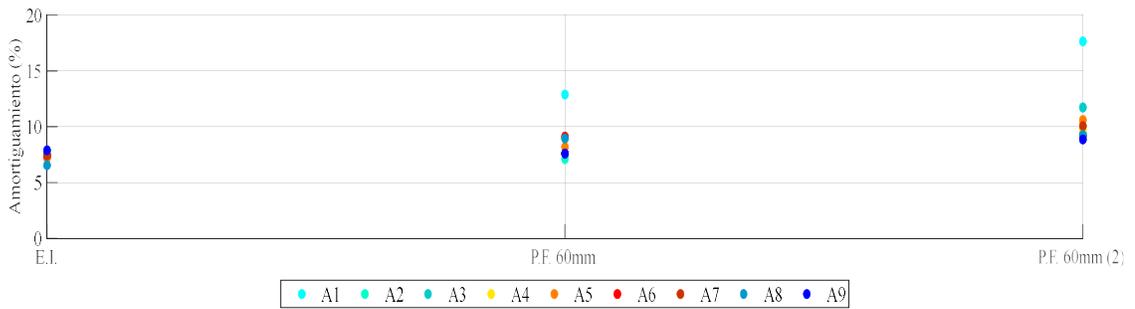
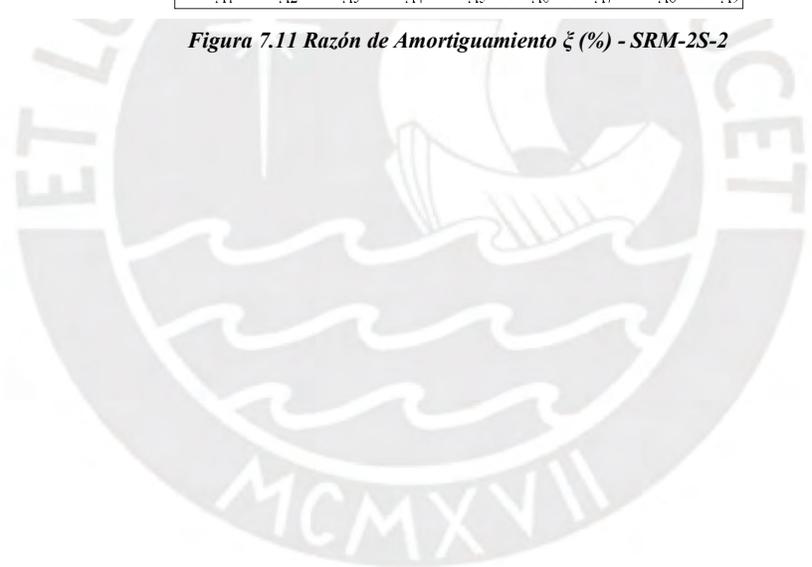


Figura 7.11 Razón de Amortiguamiento ζ (%) - SRM-2S-2



7.2 RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTO

Se instalaron 11 LVDT's en cada modelo para los ensayos de simulación sísmica, los que permitieron registrar las respuestas de desplazamiento absoluto en puntos estratégicos indicados anteriormente en el Capítulo 6.

A partir de la información recopilada se elaboraron vistas de perfil y de elevación de los modelos ensayados, con la finalidad de visualizar la manera en que se fueron dando los desplazamientos relativos a lo largo de toda la altura de cada modelo. Dichas gráficas se realizaron en tres intervalos de 5 segundos. Asimismo, se elaboraron gráficos de historia en el tiempo de los desplazamientos relativos de entrepiso.

7.2.1 MODELO URM-2S-1

La Tabla 12 muestra los desplazamientos relativos de entrepiso (mm) que fueron registrados durante las dos primeras fases de ensayo a las que fue sometido el modelo URM-2S-1. Cabe mencionar que para la tercera fase se retiraron los dispositivos LVDT's por posible colapso de la estructura.

Tabla 12 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), URM-2S-1

LVDT's	Fase 1 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$)		Fase 2 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$)		
	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	
	Base	D0	14.04	-11.15	-22.38
1er Nivel	D1	4.40	-4.48	6.82	-64.81
	D2	6.25	-4.50	38.12	-4.97
	D3	5.04	-4.85	5.02	-30.81
	D8	4.45	-3.09	29.42	-2.98
	D10	4.89	-5.20	79.64	-38.47
2do Nivel	D4	8.73	-5.34	64.67	-18.66
	D5	3.19	-4.31	12.48	-37.85
	D6	4.33	-3.85	21.77	-30.83
	D9	4.24	-6.19	13.84	-26.19
	D11	4.50	-3.64	16.50	-90.34

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$), el modelo presentó pequeños desplazamientos de entrepiso con valores muy similares en sus dos niveles, donde el muro lateral registró un desplazamiento de entrepiso de 8.73mm siendo el máximo valor que se dio en el segundo piso, mientras que el muro posterior presentó un desplazamiento de entrepiso de 6.25mm que fue el máximo valor que se registró en el primer nivel. Es importante mencionar que los máximos desplazamientos de entrepiso se presentaron en todos los muros casi al mismo tiempo ($t=5\text{s}$).

En referencia al muro frontal, se observa que, en el segundo piso, la parte central presentó mayores desplazamientos que en su extremo. Sin embargo, en el primer nivel la parte extrema

presentó mayores desplazamientos que la zona central (Figura 7.12 y 7.13). Por lo tanto, se puede inducir que los desplazamientos en los dos niveles del muro no fueron uniformes.

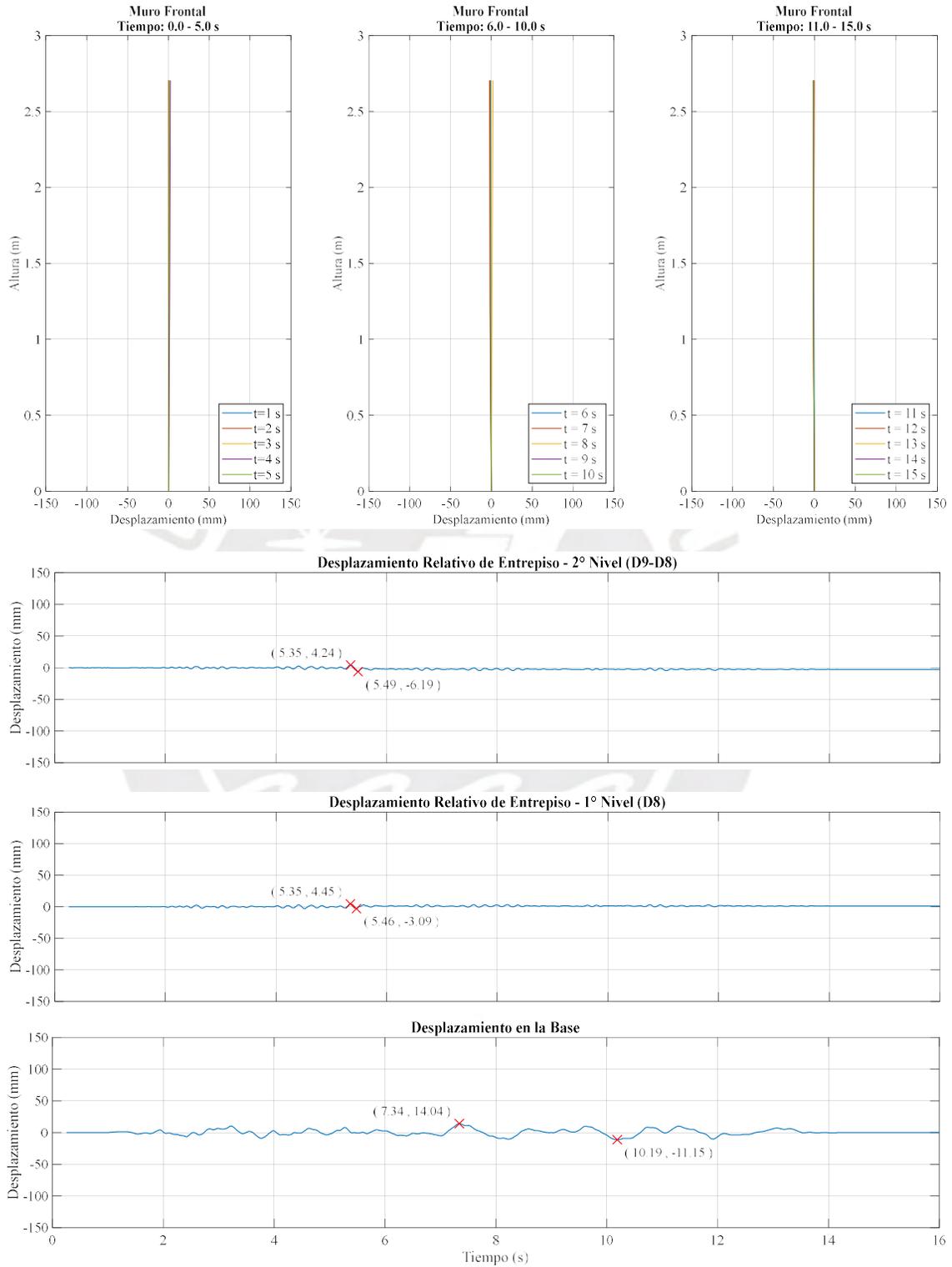


Figura 7.12 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

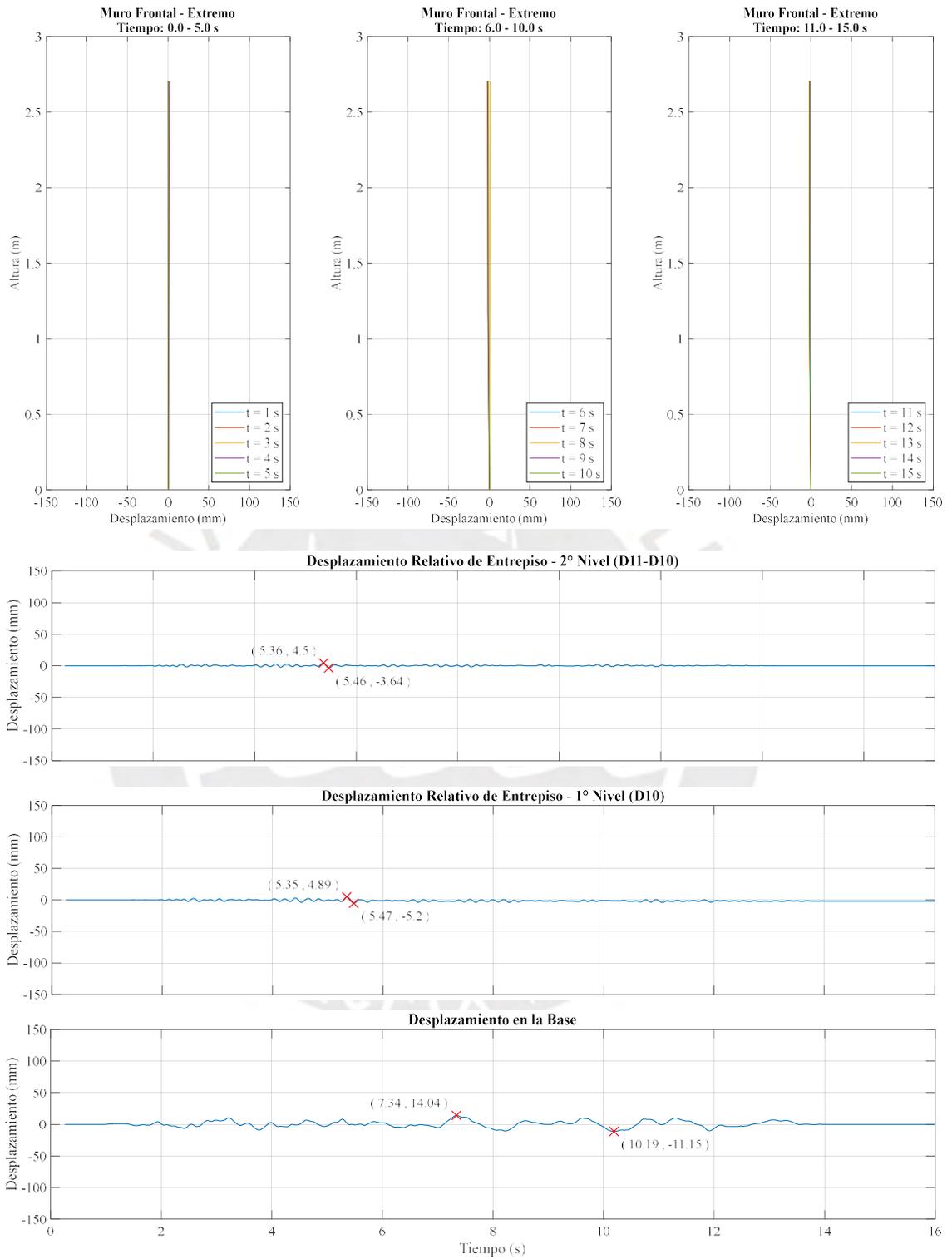


Figura 7.13 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

Respecto al muro lateral derecho, se observa apreciables desplazamientos registrados en la zona debajo del vano de la ventana.

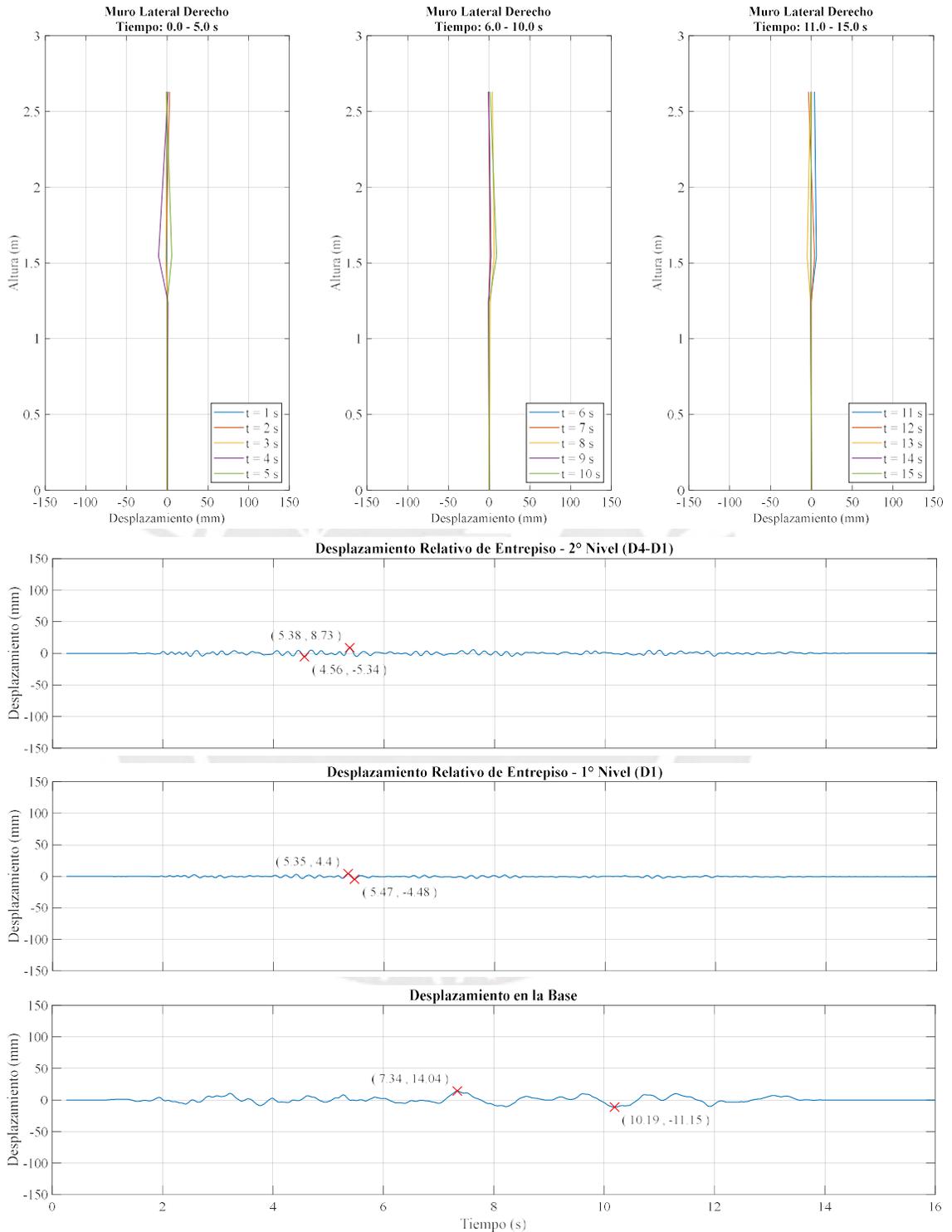


Figura 7.14 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

Finalmente, en el muro posterior se observa al igual que en muro frontal, existe mucha variación entre los desplazamientos de la parte central con la del extremo, con lo cual, en los dos niveles del muro los desplazamientos no fueron uniformes (Figura 7.15 y 7.16).

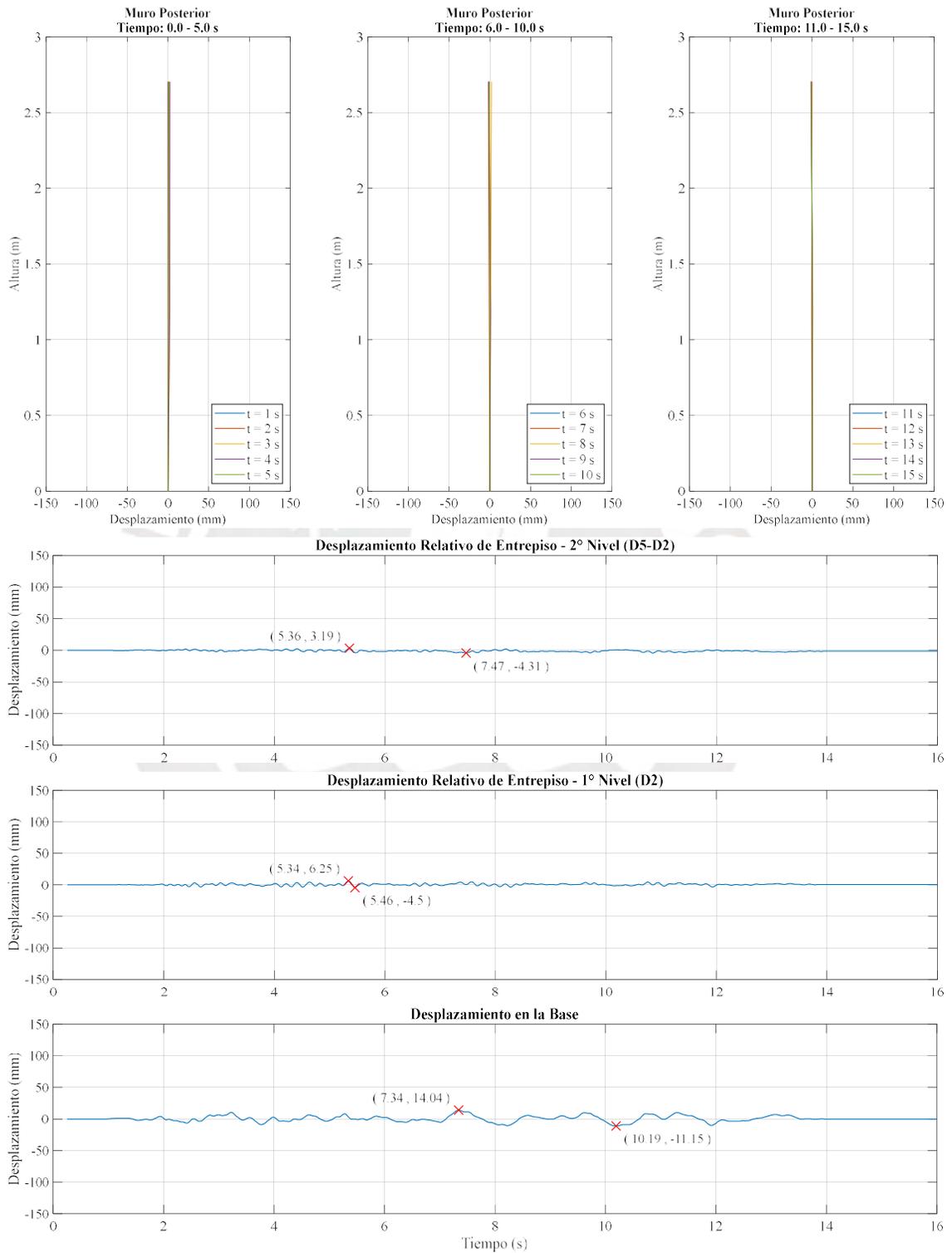


Figura 7.15 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

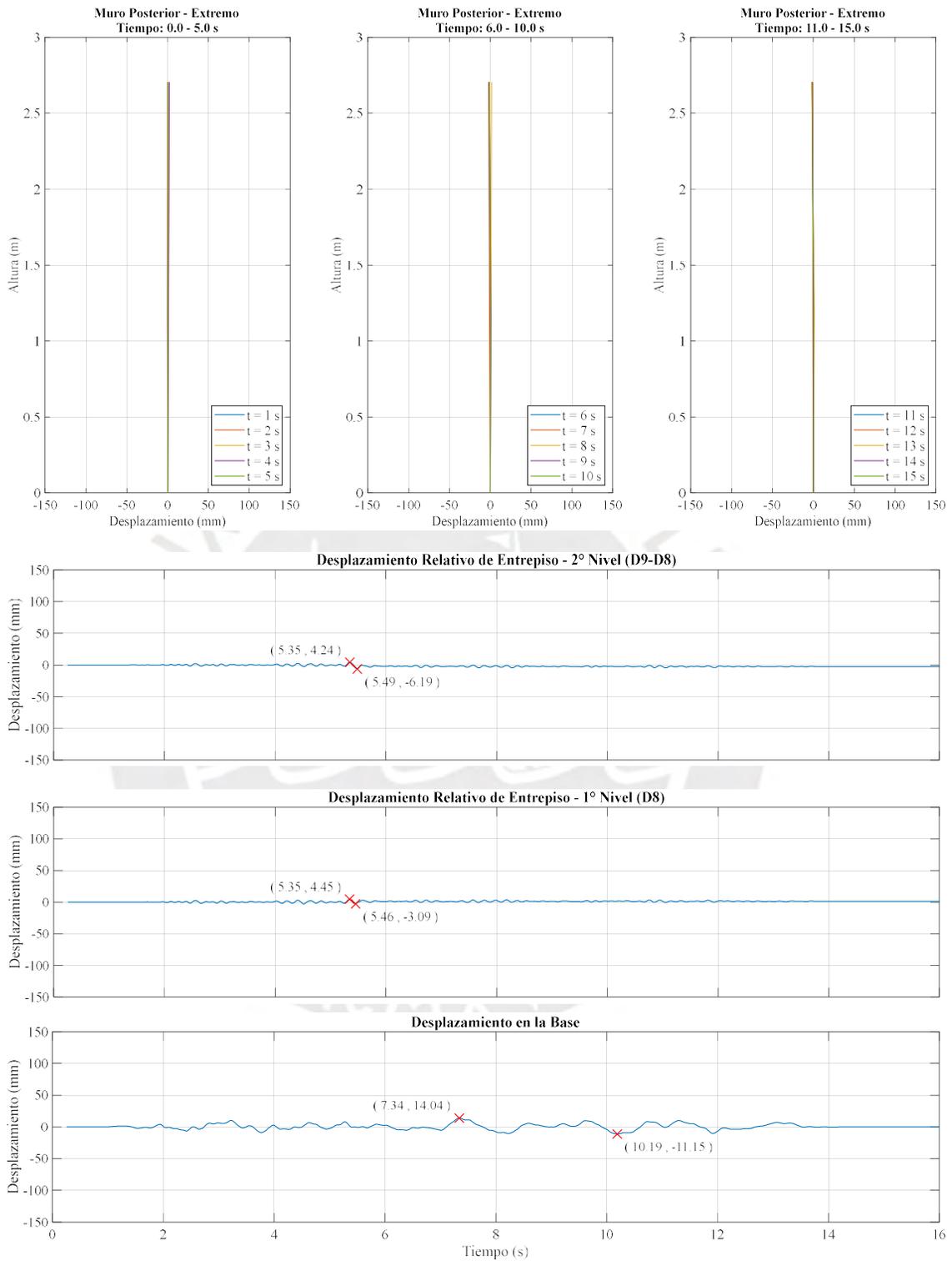


Figura 7.16 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

Por otra parte, en la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$) se registraron grandes desplazamientos que conllevaron al modelo a sufrir daños severos, sobretodo en el segundo nivel que fue donde se presentó el máximo desplazamiento de entrepiso, alcanzando un valor de 90.34mm en el extremo del muro frontal. Mientras que, en el primer nivel, el máximo desplazamiento de entrepiso fue 79.64mm, en cual también se dio en el extremo del mismo muro.

Asimismo, en el muro frontal, las deformaciones siguieron un patrón casi lineal, esto se dio debido a la separación de la viga diafragma del segundo nivel con el muro. A su vez, se evidencia ciertos efectos por torsión provocado por los grandes desplazamientos que se registran en el extremo del muro en comparación a la parte central de éste. También se evidencia una deformación permanente en sus dos niveles (Figura 7.17 y 7.18).

En referencia al muro lateral, este presentó el mismo valor de desplazamiento máximo de entrepiso en los dos niveles, es decir, 64mm. Además, esto se produjo en el mismo instante, pero en sentidos opuestos. Adicional a ello, se evidencia marcados desplazamientos en la zona debajo del vano de la ventana (Figura 7.19).

Respecto al muro posterior, se evidencian efectos por torsión debido a la considerable diferencia entre los desplazamientos que han sido registrados en la parte central del muro y en su extremo. A su vez, la deformación del muro obedece a su segundo modo de vibración debido a los desplazamientos opuestos que se produjeron en cada nivel. Finalmente se observa una deformación permanente en los dos niveles del muro (Figura 7.20 y 7.21).

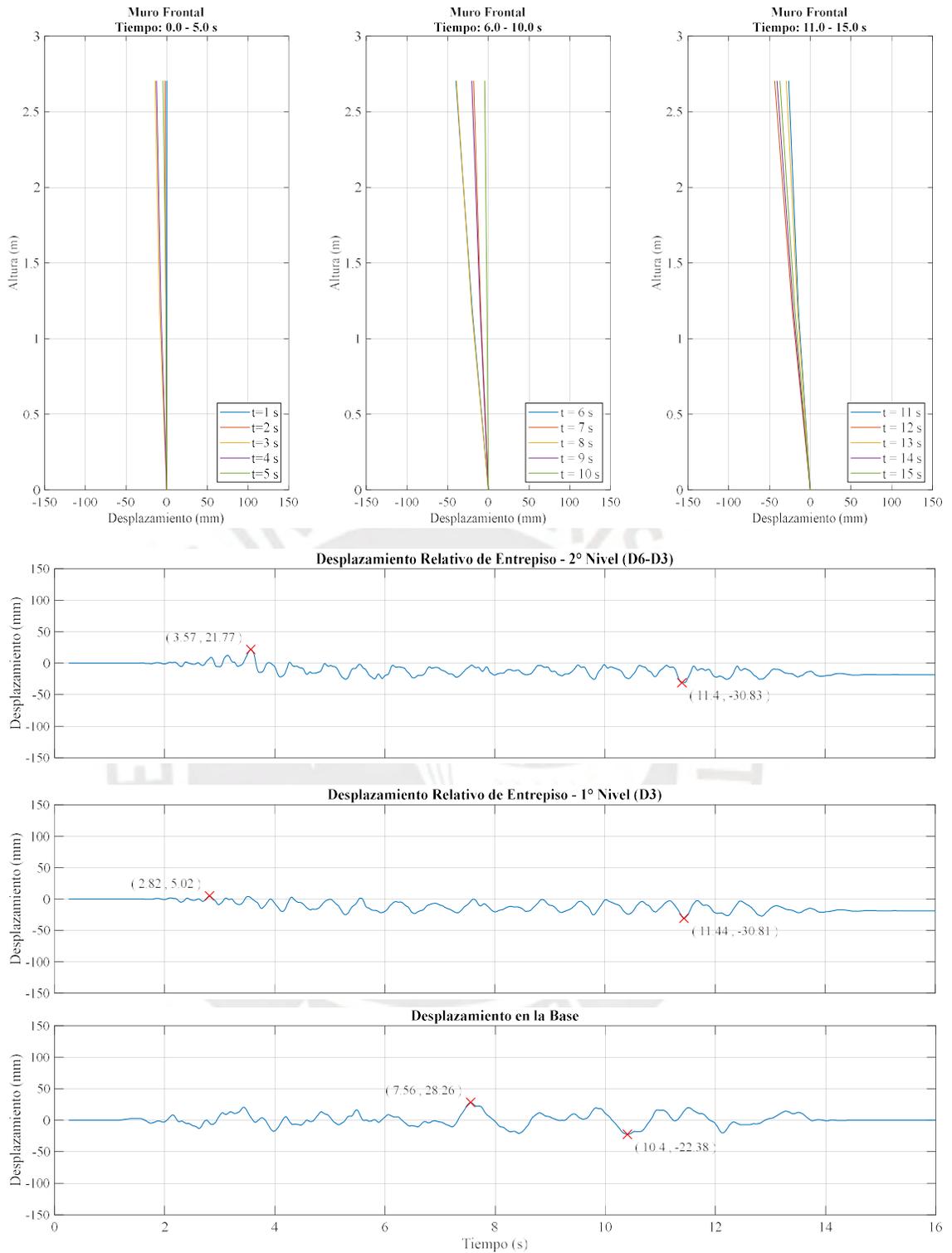


Figura 7.17 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

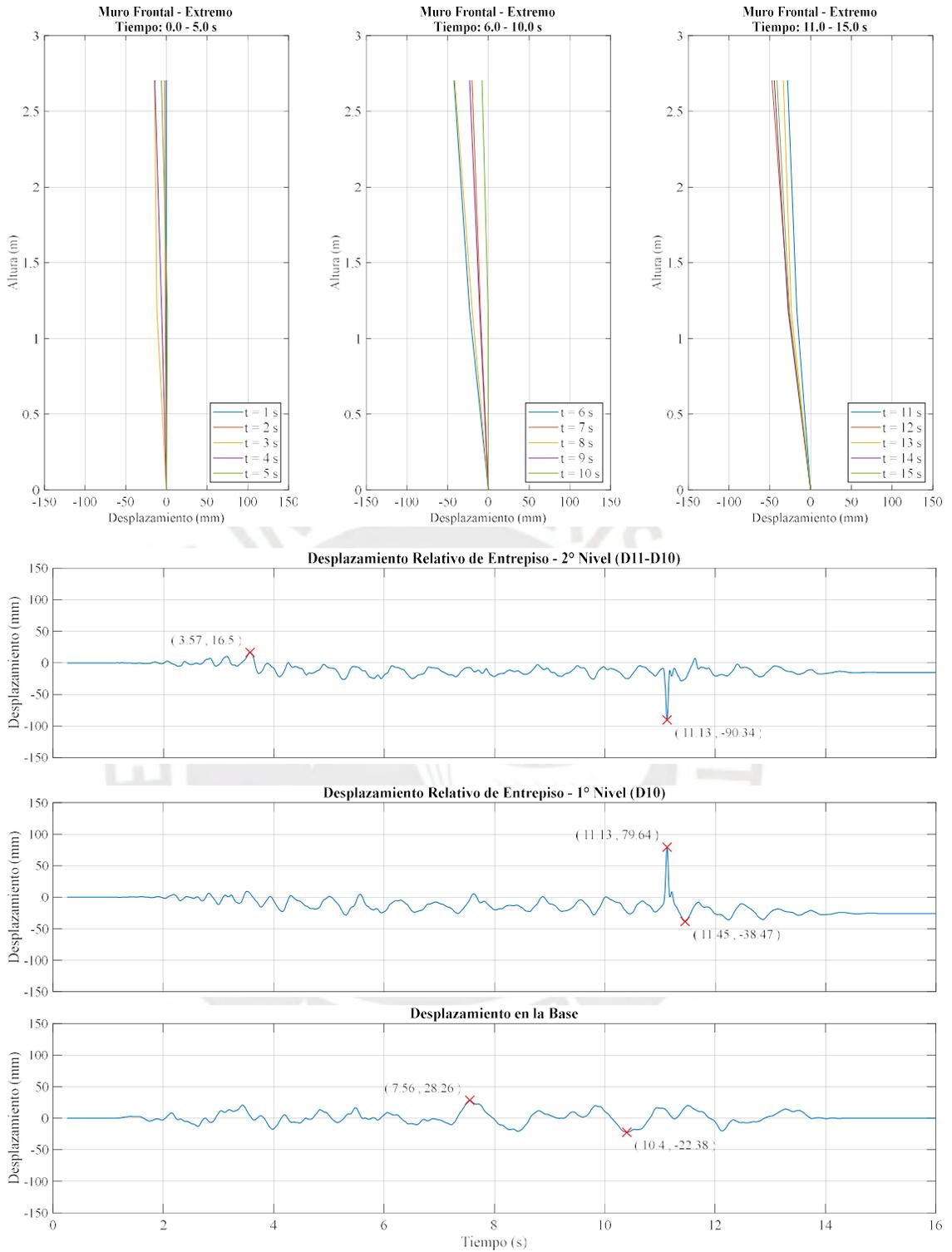


Figura 7.18 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

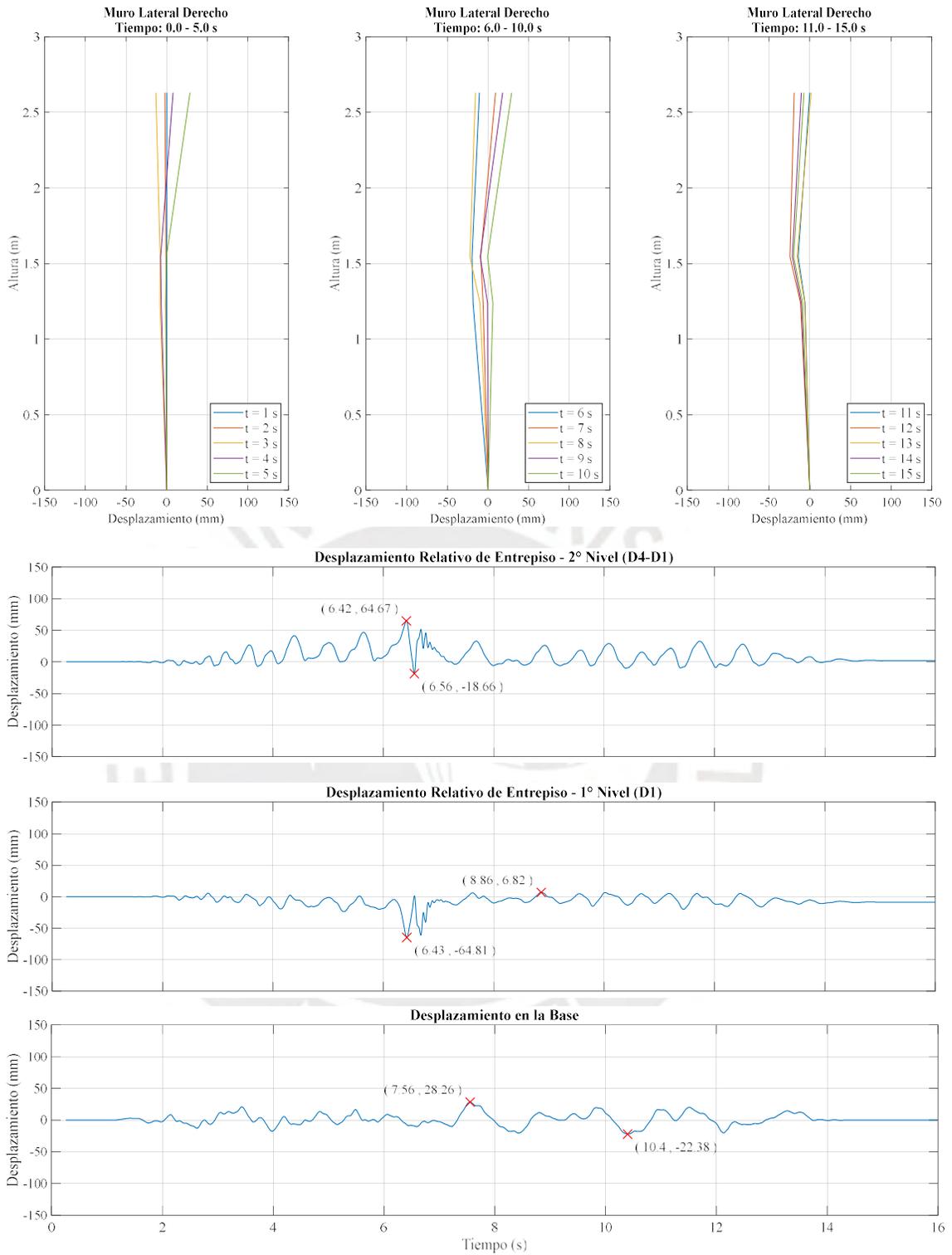


Figura 7.19 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

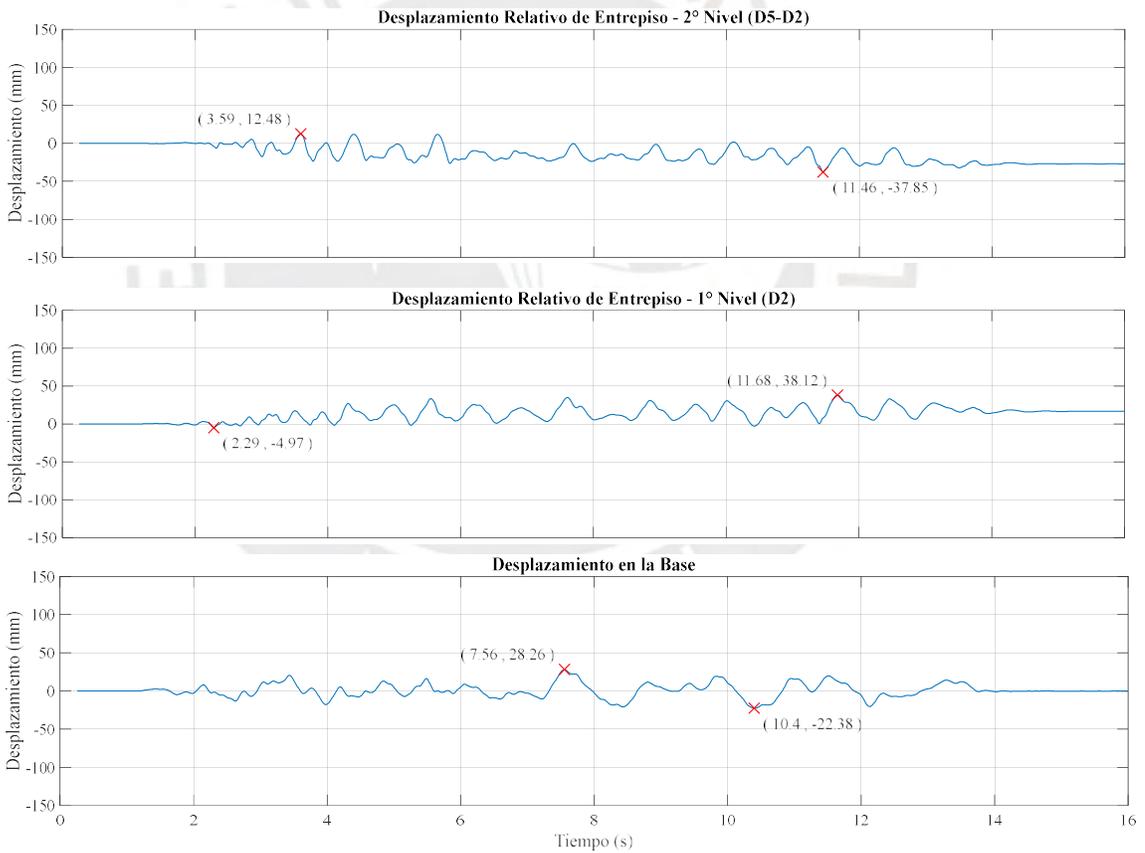
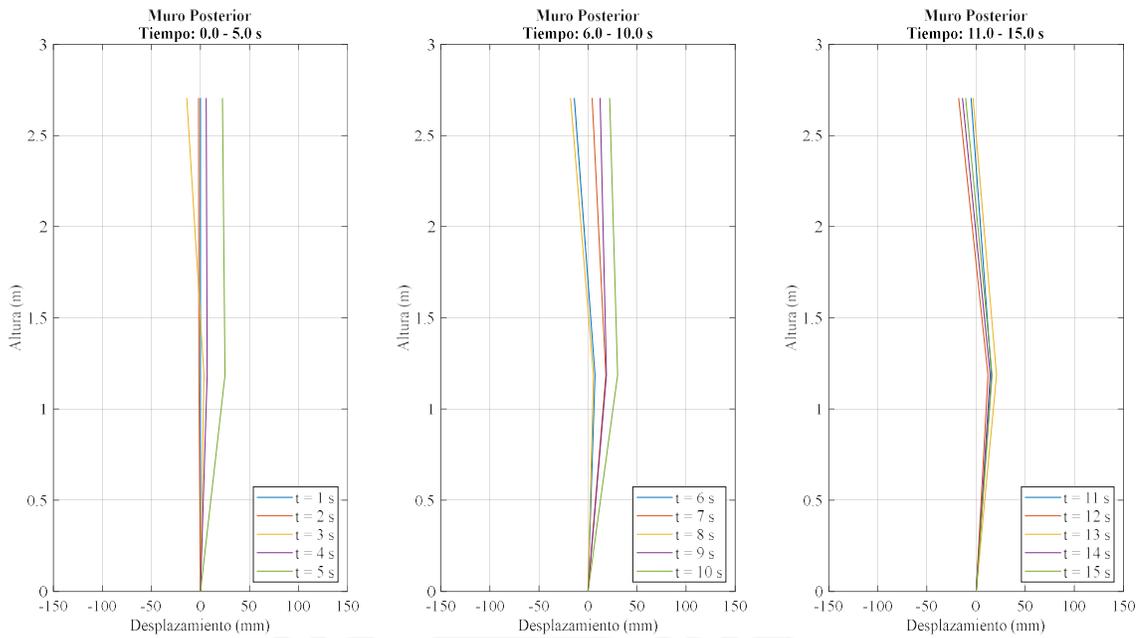


Figura 7.20 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

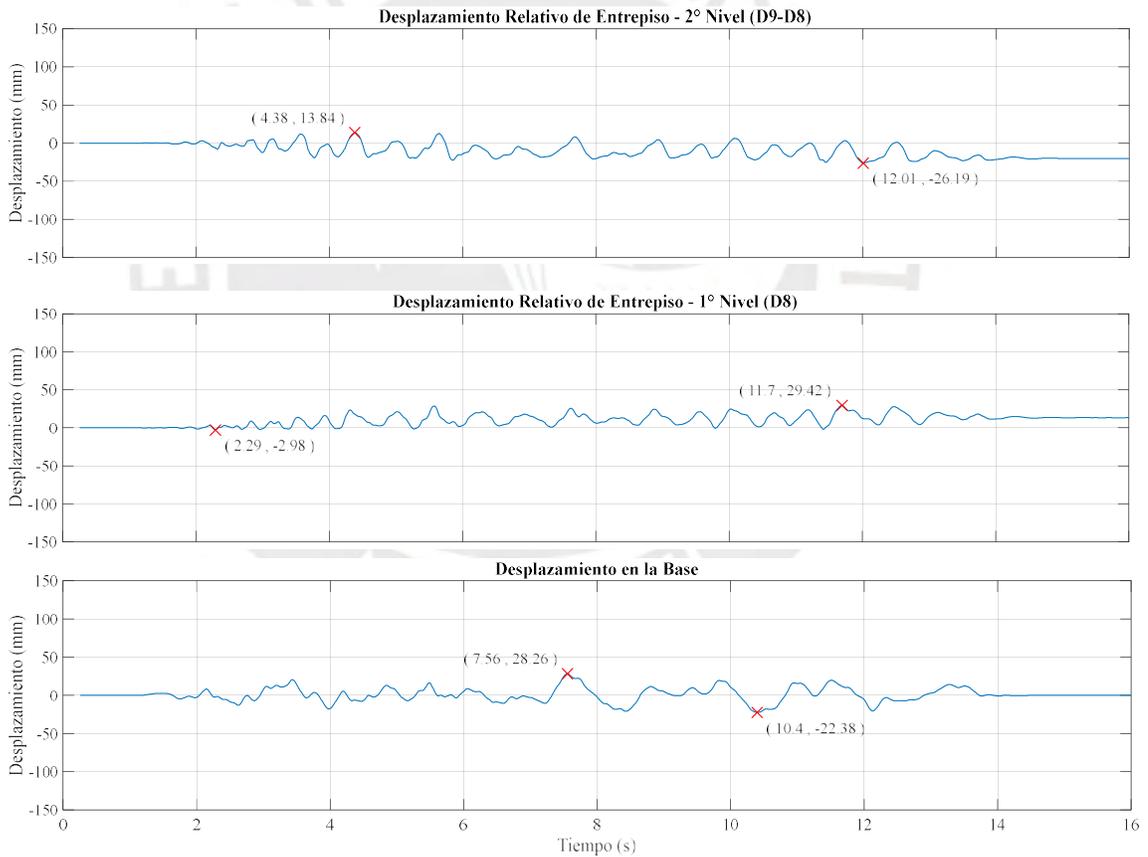
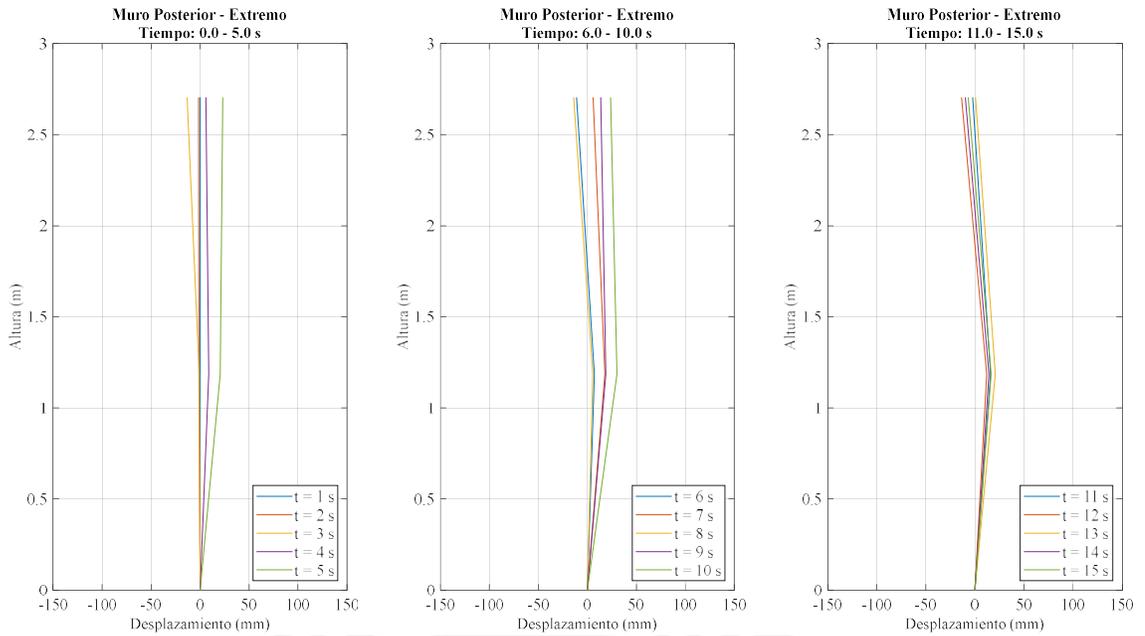


Figura 7.21 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

7.2.2 MODELO URM-2S-2

La Tabla 13 muestra los desplazamientos relativos de entrepiso (mm) que fueron registrados durante las dos fases de ensayo a las que fue sometido el modelo URM-2S-2. Es importante mencionar debido al severo daño que sufrió el modelo durante la segunda fase, se detectó fallas en la recopilación de datos por parte de dos dispositivos LVDT's ubicados en el segundo nivel del muro lateral (D4) y del muro frontal (D6).

Tabla 13 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), URM-2S-2

LVDT's	Fase 1		Fase 2		
	$(\Delta_{m\acute{a}x} = 45\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$		
	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	
Base	D0	41.81	-33.57	55.97	-44.55
	D1	35.87	-27.00	41.65	-35.51
1er Nivel	D2	43.20	-9.83	58.75	-33.75
	D3	9.51	-34.06	17.95	-33.18
	D8	25.35	-5.27	48.20	-11.60
	D10	112.60	-37.86	61.60	-38.27
2do Nivel	D4	97.81	-26.91	-	-
	D5	66.08	-20.91	46.48	-56.73
	D6	32.68	-26.23	-	-
	D9	68.56	-10.16	78.17	-17.12
	D11	38.28	-149.12	99.35	-47.42

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 45\text{mm}$), el modelo sufrió severos daños debido a los elevados desplazamientos que se presentaron, siendo en el extremo del muro frontal donde se registraron los máximos desplazamientos de entrepiso, dichos valores fueron 112.60mm y 149.12mm para el primer y segundo nivel, respectivamente.

Asimismo, se observa que el muro frontal presentó gran variación entre los desplazamientos registrados en la parte central y en su extremo, lo que evidenció la existencia de efectos por torsión en el modelo. A su vez, se puede visualizar que las deformaciones del muro en sus dos niveles se dieron en sentidos opuestos. Además, se llegó a presentar un desplazamiento permanente sobretodo en el primer piso (Figura 7.22 y 7.23).

Respecto al muro lateral, se aprecia con amplia notoriedad que el segundo piso fue el que sufrió mayores desplazamientos de entrepiso en referencia al primer nivel. Adicionalmente, se observa que las deformaciones se dieron siguiendo un patrón casi lineal (Figura 7.24).

En referencia al muro posterior, este presenta al igual que el muro frontal, desplazamientos con gran variación entre los registrados en la parte central del muro y los registrados en su extremo. En el extremo del muro, el segundo nivel fue donde se sufrió elevados desplazamientos de entrepisos en comparación a los registrados en el primer nivel (Figura 7.25 y 7.26).

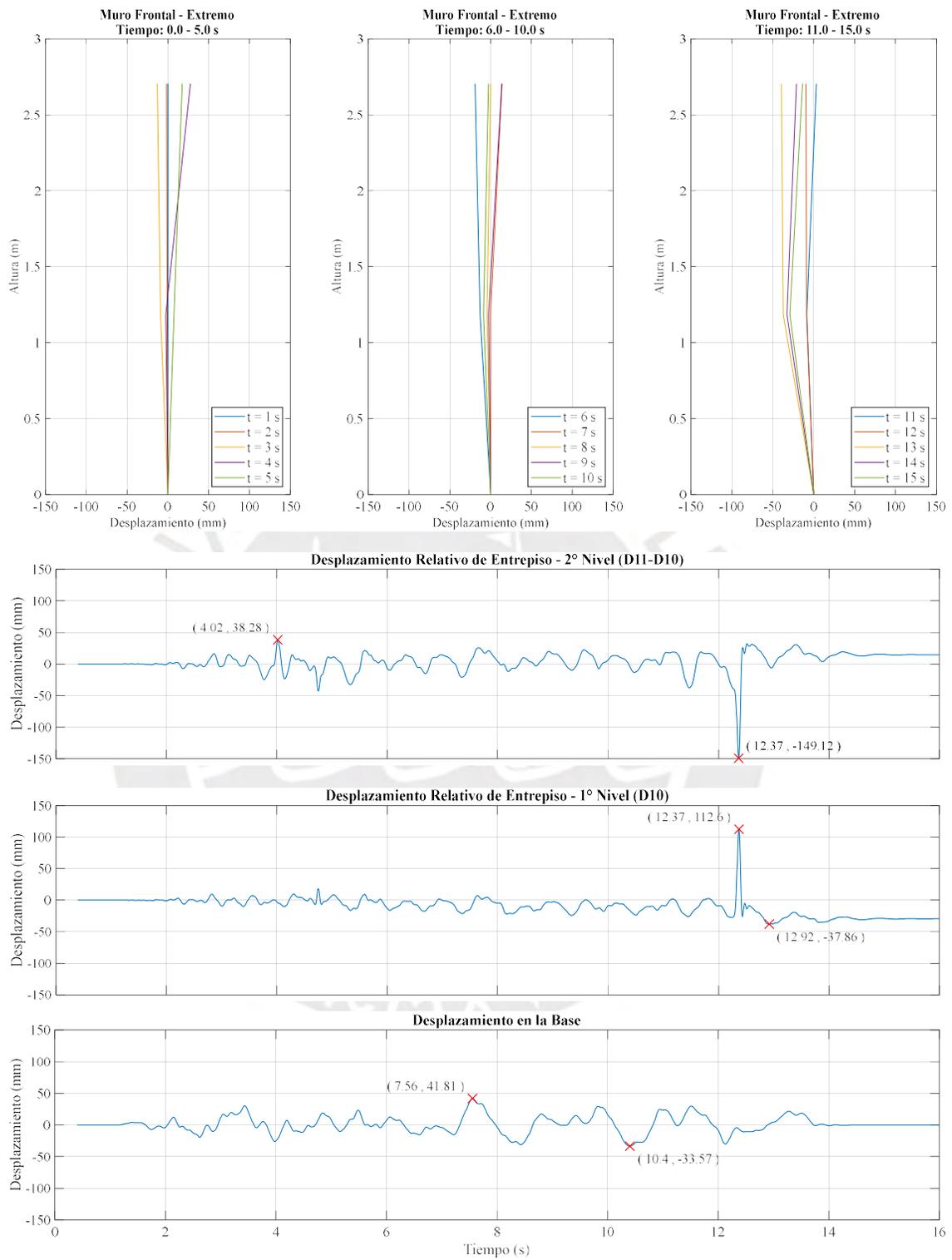


Figura 7.23 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase I (45 mm) - URM-2S-2

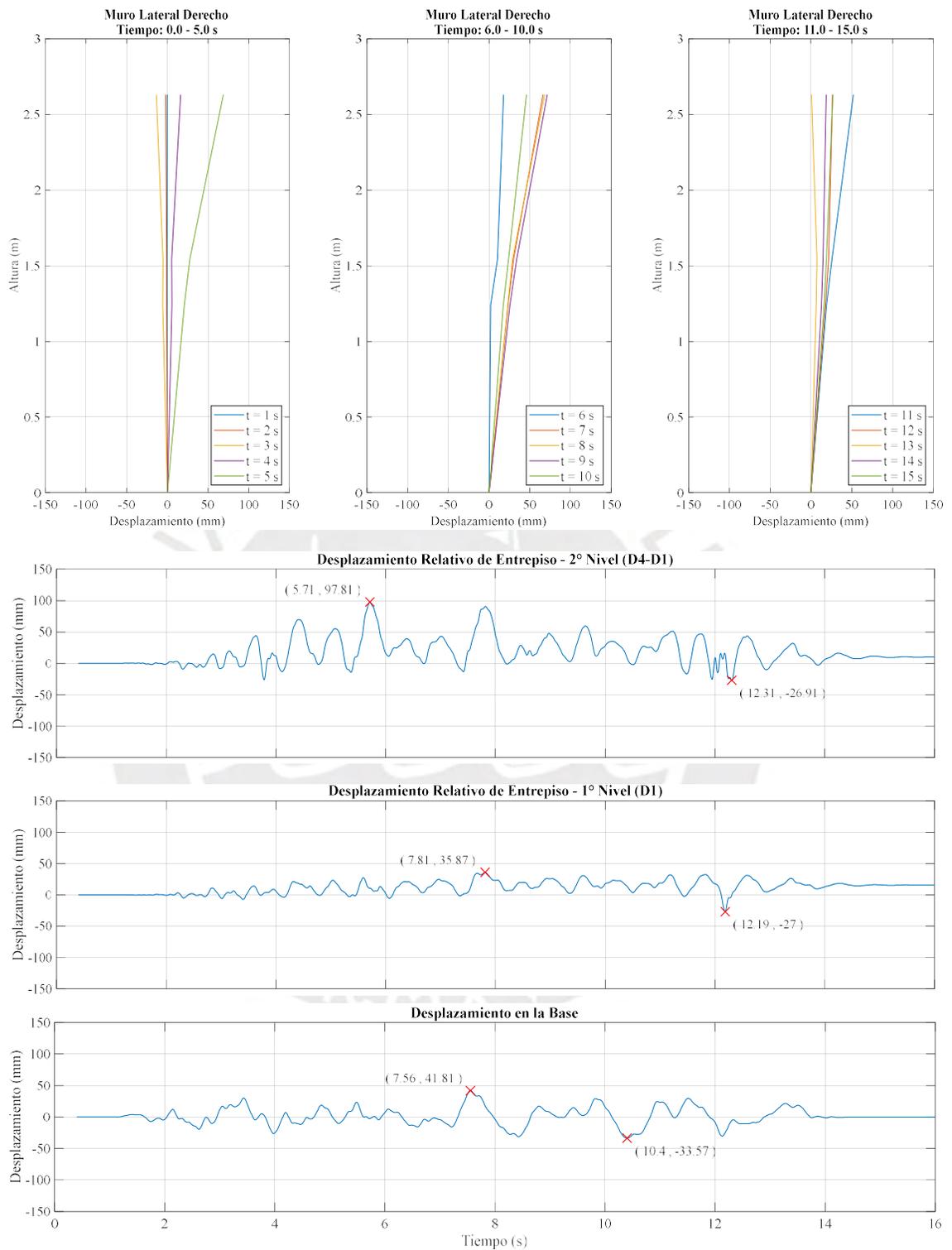


Figura 7.24 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

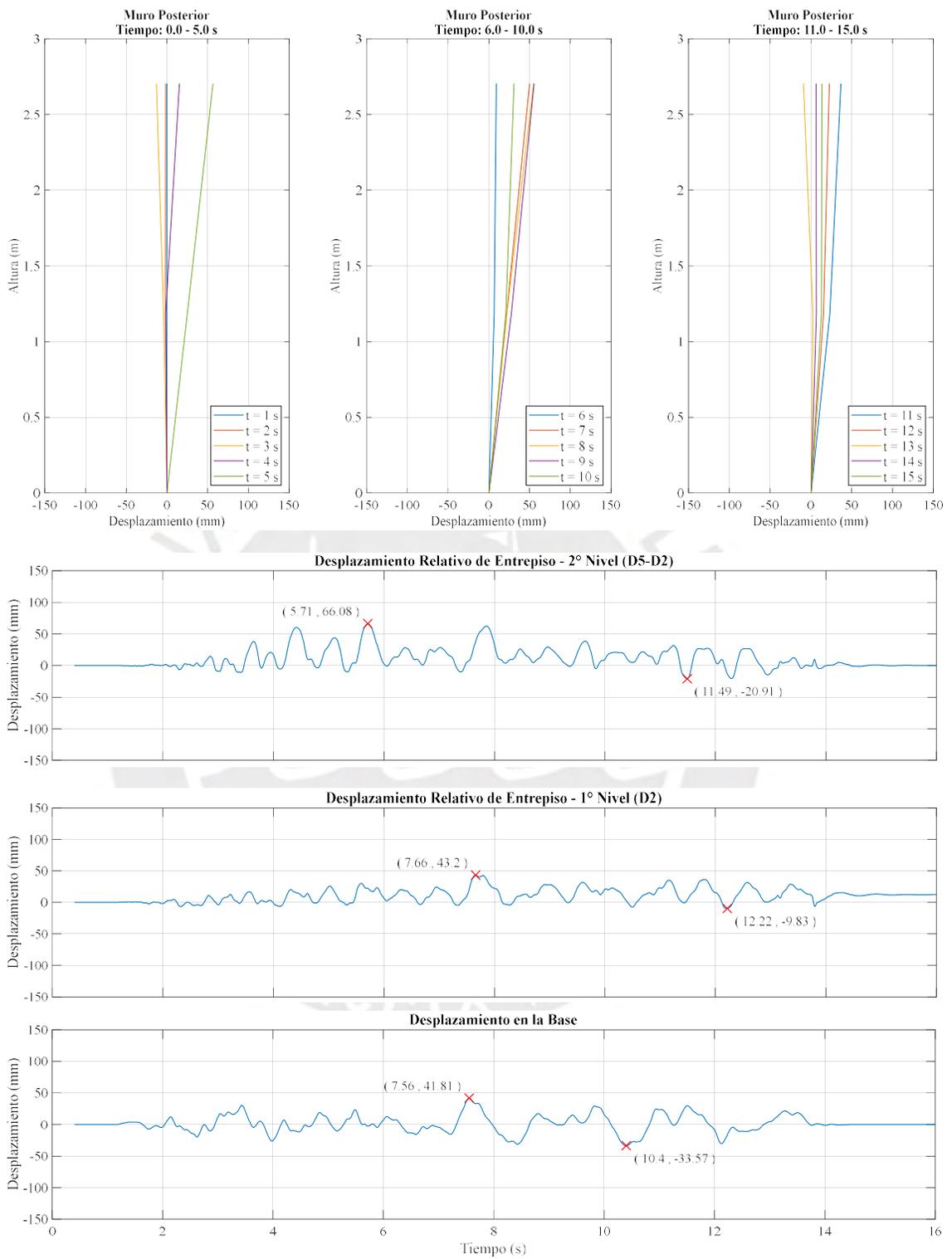


Figura 7.25 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

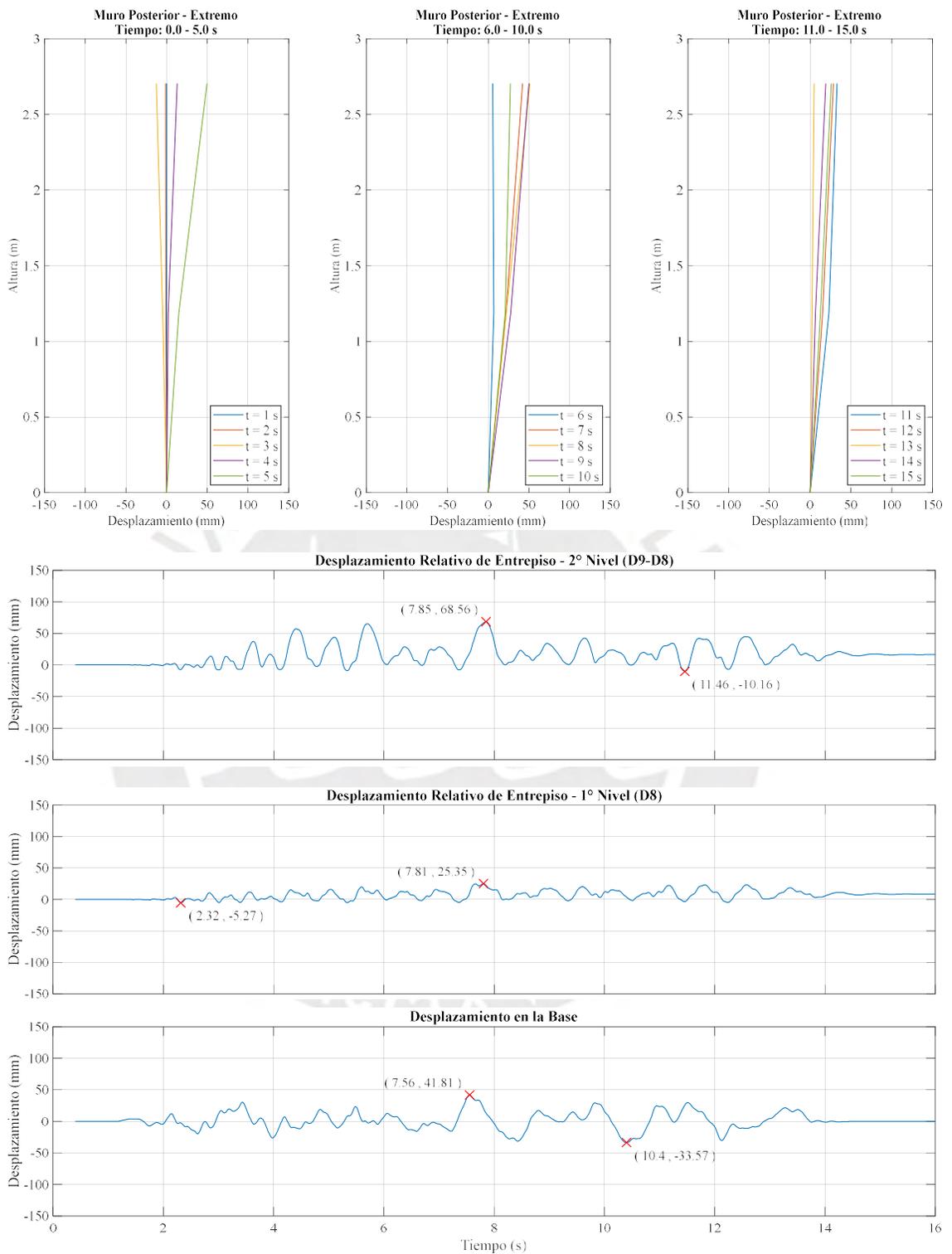


Figura 7.26 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

En la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60 \text{ mm}$), el modelo terminó al borde del colapso. De la información que se pudo recopilar a través de los dispositivos LVDT's, el máximo desplazamiento de entrepiso en cada nivel se dio al igual que en la fase anterior, en el extremo del muro frontal, cuyos valores fueron 61.60mm y 99.35mm para el primer y segundo piso, respectivamente.

Asimismo, en la parte extrema del muro frontal se puede observar como durante los primeros segundos del ensayo, el segundo nivel registró su máximo desplazamiento de entrepiso, mientras que hasta ese momento los desplazamientos del primer nivel eran relativamente bajos. Posterior a los 8 segundos del ensayo, se observa como el muro del primer nivel empezó con una deformación permanente hasta finalizar el ensayo (Figura 7.27).

Respecto al muro lateral, solo se pudo registrar los datos del primer nivel donde el desplazamiento máximo de entrepiso fue 41.65mm.

En referencia al muro posterior del primer nivel, se aprecia que desde el inicio de la fase existe gran variación entre los desplazamientos de la zona central del muro con los de su extremo, cabe mencionar que dicha diferencia se va acortando a medida que avanza el ensayo. Sucede lo contrario con el muro del segundo nivel, a medida que avanza el ensayo, la variación de desplazamientos entre la zona central y extrema del muro se va acrecentado, debido a que los desplazamientos de una zona se dan en sentido contrario de la otra (Figura 7.28 y 7.29).

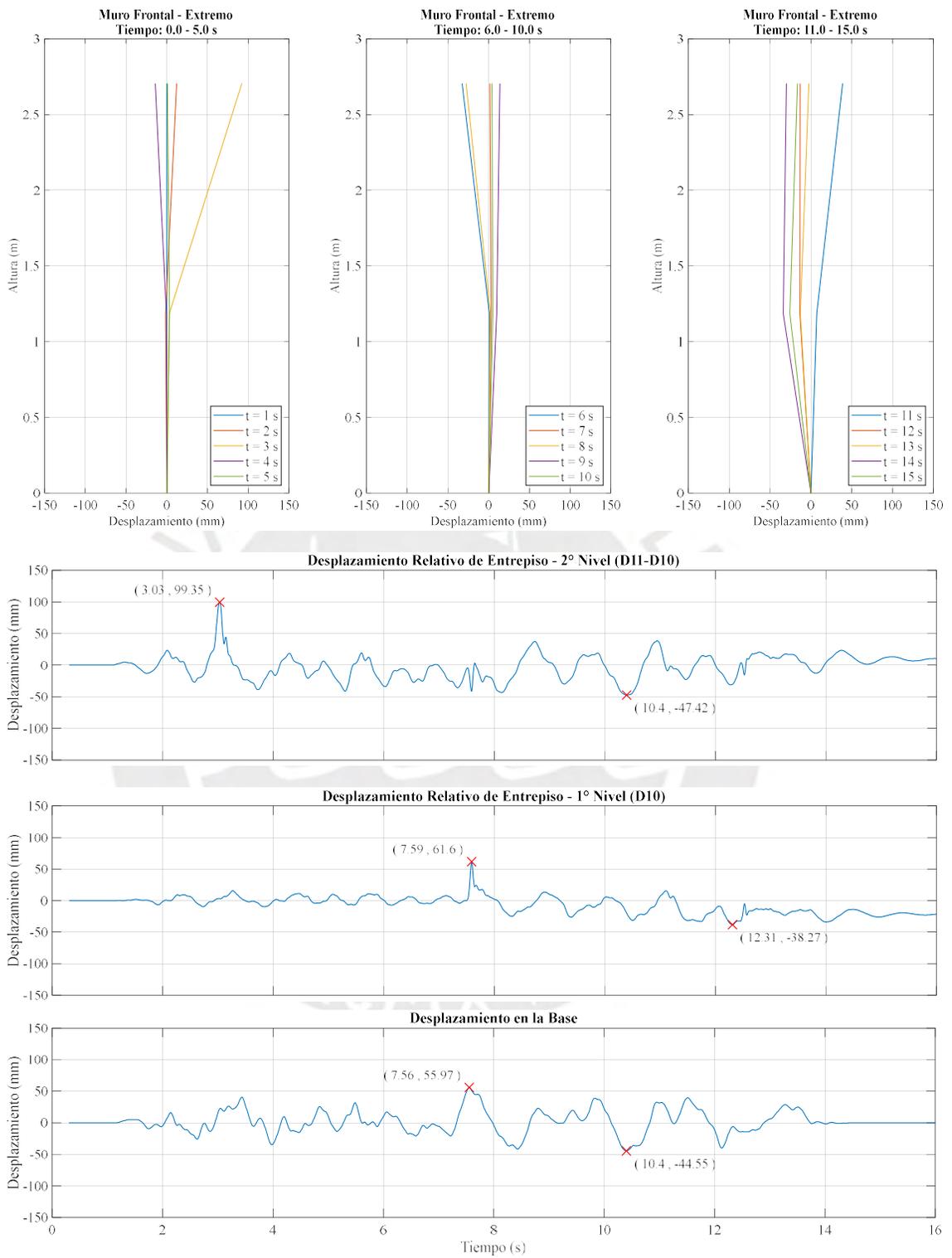


Figura 7.27 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

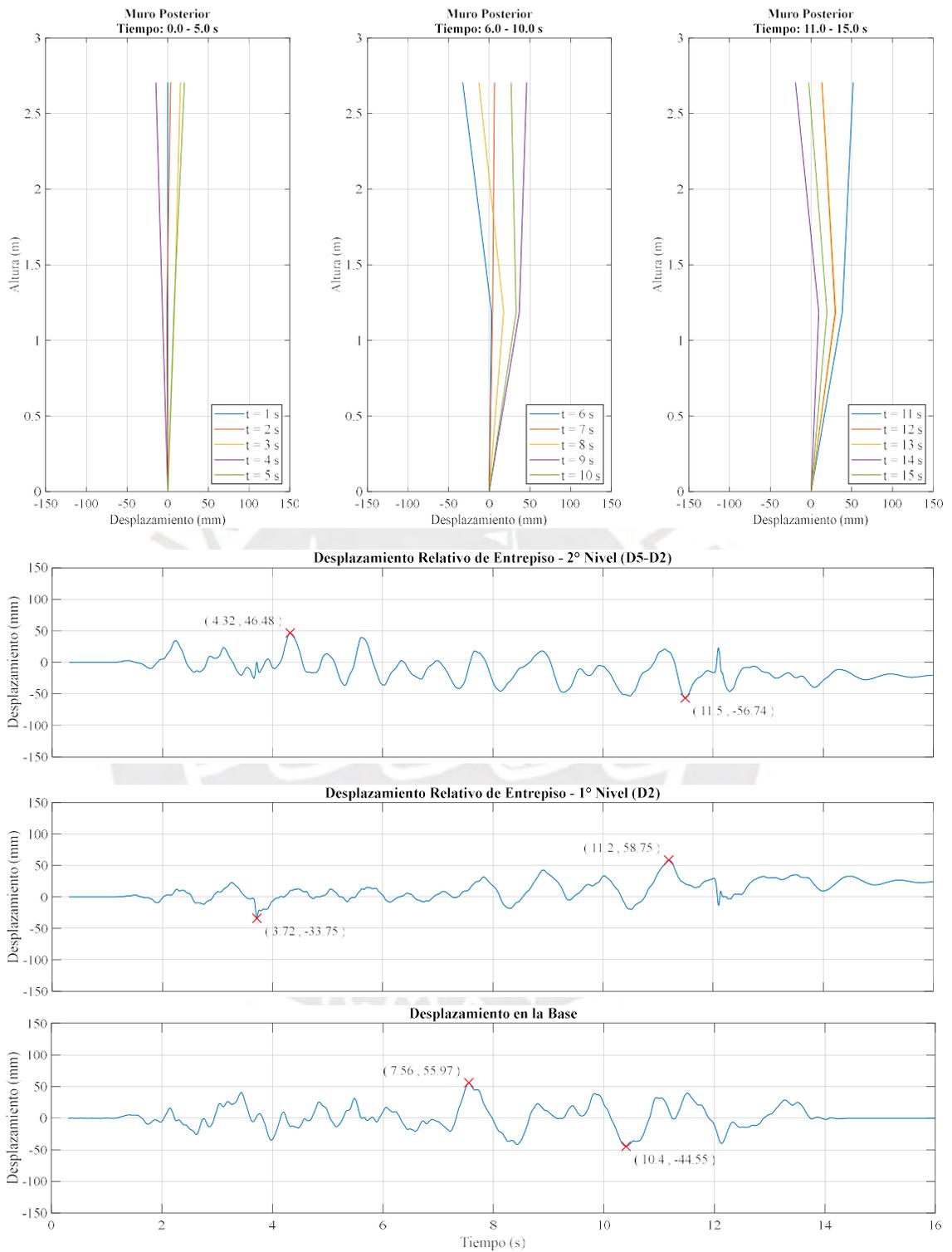


Figura 7.28 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

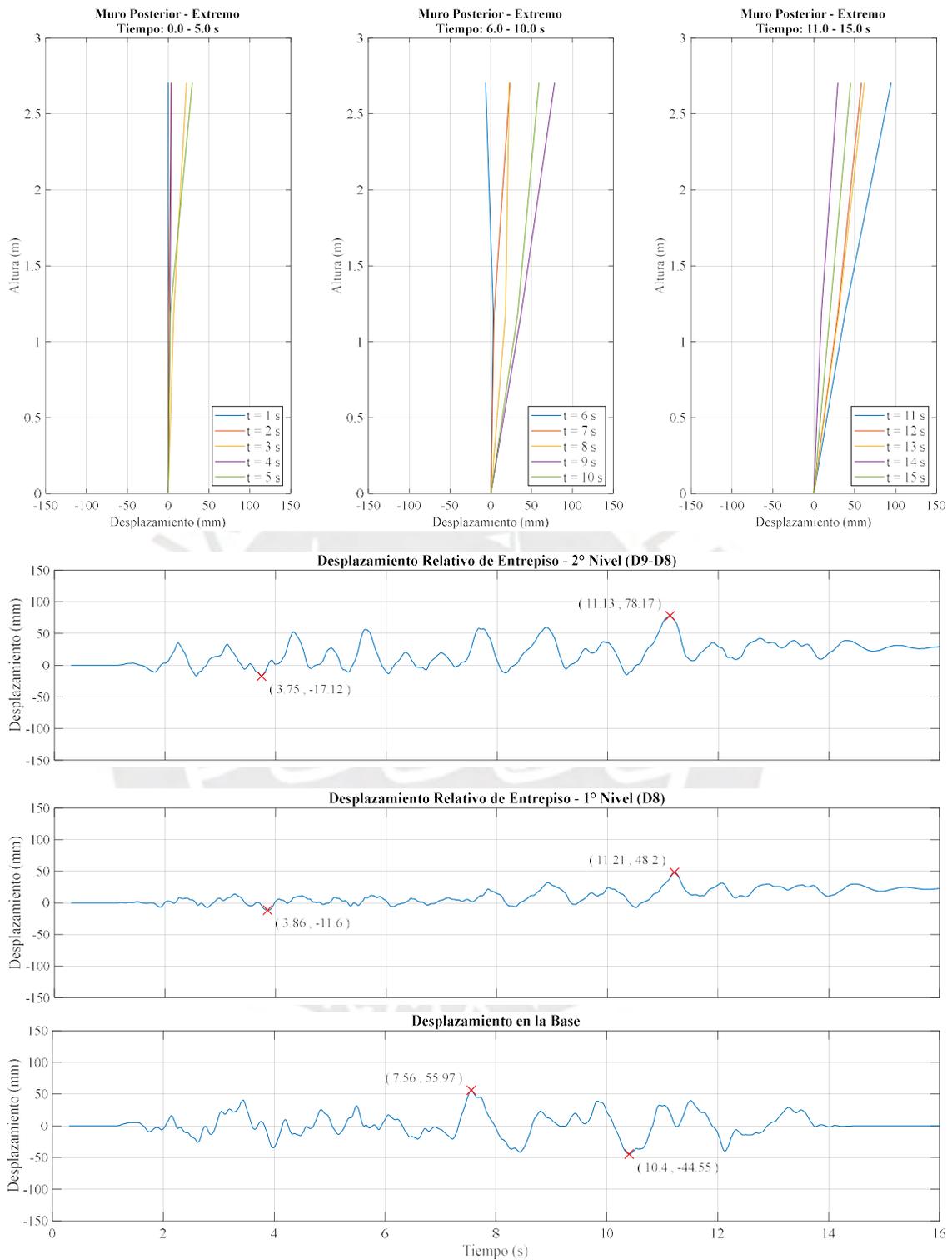


Figura 7.29 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

7.2.3 MODELO SRM-2S-1

La Tabla 14 muestra los desplazamientos relativos de entrepiso (mm) que fueron registrados durante las 04 fases de ensayo a las que fue sometido el modelo SRM-2S-1.

Tabla 14 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), SRM-2S-1

LVDT's		Fase 1		Fase 2		Fase 3		Fase 4	
		$(\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm})$		$(\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm})$		$(\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm})$		$(\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm})$	
		Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)
Base	D0	14.14	-11.16	28.35	-22.34	56.35	-44.40	56.15	-44.48
	D1	3.73	-4.13	13.88	-12.36	32.94	-21.32	55.84	-101.89
1er Nivel	D2	5.33	-5.17	13.69	-13.96	42.16	-24.26	65.47	-26.07
	D3	3.92	-4.68	11.53	-13.70	26.16	-25.65	44.82	-30.27
	D8	4.04	-4.63	13.75	-11.72	29.13	-19.56	44.57	-28.54
	D10	3.69	-5.28	11.76	-14.50	24.73	-28.55	38.81	-32.61
2do Nivel	D4	4.34	-5.67	21.54	-12.97	48.41	-26.28	96.51	-45.64
	D5	3.15	-4.72	21.51	-12.38	38.93	-29.89	52.73	-41.31
	D6	3.87	-4.71	20.42	-11.92	40.10	-21.44	52.15	-34.33
	D9	3.79	-5.76	20.82	-14.47	42.89	-25.93	56.01	-34.38
	D11	4.08	-5.73	18.94	-11.47	36.54	-21.48	51.06	-29.84

En la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$), el modelo presentó pequeños desplazamientos de entrepiso, los que siguieron un comportamiento dentro del rango lineal. El máximo desplazamiento de entrepiso fue 5.73mm, que se produjo en el extremo del muro frontal del segundo piso. En el primer nivel, el máximo desplazamiento de entrepiso fue 5.33mm que se registró en la zona central del muro frontal.

En el muro frontal, a diferencia de lo que se observó en el modelo no reforzado (URM-2S-1), el modelo presentó deformaciones más uniformes entre la parte central y el extremo del muro (Figura 7.30 y 7.31).

En lo que respecta al muro lateral, a diferencia de lo que se observó en el modelo no reforzado (URM-2S-1), el presente modelo no sufrió marcadas deformaciones en la zona debajo del vano de la ventana del segundo nivel (Figura 7.32).

Referente al muro posterior, al igual que en el muro frontal, se presentaron deformaciones más uniformes entre la parte central y el extremo del muro (Figura 7.33 y 7.34).

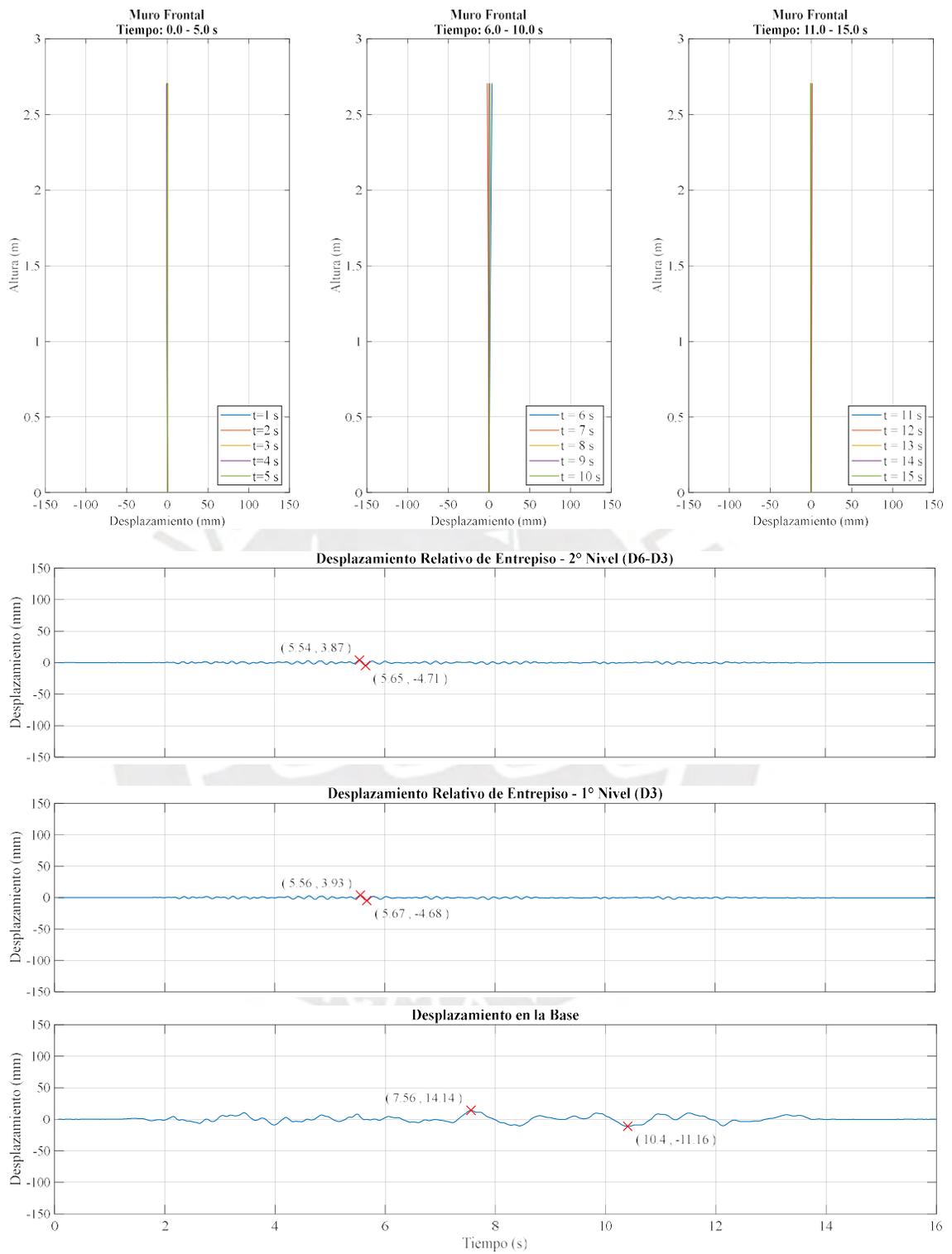


Figura 7.30 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

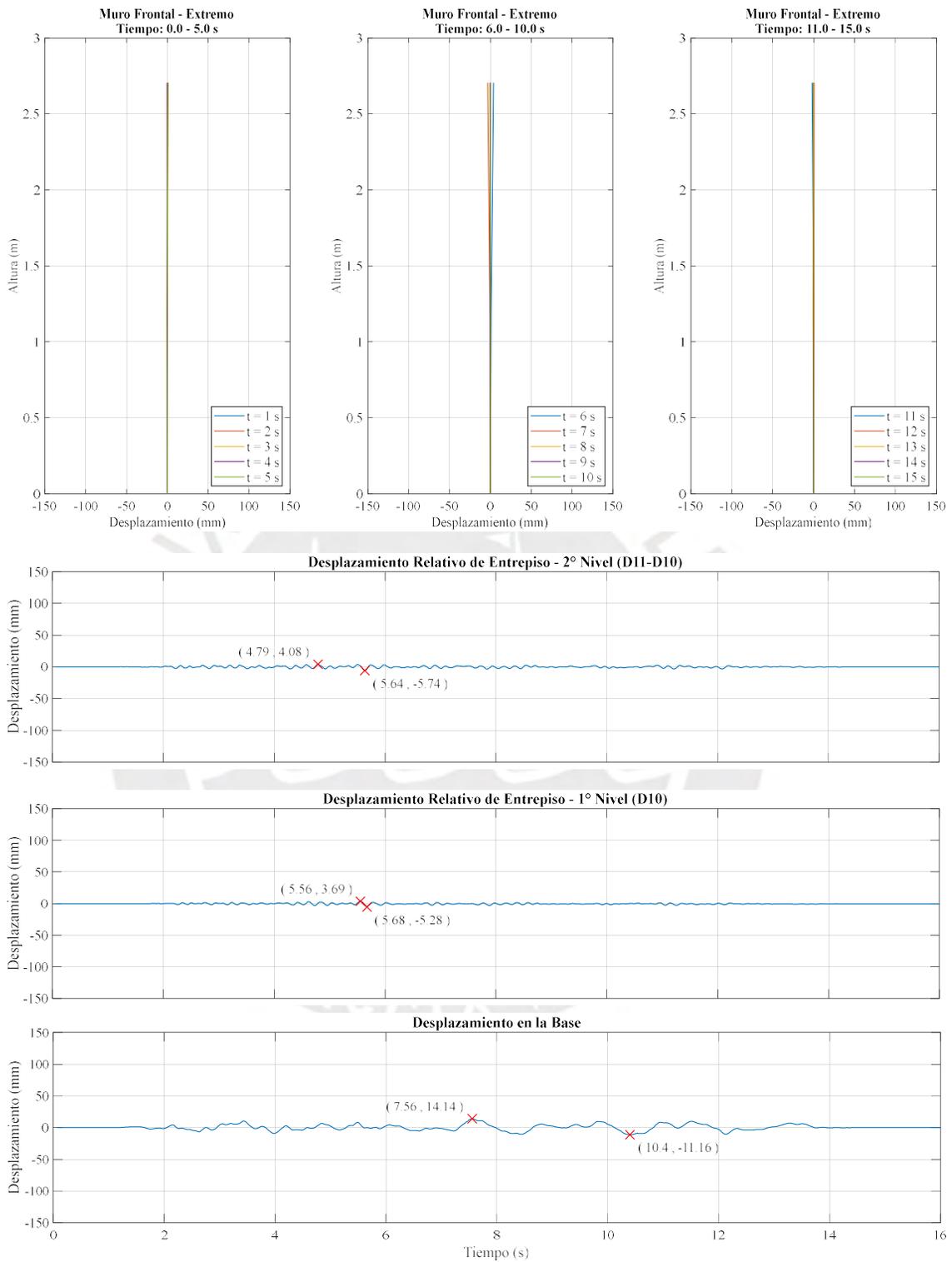


Figura 7.31 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

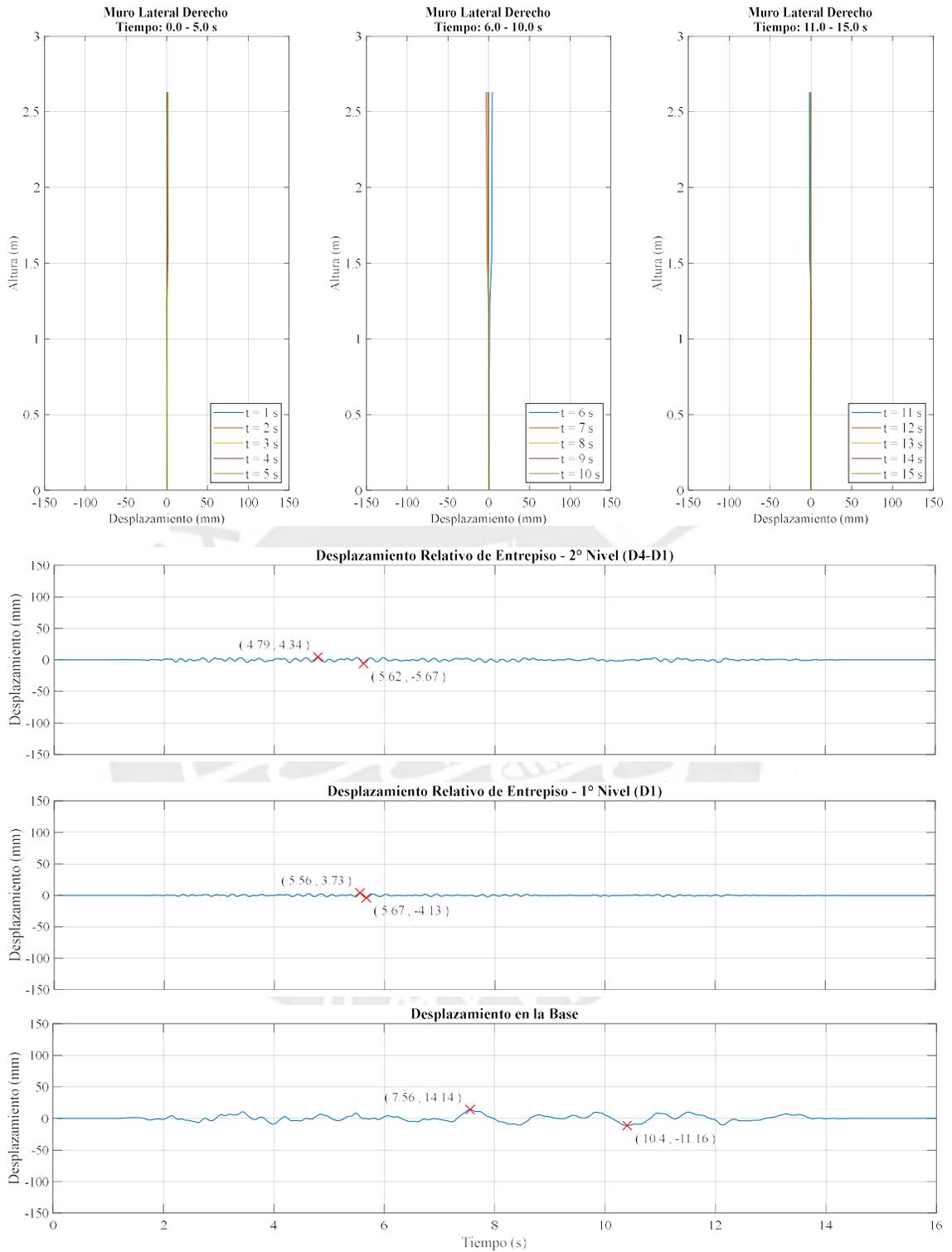


Figura 7.32 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

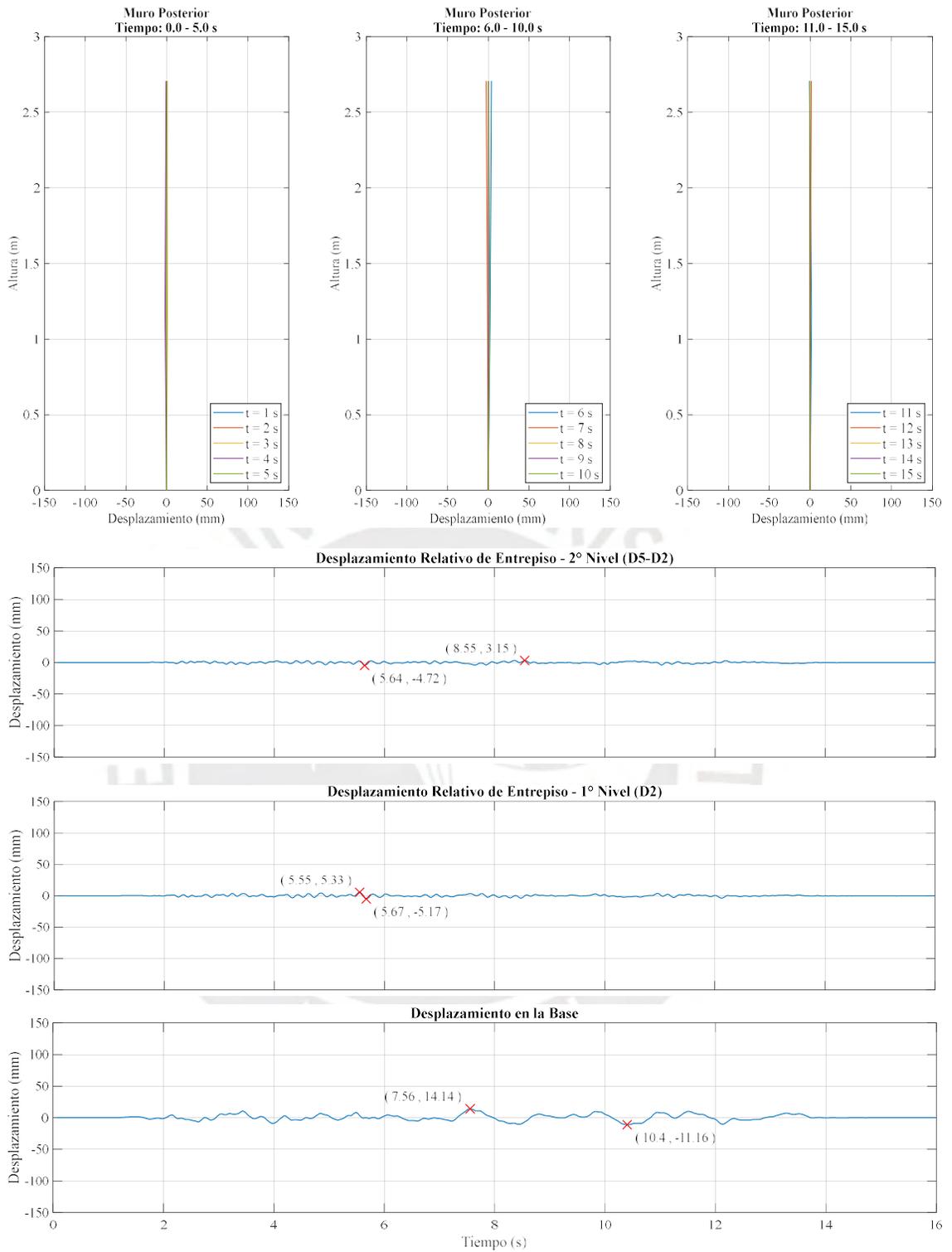


Figura 7.33 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

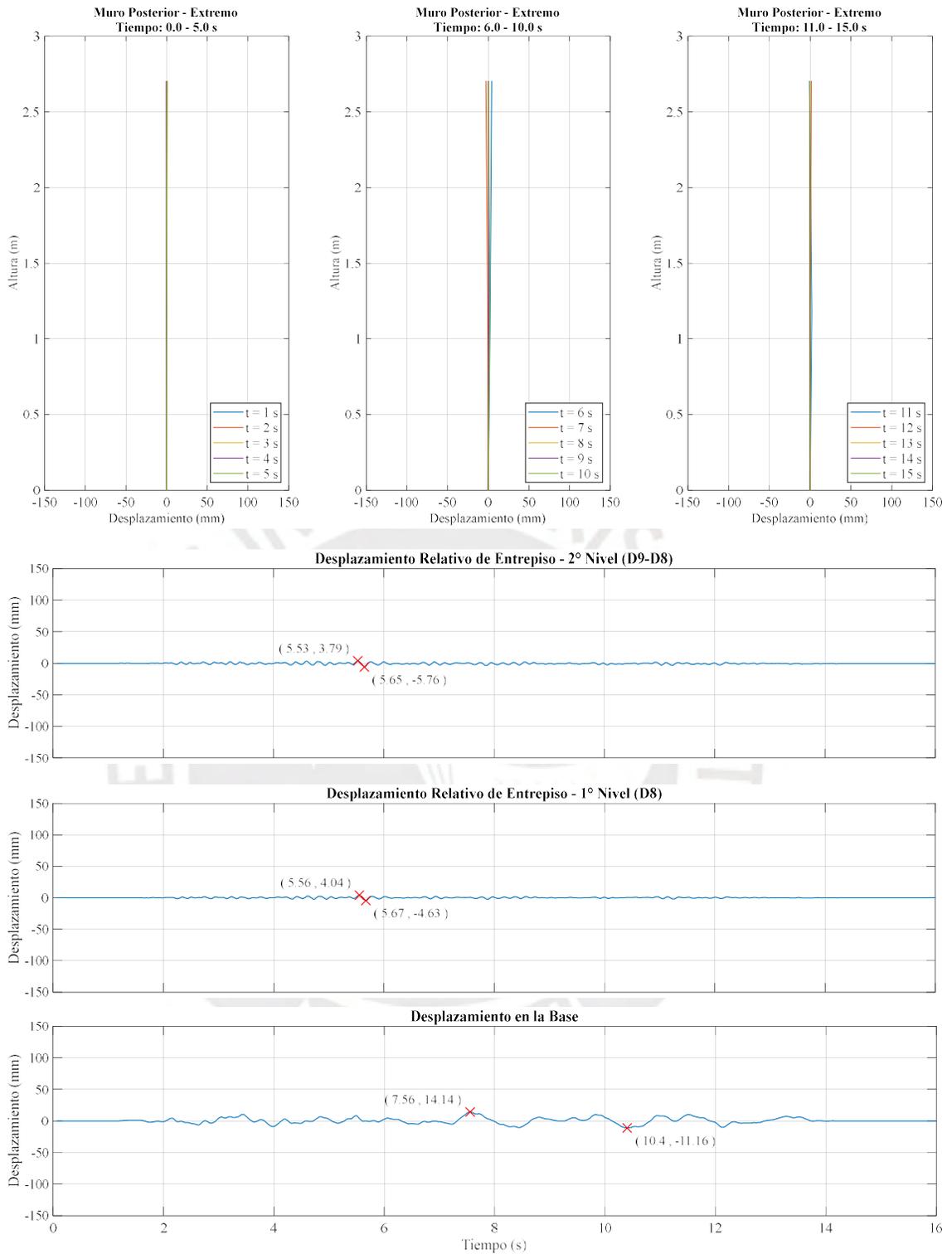


Figura 7.34 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase I (15 mm) - SRM-2S-1

En la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 30 \text{ mm}$), a pesar de que se formaron grietas horizontales a la mitad de la altura de los muros del primer y segundo nivel, se logró apreciar el gran aporte de la malla de cuerdas sintéticas para reducir y uniformizar los desplazamientos de entrepiso. Siendo importante mencionar que los máximos desplazamientos de entrepiso registrados en cada uno de los muros se dieron en el mismo instante.

En esta fase, el máximo desplazamiento relativo de entrepiso fue 20.82mm, que se registró en el extremo del muro posterior del segundo nivel. Mientras que, en el primer nivel, el máximo desplazamiento de entrepiso fue 14.50mm, registrado en el extremo del muro frontal.

En referencia al muro frontal, este presentó deformaciones casi lineales tal como se muestra en las gráficas de elevación. Asimismo, al comparar los desplazamientos entre la parte central y extremo del muro se puede interpretar que la malla de cuerdas cumplió con la función de uniformizar los desplazamientos relativos de entrepiso (Figura 7.35 y 7.36).

En el muro lateral, se observa que las deformaciones se dieron de forma lineal. A su vez, la malla de cuerdas llegó a controlar las deformaciones que fueron notorias en el modelo no reforzado, específicamente de la zona debajo del vano de la ventana del segundo nivel. Además, se logra distinguir con facilidad las diferencias entre las historias en el tiempo de los desplazamientos relativos de entrepiso del modelo reforzado y no reforzando, donde en el primero de estos los desplazamientos fueron mucho menores y no se observaron cambios bruscos (Figura 7.37).

Finalmente, el muro posterior presentó desplazamientos lineales, cuya deformada se rigió a su primer modo de vibración, es decir que los desplazamientos en sus dos niveles se dieron en un mismo sentido, lo cual no sucedió en el modelo no reforzado. Asimismo, el muro reforzado no presentó deformaciones permanentes como si se observó en el modelo no reforzado.

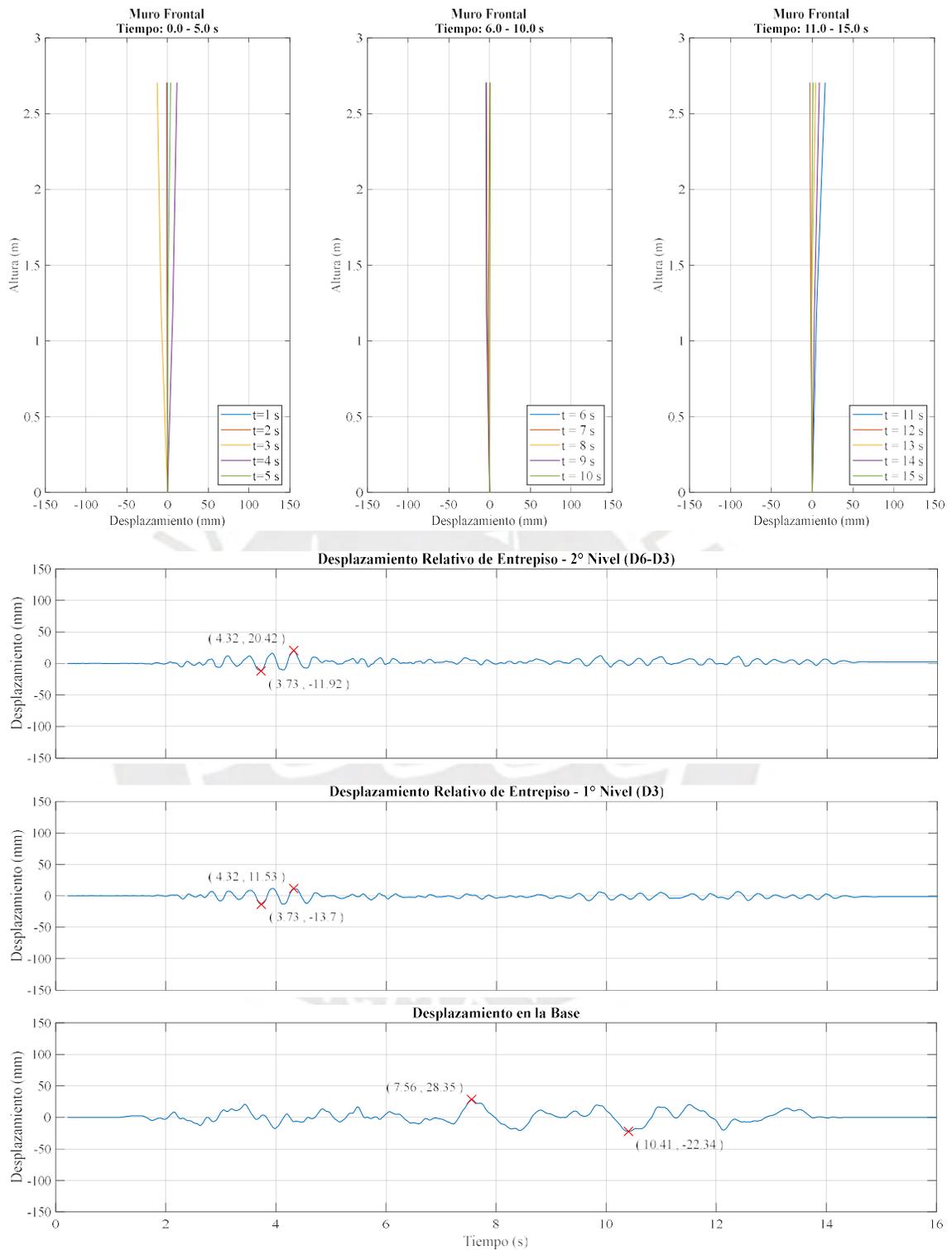


Figura 7.35 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

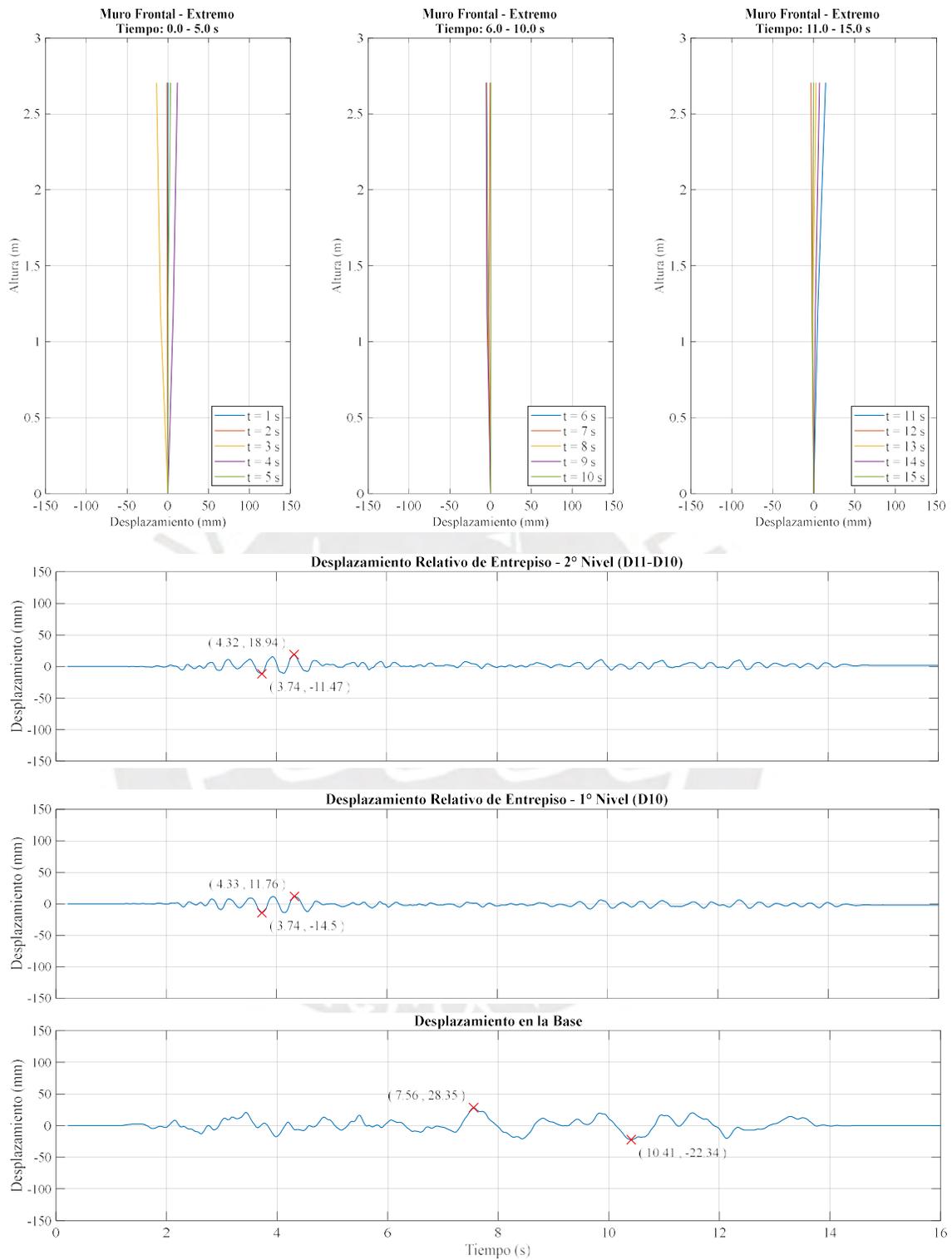


Figura 7.36 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

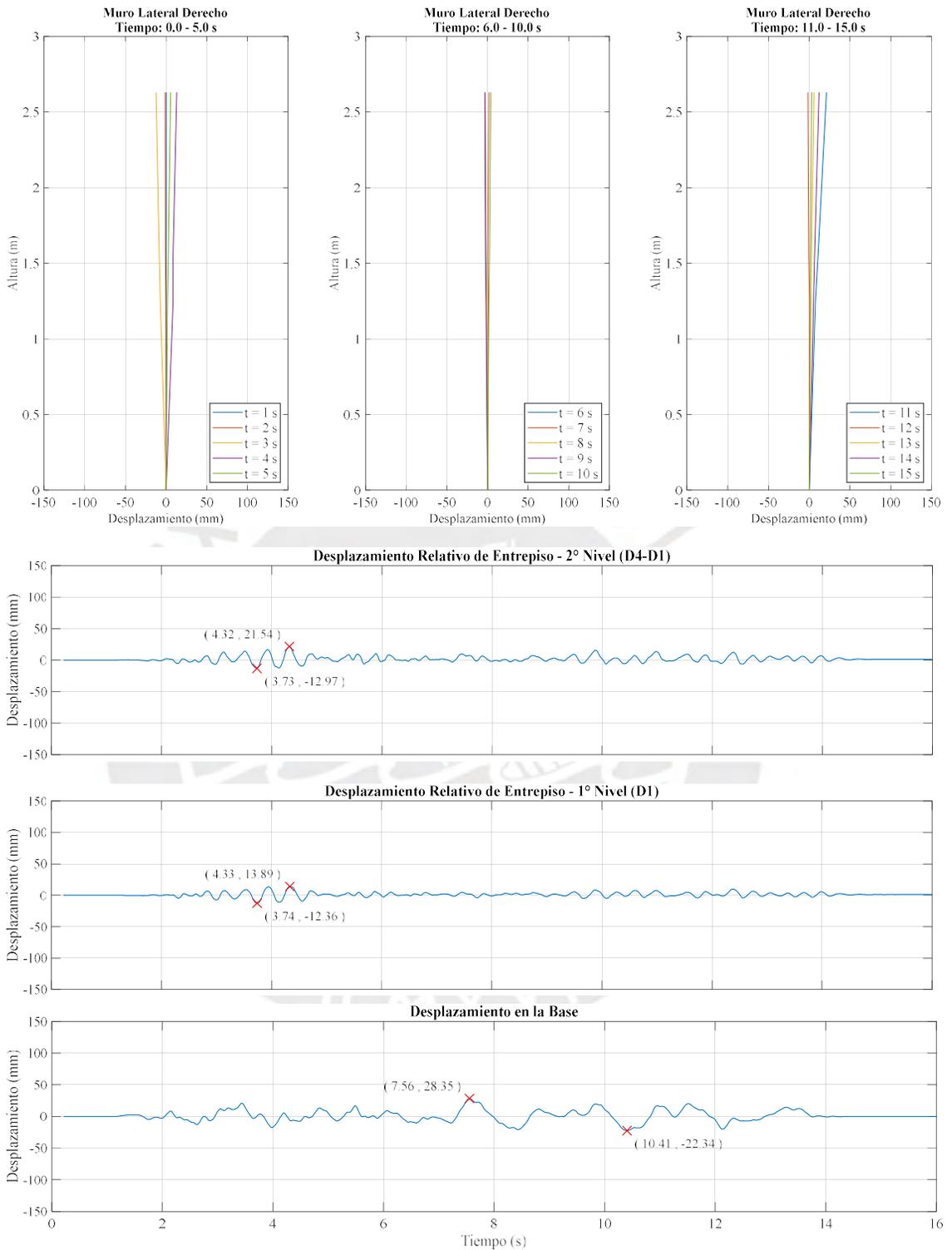


Figura 7.37 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

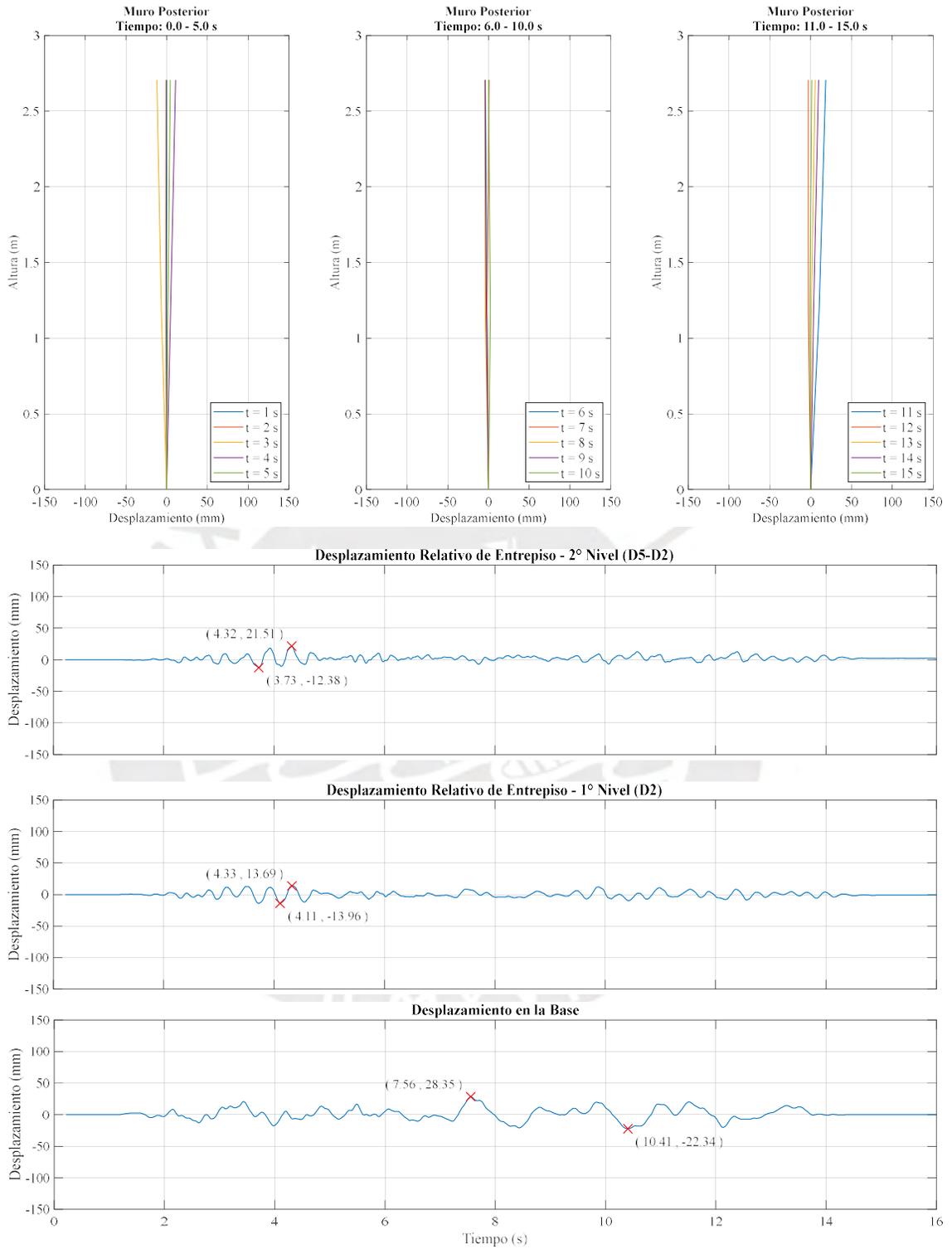


Figura 7.38 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

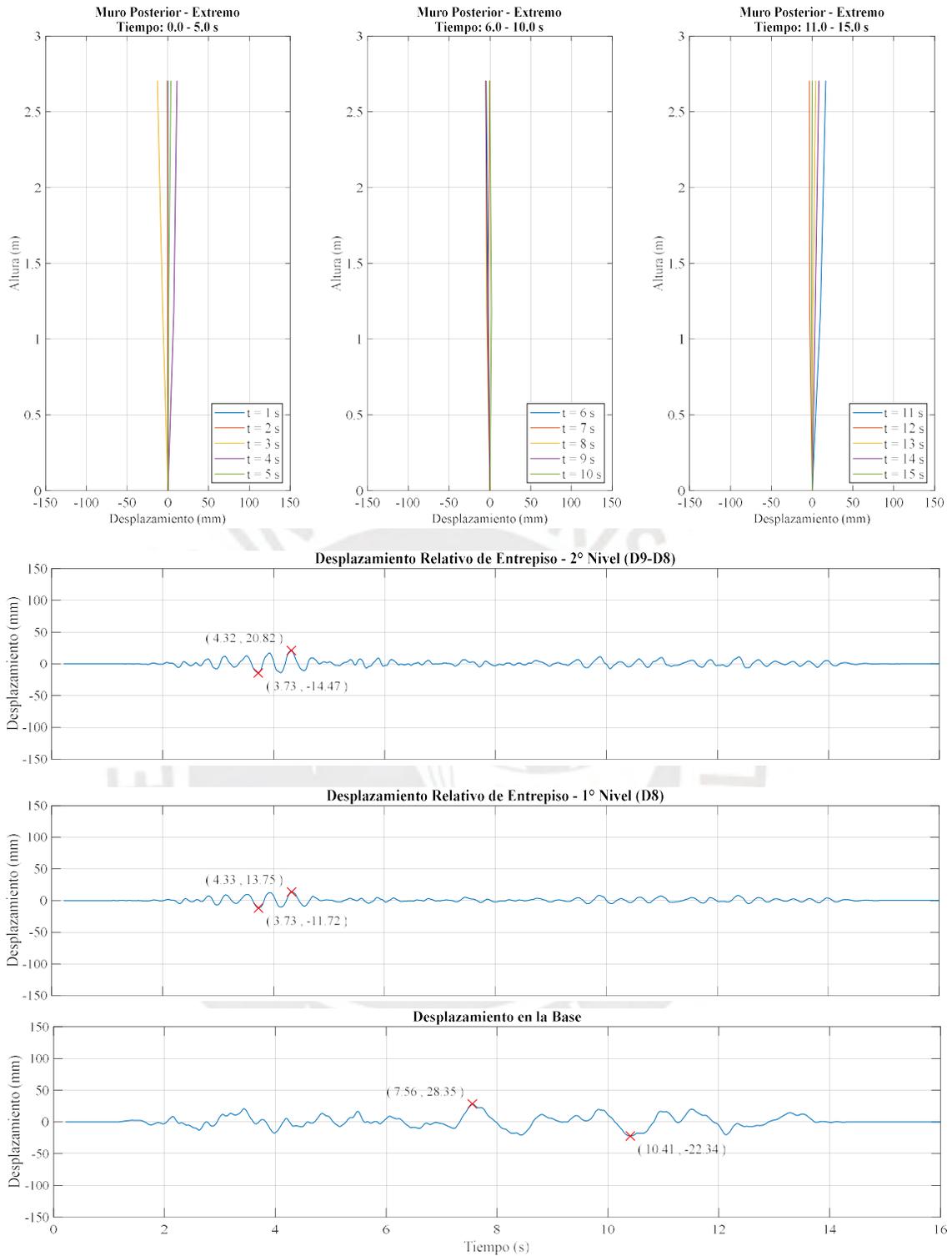


Figura 7.39 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

Si bien, en la tercera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) se observó la formación de bloques rígidos, el sistema de malla de cuerdas sintéticas logra aún uniformar las deformaciones de los muros. Pero ya se empieza a ver limitaciones en el aporte del refuerzo.

Los máximos desplazamientos relativos de entrepiso se registraron, para el primer nivel, en el muro posterior cuyo valor fue 42.16mm. Mientras que, para el segundo nivel, se registró en el muro lateral con un valor de 48.41mm. Es importante mencionar que, los máximos desplazamientos relativos de entrepiso de cada muro se presentaron al mismo instante en sus dos niveles.

En el muro frontal, se observa que las deformaciones se dieron de manera casi lineal rigiéndose aún a su primer modo de vibración. Se aprecia que los desplazamientos relativos de entrepiso del segundo nivel fueron ligeramente mayores a los del primero, lo que se encuentra reflejado en las vistas de elevación del muro. A su vez, la malla de cuerdas permitió que los desplazamientos registrados en la parte central del muro y en su extremo sean uniformes. Además, no se observaron desplazamientos permanentes en el modelo (Figura 7.40 y 7.41).

En referencia al muro lateral, este aún presentó deformaciones casi lineales, pero ya se empieza a ser notorio que el desplazamiento relativo de entrepiso del segundo nivel es mayor que del primero. Asimismo, se empieza a hacer más visibles las deformaciones del muro en la zona debajo del vano de la ventana del segundo nivel (Figura 7.42).

Respecto al muro posterior, si bien presentó deformaciones casi lineales, en esta fase ya se comienza a ver las limitaciones del aporte de la malla de cuerdas, ya que no logró uniformizar los desplazamientos de la parte central del muro del primer nivel con su extremo, es decir, que en la parte central del muro presentó mayores desplazamientos a los registrados en su extremo. Mientras que, en el segundo nivel, el refuerzo aún mantiene desplazamientos uniformes (Figura 7.43 y 7.45)

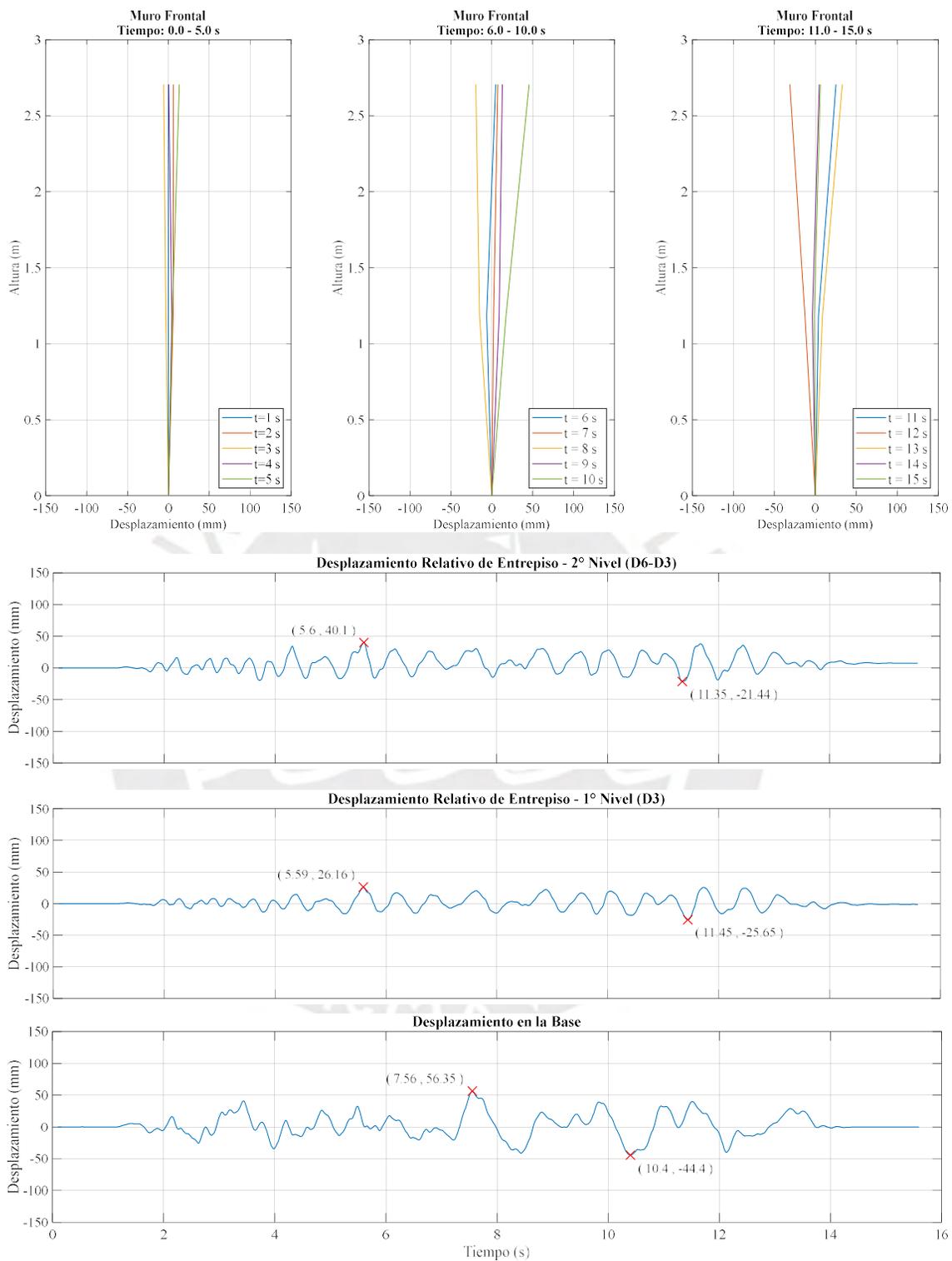


Figura 7.40 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

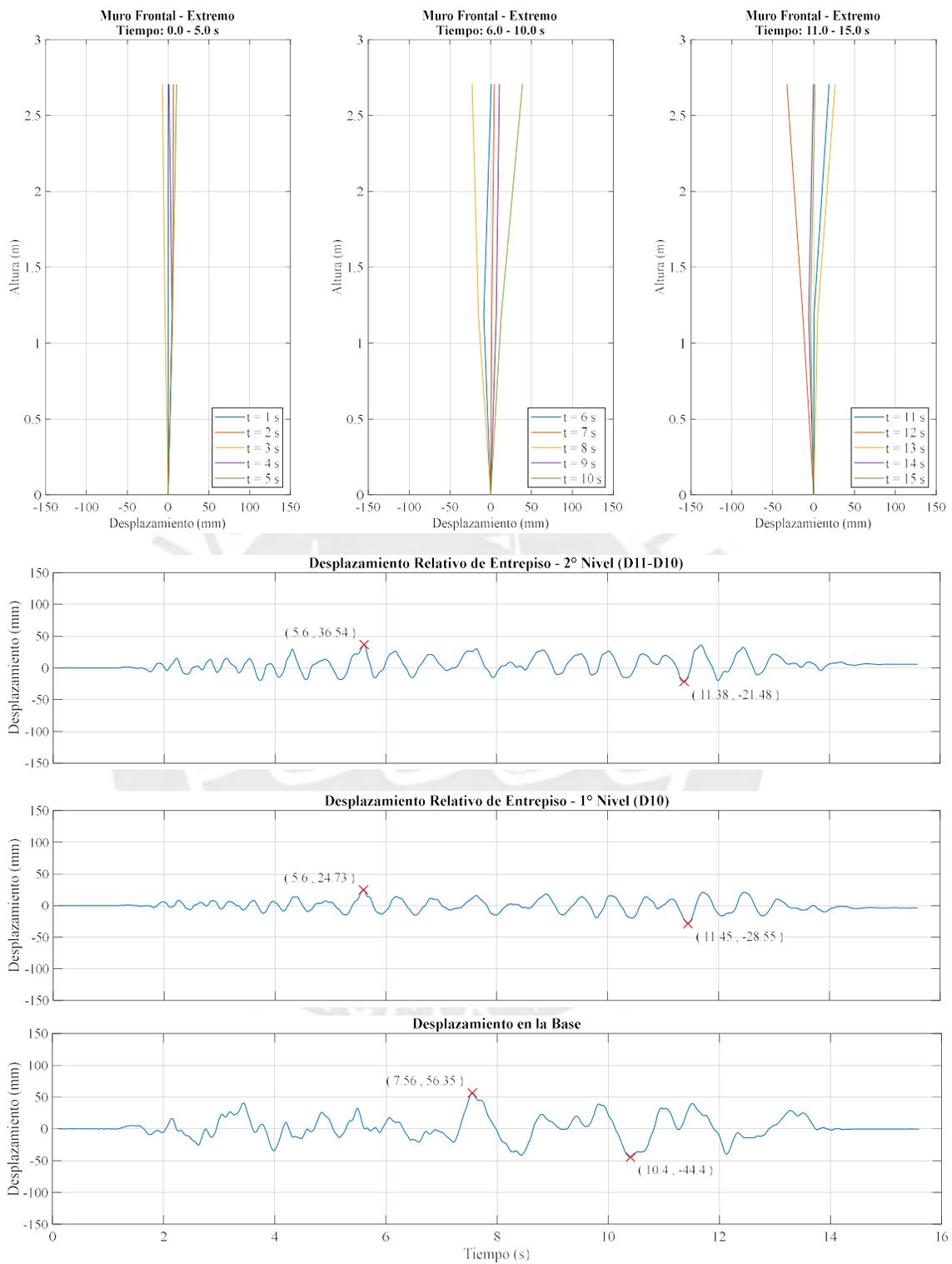


Figura 7.41 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

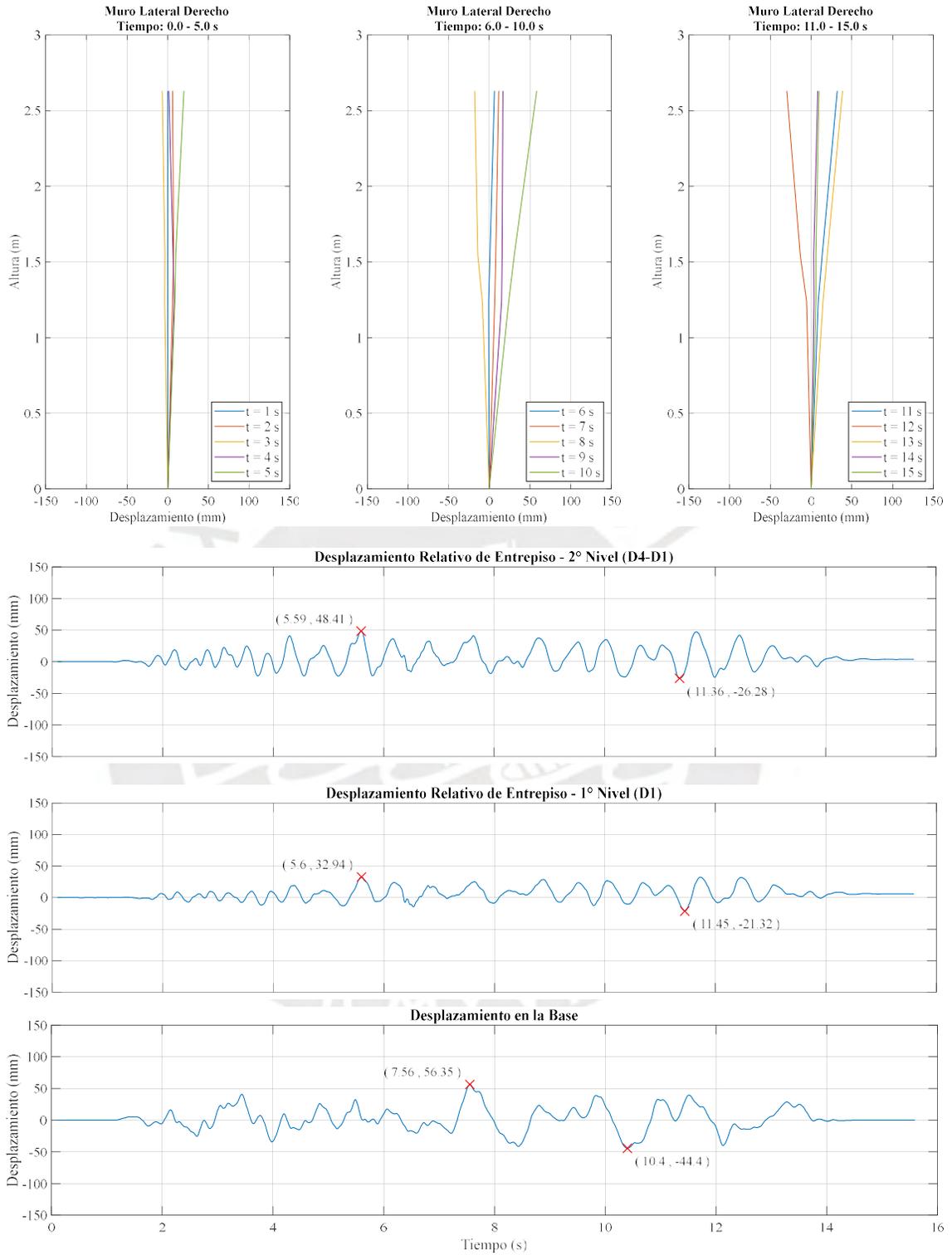


Figura 7.42 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

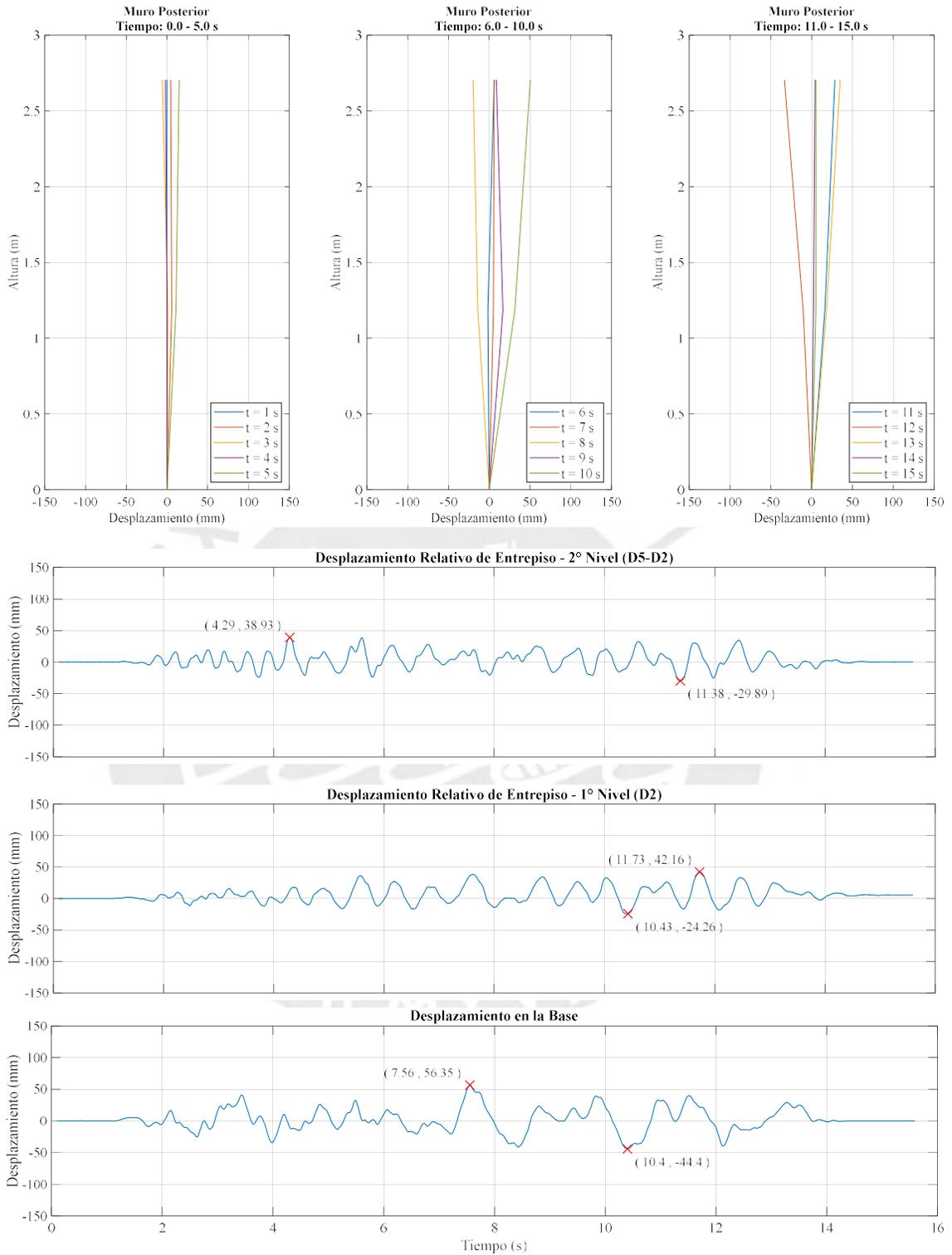


Figura 7.43 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

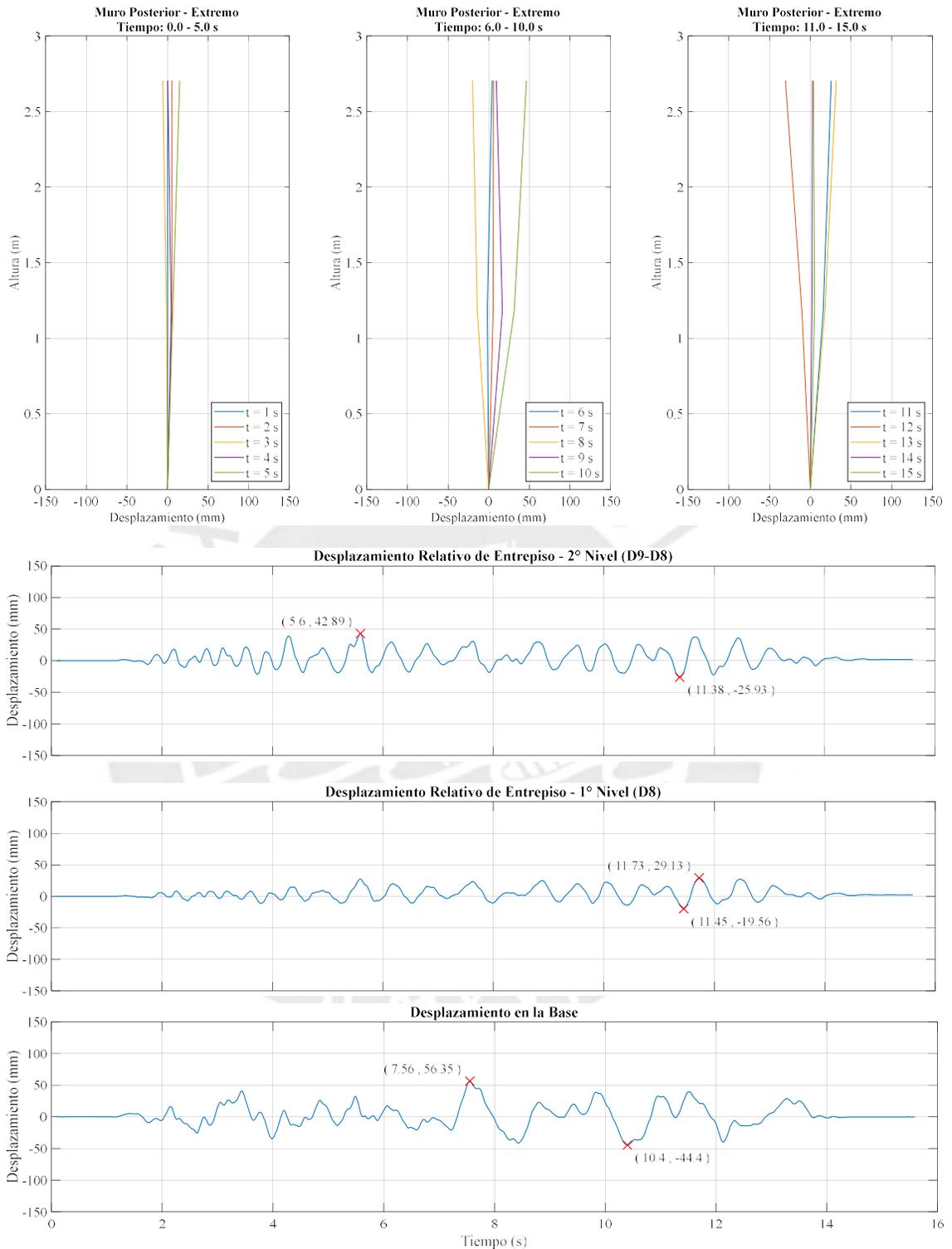


Figura 7.44 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

Durante la cuarta fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), se observó la formación de severas grietas que dieron creación a nuevos bloques rígidos. Se produjo también la separación de los muros con las vigas diafragmas de madera. Es importante mencionar que, si bien el modelo sufrió severos daños, a diferencia de lo observado en el modelo no reforzado, la contribución de la malla de cuerdas evitó el volteo de los bloques rígidos que hubieran conllevado al colapso de la estructura.

Los máximos desplazamientos de entrepiso en el primer y segundo nivel se dieron en el muro lateral, alcanzando los valores de 101.89mm y 96.51mm, respectivamente.

Respecto al muro frontal, éste presentó deformaciones uniformes entre la zona central y su extremo durante la primera mitad del ensayo. Siendo la segunda mitad ($t=8\text{s}$), donde se produjo de manera notoria la separación del muro con las vigas diafragmas de madera, esto conllevó a que se presenten apreciables variaciones, ya que la parte central empezó a sufrir mayores desplazamientos que su extremo (Figura 7.45 y 7.46).

En el muro lateral, se presentaron los máximos desplazamientos de entrepiso que coincidentemente se dieron al mismo tiempo, pero en sentidos opuestos. Asimismo, se hizo evidente la tendencia que presentaba el muro del primer nivel a sufrir un desplazamiento permanente. Además, fueron apreciables los desplazamientos registrados en la zona del muro ubicado bajo el vano de la ventana del segundo nivel (Figura 7.47).

En referencia al muro posterior, en el segundo nivel se tuvo desplazamientos uniformes tanto en la parte central como en su extremo, lo cual no sucedió en el primer nivel, ya que en la parte central del muro se tuvo mayores desplazamientos que en su extremo. Además, en los dos niveles del muro, la parte central del muro sufrió apreciables desplazamientos permanentes (Figura 7.48 y 7.49).

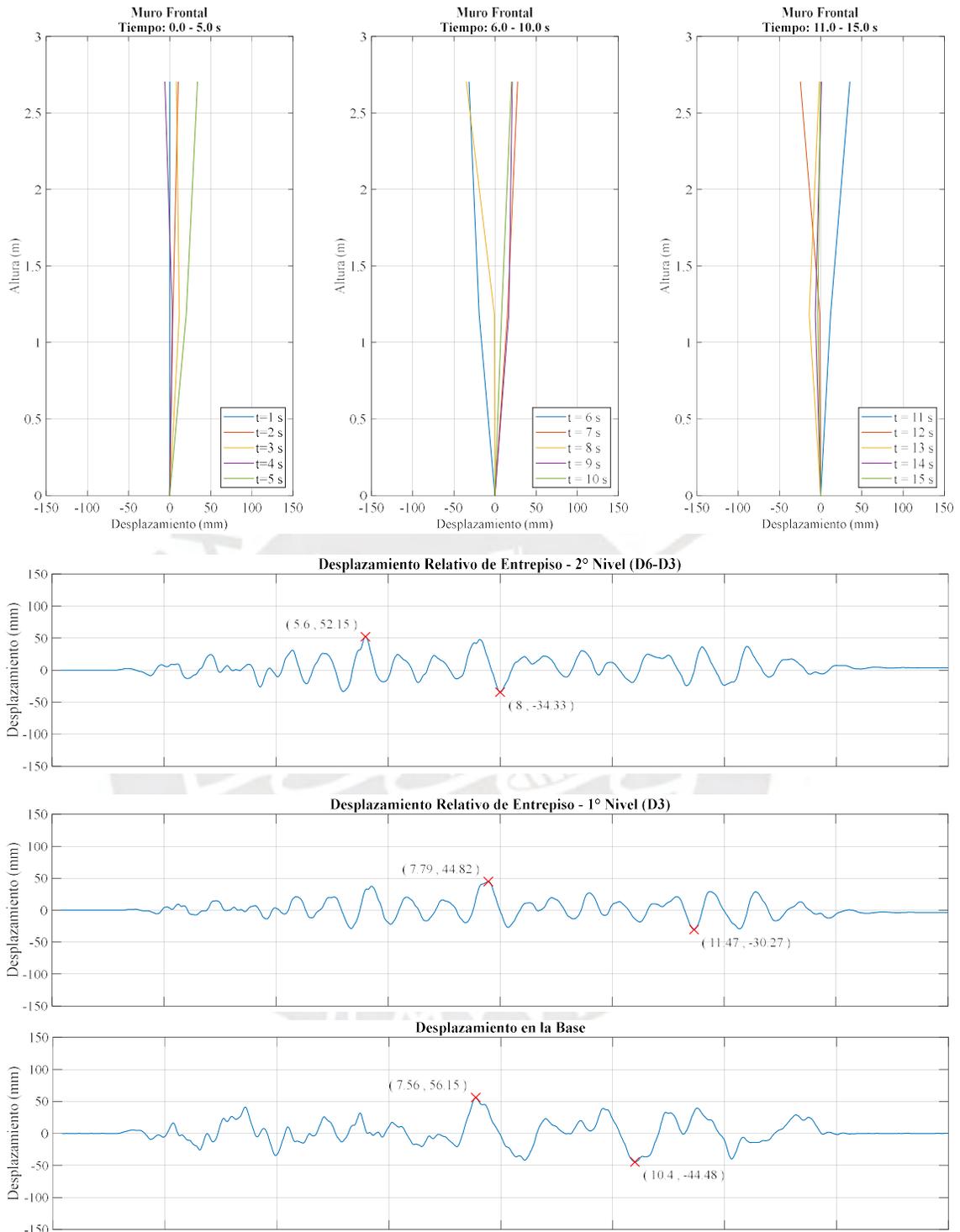


Figura 7.45 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

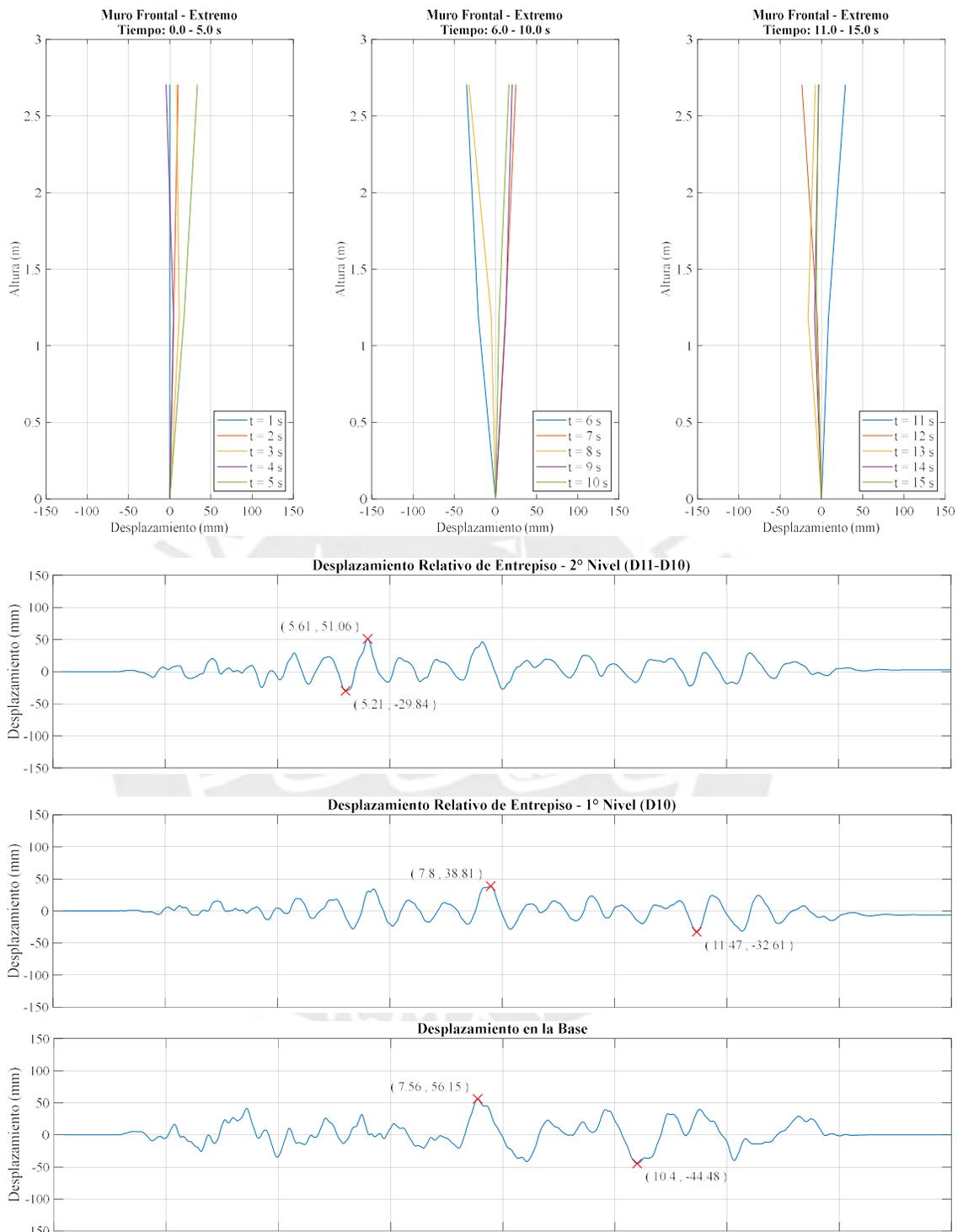


Figura 7.46 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

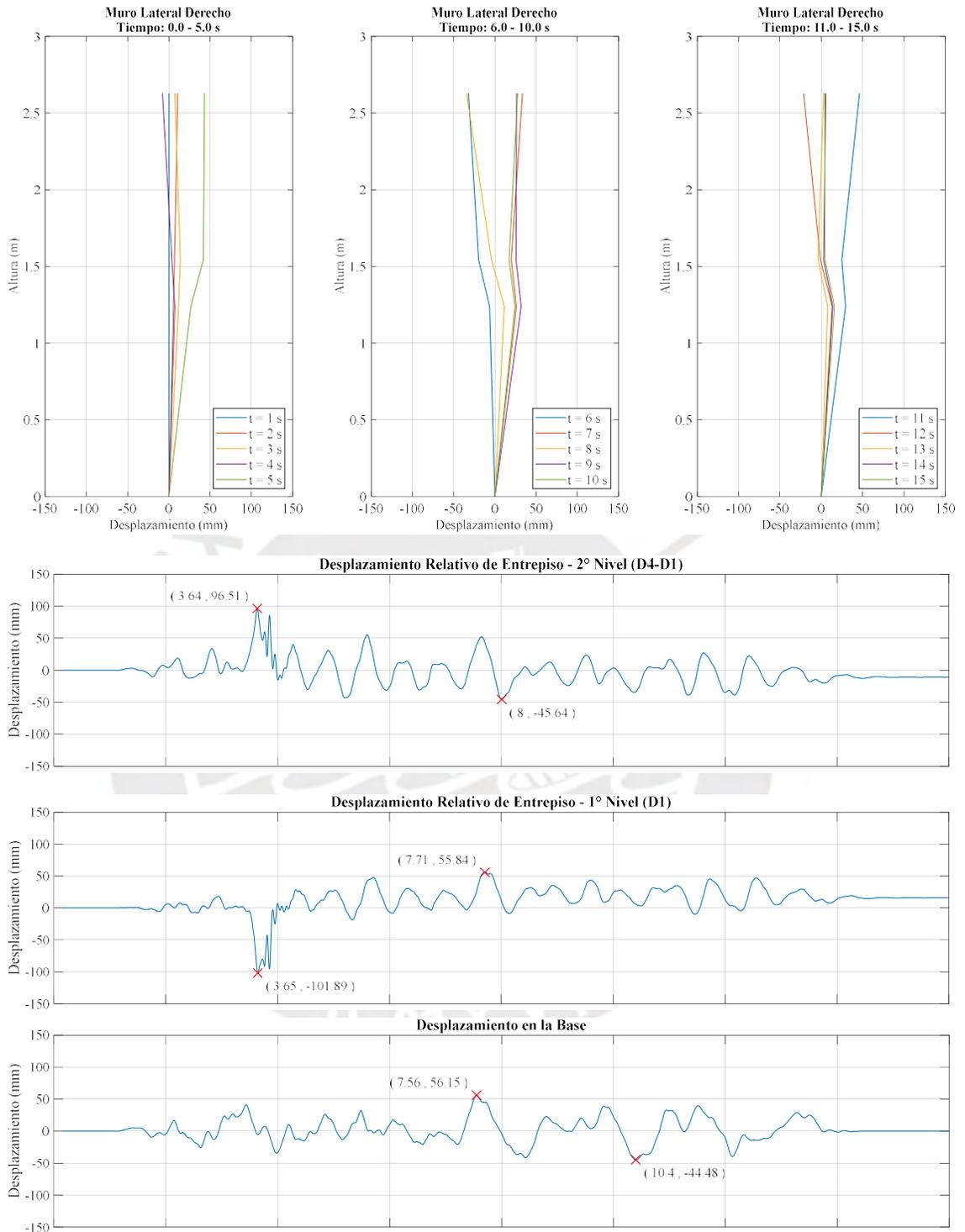


Figura 7.47 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

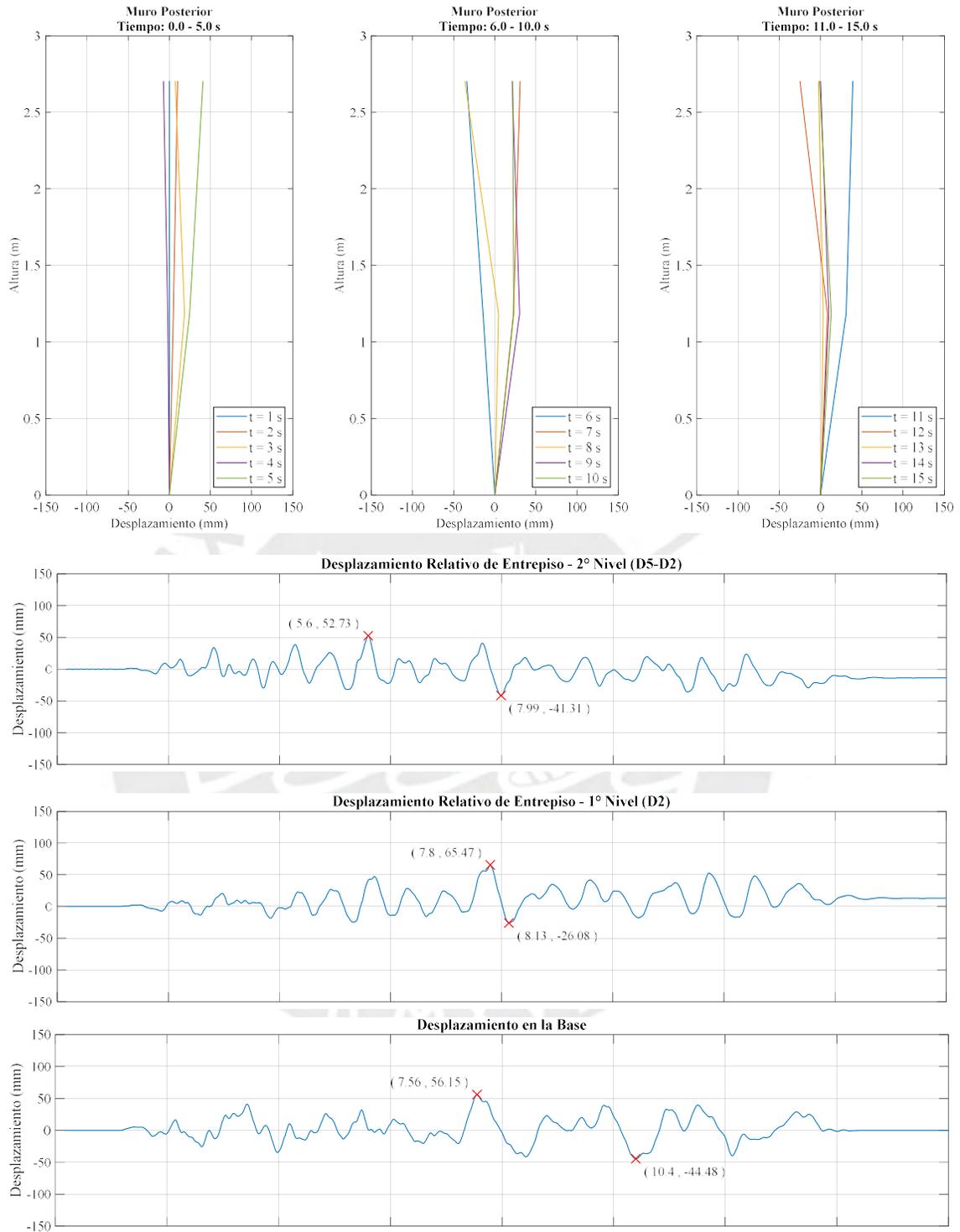


Figura 7.48 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

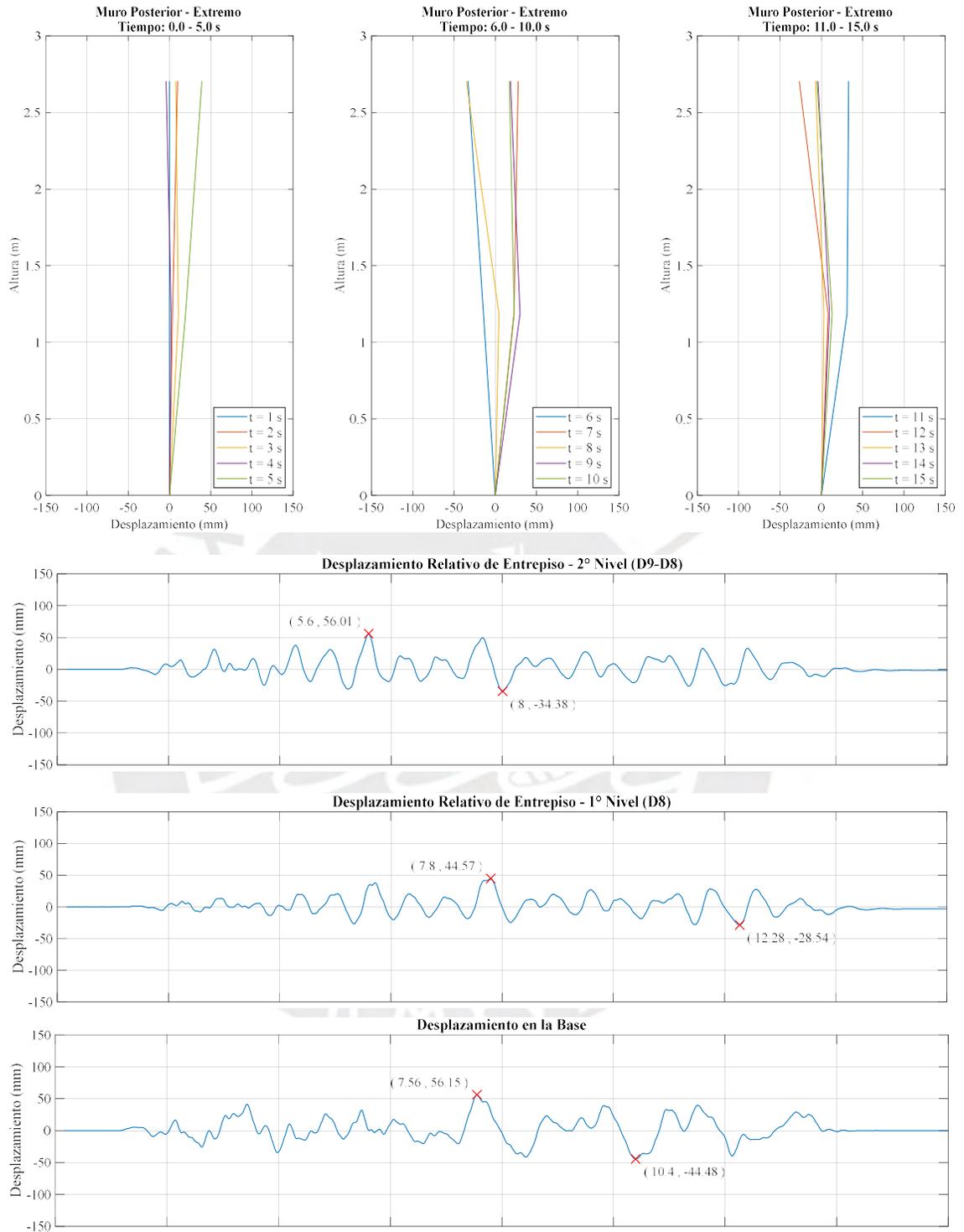


Figura 7.49 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

7.2.4 MODELO SRM-2S-2

La Tabla 15 muestra los desplazamientos relativos de entrepiso (mm) que fueron registrados durante las dos fases de ensayo a las que fue sometido el modelo SRM-2S-2.

Tabla 15 Máximos Desplazamientos Relativos de Entrepiso (mm), SRM-2S-2

LVDT's	Fase 1		Fase 2		
	$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$		
	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	
Base	D0	57.24	-45.41	57.27	-45.26
	D1	33.73	-30.70	29.98	-31.37
1er Nivel	D2	58.46	-9.11	43.99	-20.09
	D3	46.27	-24.14	35.54	-27.42
	D8	48.01	-10.37	36.70	-18.57
	D10	45.68	-25.02	36.60	-26.48
2do Nivel	D4	47.03	-29.77	55.75	-36.85
	D5	32.49	-52.17	38.65	-43.76
	D6	33.25	-31.11	41.11	-32.43
	D9	49.69	-43.24	73.69	-35.26
	D11	43.17	-29.39	40.55	-34.42

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60 \text{ mm}$), el modelo sufrió un severo daño, donde se presentaron grietas horizontales a la altura de los vanos de las ventanas y puerta, y grietas diagonales que dieron formación a bloques rígidos. Asimismo, se produjeron deformaciones permanentes en las zonas de los dos entrepisos.

Los máximos desplazamientos de entrepiso en cada nivel se dieron en el muro posterior, donde se alcanzó valores de 58.46mm y 52.17mm para el primer y segundo piso, respectivamente.

En lo que respecta al muro frontal, en el primer nivel se observa que, a pesar de haberse formado un plano de falla horizontal a la altura del vano de la puerta, esto no generó variaciones considerables entre la parte central del muro y su extremo, es decir, en ambas zonas los desplazamientos fueron similares. Mientras que en el segundo nivel sucede lo contrario, es decir, se registraron mayores desplazamientos en el extremo del muro que en la parte central de éste. Cabe mencionar que en este nivel también se generó un plano de falla horizontal, justo a la altura del vano de la ventana (Figura 7.50 y 7.51).

En el muro lateral se observa que durante los primeros 9 segundos del ensayo, los desplazamientos relativos de entrepiso del primer y segundo nivel fueron muy similares, siendo el ultimo de estos ligeramente superior. A su vez, el segundo nivel sufrió un desplazamiento permanente, tal como se puede observar en la Figura 7.52.

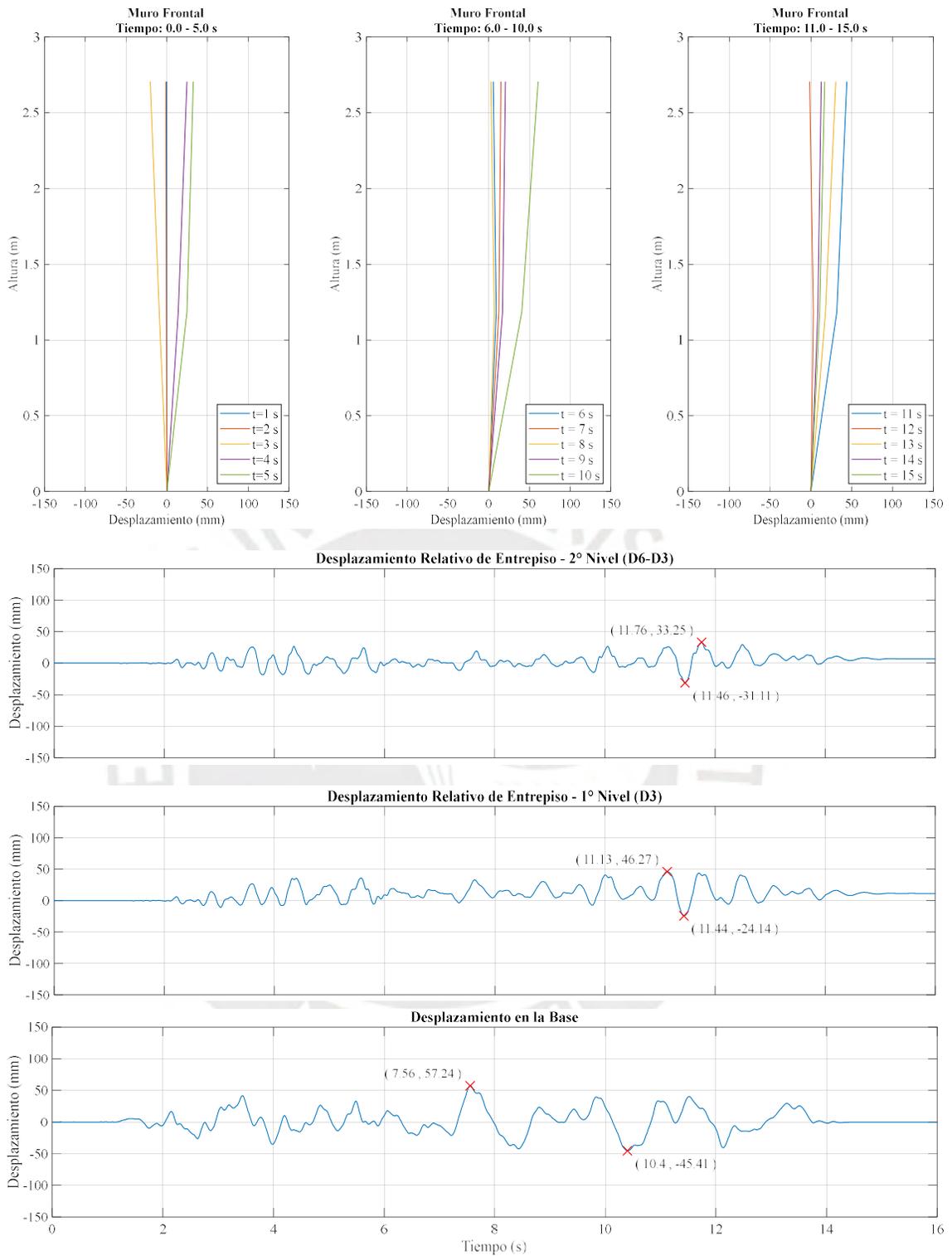


Figura 7.50 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

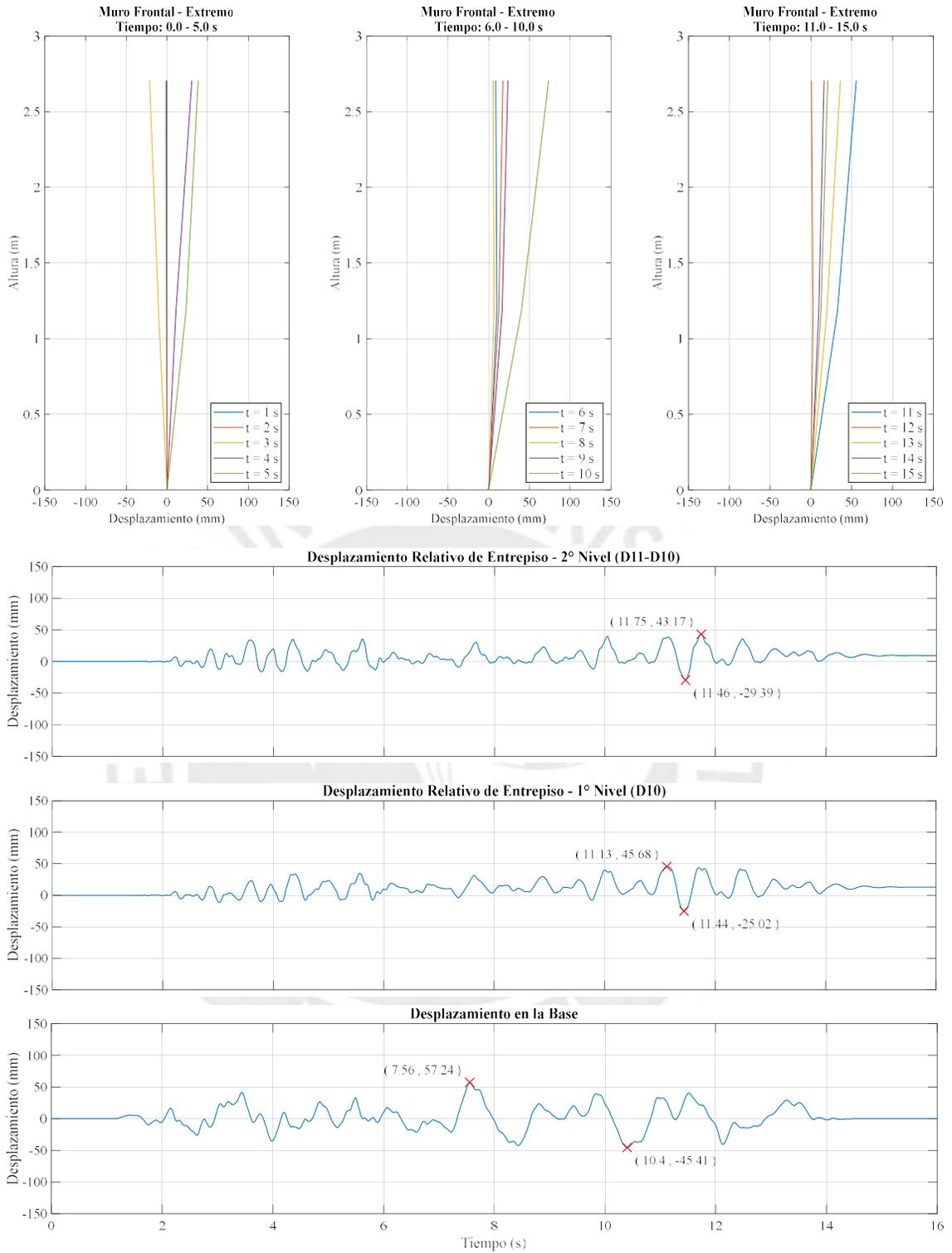


Figura 7.51 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

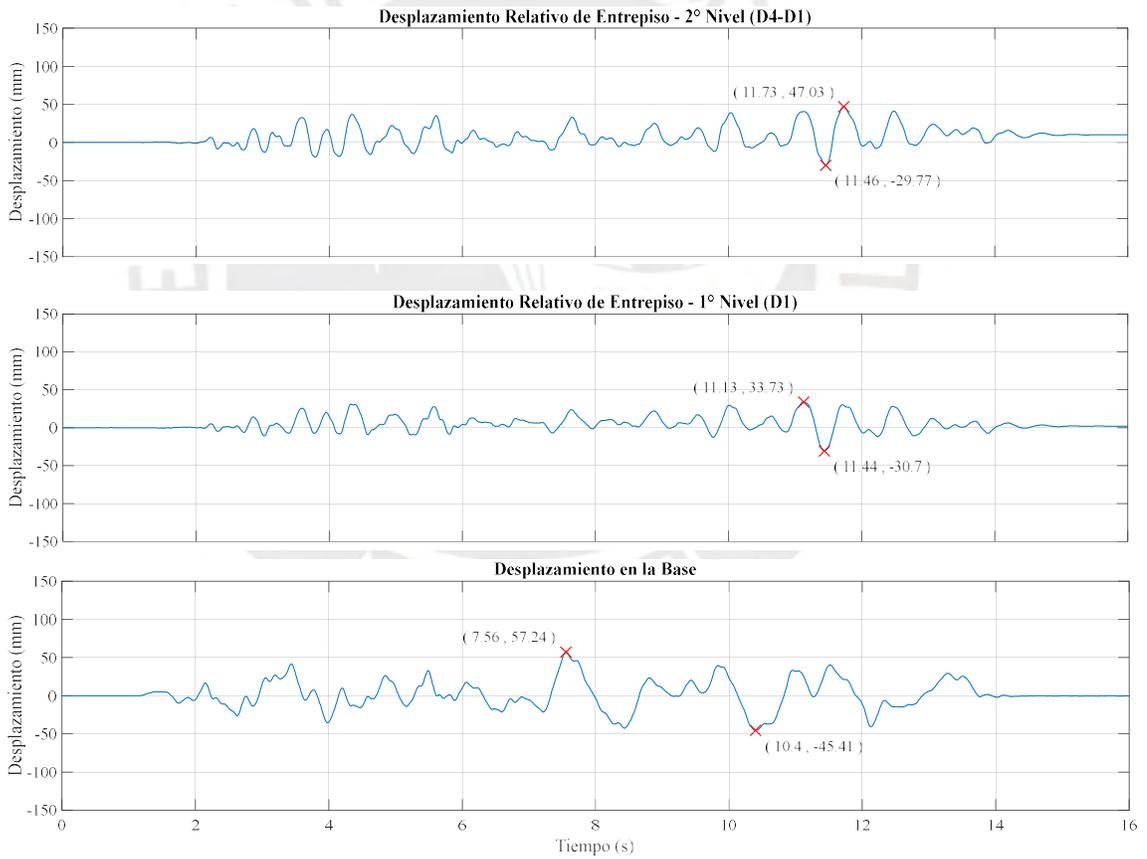
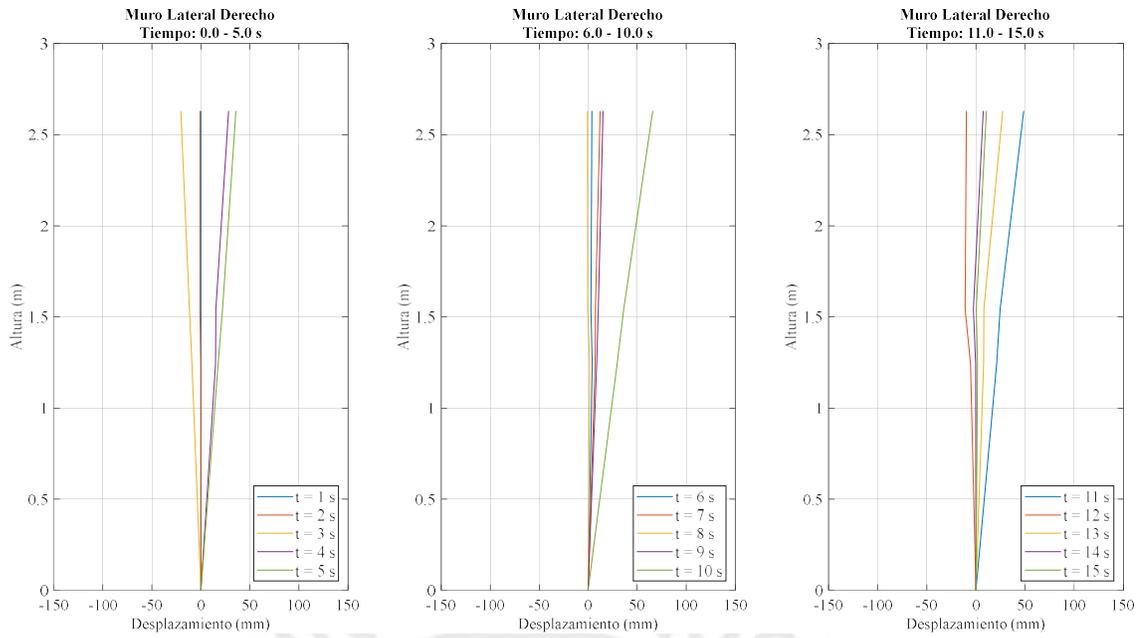


Figura 7.52 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

En el muro posterior, se formó un plano de falla horizontal en el primer nivel, que facilitó a que se presenten mayores desplazamientos en la zona central del muro que en su extremo. Lo mismo se repitió en el segundo nivel, pero sin un plano de falla (Figura 7.53 y 7.54)

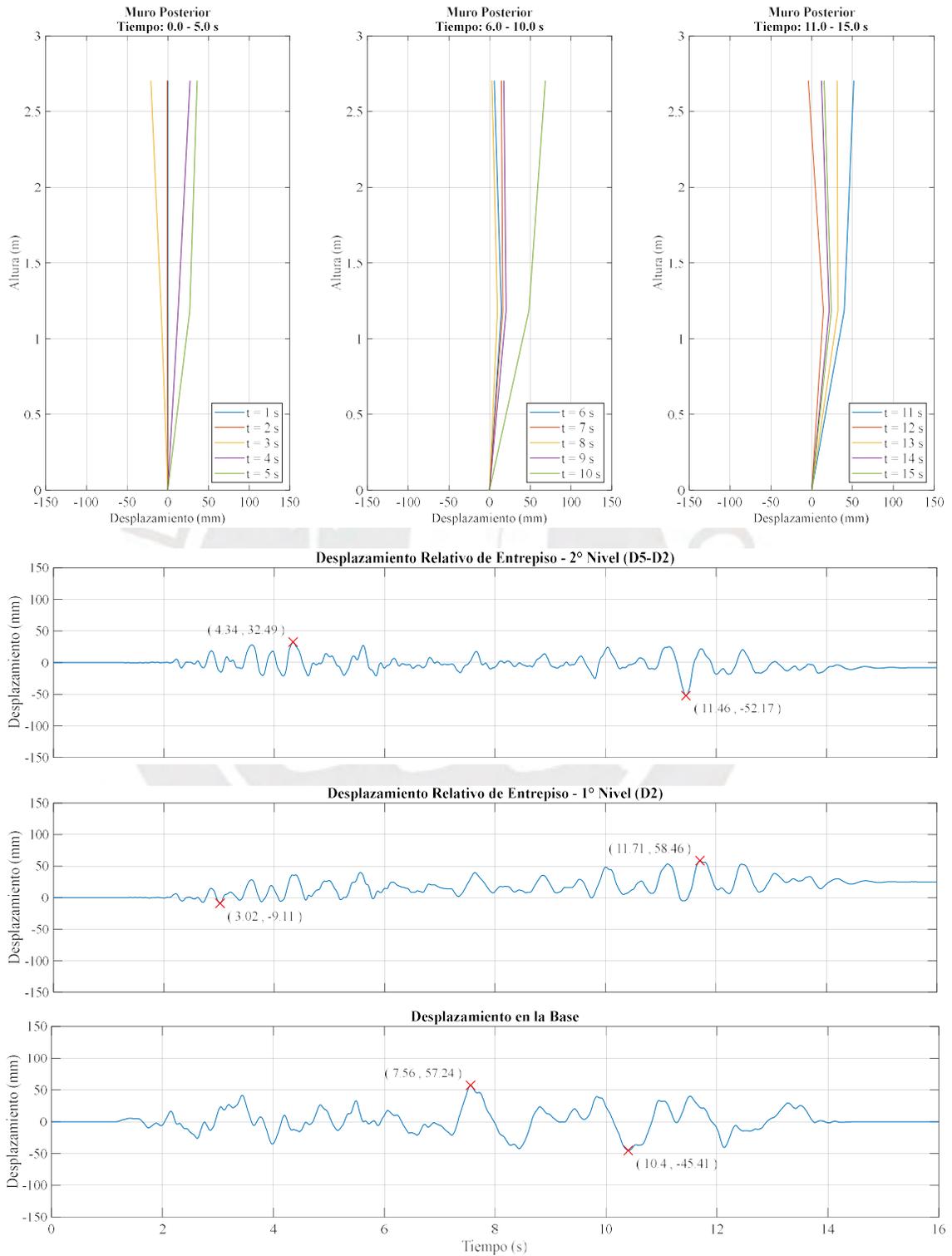


Figura 7.53 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

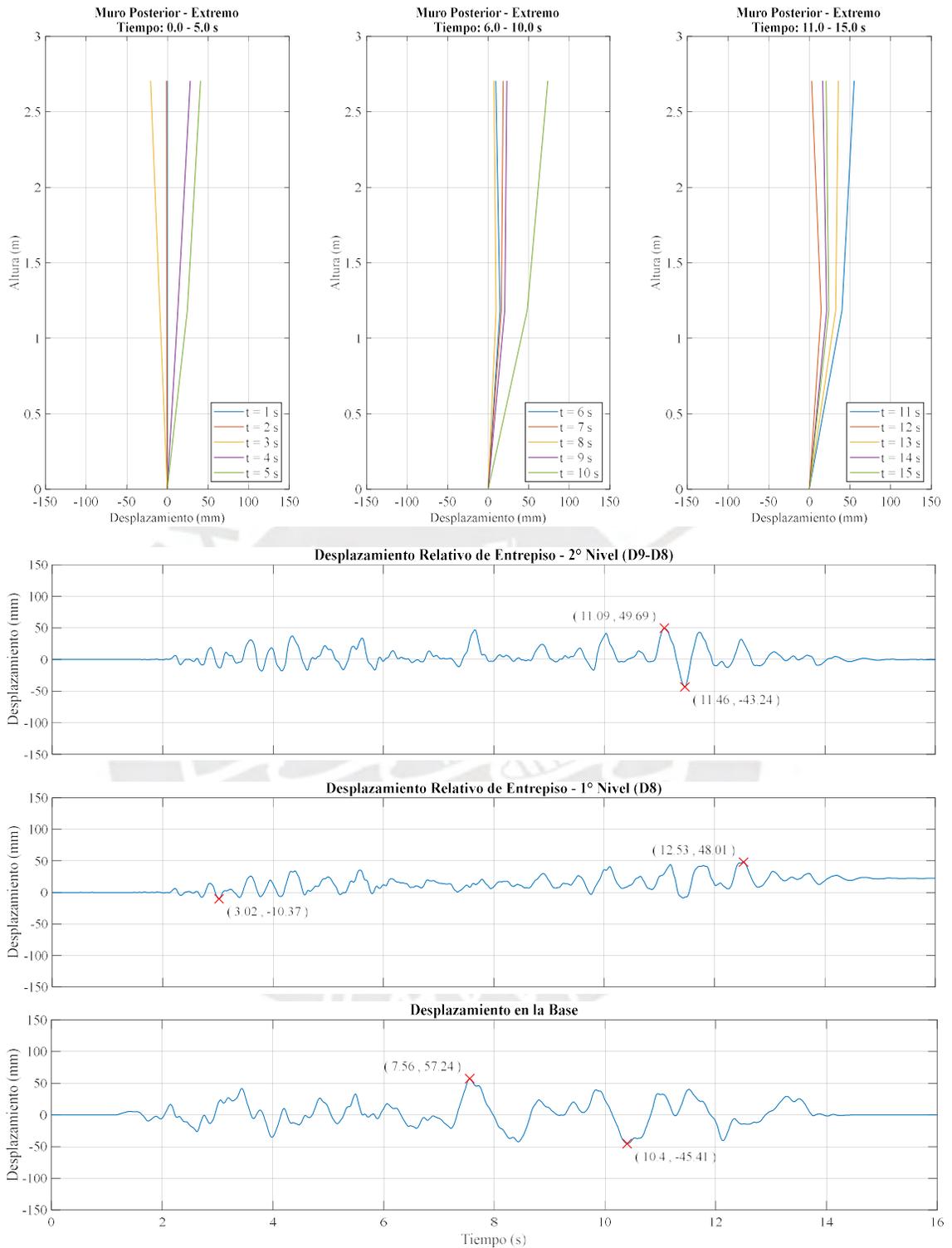


Figura 7.54 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase I (60 mm) - SRM-2S-2

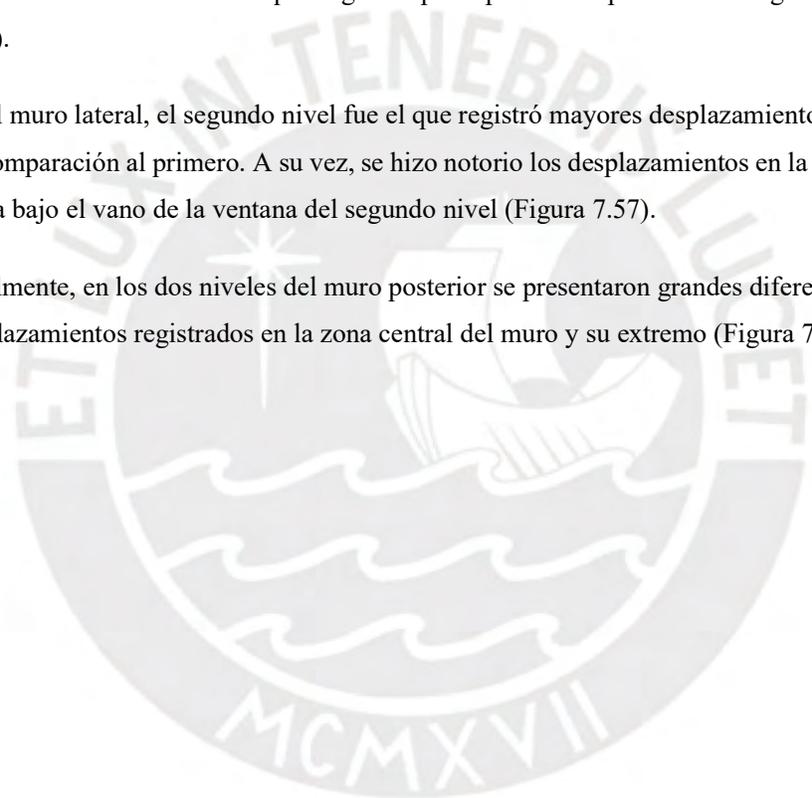
En la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm}$), se observó como el tambaleo de los bloques rígidos formados en el primer nivel sirvieron como un medio de disipación de energía.

Los máximos desplazamientos relativos de entrepiso se produjeron, para el primer nivel, en la parte central del muro posterior, cuyo valor fue 43.99mm. Mientras que, para el segundo nivel, se registró en el muro lateral, cuyo valor fue 55.75mm.

En los dos niveles del muro frontal, se dieron deformaciones uniformes entre la parte central del muro y su extremo. Asimismo, a partir de las vistas de perfil se logró observar que por momentos el primer piso se desplazaba más que el segundo nivel, mientras que en este último el desplazamiento era casi nulo. Esto permite contrastar lo señalado en párrafos anteriores, donde el tambaleo de los bloques rígidos aporta para la disipación de energía (Figura 7.55 y 7.56).

En el muro lateral, el segundo nivel fue el que registró mayores desplazamientos de entrepiso en comparación al primero. A su vez, se hizo notorio los desplazamientos en la zona del muro ubica bajo el vano de la ventana del segundo nivel (Figura 7.57).

Finalmente, en los dos niveles del muro posterior se presentaron grandes diferencias entre los desplazamientos registrados en la zona central del muro y su extremo (Figura 7.58 y 7.59).



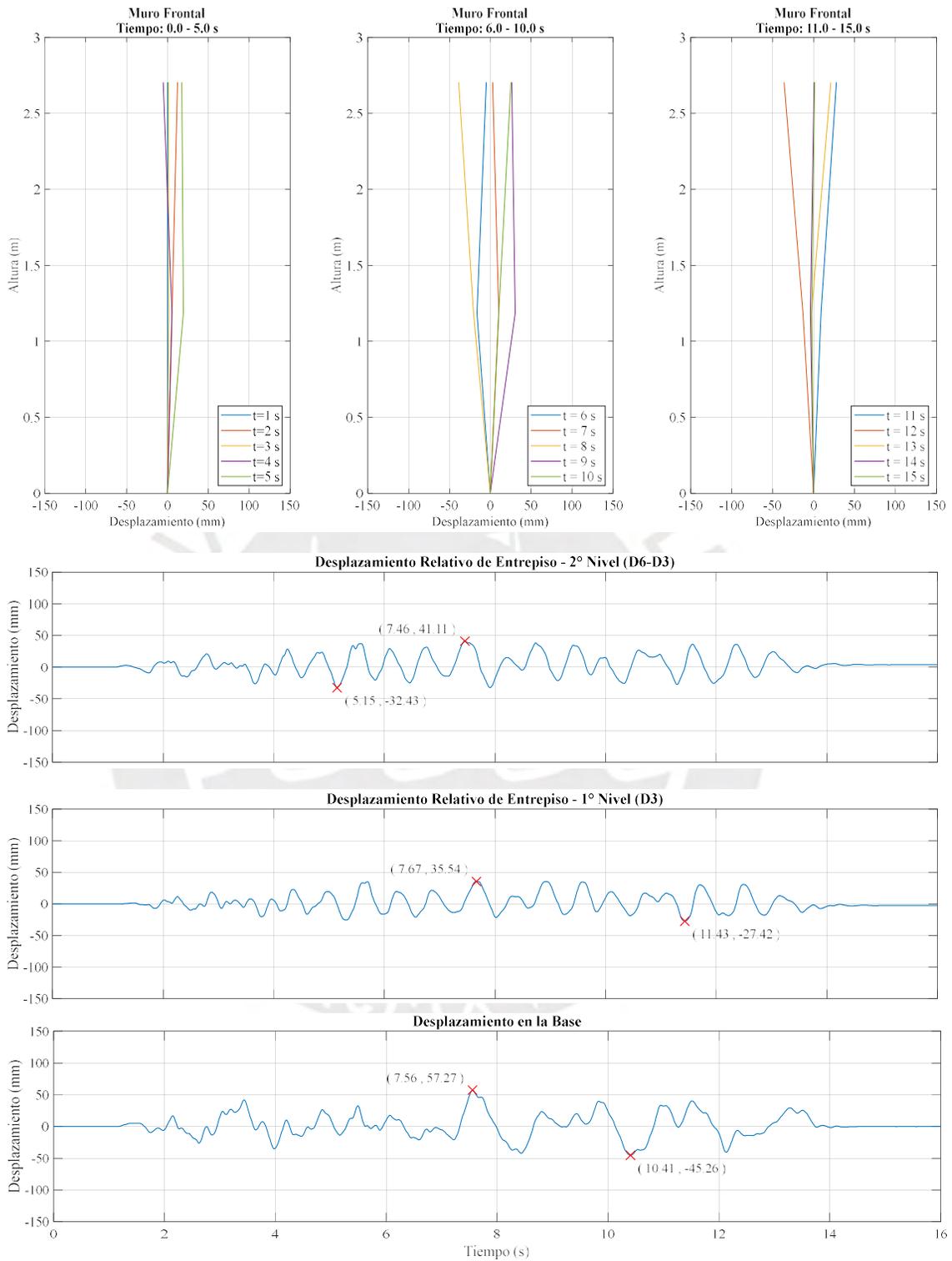


Figura 7.55 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

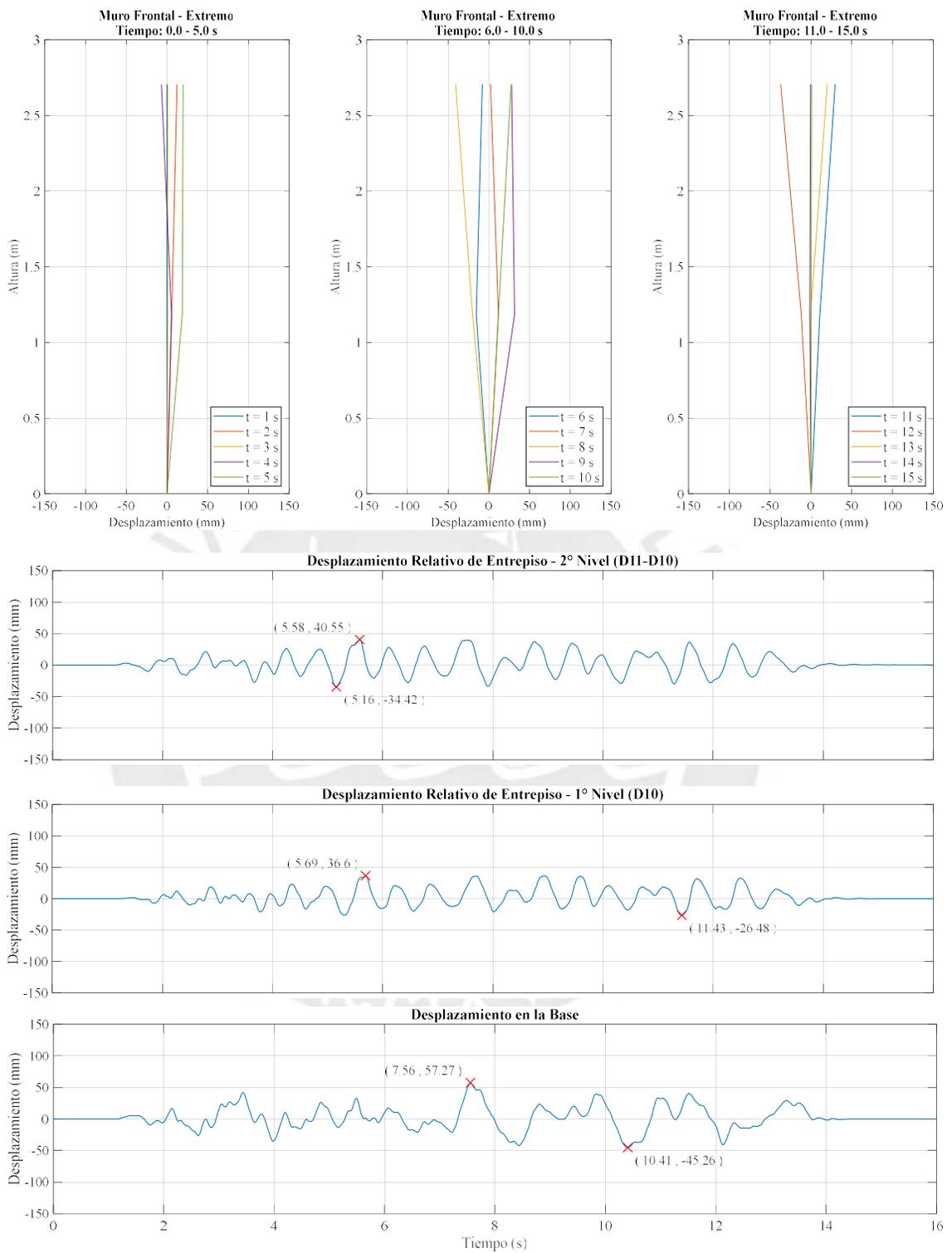


Figura 7.56 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Frontal Extremo - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

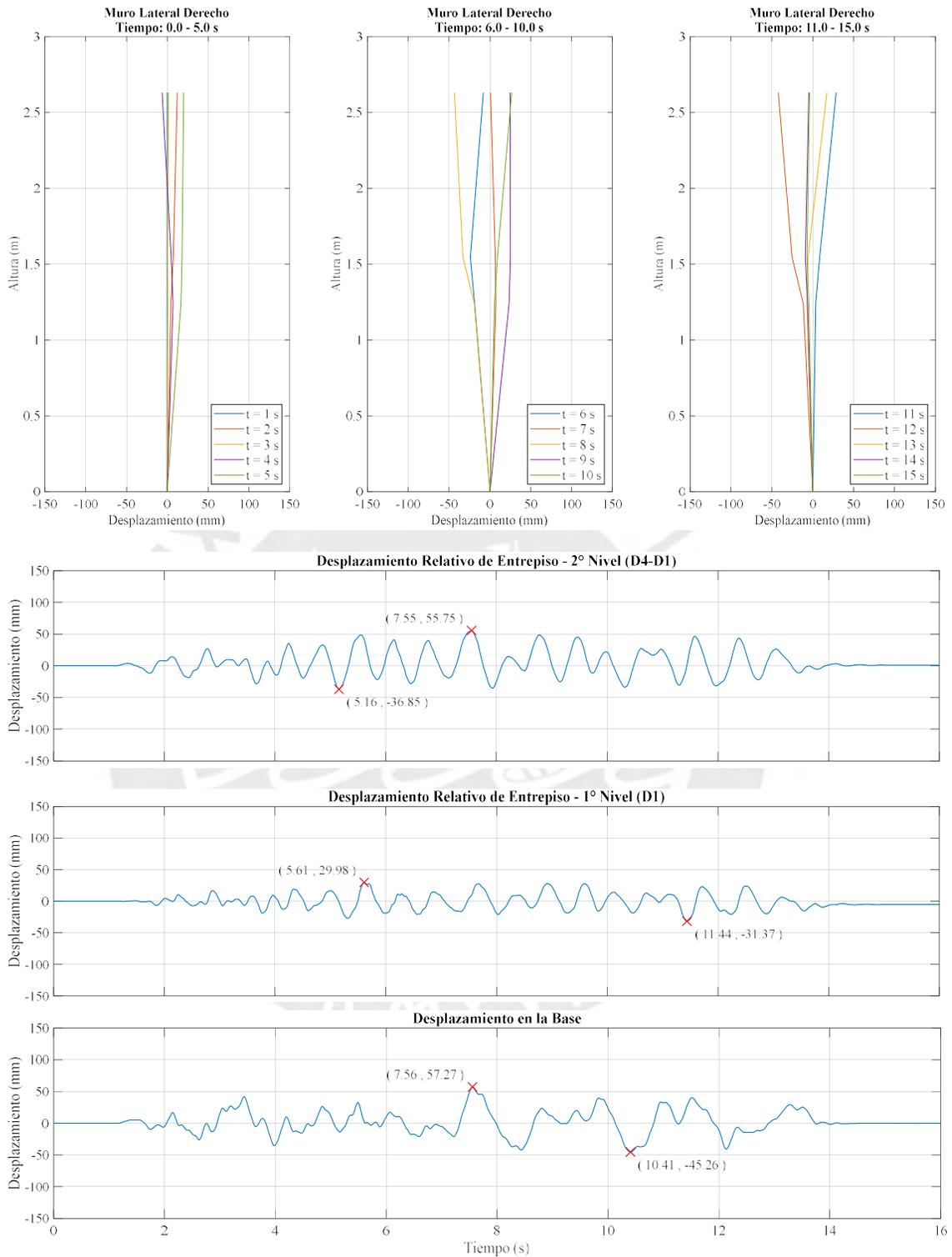


Figura 7.57 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Lateral - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

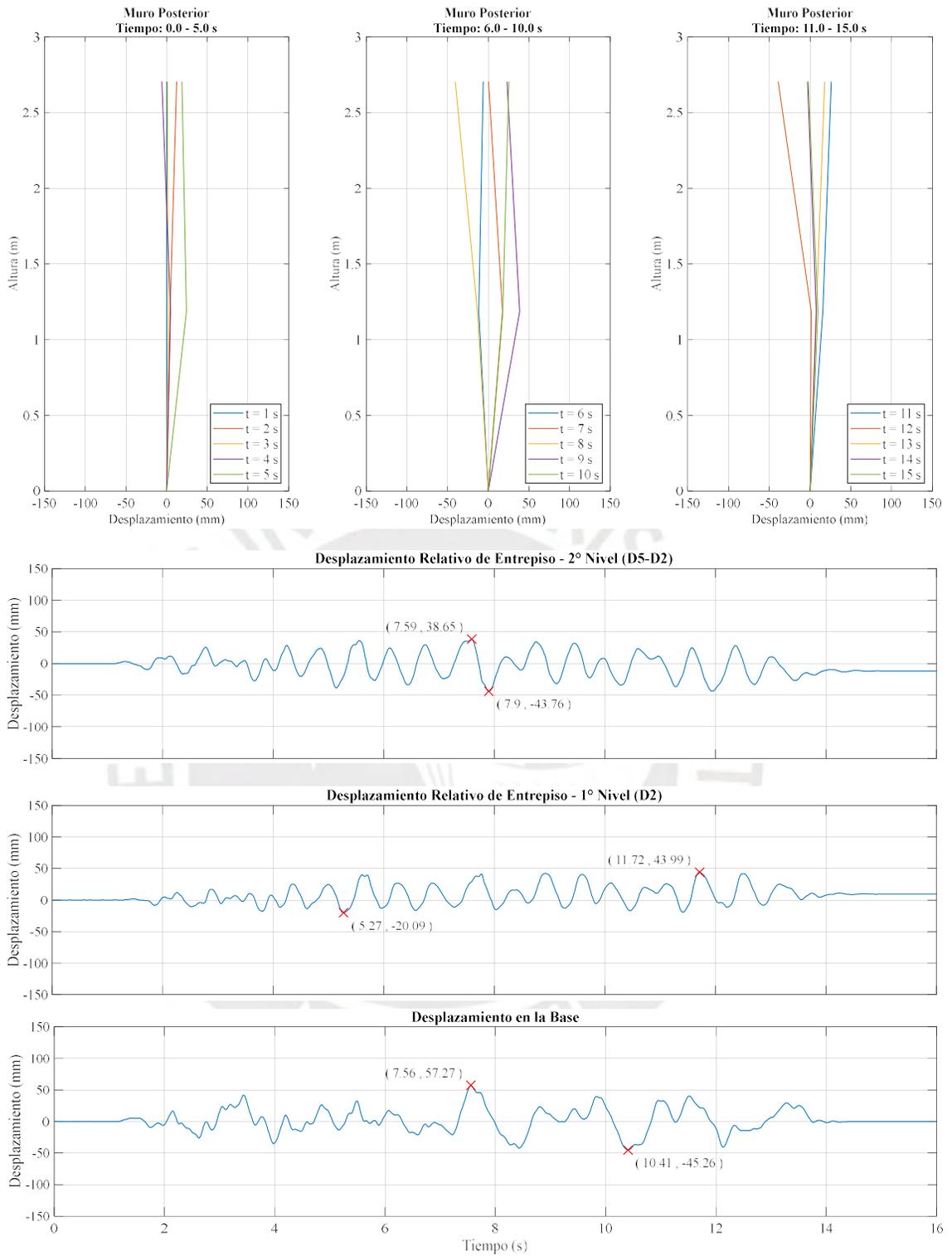


Figura 7.58 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

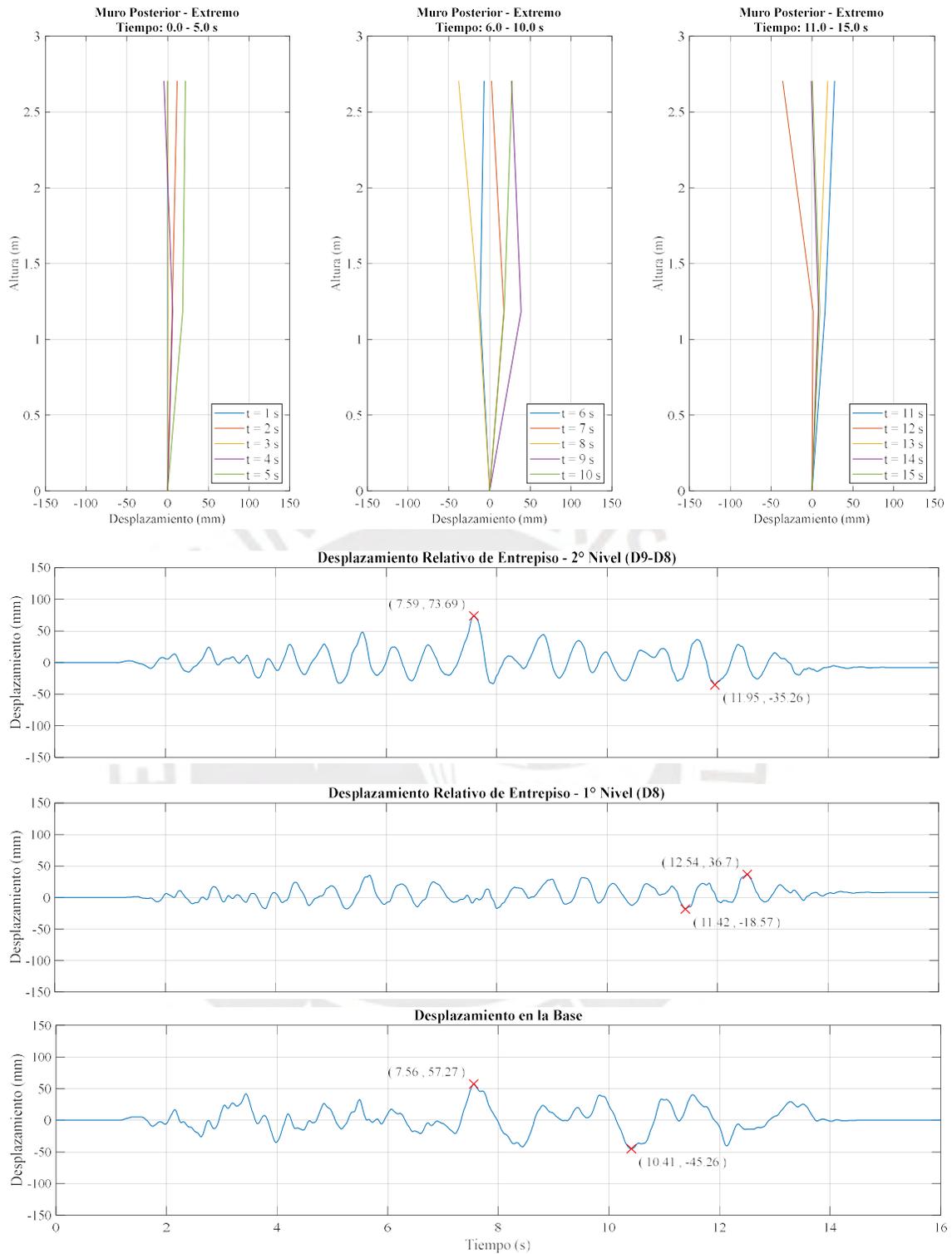


Figura 7.59 Respuesta de desplazamiento relativo – Muro Posterior Extremo - Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

7.2.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los ensayos de simulación sísmica que se realizaron a los 04 modelos a escala reducida, donde los resultados han sido mostrados y analizados en este capítulo, se procedió a comparar en la Tabla 16, los máximos desplazamientos relativos de entrepiso de los modelos no reforzados y reforzados. De esta manera, poder evaluar parcialmente la efectividad de la malla de cuerdas sintéticas como sistema de refuerzo en viviendas de abode de dos pisos.

Tabla 16 Evaluación del Sistema de Refuerzo según Desplazamientos (mm)

LVDT's		Fase ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$)			Fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$)		
		URM	SRM	% REDUCCIÓN	URM	SRM	% REDUCCIÓN
		Base	D0	28.26	28.35	-	55.97
1er Nivel	D1	64.81	13.88	79%	41.65	31.37	25%
	D2	38.12	13.96	63%	58.75	43.99	25%
	D3	30.81	13.70	56%	33.18	35.54	-
	D8	29.42	13.75	53%	48.20	36.70	24%
	D10	79.64	14.5	82%	61.60	36.60	41%
2do Nivel	D4	64.67	21.54	67%	-	55.75	-
	D5	37.85	21.51	43%	56.73	43.76	23%
	D6	30.83	20.42	34%	-	41.11	-
	D9	26.19	20.82	21%	78.17	73.69	6%
	D11	90.34	18.94	79%	99.35	40.55	59%

Es importante mencionar, que, en ésta tabla no se realizó la comparación de los resultados que se obtuvieron durante las fases de ensayo con desplazamiento máximo en la base de 15mm ya que ambos modelos, es decir, reforzado y no reforzado presentaron valores similares.

Por otra parte, para las fases de ensayo con desplazamiento máximo en la base de 30mm, se puede señalar que el sistema de refuerzo planteado en este trabajo de investigación permitió reducir desde 20% hasta 82% los desplazamientos relativos de entrepiso. Por lo tanto, se puede indicar que el sistema de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas permite reducir los desplazamientos en un 58%, como valor promedio.

Asimismo, para las fases de ensayo con desplazamiento máximo en la base de 60mm, se puede señalar que el sistema de refuerzo permitió reducir desde 6% hasta 59% los desplazamientos relativos de entrepiso. Por lo tanto, es posible indicar que el sistema de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas permite reducir los desplazamientos en un 29%, como valor promedio.

7.3 RESPUESTA DE ACELERACIÓN

Se procedió a analizar los datos registrados en cada una de las fases de ensayos, recopilados a través de los dispositivos de instrumentación instalados en los 4 modelos de abobe de dos pisos.

7.3.1 MODELO URM-2S-1

La Tabla 17 muestra las aceleraciones totales máximas (g) que fueron registradas durante las tres fases de ensayo a las que fue sometido el modelo URM-2S-1.

Tabla 17 Aceleraciones totales máximas (g), URM-2S-1

Acelerómetro	Fase 1 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$)		Fase 2 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$)		Fase 3 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 37.5\text{mm}$)		
	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	
	Base						
A0	0.32	-0.47	0.58	-0.94	0.66	-1.12	
A8	0.33	-0.40	0.60	-0.81	0.65	-1.02	
1er Nivel	A1	0.59	-0.53	0.77	-0.79	0.66	-0.86
	A9	0.70	-0.47	0.79	-0.76	0.85	-0.69
	A2	0.76	-0.50	1.15	-1.14	0.77	-0.81
	A3	0.59	-0.60	0.96	-0.87	0.73	-0.82
2do Nivel	A7	0.42	-0.38	0.57	-0.63	0.48	-0.62
	A4	0.41	-0.55	0.49	-0.73	0.28	-0.62
	A10	0.73	-0.62	0.71	-0.68	0.77	-0.43
	A5	1.25	-0.75	1.11	-0.99	0.90	-0.52
A6	1.26	-0.71	1.83	-1.26	1.26	-2.03	

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$), la señal comando registró una aceleración máxima en la base de 0.47g, que se llegó a amplificar hasta 1.26g, dicho valor se dio en el muro frontal del segundo nivel (A6). De esta manera, se puede establecer que el Factor de Amplificación Dinámica para esta fase fue 2.68.

Las Figuras 7.60; 7.61 y 7.62, muestran el perfil de la distribución de las aceleraciones en altura y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados, pudiéndose visualizar que, durante los primeros 10s en el muro frontal se generaron las mayores aceleraciones para el segundo nivel. El muro lateral presentó aceleraciones casi uniformes en toda su altura y ligeramente superiores a los registrados en la base. Finalmente, en el muro posterior se observa aceleraciones uniformes con valores ligeramente superiores a la base hasta la zona próxima del segundo entreciso que es donde se amplifican y se invierte el sentido de las aceleraciones, lo que ya da indicios de la tendencia del modelo a comportarse de acuerdo a su segundo modo de vibración. Por lo anteriormente expuesto se puede interpretar que el muro frontal y posterior son los que reciben las mayores fuerzas inerciales.

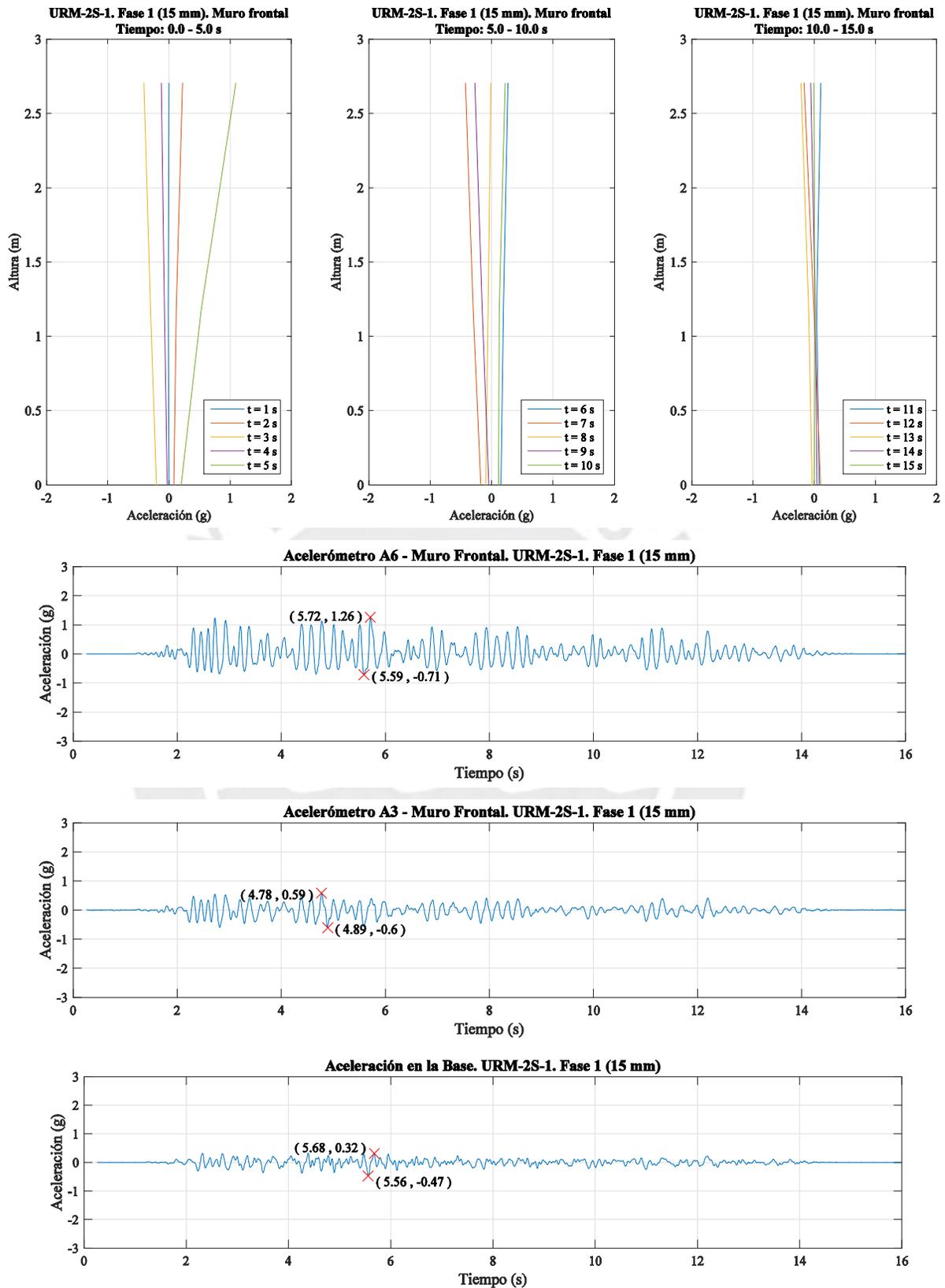


Figura 7.60 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

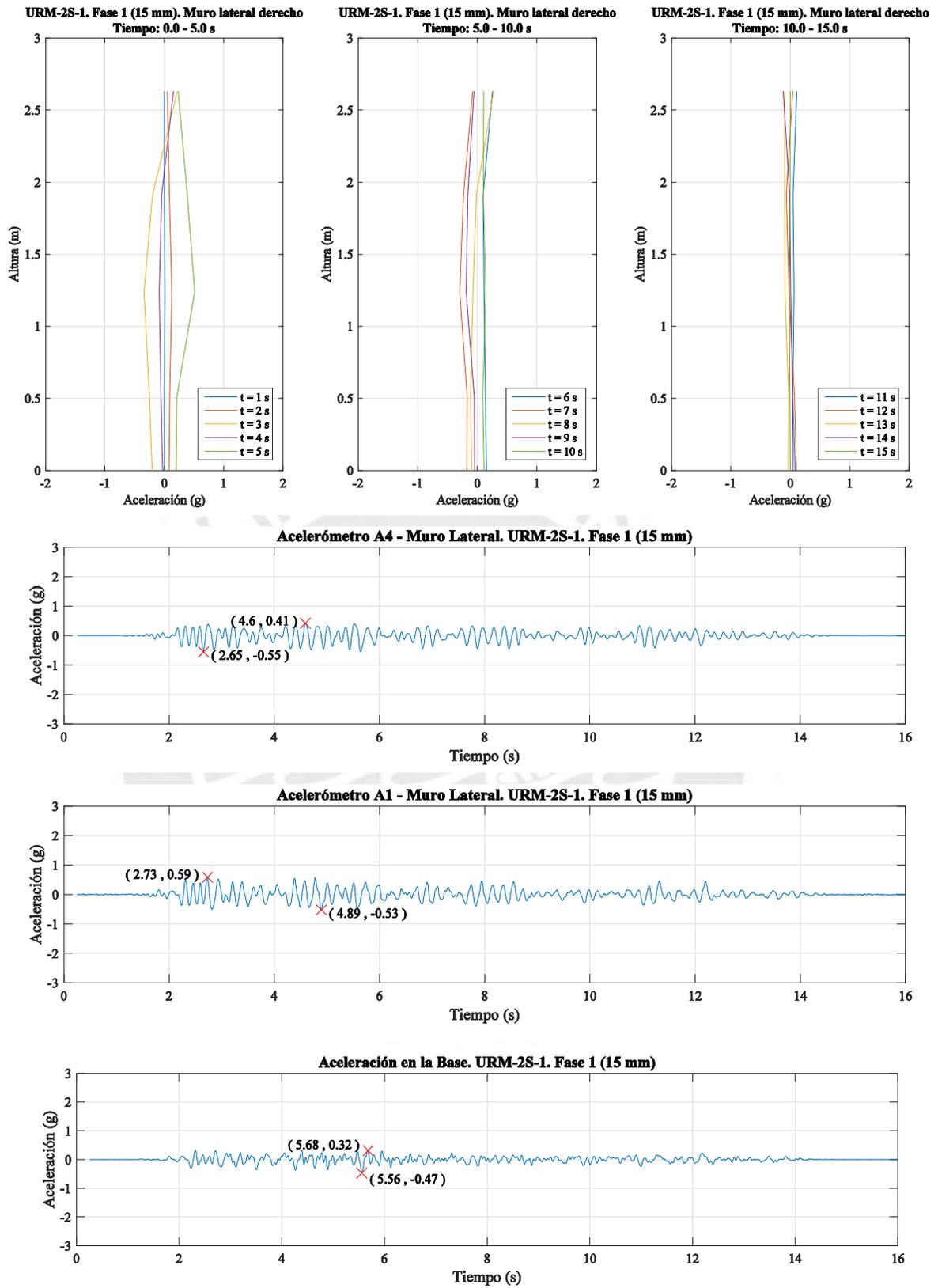


Figura 7.61 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

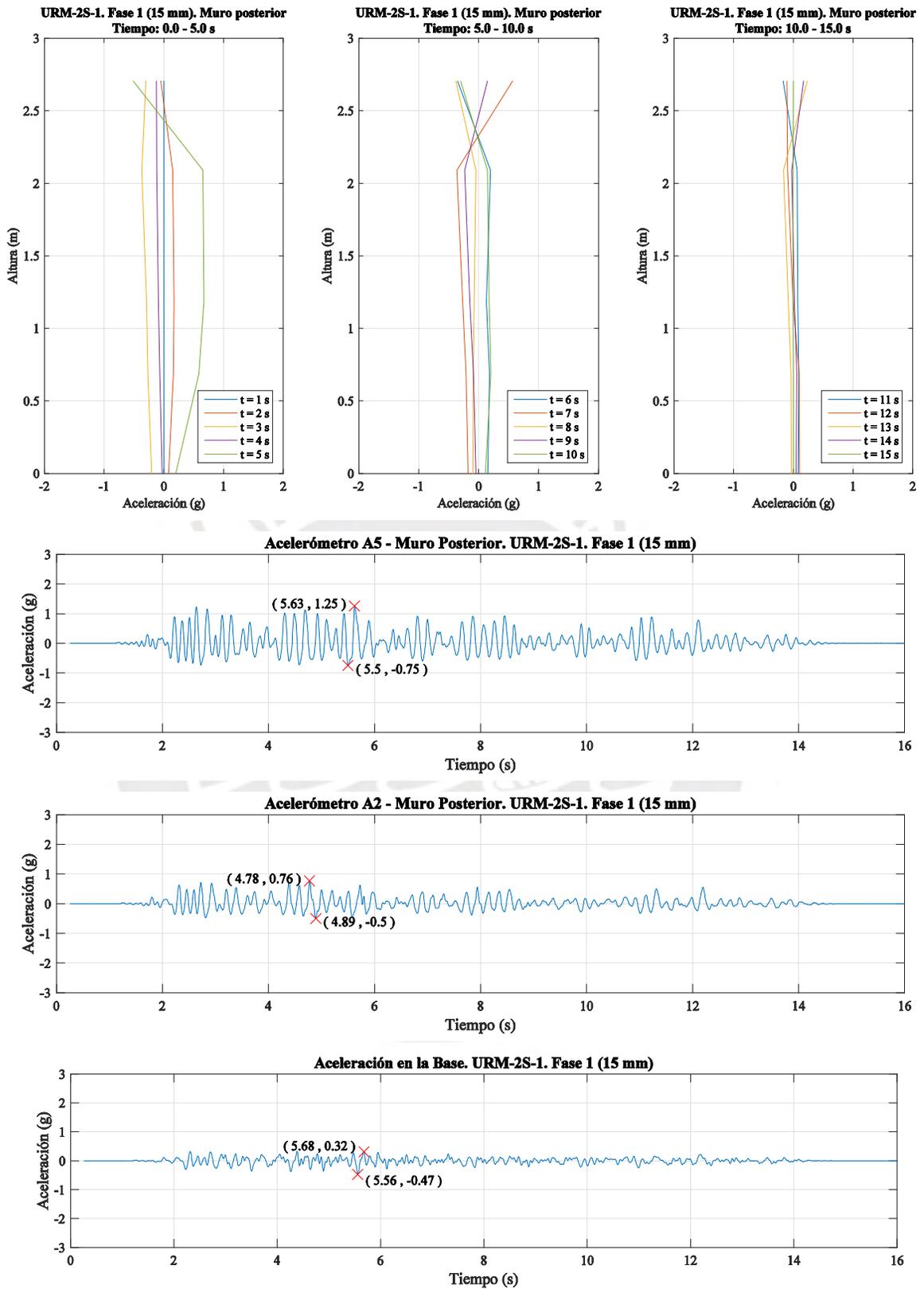
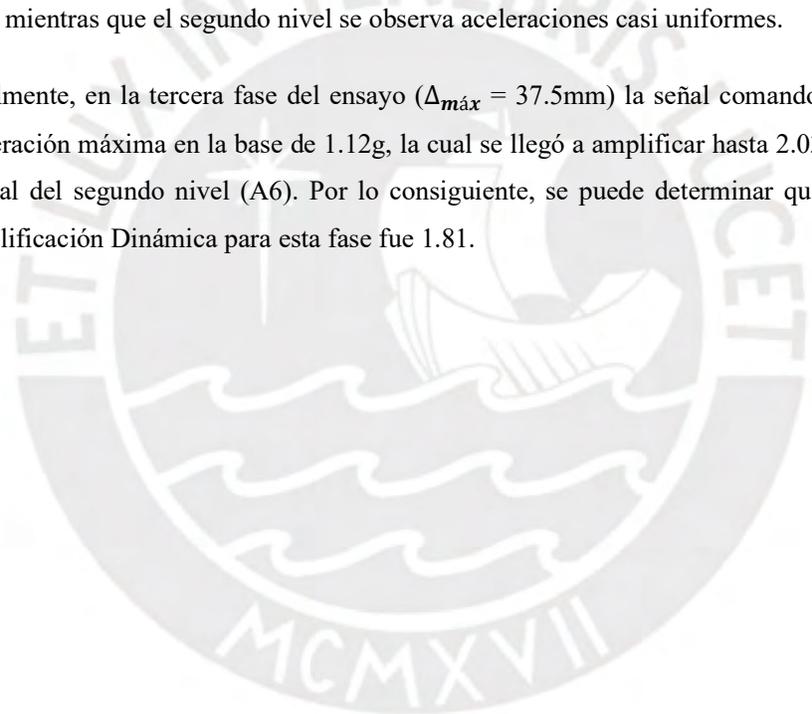


Figura 7.62 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

Por otra parte, en la segunda fase del ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$) la se\u00f1al comando present\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 0.94g, la cual se lleg\u00f3 a amplificar hasta 1.83g. en el muro frontal del segundo nivel (A6). Por lo consiguiente, se puede determinar que el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica para esta fase fue 1.95.

Las Figuras 7.63; 7.64 y 7.65, muestran la manera en que se da la distribuci\u00f3n de las aceleraciones a lo largo de toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados. En el muro frontal se observa que la amplificaci\u00f3n de la aceleraci\u00f3n se dio en gran parte de manera lineal. En referencia al muro lateral, \u00e9ste sigue presentando, tal como se dio en la fase anterior, aceleraciones uniformes similares a los registrados en la base hasta la zona pr\u00f3xima al segundo entrepiso que es donde se amplifica e invierte el sentido de las aceleraciones. Asimismo, en el muro posterior se aprecia cambios en el sentido de las aceleraciones que principalmente se dieron en el primer piso, mientras que el segundo nivel se observa aceleraciones casi uniformes.

Finalmente, en la tercera fase del ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 37.5\text{mm}$) la se\u00f1al comando present\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 1.12g, la cual se lleg\u00f3 a amplificar hasta 2.03g. en el muro frontal del segundo nivel (A6). Por lo consiguiente, se puede determinar que el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica para esta fase fue 1.81.



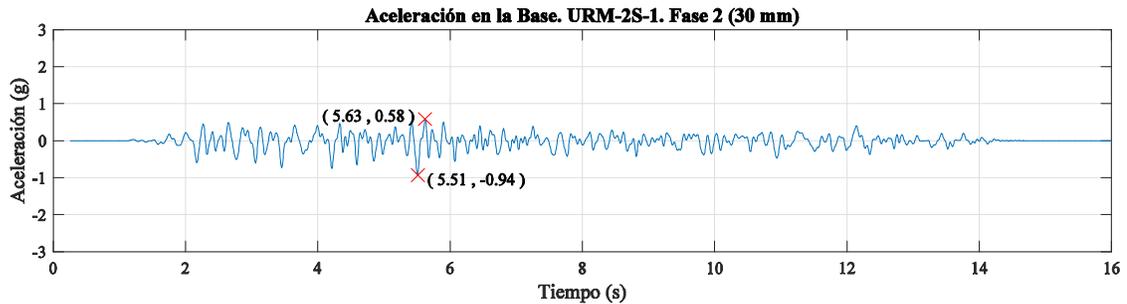
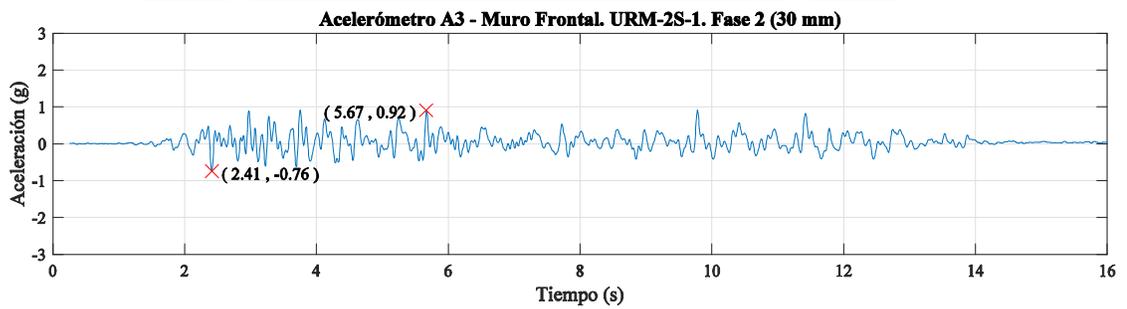
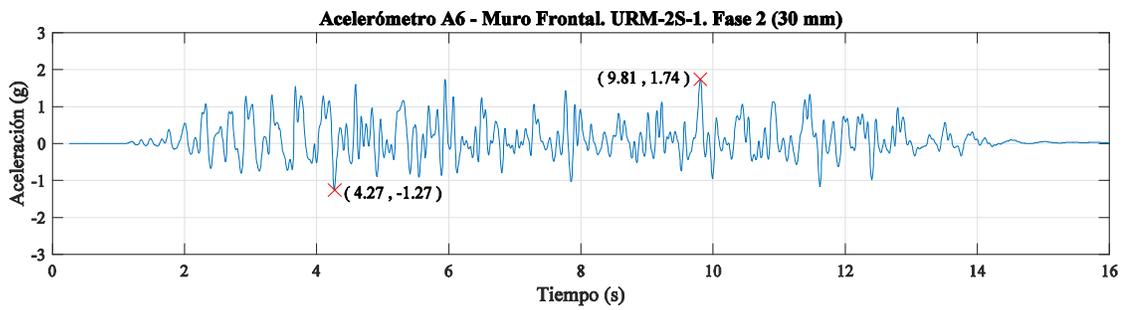
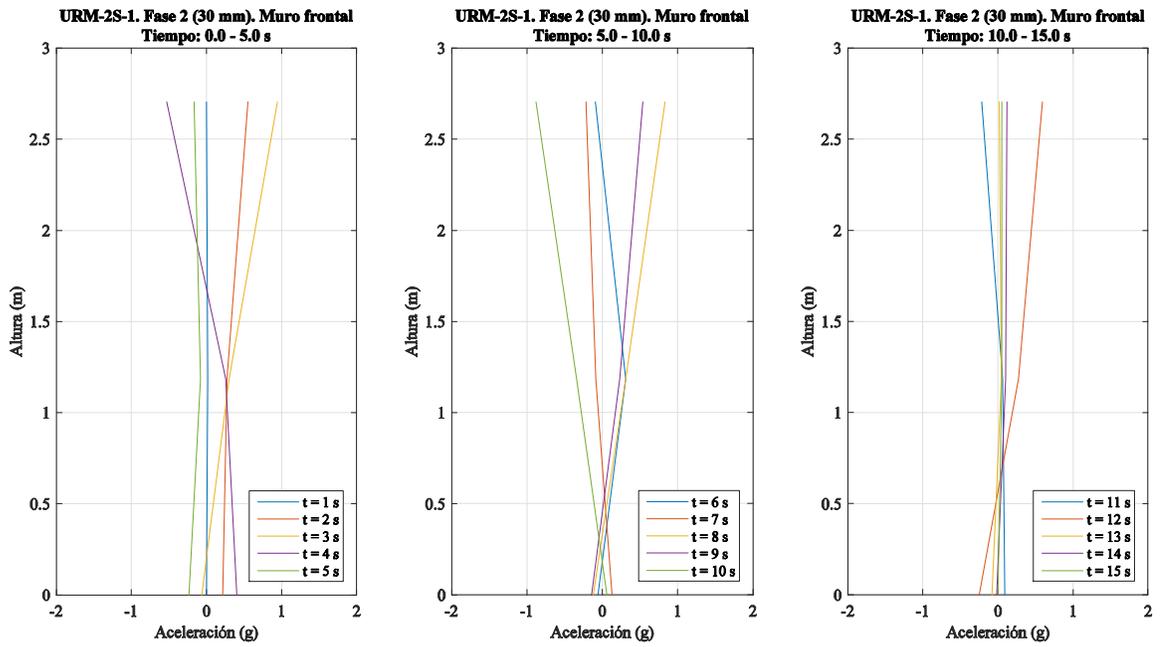


Figura 7.63 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

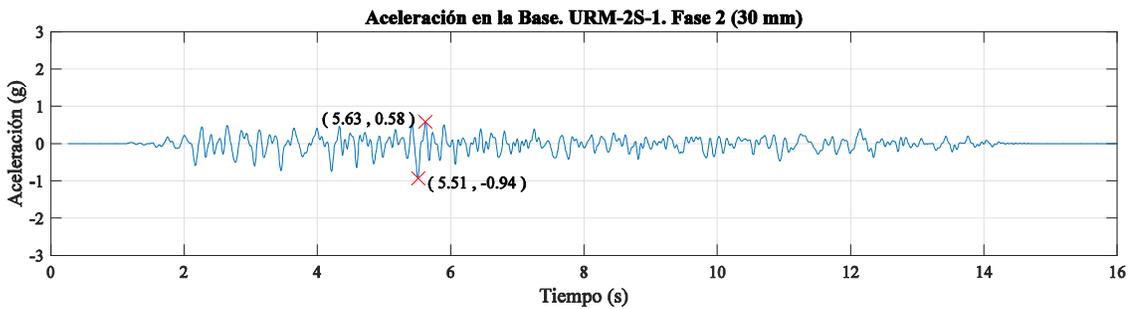
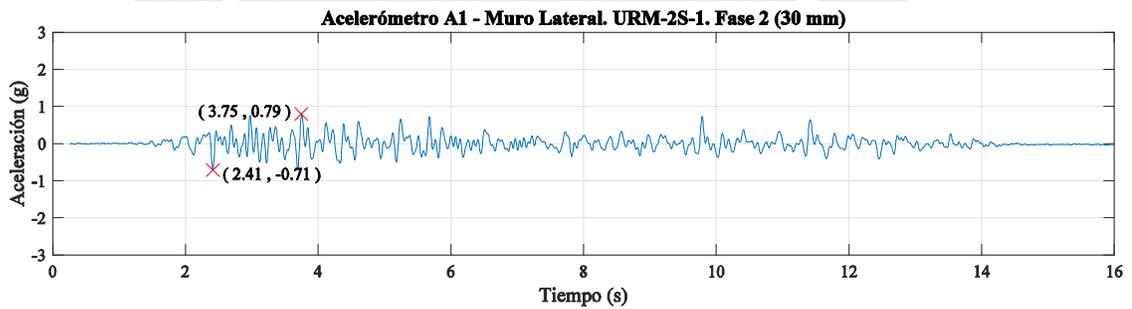
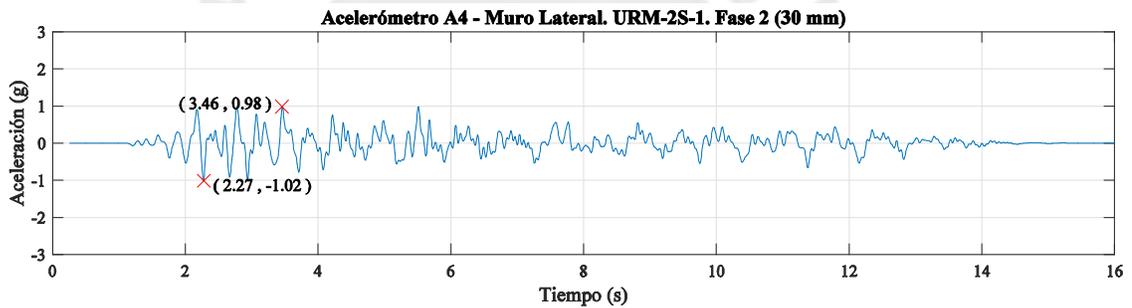
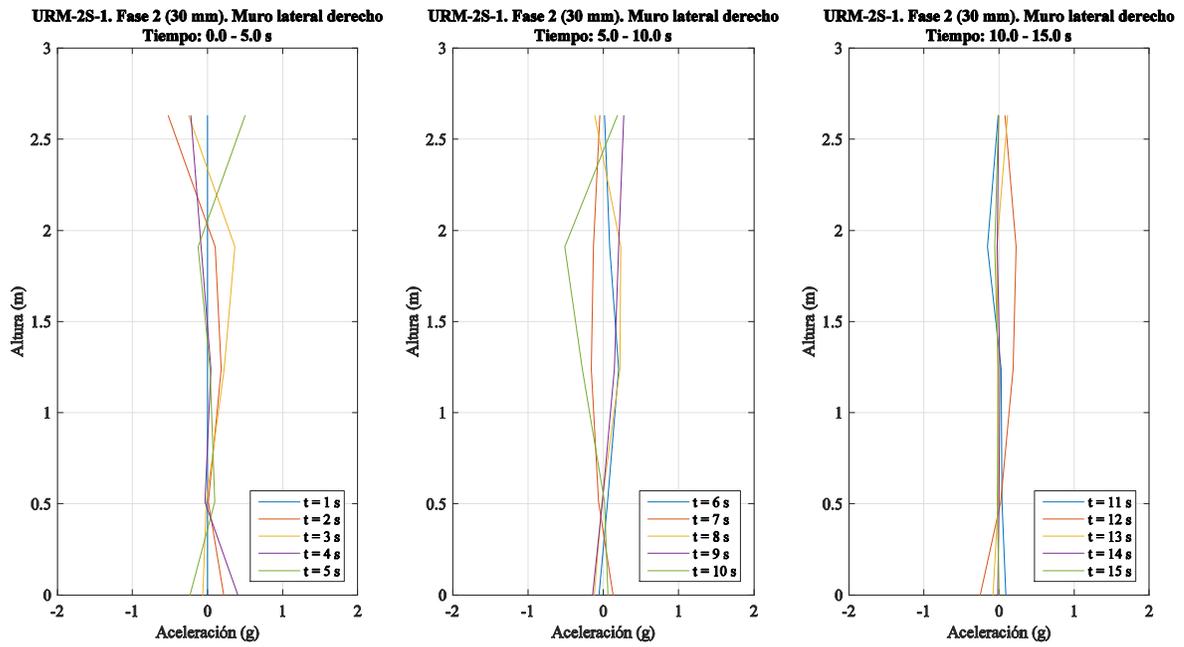


Figura 7.64 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

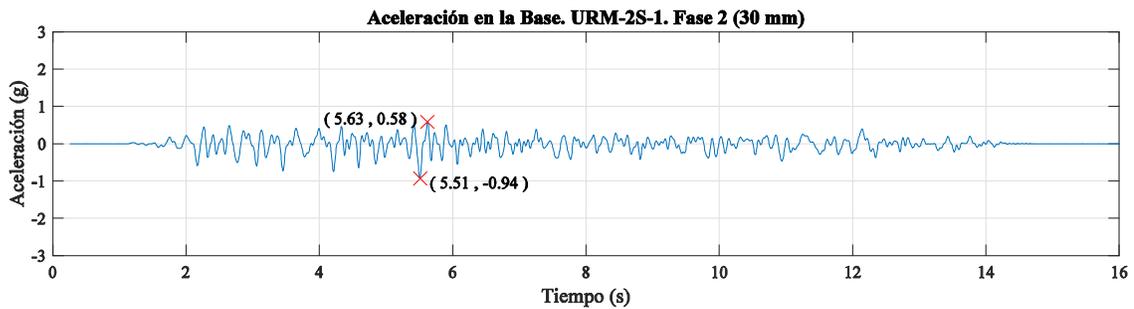
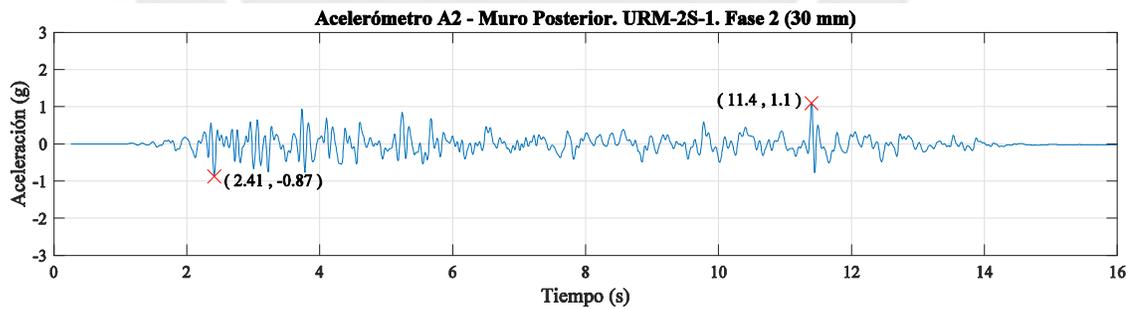
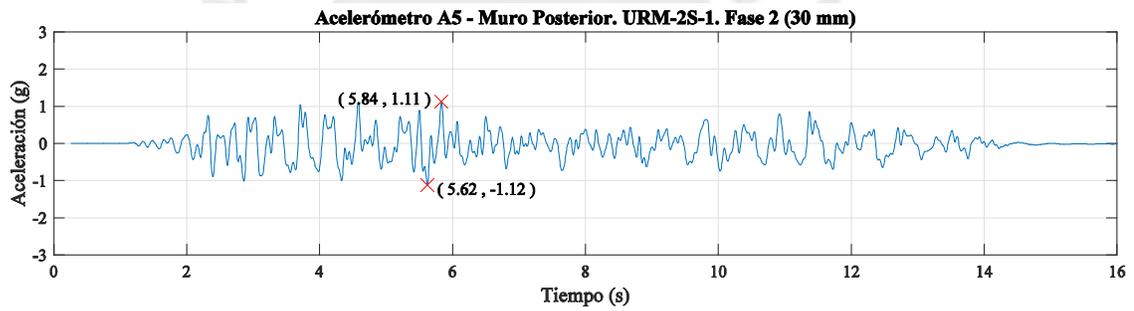
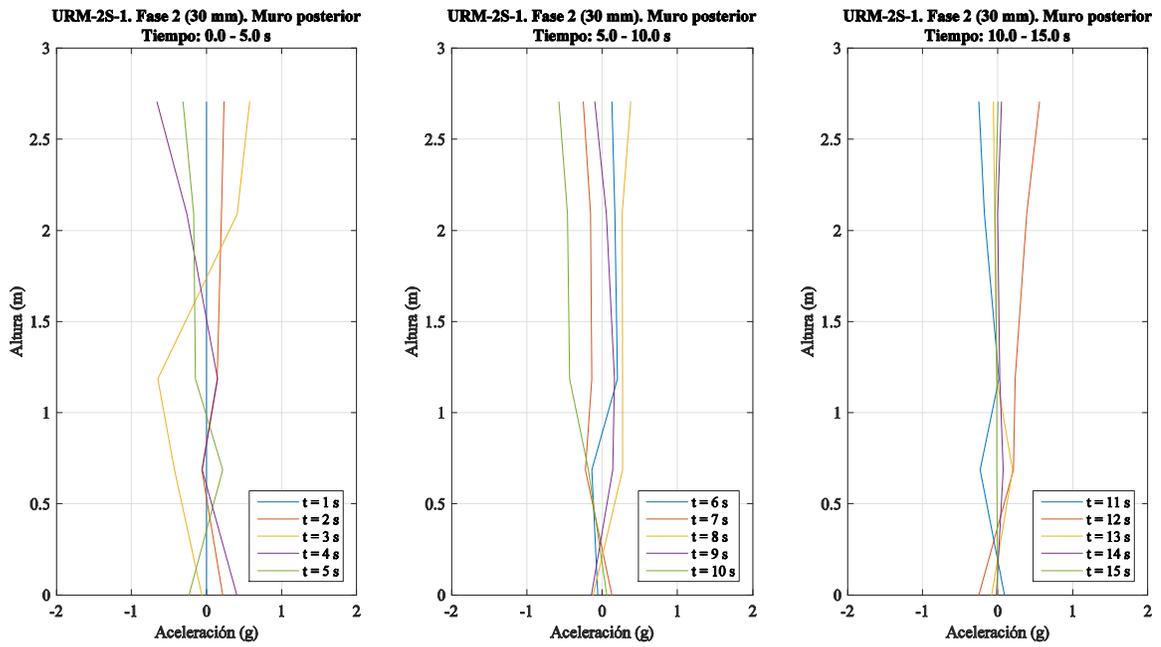


Figura 7.65 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

7.3.2 MODELO URM-2S-2

La Tabla 18 muestra las aceleraciones totales máximas (g) que fueron registradas durante las dos fases de ensayo a las que fue sometido el modelo URM-2S-2.

Tabla 18 Aceleraciones totales máximos (g), URM-2S-2

Acelerómetro	Fase 1		Fase 2		
	$(\Delta_{m\acute{a}x} = 45\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$		
	Máx. (+)	Máx. (-)	Máx. (+)	Máx. (-)	
Base	A0	0.76	-1.27	1.12	-1.64
	A8	0.25	-0.38	0.34	-0.44
1er Nivel	A1	0.47	-0.69	0.28	-0.33
	A9	0.87	-1.05	1.28	-1.67
	A2	0.99	-0.94	0.81	-1.02
	A3	0.94	-0.79	0.85	-0.84
	A7	0.77	-0.95	0.62	-0.49
2do Nivel	A4	0.77	0.49	0.59	-0.61
	A10	1.01	-1.49	0.91	-0.84
	A5	1.26	-1.07	1.64	-0.77
	A6	1.98	-1.81	1.01	-1.34

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 45\text{mm}$), la señal comando presentó una aceleración máxima en la base de 1.27g, alcanzando una amplificación máxima de 1.98g que se registró en el muro frontal del segundo piso (A6). Por lo cual, se puede determinar que el Factor de Amplificación Dinámica para la presente fase fue 1.56.

Las Figuras 7.66; 7.67 y 7.68 grafican la distribución de las aceleraciones que se generaron a lo largo de toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados, permitiendo identificar que el muro frontal presentó en el primer piso aceleraciones con valores ligeramente menores a las de la base y se dio una notoria amplificación de aceleraciones en el segundo nivel.

Respecto al muro lateral, se ve en gran parte del ensayo que en la zona de los entrepisos se presentaron aceleraciones menores a los registrados a la base.

Por último, en el muro posterior se registró en el primer entrepiso aceleraciones ligeramente menores a las de la base, mientras que en el segundo entrepiso éstas fueron ligeramente superiores a las de la base. Siendo importante mencionar que en el segundo piso la aceleración máxima no llegó a superar la aceleración máxima de la base.

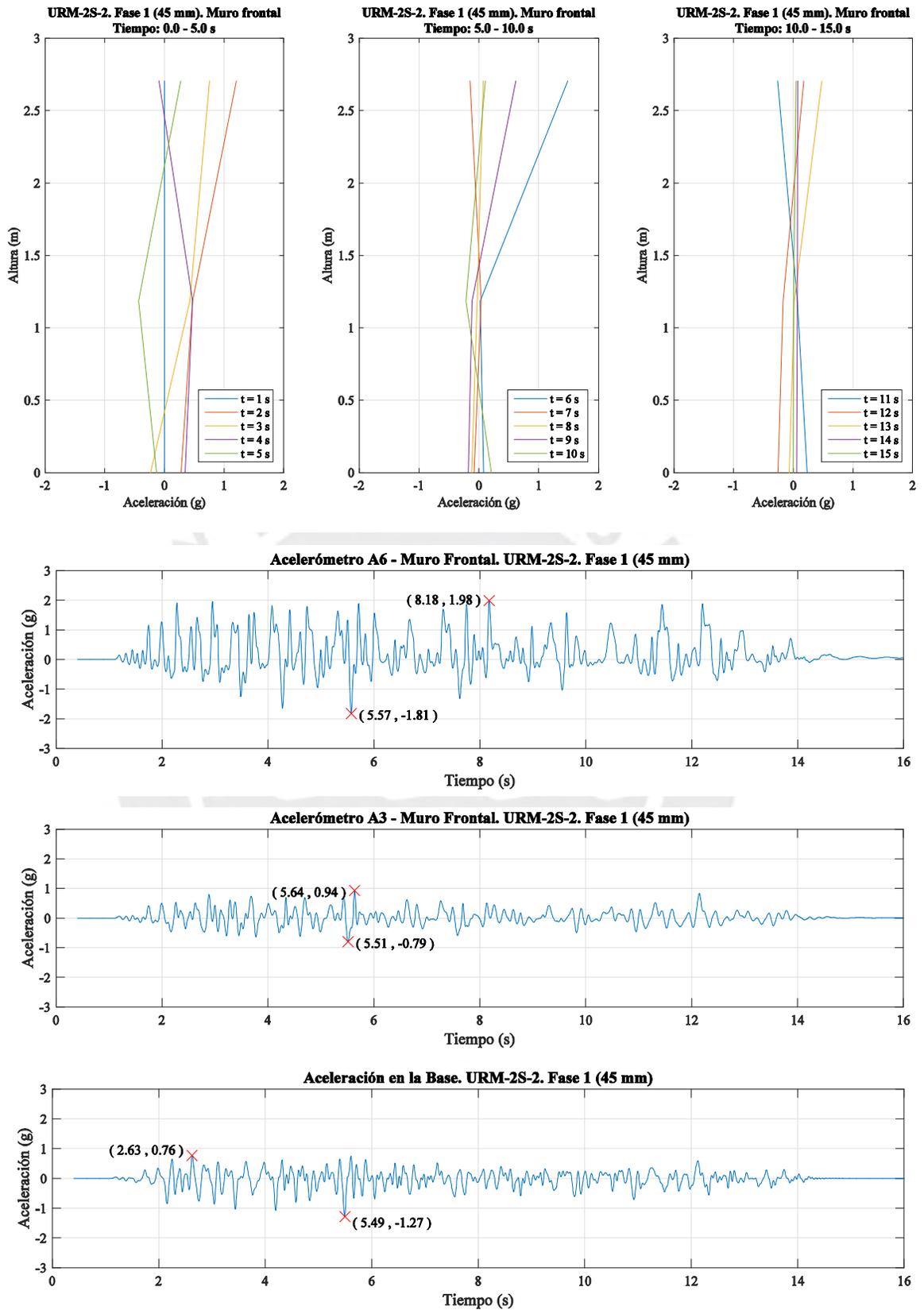


Figura 7.66 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

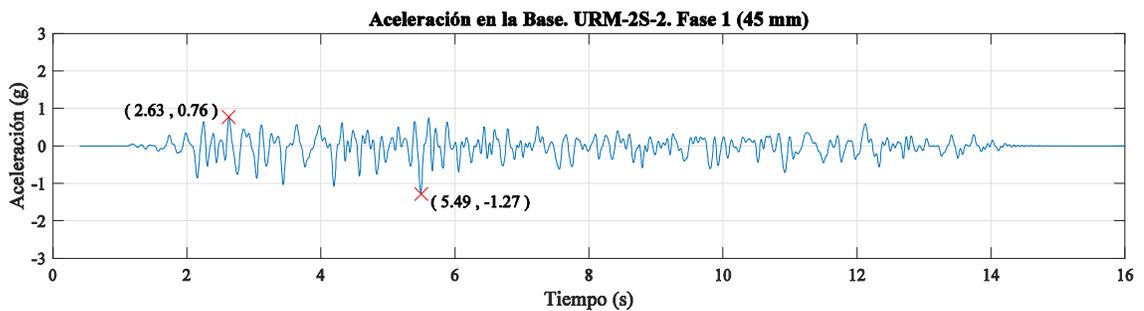
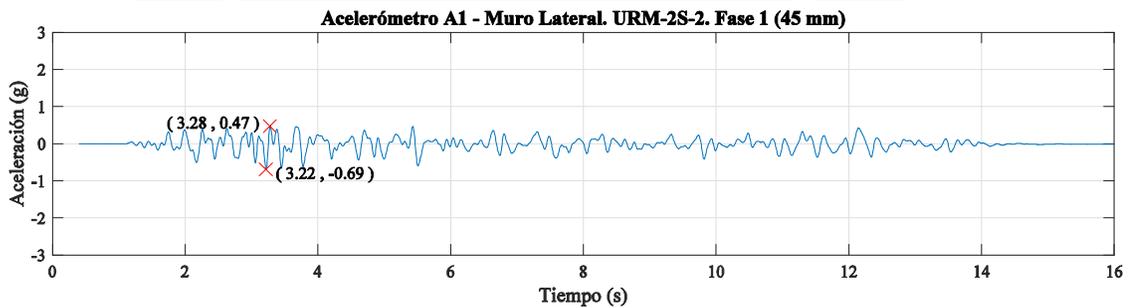
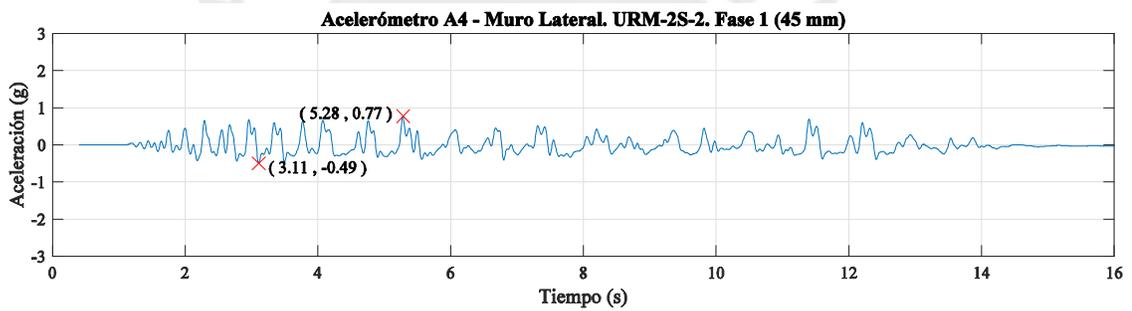
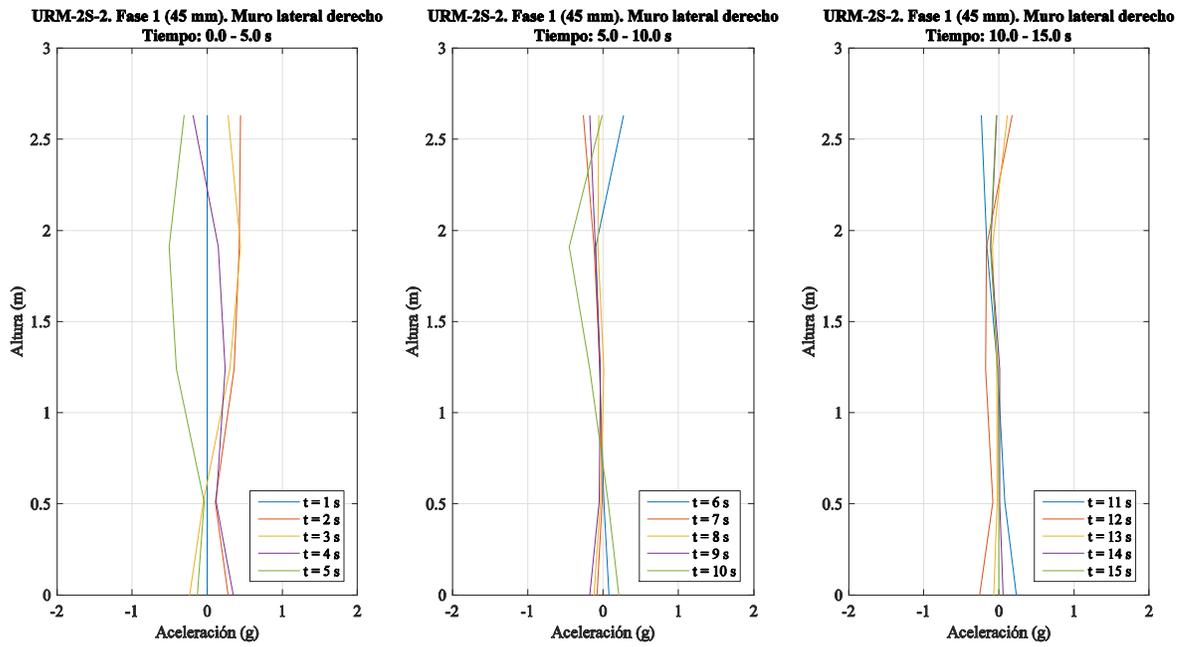


Figura 7.67 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

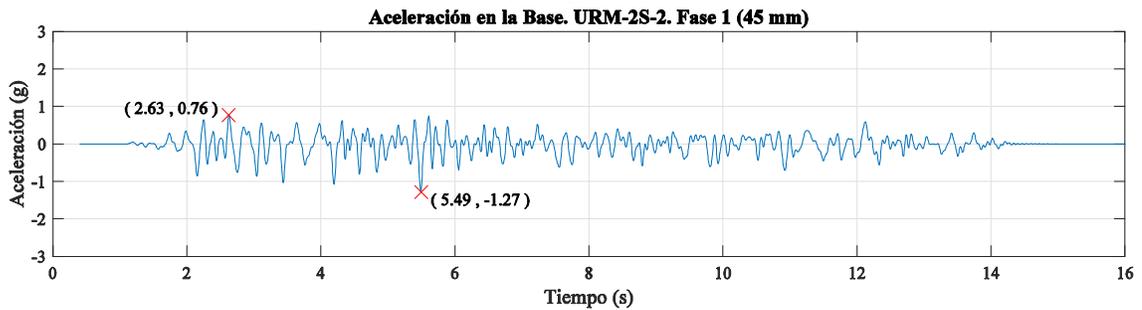
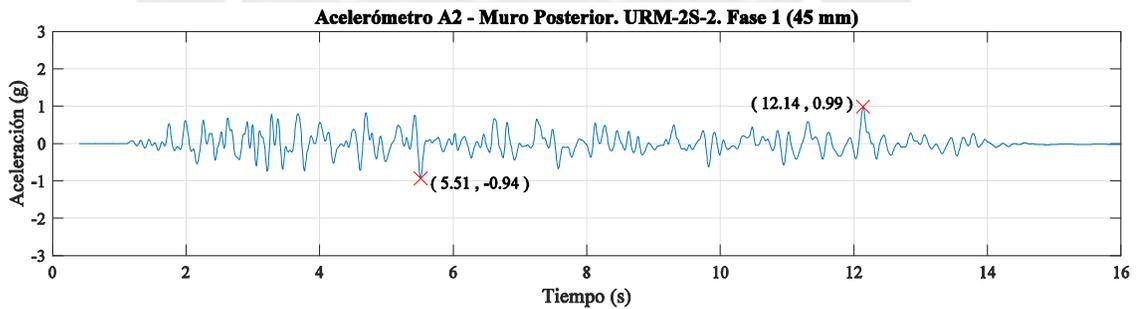
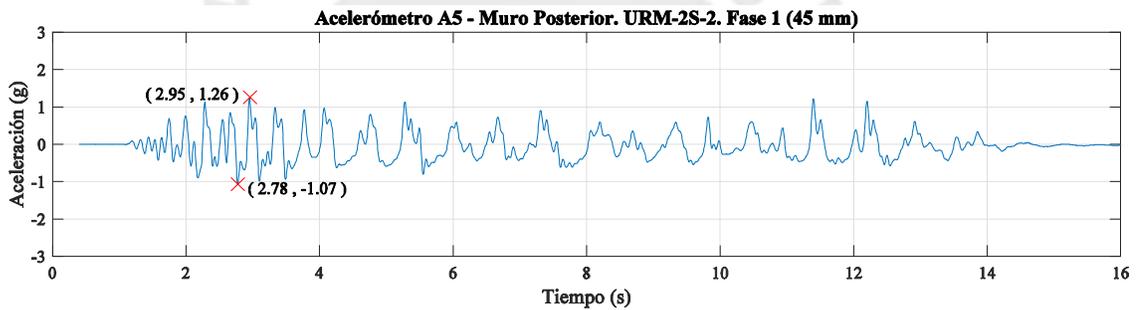
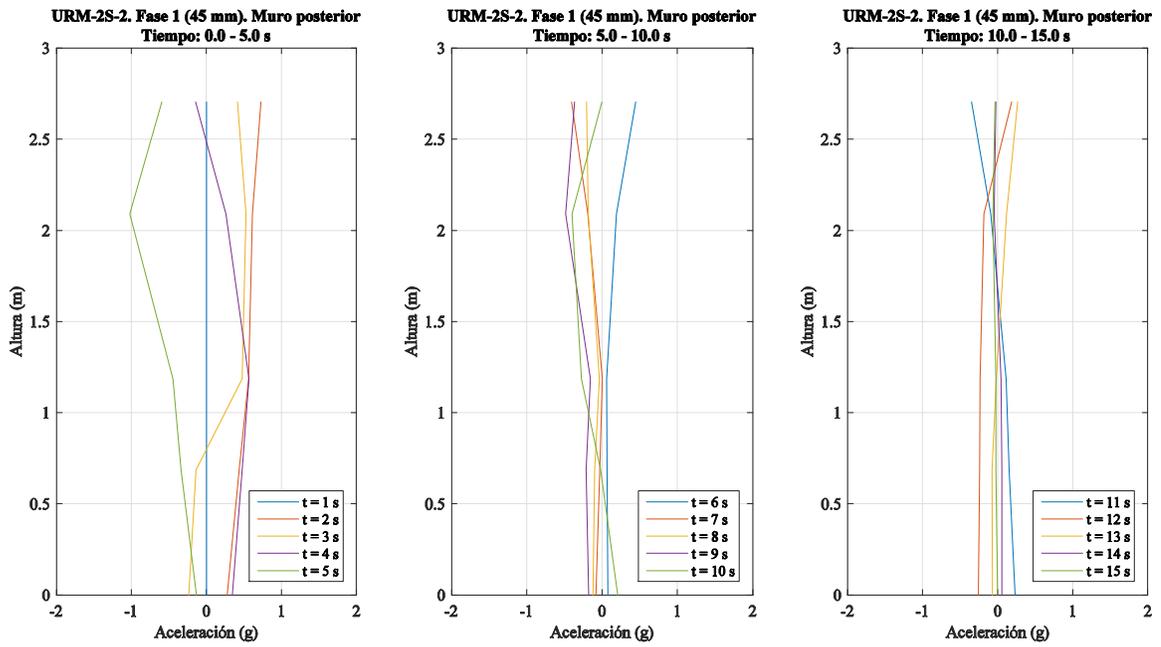


Figura 7.68 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

Por otra parte, en la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), la se\u00f1al comando registr\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 1.64g, presentando una amplificaci\u00f3n m\u00e1xima de 1.64g, la cual fue recopilada por el aceler\u00f3metro A5 ubicado en el muro posterior del segundo piso del muro posterior. De esta manera, se puede identificar el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica de 1.00. Es importante mencionar que no se ha considerado los valores del aceler\u00f3metro A9 debido a que se ubica a la mitad de la altura del primer piso del muro posterior, quedando muy cerca a la base del modelo.

Las Figuras 7.69; 7.70 y 7.71, muestran la forma en que se da la distribuci\u00f3n de las aceleraciones a lo largo de toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados.

En el muro frontal y el muro lateral se visualiza que tanto en el primer y segundo nivel las aceleraciones registradas son menores a las de la base, por lo consiguiente se puede interpretar que esto se da por el nivel considerable de da\u00f1o que presentaron dichos muros.

Finalmente, en el muro posterior se aprecia que el primer piso registr\u00f3 aceleraciones menores a las de la base, esta tendencia se da hasta la zona cercana al segundo entrepiso que es donde se amplifican las aceleraciones. Cabe mencionar que la aceleraci\u00f3n m\u00e1xima del segundo entrepiso no lleg\u00f3 a superar el valor de la aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base. Por lo tanto, esto nos permite interpretar que el muro del primer piso present\u00f3 un mayor nivel de da\u00f1o en comparaci\u00f3n al segundo nivel.

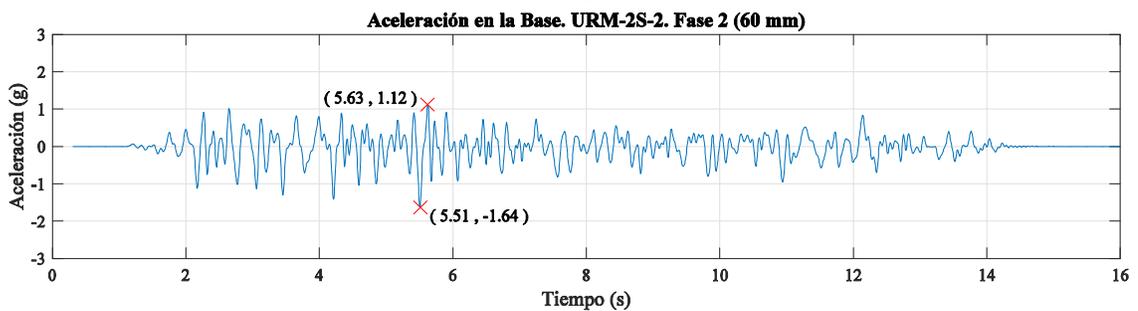
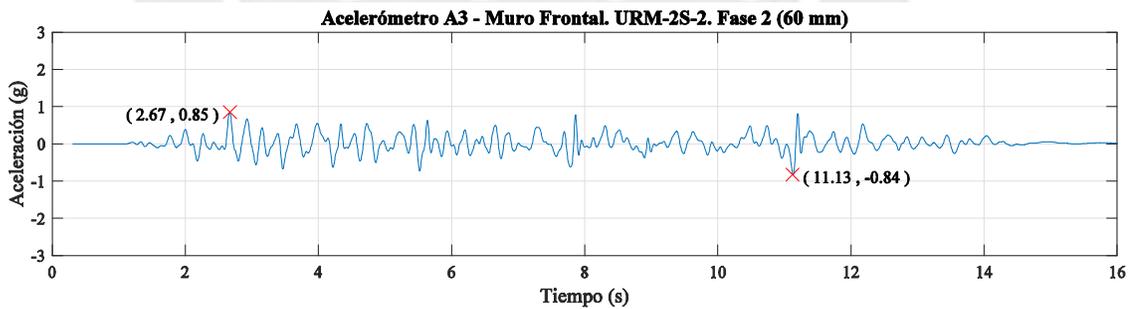
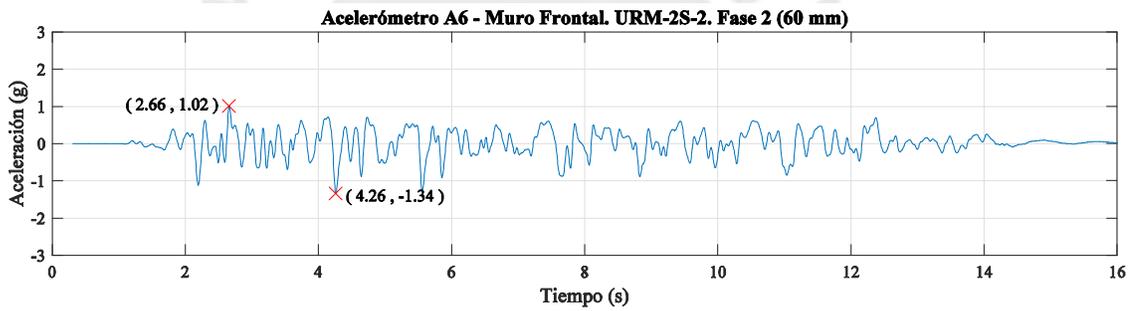
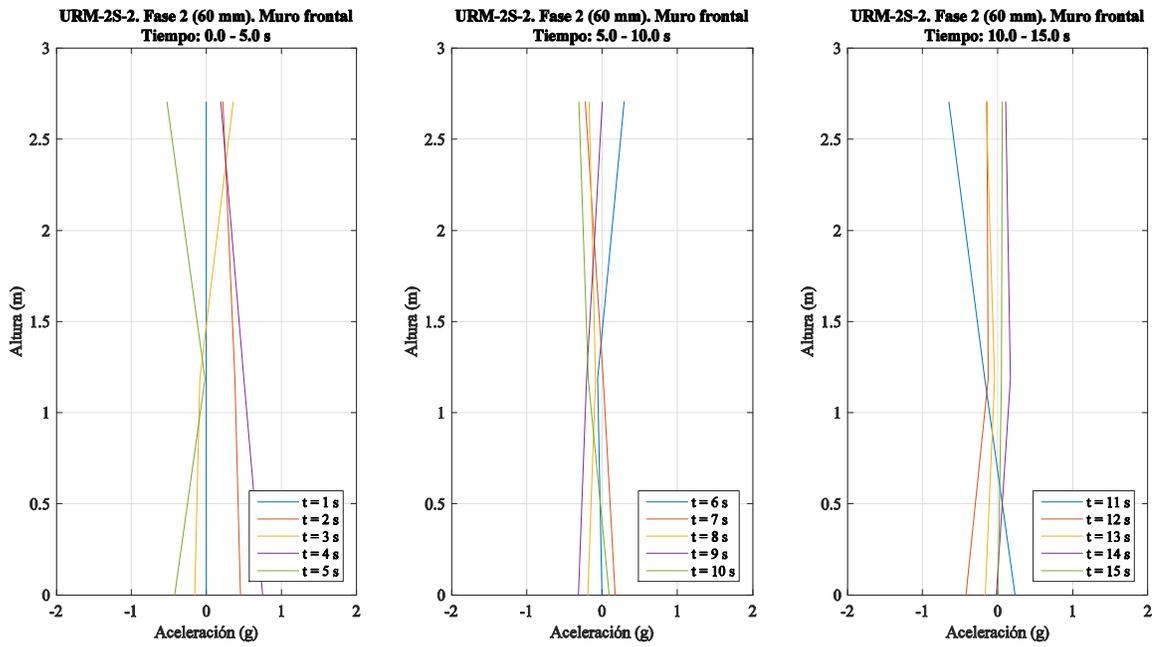


Figura 7.69 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

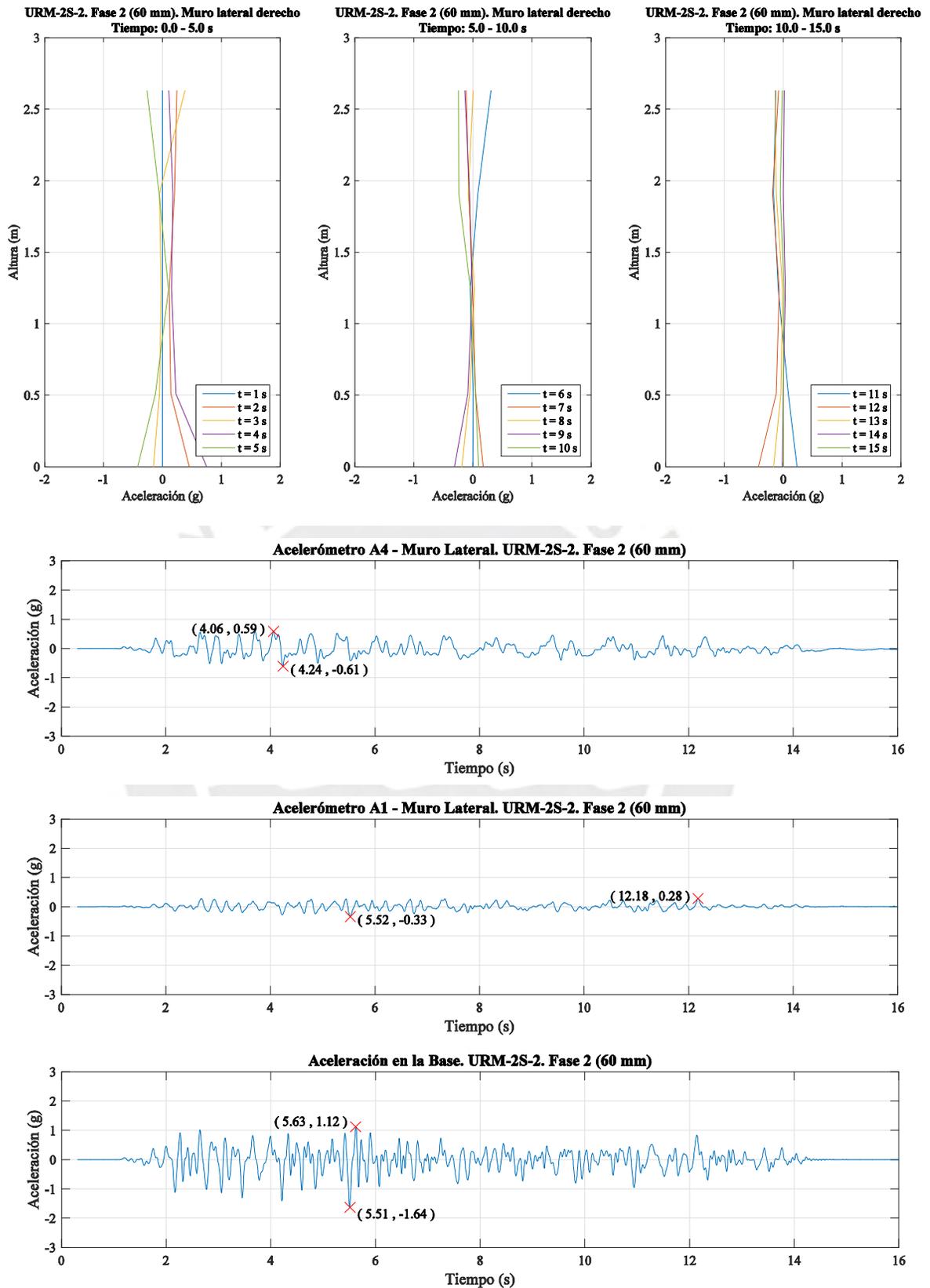


Figura 7.70 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

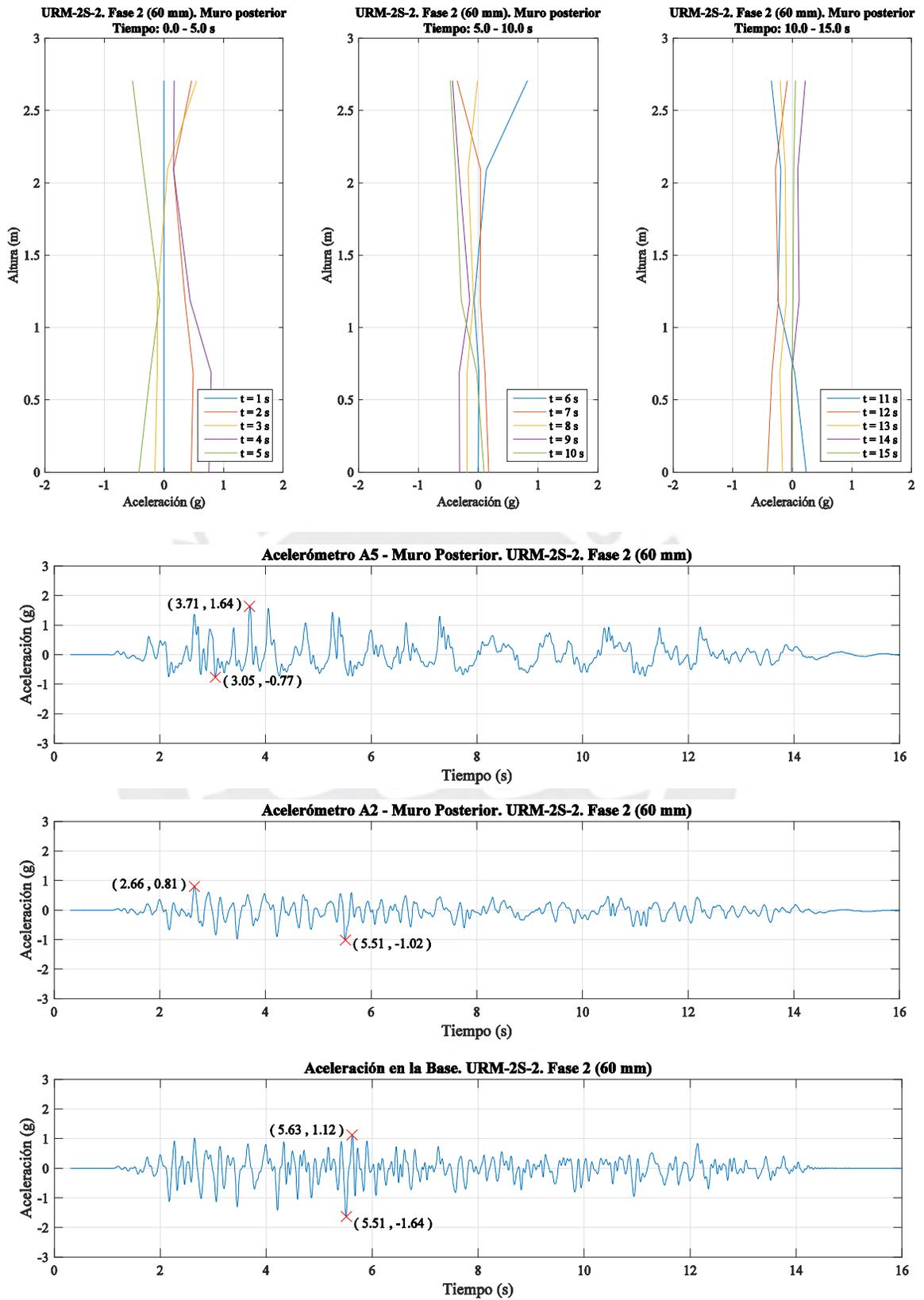


Figura 7.71 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

7.3.3 MODELO SRM-2S-1

La Tabla 19 muestra las aceleraciones totales máximas (g) que fueron registradas durante las 04 fases de ensayo a las que fue sometido el modelo SRM-2S-1.

Tabla 19 Aceleraciones totales máximos (g), SRM-2S-1

Acele.		Fase 1		Fase 2		Fase 3		Fase 4	
		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$	
		Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)
Base	A0	0.34	-0.50	0.59	-0.98	1.13	-1.68	1.11	-1.70
	A8	0.35	-0.50	0.60	-0.98	0.96	-1.42	0.93	-1.67
1er Nivel	A1	0.53	-0.45	0.72	-0.88	1.10	-1.74	0.81	-1.38
	A9	0.77	-0.53	1.22	-1.00	2.58	-1.99	1.84	-2.00
	A2	0.63	-0.64	1.14	-0.97	2.25	-1.60	1.63	-1.55
	A3	0.55	-0.61	0.88	-0.91	1.14	-2.17	1.02	-1.25
	A7	0.51	-0.41	0.71	-0.52	0.83	-1.10	0.80	-0.84
2do Nivel	A4	0.69	-0.54	0.98	-0.96	1.48	-1.00	1.10	-0.78
	A10	0.51	-0.46	0.64	-0.57	0.90	-0.88	0.90	-0.72
	A5	1.36	-0.81	1.40	-1.53	2.47	-1.33	1.97	-1.00
	A6	0.66	-0.49	0.90	-0.69	0.90	-1.11	0.88	-0.90

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15\text{mm}$), la señal comando presentó una aceleración máxima en la base de 0.50g, que se llegó a amplificar hasta 1.36g registrándose en el muro posterior del segundo piso (A5). Por lo cual, se puede determinar que el Factor de Amplificación Dinámica para la presente fase fue 2.72.

Las Figuras 7.72; 7.73 y 7.74 muestran la distribución de las aceleraciones que se produjeron en toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados. A partir de los cuales se puede observar que el muro frontal y muro lateral presentaron a lo largo de toda su altura aceleraciones muy similares entre si. En referencia al muro posterior, ésta presenta aceleraciones casi uniformes hasta la zona cercana al segundo entepiso que es donde se genera una considerable amplificación de las aceleraciones.

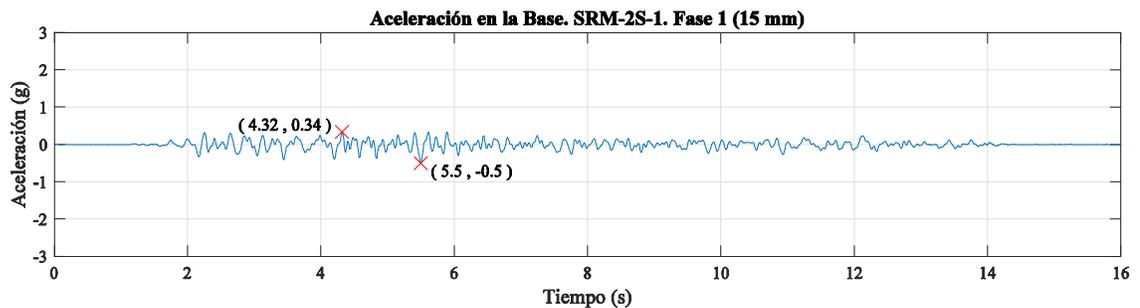
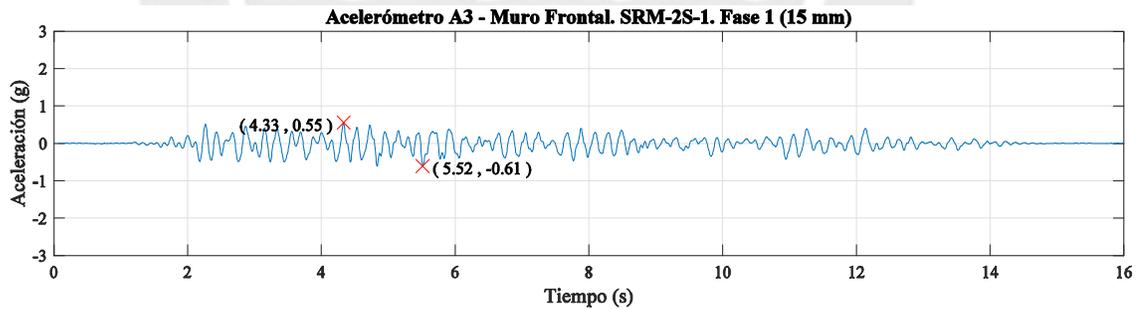
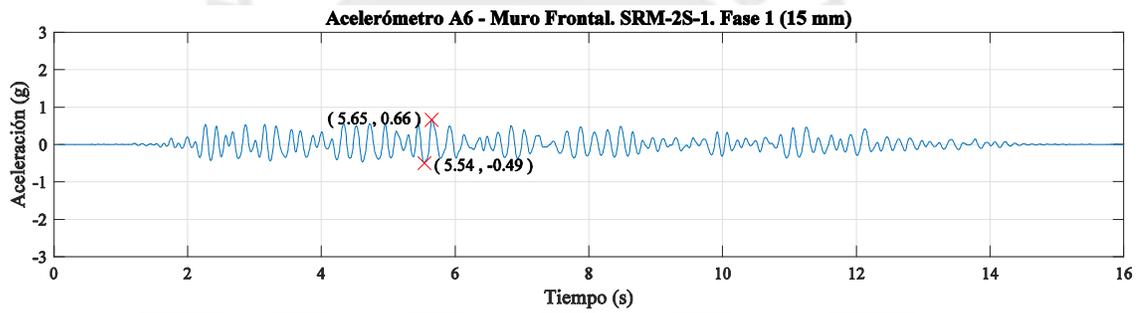
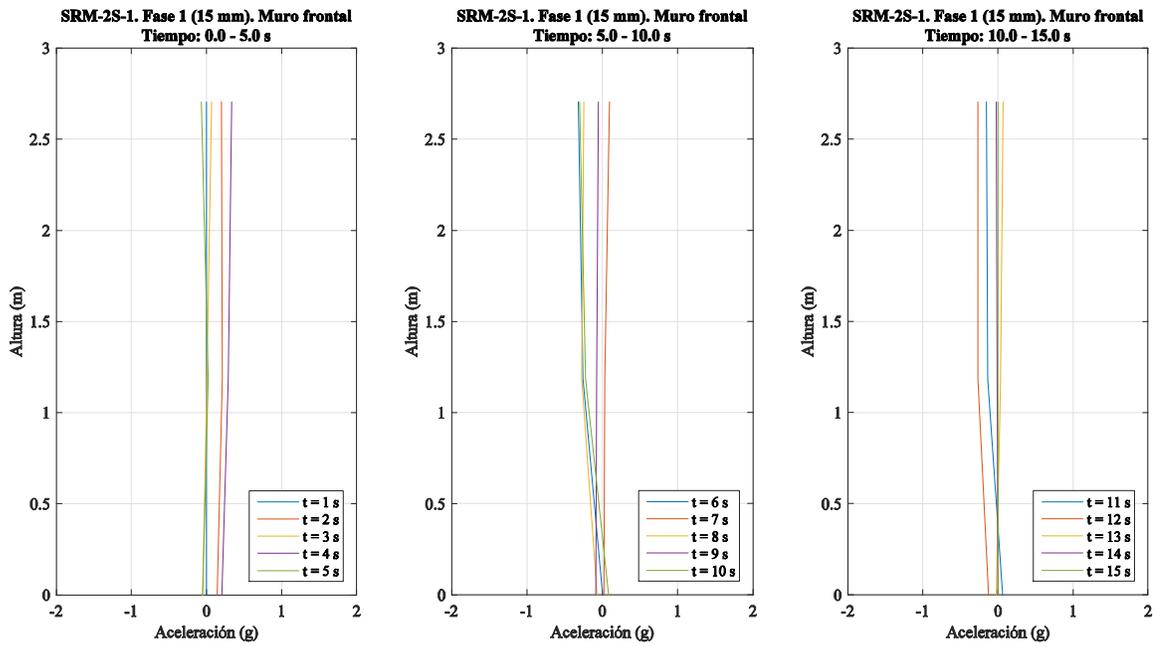


Figura 7.72 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

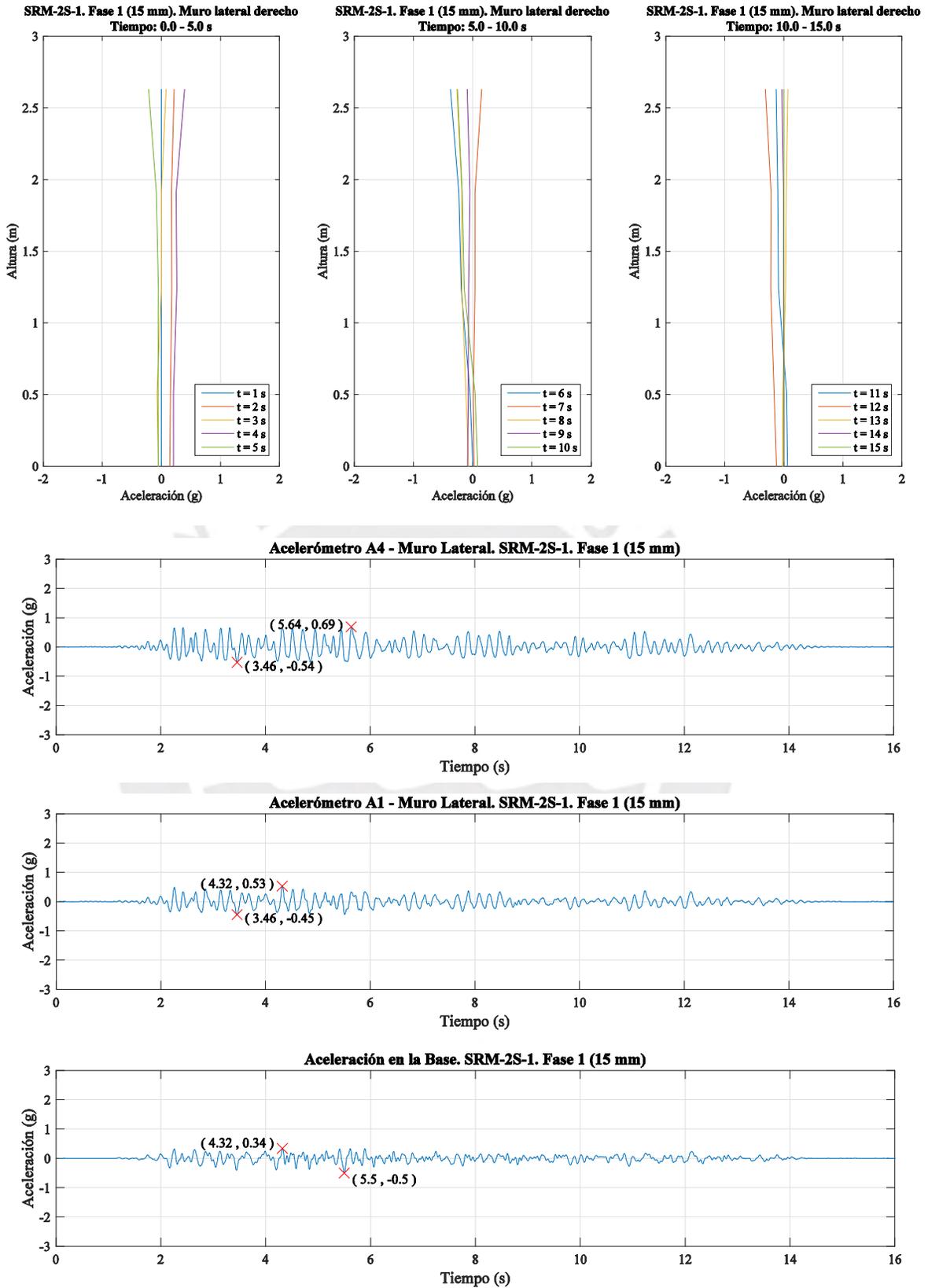


Figura 7.73 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

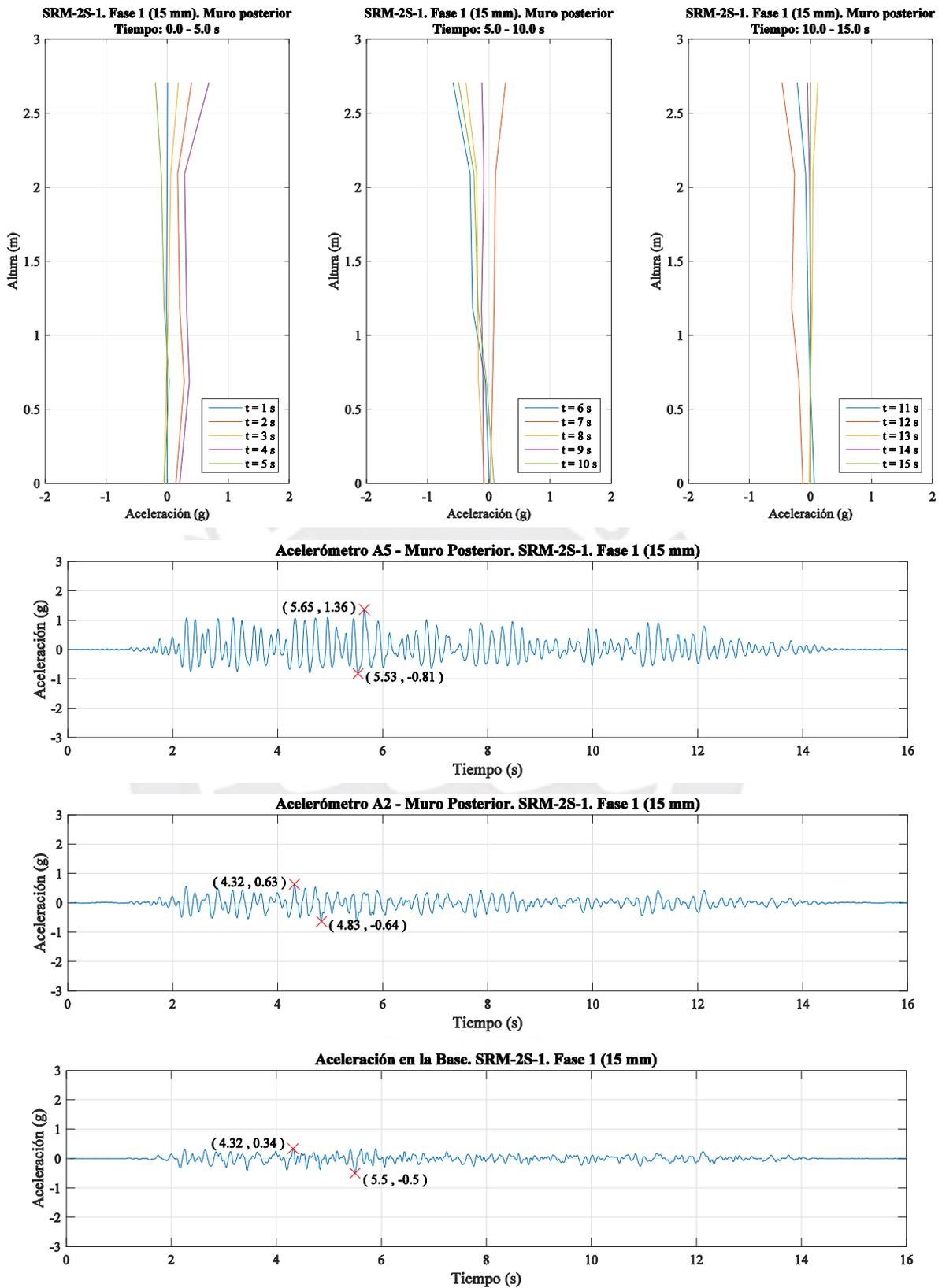
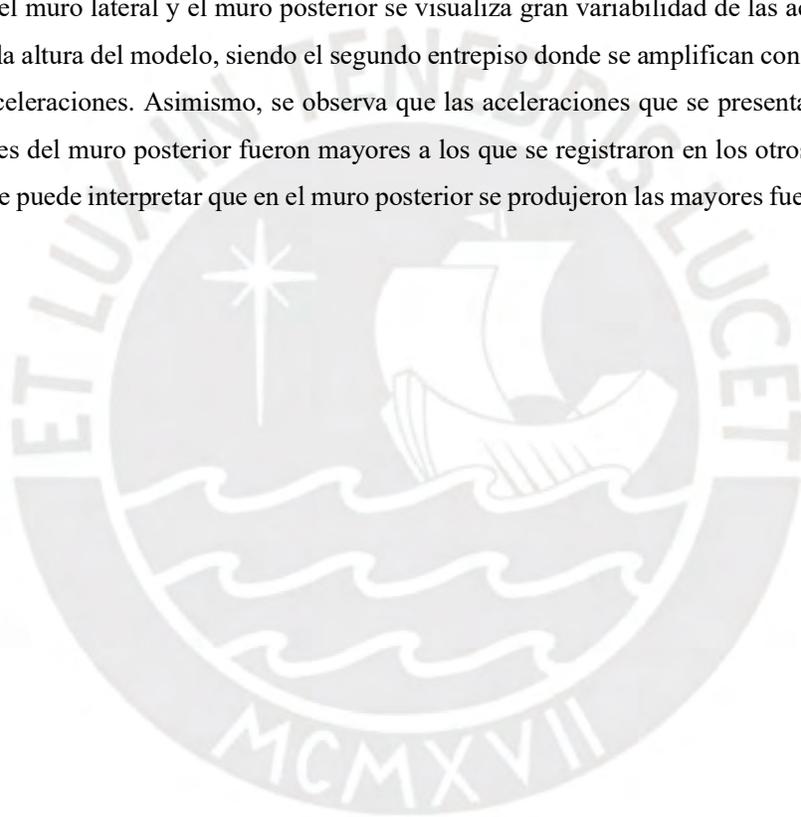


Figura 7.74 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

Por otra parte, en la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30\text{mm}$) la se\u00f1al comando present\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 0.98g, que se lleg\u00f3 a amplificar hasta 1.40g registrada en el muro posterior del segundo piso (A5). Por lo cual, se puede determinar que el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica para la presente fase fue 1.43.

En las Figuras 7.75; 7.76 y 7.77, se muestra la distribuci\u00f3n de las aceleraciones que se produjeron en toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados. En el muro frontal se observa que durante los primeros 4 segundos la amplificaci\u00f3n de la aceleraci\u00f3n se da casi de manera lineal, luego se registraron aceleraciones en el primer y segundo entrepiso relativamente similares.

Para el muro lateral y el muro posterior se visualiza gran variabilidad de las aceleraciones en toda la altura del modelo, siendo el segundo entrepiso donde se amplifican considerablemente las aceleraciones. Asimismo, se observa que las aceleraciones que se presentaron en los dos niveles del muro posterior fueron mayores a los que se registraron en los otros muros, por lo que se puede interpretar que en el muro posterior se produjeron las mayores fuerzas inerciales.



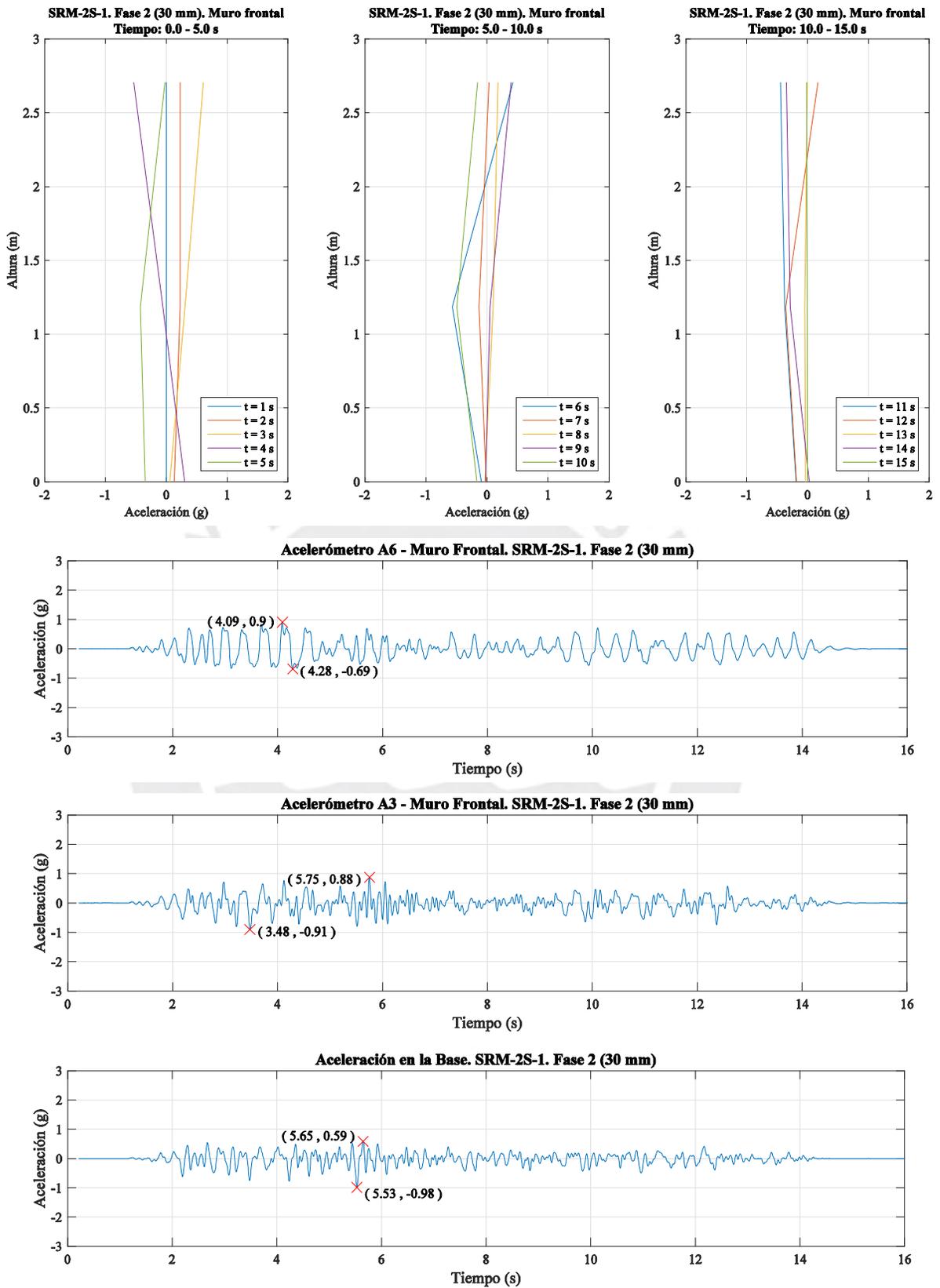


Figura 7.75 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

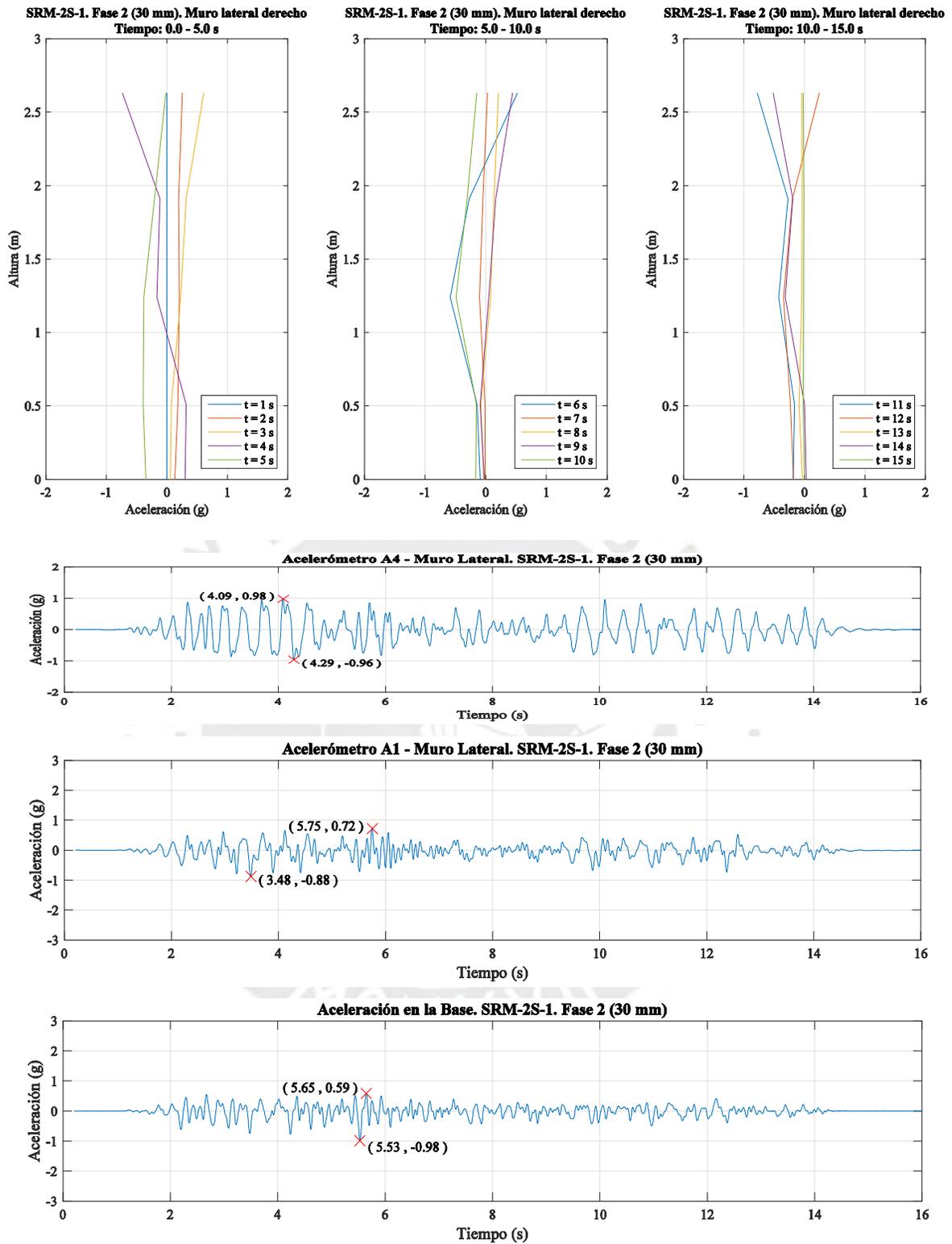


Figura 7.76 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

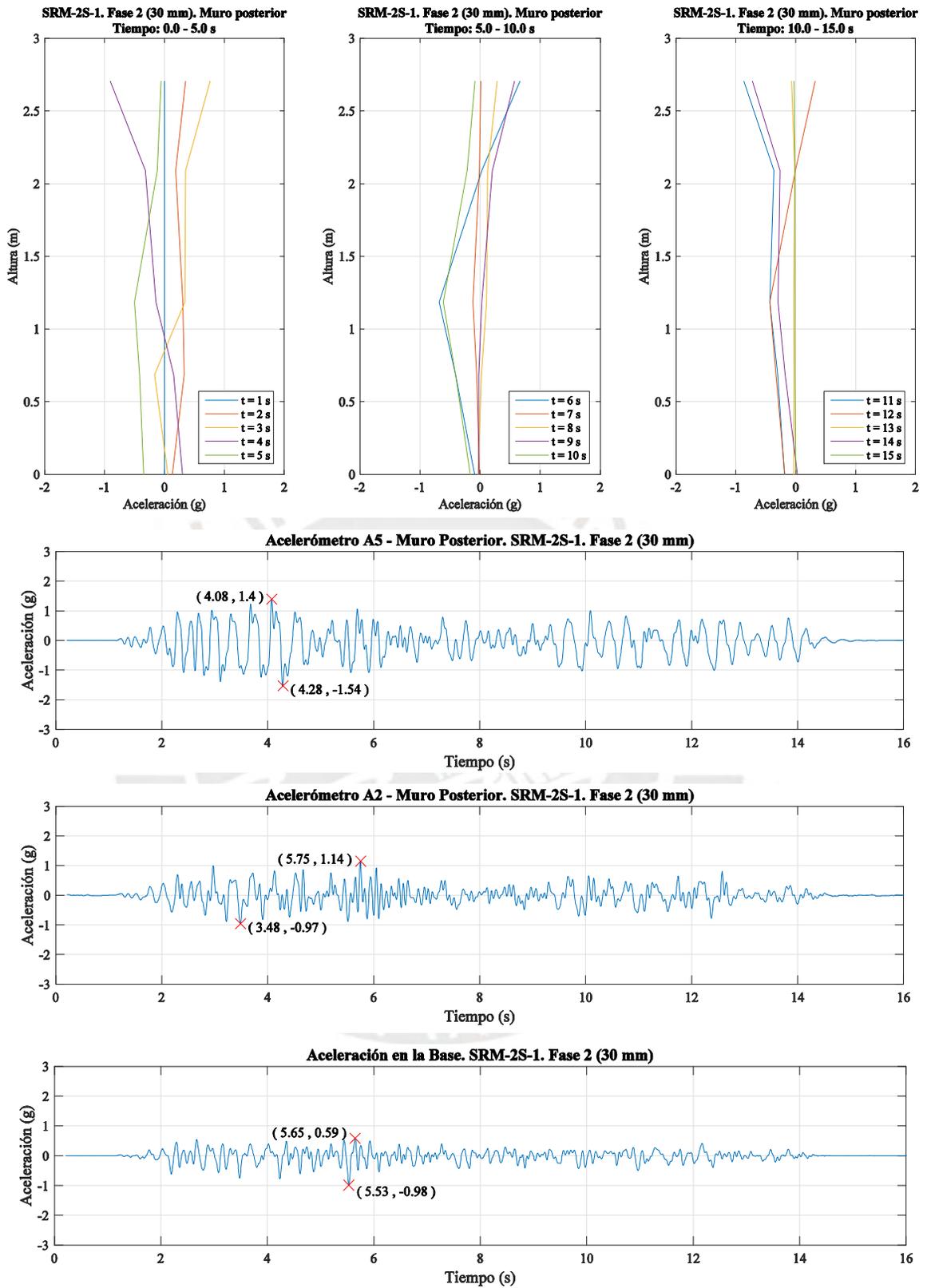


Figura 7.77 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

Respecto a la tercera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), la se\u00f1al comando present\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 1.68g, alcanzando una amplificaci\u00f3n m\u00e1xima de 2.47g, la cual fue recopilada por el aceler\u00f3metro A5 ubicado en el muro posterior del segundo piso. De esta manera, se puede identificar el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica de 1.47. Es importante hacer mencisi\u00f3n que no se ha considerado los valores del aceler\u00f3metro A9 debido a que se ubica en la mitad de la altura del muro posterior, quedando cerca a la base del modelo.

Las Figuras 7.78; 7.79 y 7.80 muestran la distribuci\u00f3n de las aceleraciones que se produjeron en toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados, a partir de los cuales en el muro frontal se puede observar que es en el primer piso donde se amplifican m\u00e1s las aceleraciones. Asimismo, las aceleraciones en el segundo nivel durante los primeros 6 segundos del ensayo resultaron ser cercanamente similares a las que se presentaron en la base, con lo cual, nos da un indicativo que el muro posterior del segundo nivel present\u00f3 mayor nivel de da\u00f1o en comparaci\u00f3n al primero.

Respecto al muro lateral se observa gran variabilidad de las aceleraciones a lo largo de toda la altura del modelo. Asimismo, se visualiza que las aceleraciones registradas en el primer entreciso fueron ligeramente superiores a las del segundo, por lo que se puede inducir que en el primer entreciso se presentaron mayores fuerzas inerciales.

Finalmente, en el muro posterior, al igual que lo observado en el muro lateral, se visualiza gran variaci\u00f3n de las aceleraciones registradas en toda la altura del modelo, pero con la diferencia que la mayor amplificaci\u00f3n de aceleraciones se da en el segundo entreciso. Asimismo, se observa que las aceleraciones que se presentaron en los dos niveles del muro posterior fueron mayores a los que se registraron en los otros muros, pudi\u00e9ndose interpretar que en el muro posterior se produjeron las mayores fuerzas inerciales.

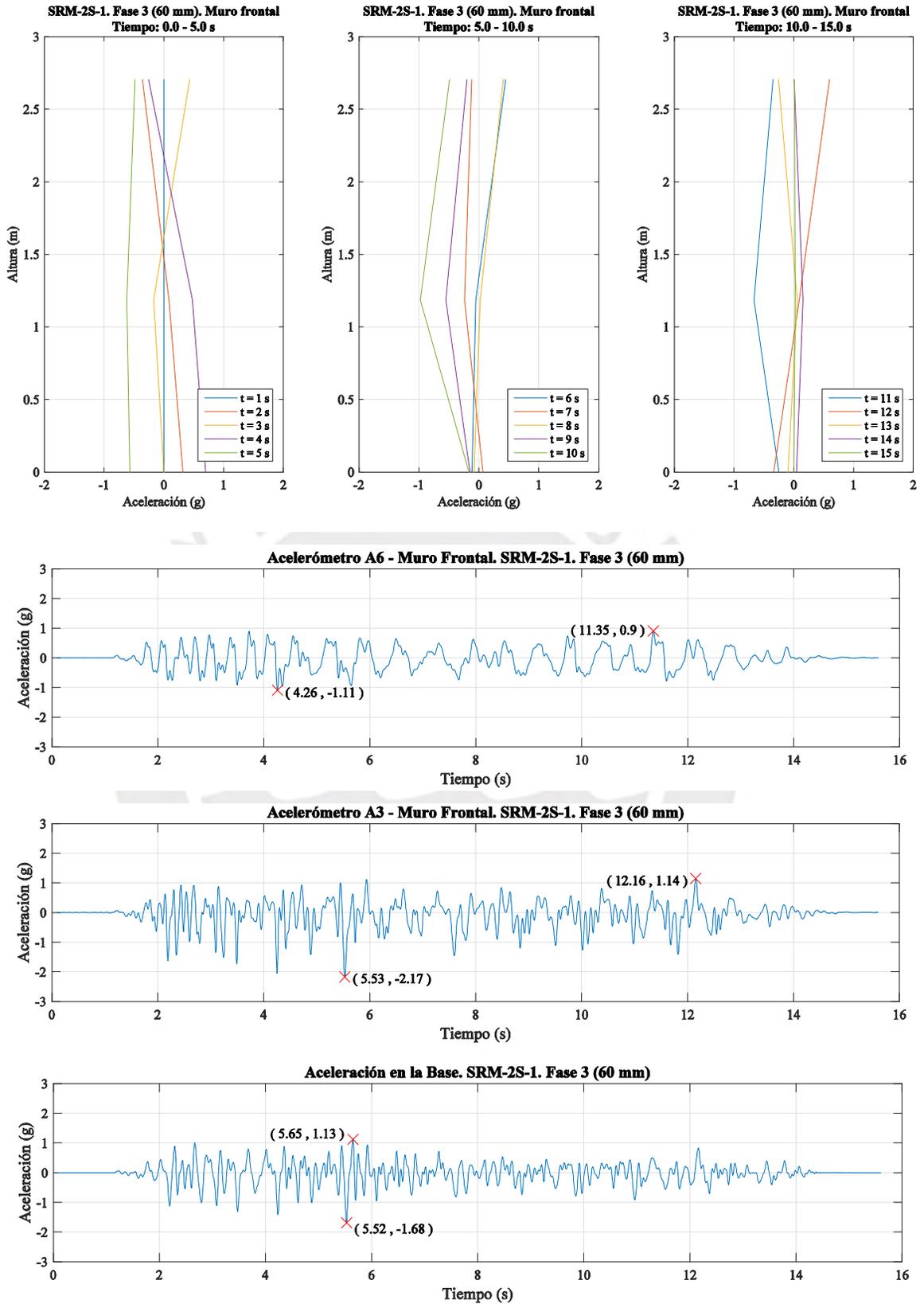


Figura 7.78 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

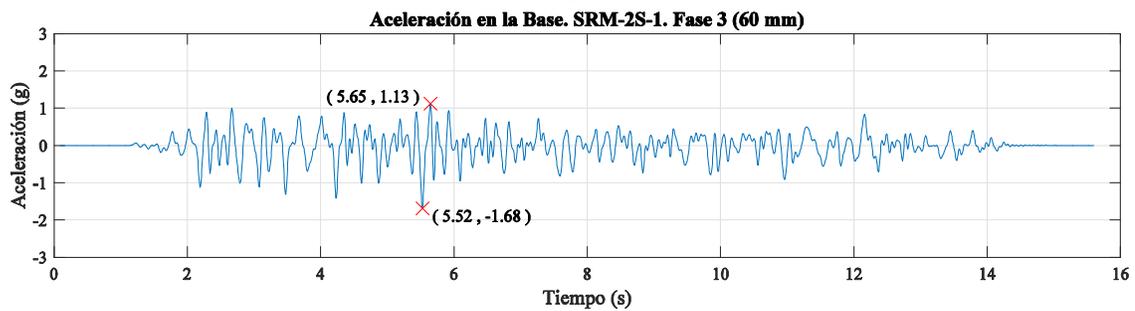
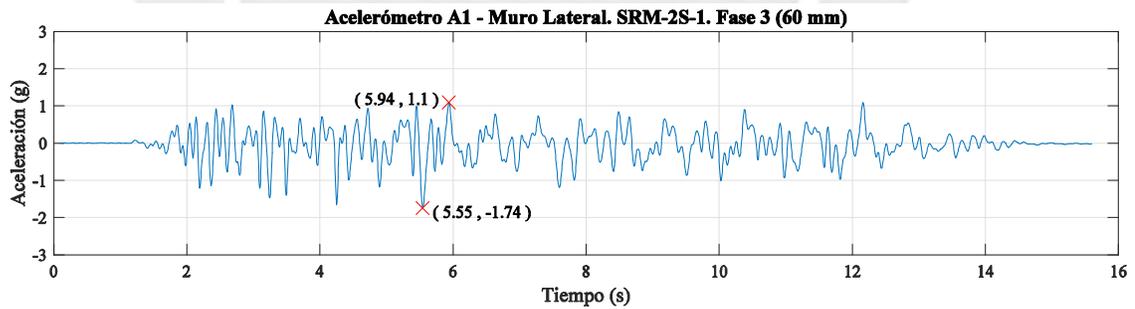
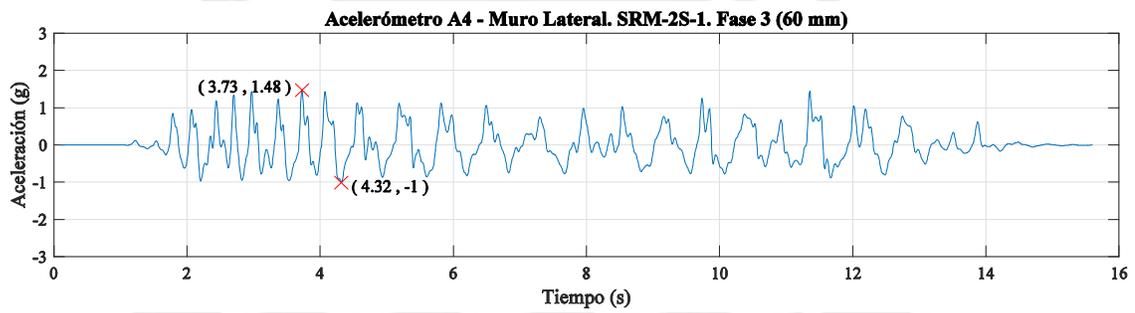
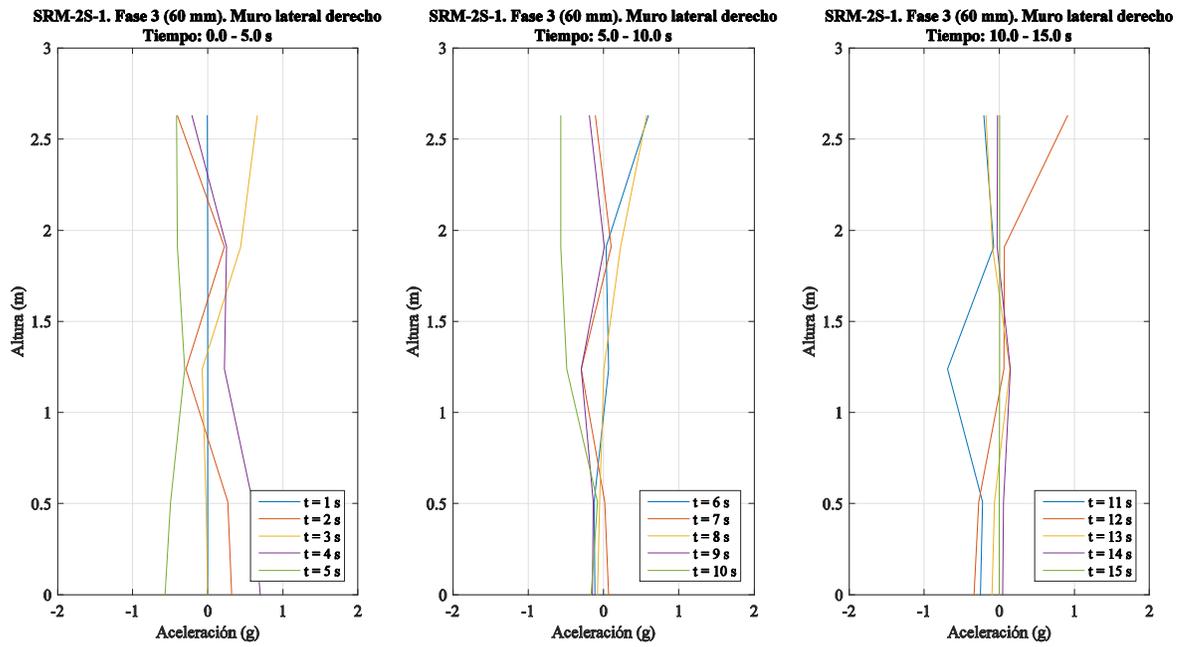


Figura 7.79 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

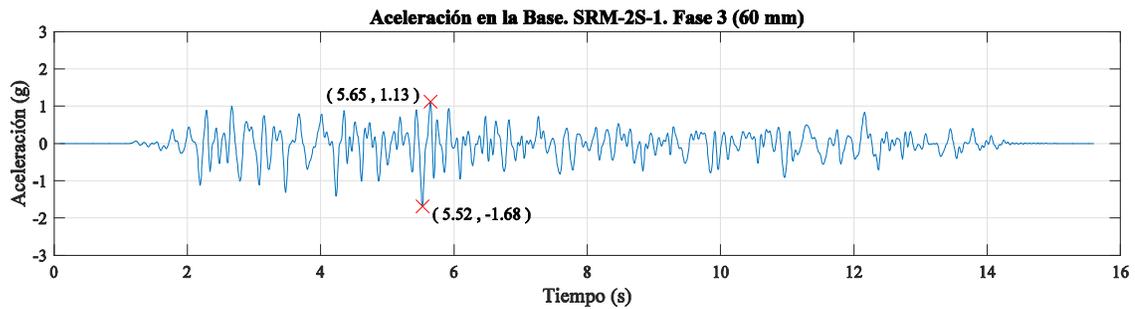
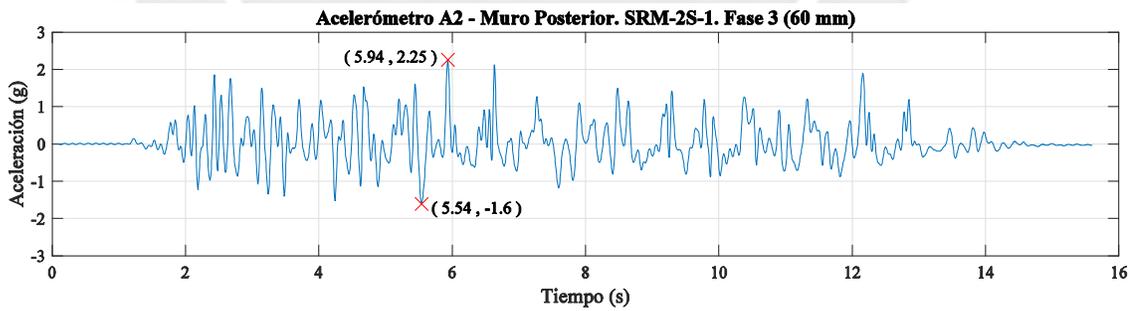
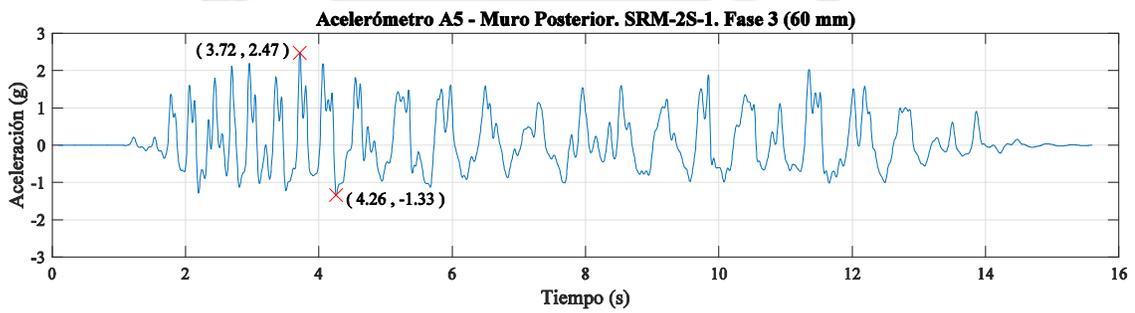
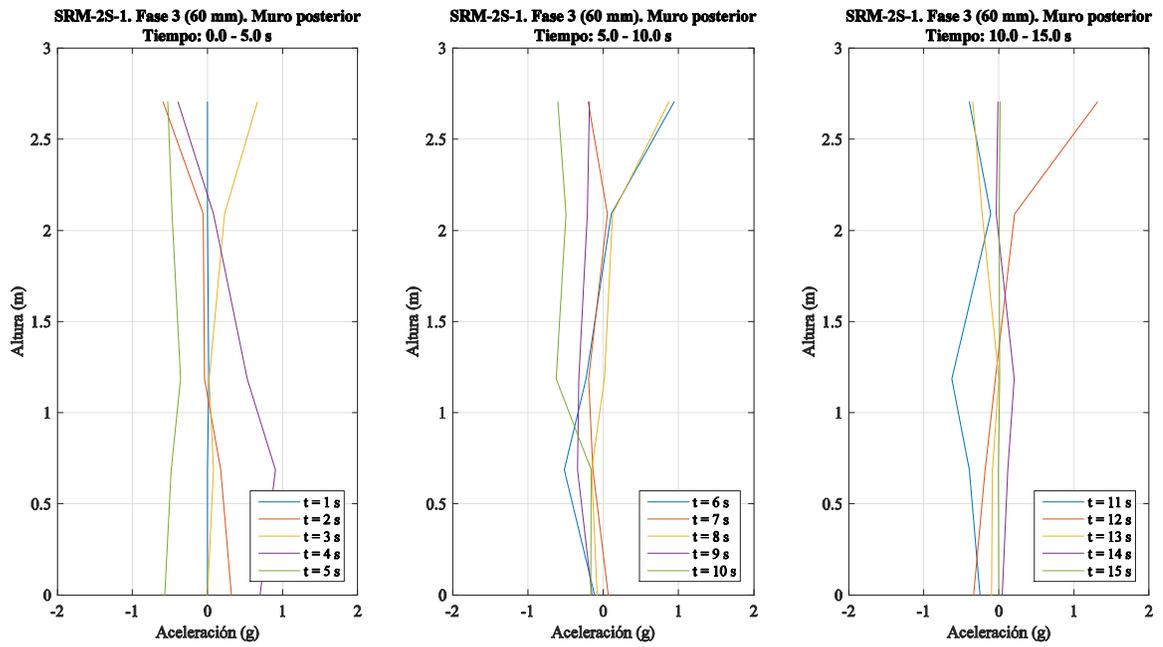
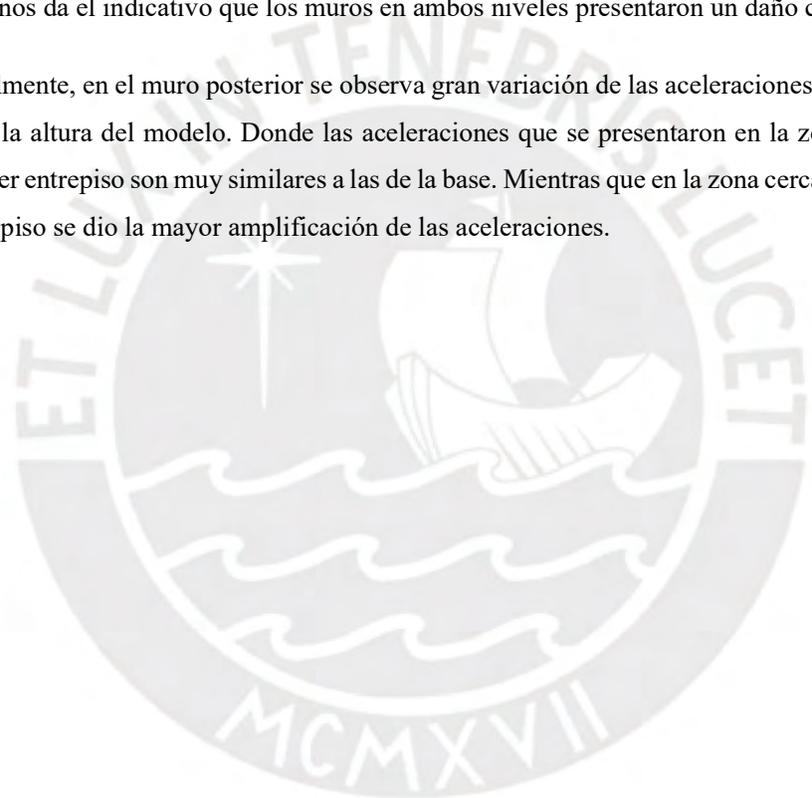


Figura 7.80 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

Para la cuarta fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60$ mm), la se\u00f1al comando registr\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 1.70g, alcanz\u00e1ndose una amplificaci\u00f3n m\u00e1xima de 1.97g que se dio en el segundo nivel del muro posterior (A5). Por lo tanto, se puede determinar que el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica fue 1.16. De la misma manera que en la fase anterior, no se consider\u00f3 el valor registrado por el aceler\u00f3metro A9 debido a que este se ubica en la mitad de la altura del muro posterior del primer piso, de tal forma que queda muy cerca a la base del modelo.

Las Figuras 7.81; 7.82 y 7.83 muestran la distribuci\u00f3n de las aceleraciones que se produjeron en toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados. Tal es as\u00ed, que en los muros frontal y lateral se observa que las aceleraciones registradas en los dos entresijos fueron ligeramente menores a las de la base, lo cual nos da el indicativo que los muros en ambos niveles presentaron un da\u00f1o considerable.

Finalmente, en el muro posterior se observa gran variaci\u00f3n de las aceleraciones registradas en toda la altura del modelo. Donde las aceleraciones que se presentaron en la zona cercana al primer entresijo son muy similares a las de la base. Mientras que en la zona cercana al segundo entresijo se dio la mayor amplificaci\u00f3n de las aceleraciones.



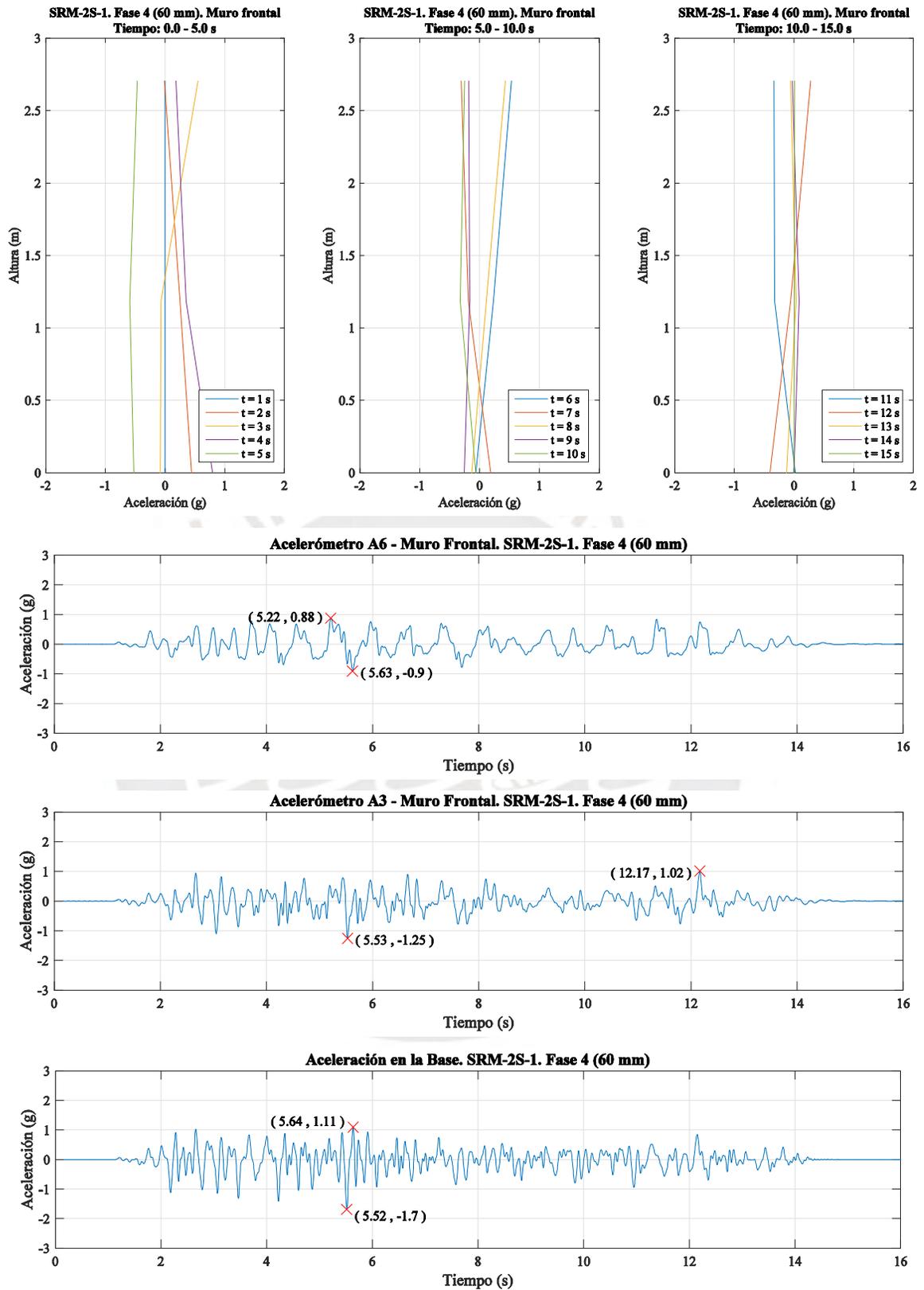


Figura 7.81 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

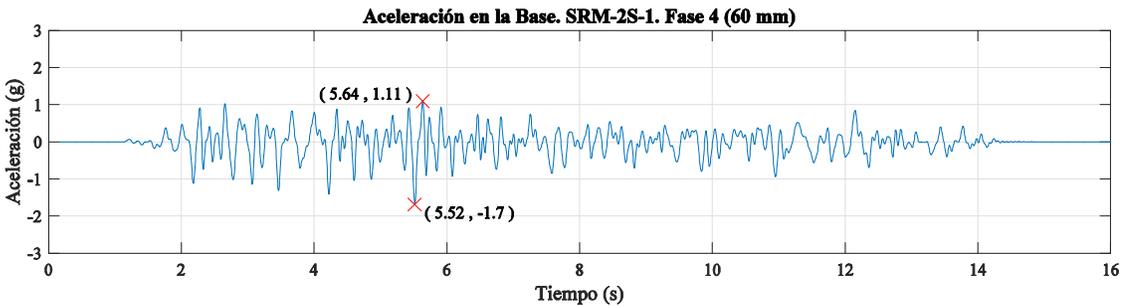
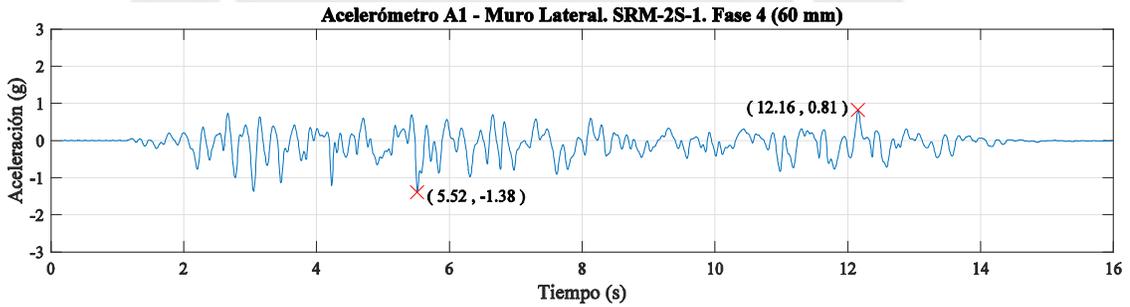
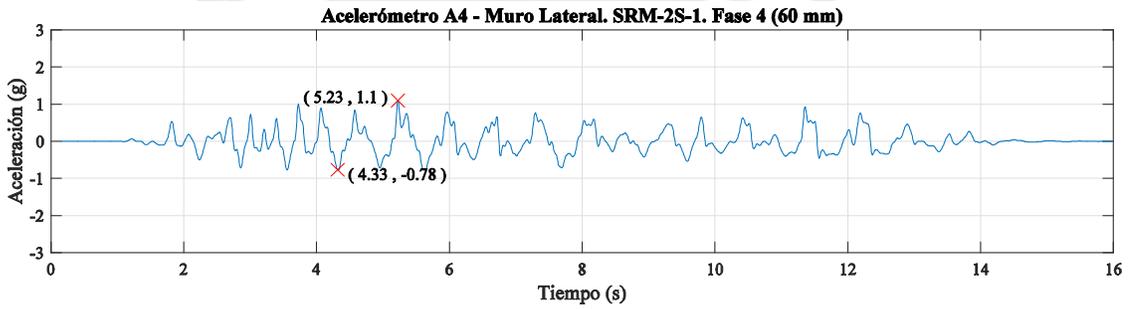
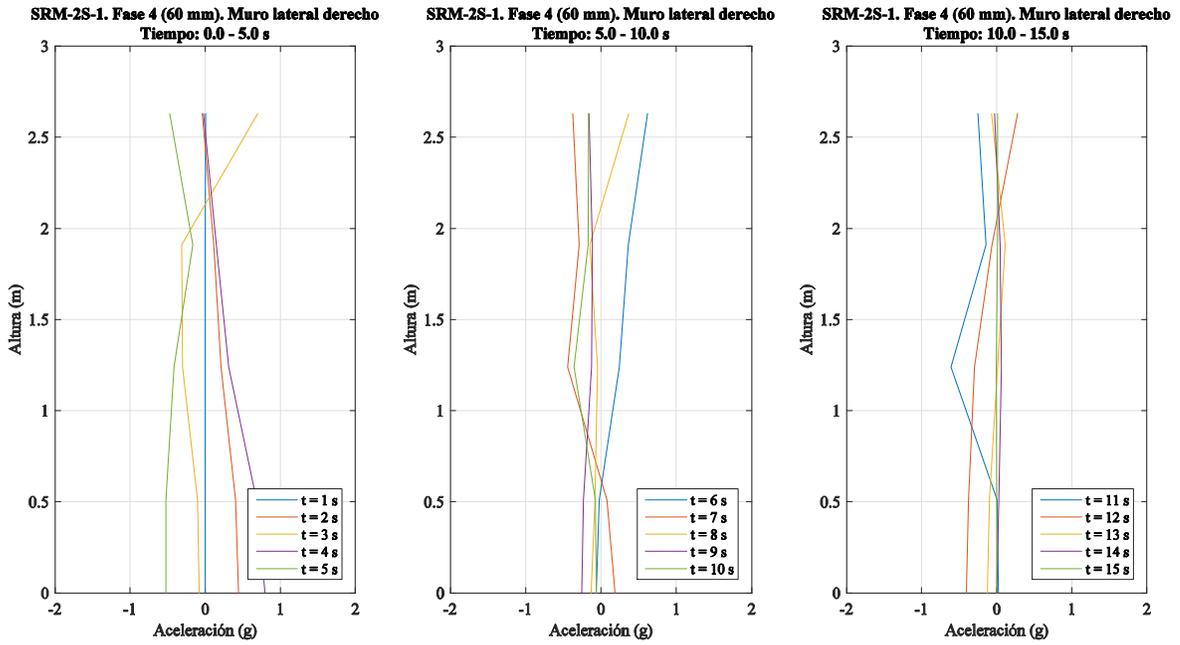


Figura 7.82 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

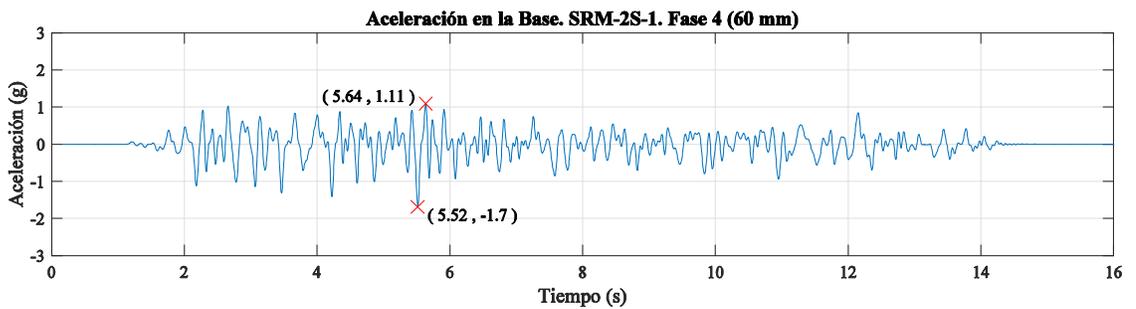
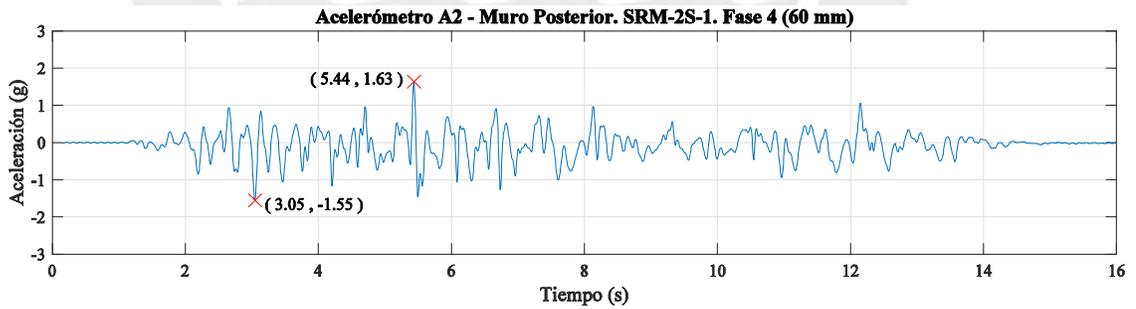
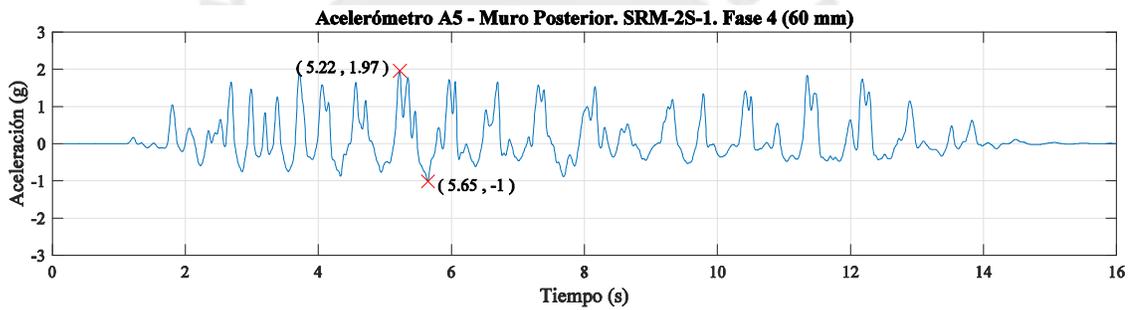
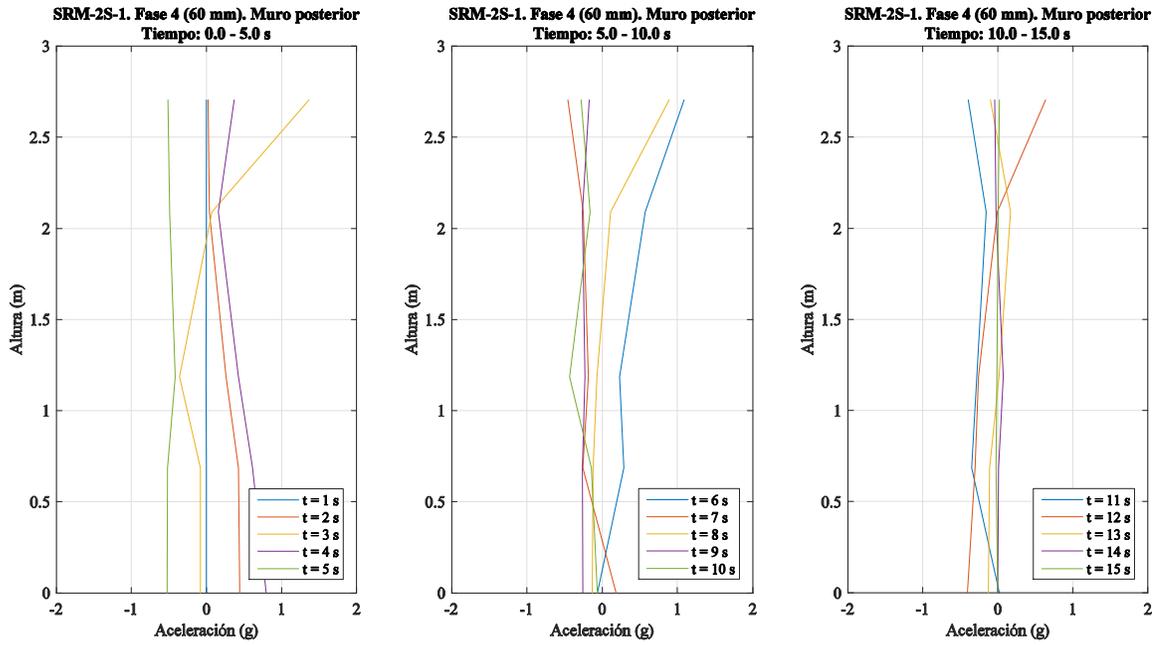


Figura 7.83 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

7.3.4 MODELO SRM-2S-2

La Tabla 20 muestra las aceleraciones totales máximas (g) que fueron registradas durante las dos fases de ensayo a las que fue sometido el modelo SRM-2S-2.

Tabla 20 Aceleraciones totales máximos (g), SRM-2S-1

Acele.		Fase 1		Fase 2	
		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$		$(\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm})$	
		Máx.(+)	Máx.(-)	Máx.(+)	Máx.(-)
Base	A0	1.23	-1.74	1.18	-1.77
	A8	1.19	-1.45	1.05	-1.73
1er Nivel	A1	1.10	-2.01	0.83	-1.44
	A9	1.28	-1.52	1.90	-0.96
	A2	1.84	-1.94	2.12	-1.37
	A3	1.74	-2.52	1.53	-1.82
	A7	0.84	-0.86	0.74	-0.88
2do Nivel	A4	1.50	-1.37	1.34	-0.86
	A5	2.08	-2.09	1.35	-1.24
	A6	1.00	-1.14	0.95	-0.92

En la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), la señal comando presentó una aceleración máxima en la base de 1.74g, que se llegó a amplificar hasta 2.52g registrándose en el muro frontal del primer piso (A3). Por lo cual, se puede determinar que el Factor de Amplificación Dinámica para la presente fase fue 1.45.

Las Figuras 7.84; 7.85 y 7.86 muestran la distribución de las aceleraciones que se produjeron en toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados, del cual se puede visualizar que en los muros frontal y posterior se presentó gran variación de las aceleraciones en toda la altura del modelo. Siendo el primer entrepiso donde se registraron las mayores amplificaciones de las aceleraciones. Esto permite inducir que el segundo nivel presentó un mayor nivel de daño.

Respecto al muro posterior, al igual que en el caso de los otros muros, se visualiza gran variación de las aceleraciones en toda la altura del modelo. Sin embargo, es en el segundo entrepiso donde se registraron las mayores amplificaciones de las aceleraciones.

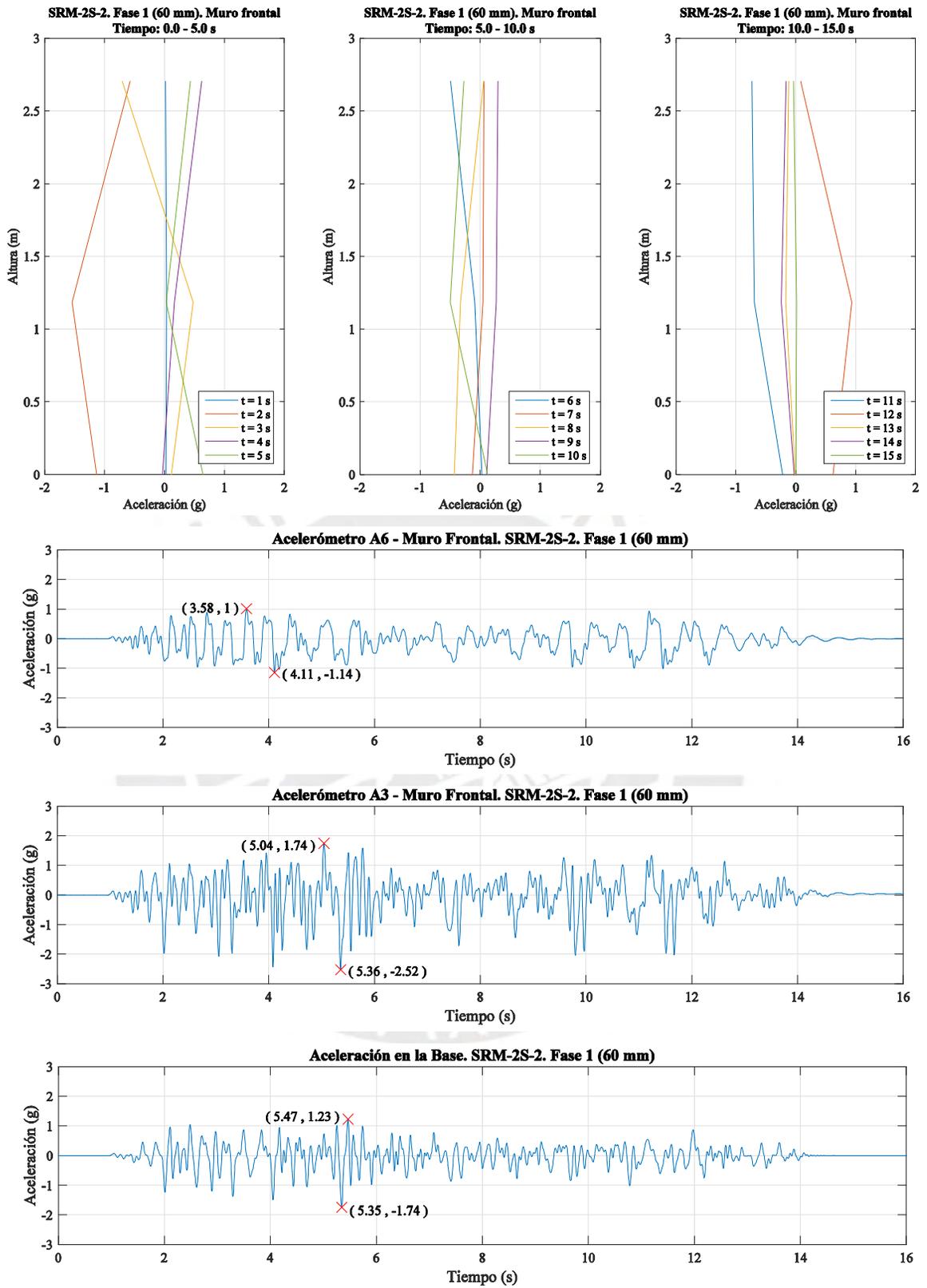


Figura 7.84 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

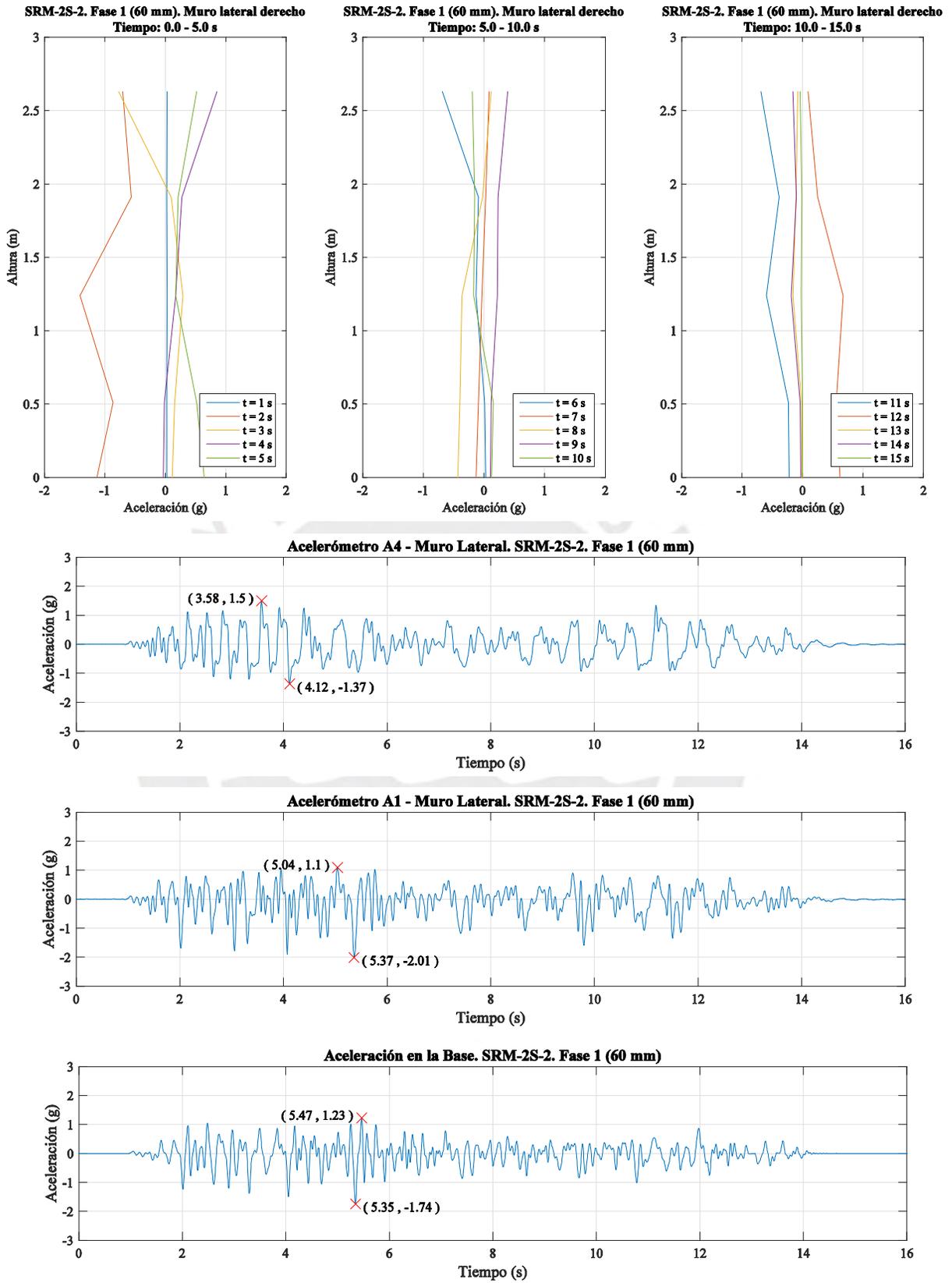


Figura 7.85 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

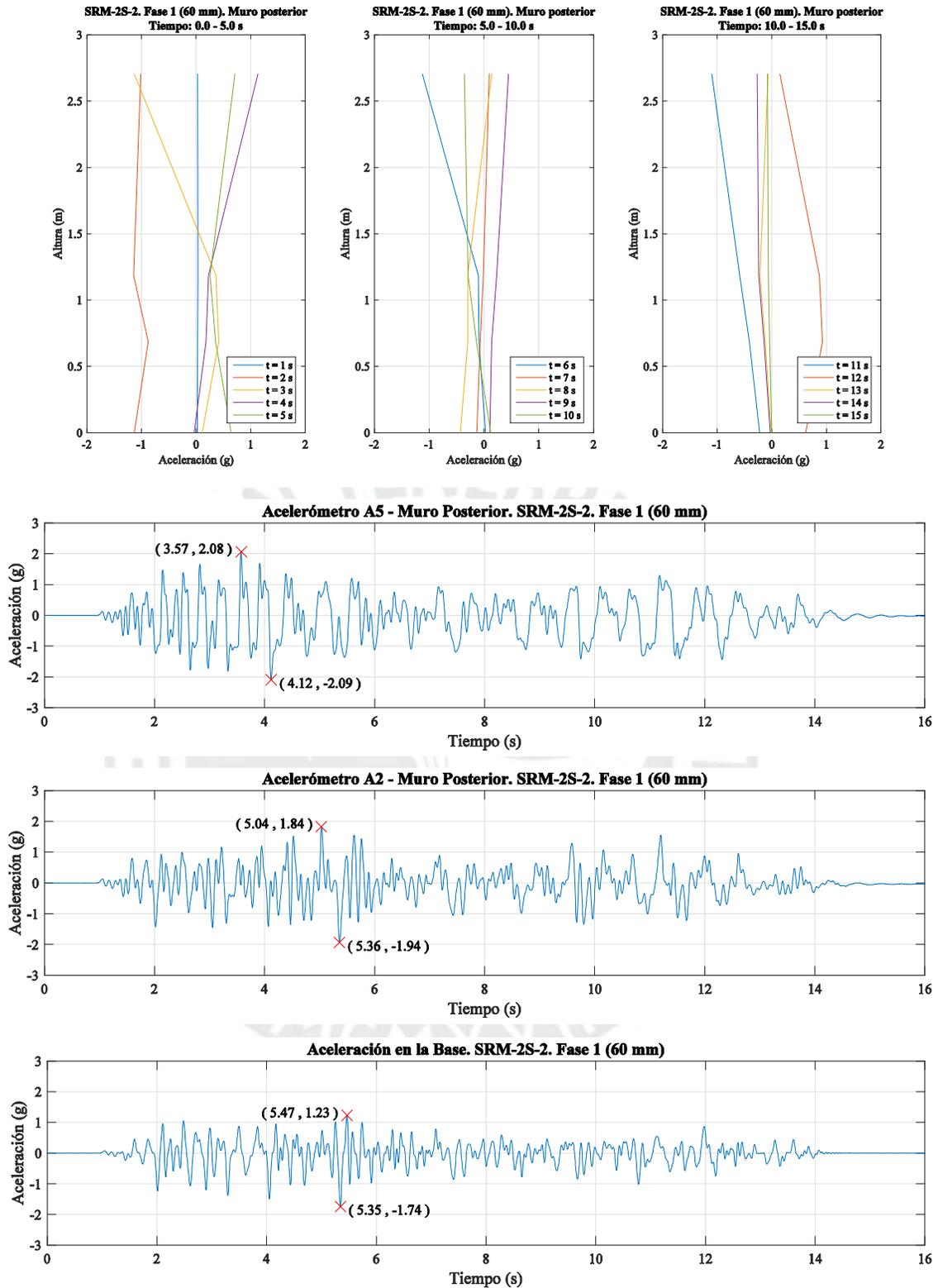
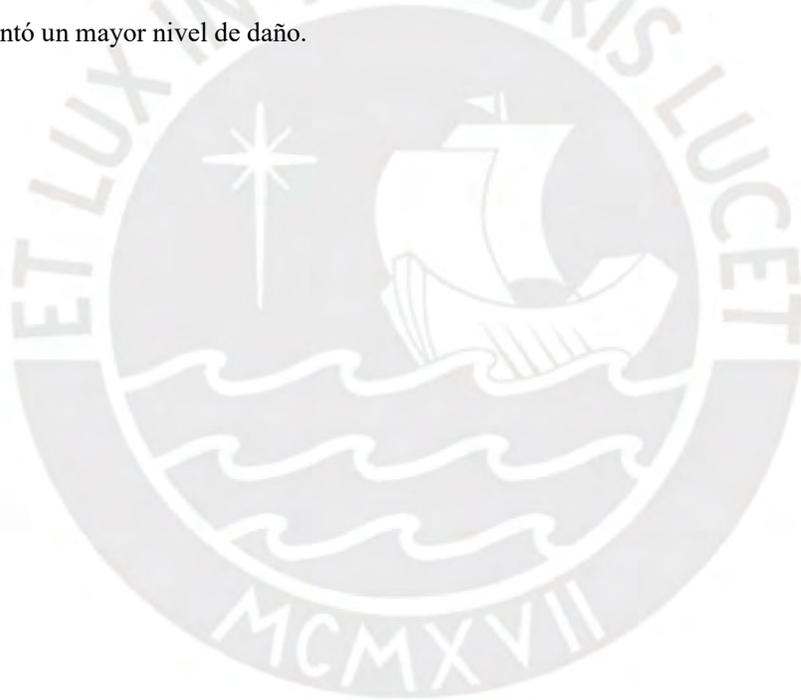


Figura 7.86 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

En la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), la se\u00f1al comando present\u00f3 una aceleraci\u00f3n m\u00e1xima en la base de 1.77g, que se lleg\u00f3 a amplificar hasta 2.12g registr\u00e1ndose en el muro posterior del primer piso (A2). Por lo cual, se puede determinar que el Factor de Amplificaci\u00f3n Din\u00e1mica para la presente fase fue 1.20.

Las Figuras 7.87; 7.88 y 7.89 muestran la distribuci\u00f3n de las aceleraciones que se produjeron en toda la altura del modelo y la historia en el tiempo de las aceleraciones recopiladas por los dispositivos instalados, donde se puede observar que en el muro frontal las aceleraciones registradas en el segundo entrepiso son menores a los de la base. A su vez, es en el primer entrepiso donde se produce la mayor amplificaci\u00f3n de aceleraciones.

Respecto a los muros lateral y posterior, es el primer entrepiso donde se presenta la mayor amplificaci\u00f3n de aceleraciones. Asimismo, las aceleraciones registradas en el segundo entrepiso son menores a las que se dieron en la base, dando como indicativo que este piso present\u00f3 un mayor nivel de da\u00f1o.



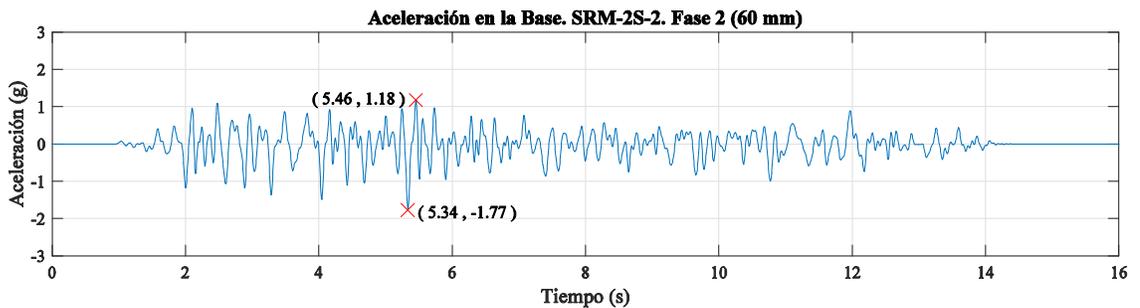
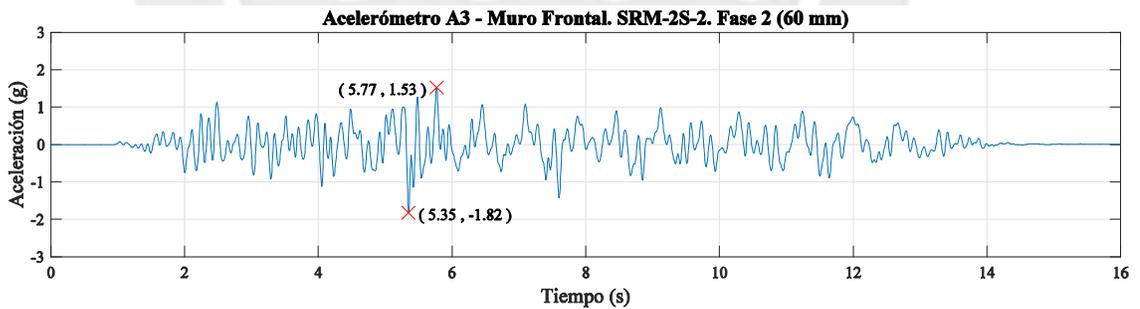
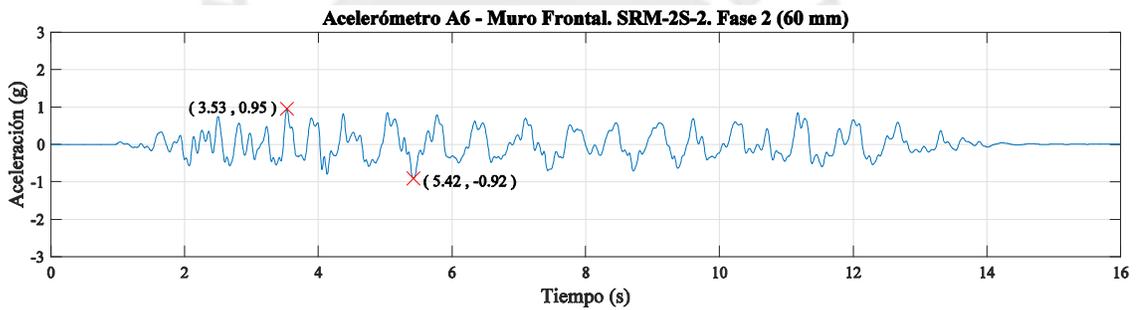
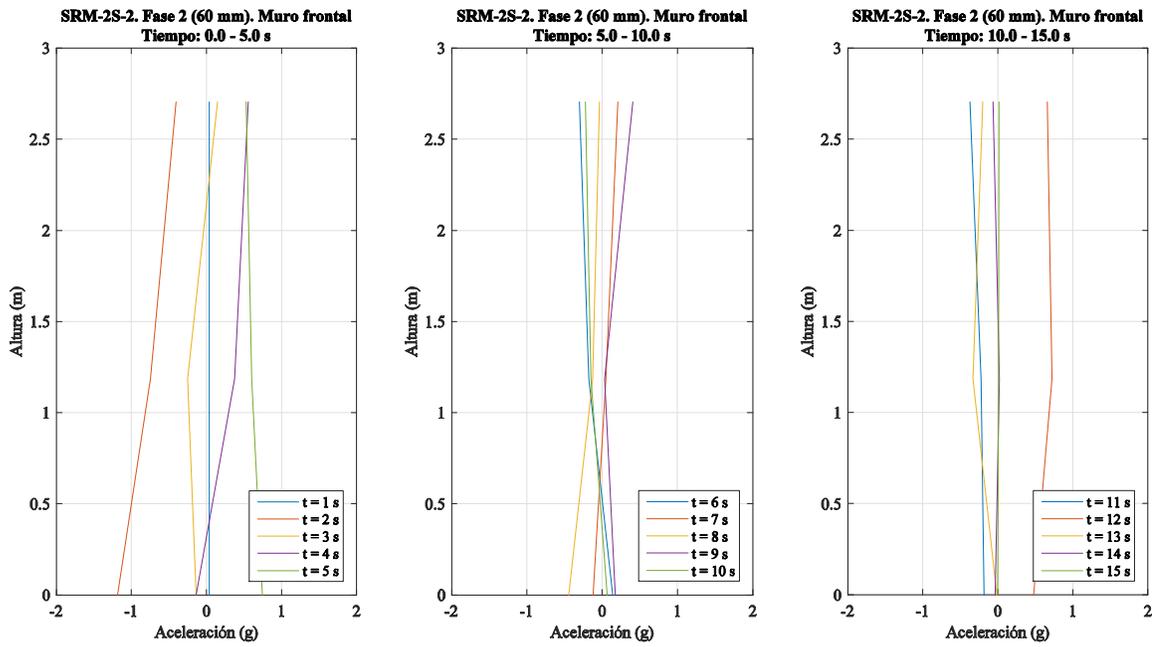


Figura 7.87 Respuesta de aceleración total – Muro Frontal – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

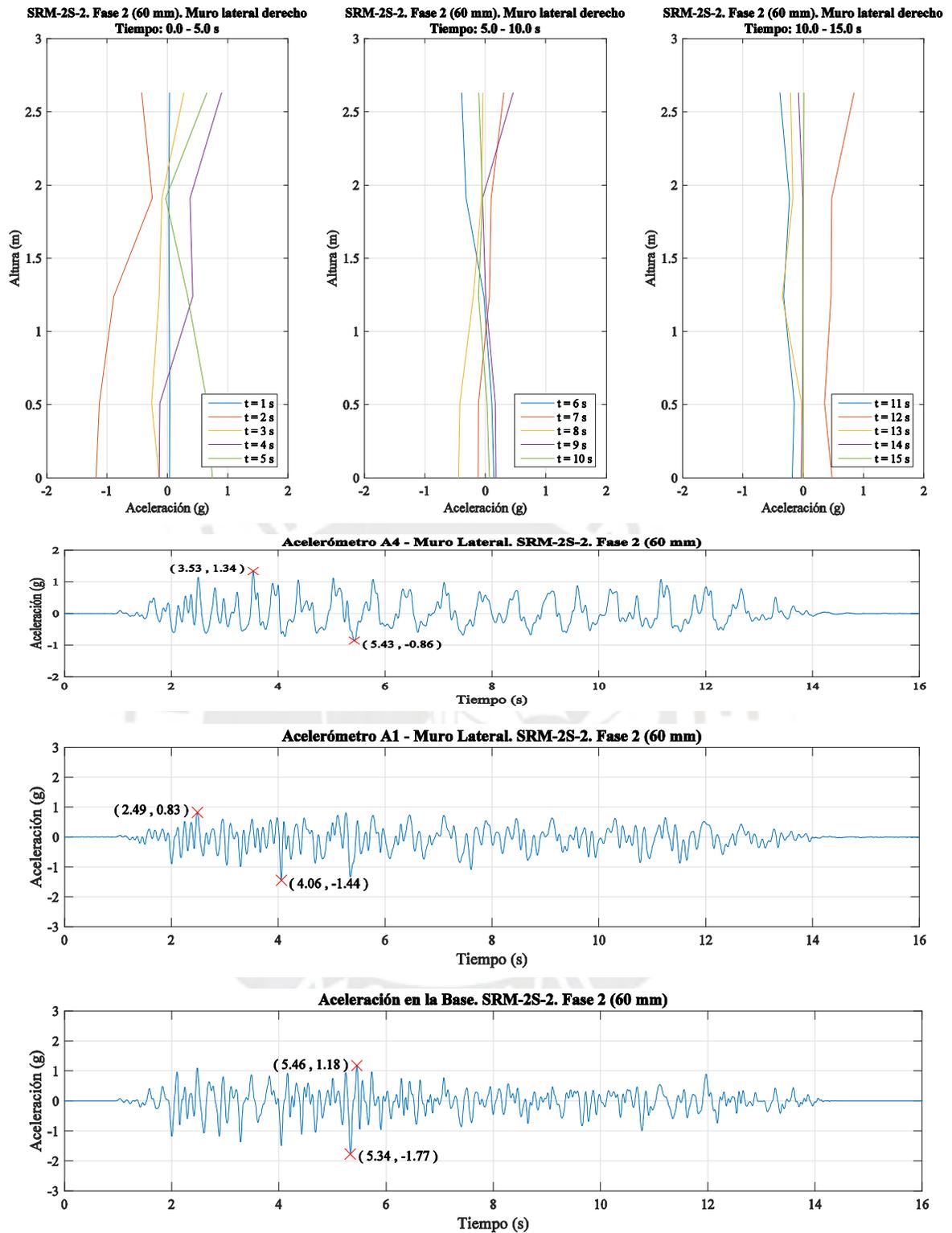


Figura 7.88 Respuesta de aceleración total – Muro Lateral – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

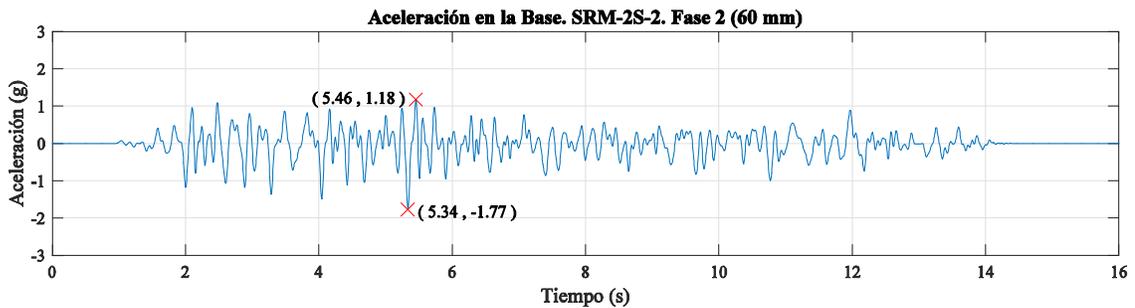
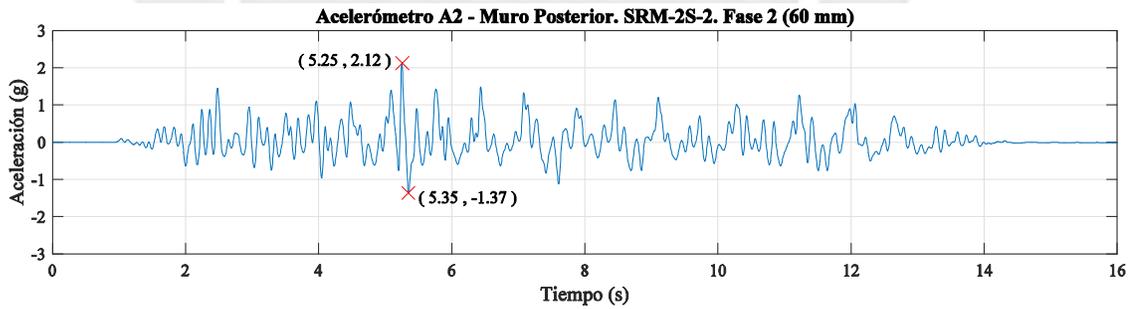
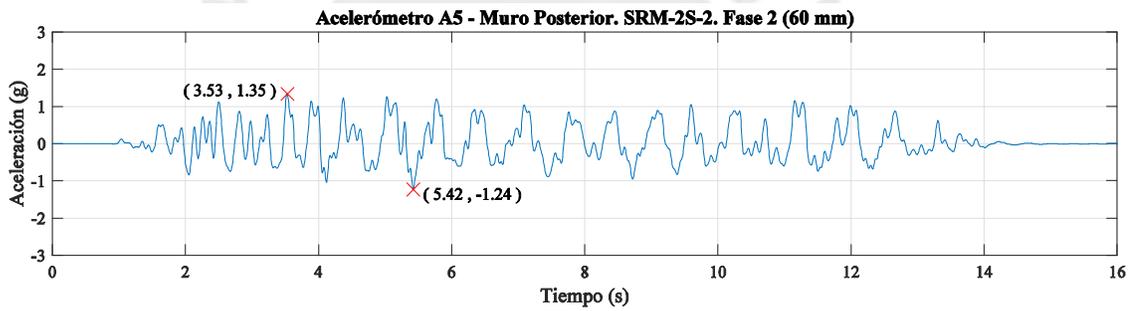
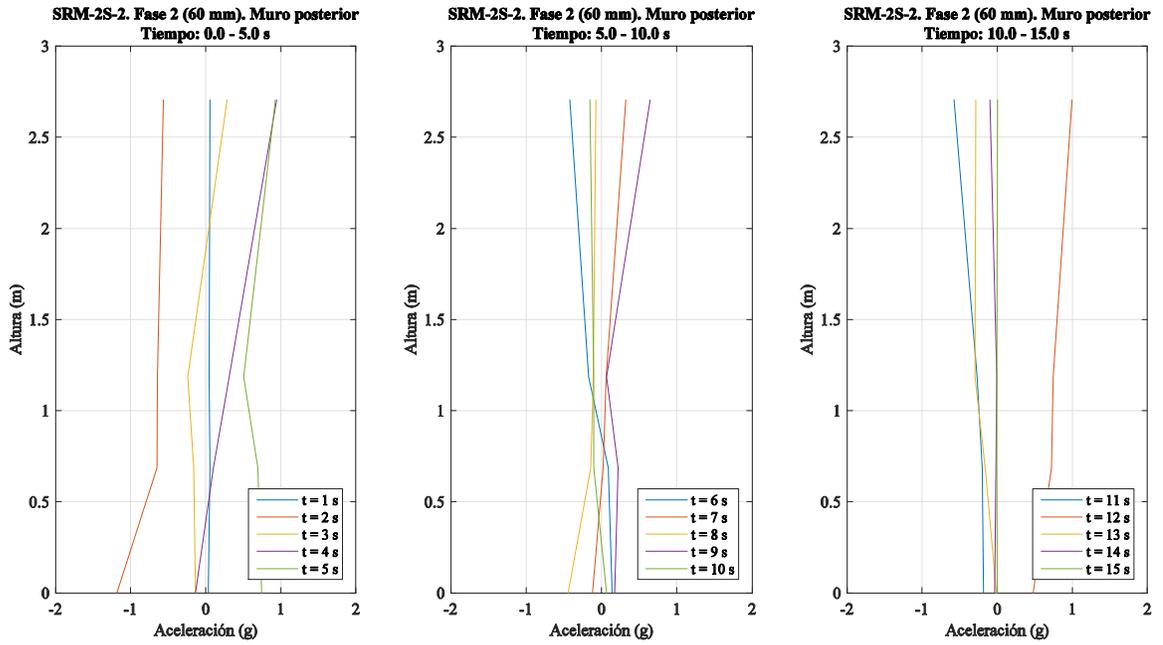


Figura 7.89 Respuesta de aceleración total – Muro Posterior – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

7.4 CORTANTE EN LA BASE

Los datos obtenidos por el sensor de fuerza instalado en el actuador de la plataforma de la mesa vibradora son el producto de la fuerza aplicada en cada instante de tiempo para desplazar a la plataforma según la señal sísmica utilizada.

La fuerza cortante en la base del modelo se puede obtener de las fuerzas de inercia en el sistema actuador-plataforma al restar a este valor la masa de la plataforma y del anillo de cimentación multiplicados por la aceleración de la mesa. En la ecuación (29) se muestra lo anteriormente explicado para el cálculo de la fuerza cortante basal.

$$V = Fa - (P_p + P_a) * A_0 \quad (29)$$

Donde:

V : Cortante basal del modelo (kN).

F_a: Fuerza aplicada a la plataforma (kN).

P_p: Peso de la plataforma 176,58 KN (18 000 kgf).

P_a: Peso del anillo de cimentación (kN).

A₀: Aceleración de la plataforma de la mesa vibradora (g).

De los resultados obtenidos en la presente investigación se determinó que los modelos que cuentan con el reforzamiento de cuerdas al ser más rígidos que los modelos no reforzados, reciben mayores fuerzas cortantes en la base, los que llegan a alcanzar valores casi similares al peso propio del modelo. Esto se da para los dos casos, es decir, cuando se someten a desplazamiento en la base con un aumento de forma gradual y cuando se someten al máximo desplazamiento en la base de forma directa.

A su vez, se identificó que para los modelos que no cuentan con refuerzo de cuerdas sintéticas y que son sometidos a desplazamientos en la base con un aumento de forma gradual sufren menor nivel de daño en comparación a cuando son sometidos de forma directa al máximo desplazamiento en la base. Esto se ve reflejado ya que, en el primer caso de estos, el modelo toma mayor fuerza cortante en la base en comparación al segundo. Se detalla los resultados obtenidos en cada uno de los modelos ensayados.

7.4.1 MODELO URM-2S-1

El modelo URM-2S-1 durante la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$) llegó a presentar una cortante máxima en la base del 50% de su peso total. Durante la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$), llegó a ser sometido a una cortante máxima en la base del 74% del peso del modelo. Ver Tabla 21.

Tabla 21 Fuerza Cortante en la Base (kN), URM-2S-1

Fase	Fuerza Cortante V (kN)	Peso del Modelo P (kN)	Coefficiente V/P
Fase 1 ($\Delta_{\text{máx}} = 15 \text{ mm}$)	44.46	89.70	0.50
Fase 2 ($\Delta_{\text{máx}} = 30 \text{ mm}$)	66.73		0.74

La Figura 7.90 y Figura 7.91 nos muestra la historia en el tiempo de la cortante en la base, donde se alcanzó valores máximos de 44.6kN y 66.73kN para la primera y segunda fase, respectivamente.

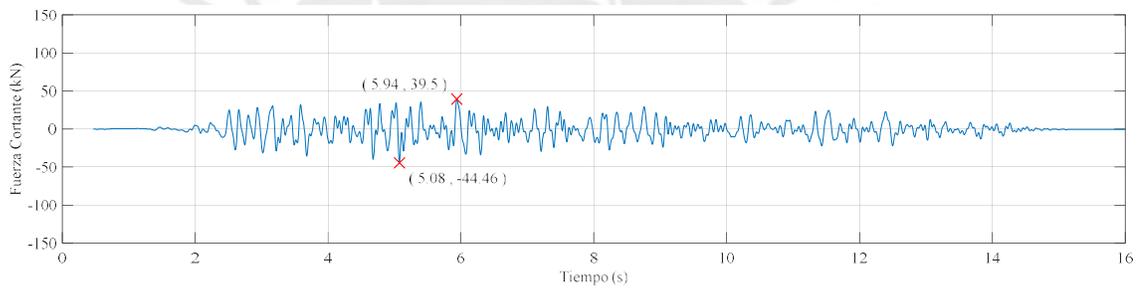


Figura 7.90 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

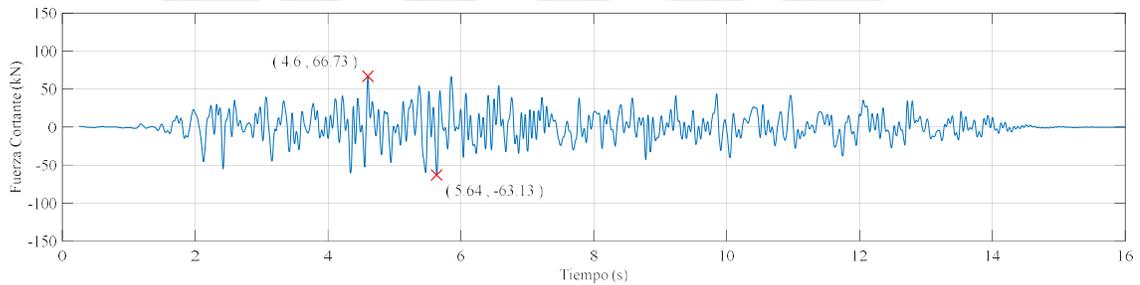


Figura 7.91 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

7.4.2 MODELO URM-2S-2

El modelo URM-2S-2 durante la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 45\text{mm}$) llegó a presentar una cortante máxima en la base del 60% de su peso total. Durante la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), llegó a ser sometido a una cortante máxima en la base del 71% del peso del modelo. Ver Tabla 22.

Tabla 22 Fuerza Cortante en la Base (kN), URM-2S-2

Fase	Fuerza Cortante V (kN)	Peso del Modelo P (kN)	Coefficiente V/P
Fase 1 ($\Delta_{\text{máx}} = 45\text{mm}$)	58.03	96.42	0.60
Fase 2 ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$)	68.59		0.71

La Figura 7.92 y Figura 7.93 nos muestra la historia en el tiempo de la cortante en la base, donde se alcanzó valores máximos de 58.03kN y 68.59kN para la primera y segunda fase, respectivamente.

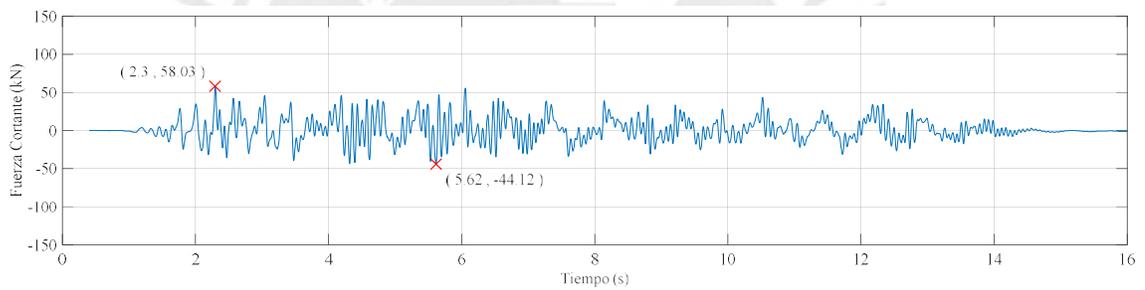


Figura 7.92 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

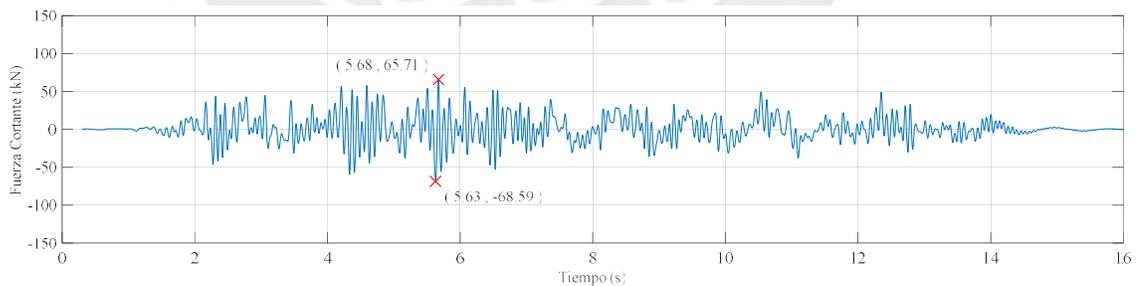


Figura 7.93 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

7.4.3 MODELO SRM-2S-1

El modelo SRM-2S-1 durante la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$) llegó a presentar una cortante máxima en la base del 49% de su peso total. Durante la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$), llegó a ser sometido a una cortante máxima en la base del 65% del peso del modelo. Durante la tercera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), presentó una cortante máxima en la base del 93% del peso del modelo. Finalmente, durante la cuarta fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$), el modelo fue sometido a una cortante máxima en la base del 102% de su peso total. Ver Tabla 23.

Tabla 23 Fuerza Cortante en la Base (kN), SRM-2S-1

Fase	Fuerza Cortante V (kN)	Peso del Modelo P (kN)	Coefficiente V/P
Fase 1 ($\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$)	44.04	90.33	0.49
Fase 2 ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$)	58.89		0.65
Fase 3 ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$)	83.63		0.93
Fase 4 ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$)	92.05		1.02

La Figura 7.94 y Figura 7.95 nos muestra la historia en el tiempo de la cortante en la base, donde se alcanzó valores máximos de 44.04kN y 58.89kN para la primera y segunda fase, respectivamente.

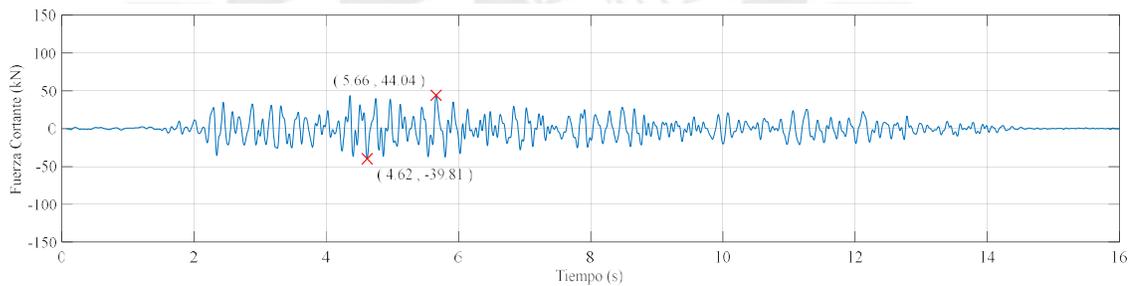


Figura 7.94 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

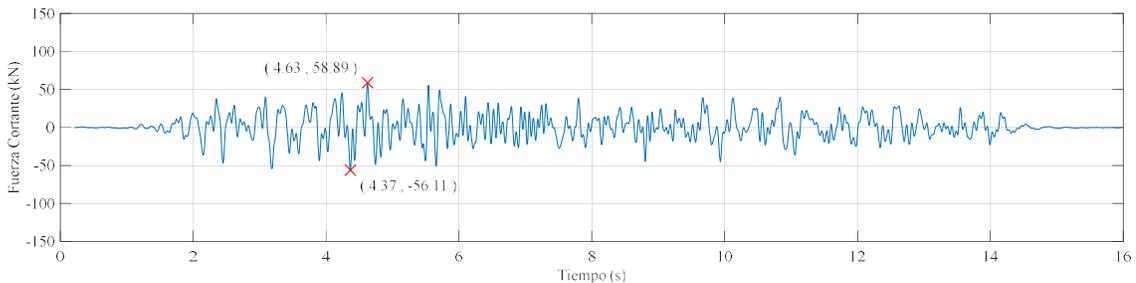


Figura 7.95 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

Por otra parte, la Figura 7.96 y Figura 7.97 nos muestra la historia en el tiempo de la cortante en la base, la cual alcanzó valores máximos de 83.63kN y 92.05kN para la tercera y cuarta fase.

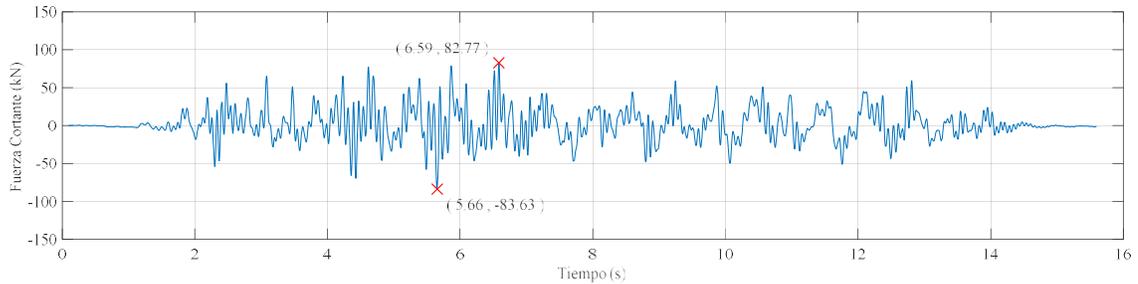


Figura 7.96 Fuerza Cortante en la Base – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

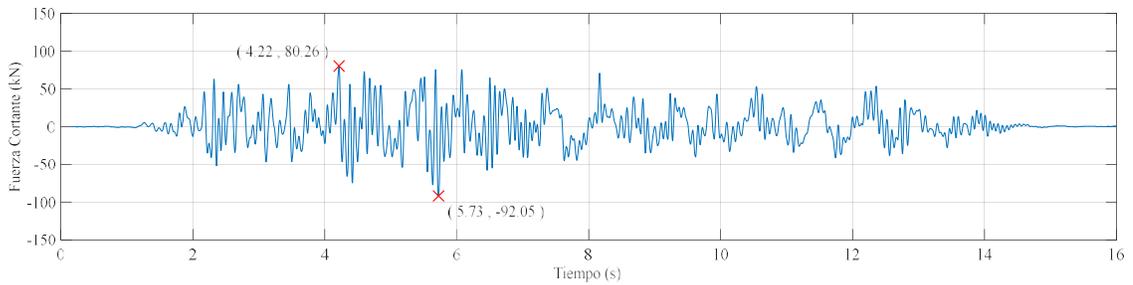


Figura 7.97 Fuerza Cortante en la Base – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

7.4.4 MODELO SRM-2S-2

El modelo SRM-2S-2 durante la primera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$) llegó a presentar una cortante máxima en la base del 112% de su peso total. Durante la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$), el modelo llegó a ser sometido a una cortante máxima en la base del 106% del peso total. Ver Tabla 24.

Tabla 24 Fuerza Cortante en la Base (kN), SRM-2S-2

Fase	Fuerza Cortante V (kN)	Peso del Modelo P (kN)	Coficiente V/P
Fase 1 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$)	94.94	84.70	1.12
Fase 2 ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60\text{mm}$)	90.03		1.06

La Figura 7.98 y Figura 7.99 nos muestra la historia en el tiempo de la cortante en la base, donde se alcanzó valores máximos de 94.94kN y 90.03kN para la primera y segunda fase, respectivamente.

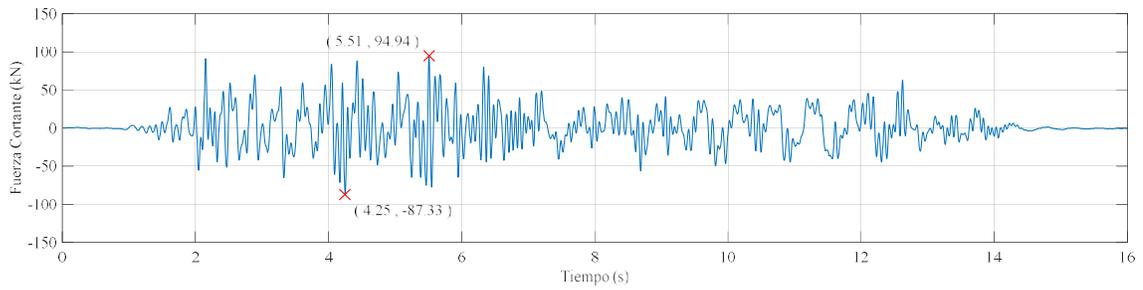


Figura 7.98 Fuerza Cortante en la Base – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

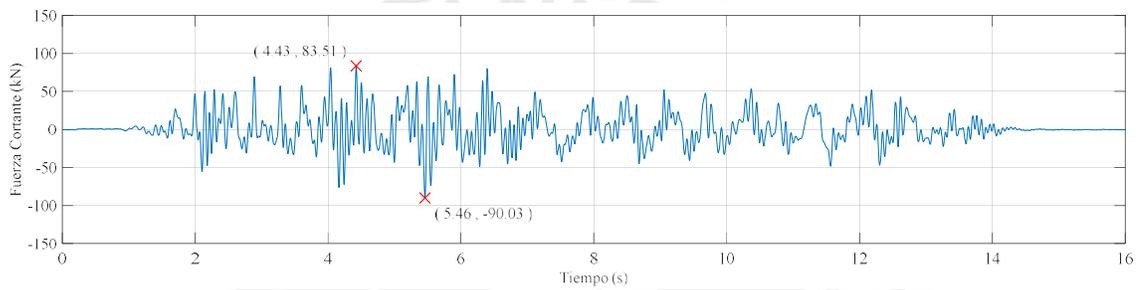


Figura 7.99 Fuerza Cortante en la Base – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

7.5 FUERZA EN LAS CUERDAS

Debido a la incertidumbre con la que se contaba en referencia al comportamiento de la cuerda sintética como elemento de reforzamiento de viviendas de adobe de dos pisos, se decidió emplear doble cuerda horizontal. Asimismo, para poder recopilar los valores de las fuerzas de tensión que se presentaron en éstas, se instalaron celdas de carga en las cuerdas ubicadas próximas a los entrepisos de cada nivel (L1 y L2).

Por otra parte, en base a los ensayos realizados por Valle (2019) a la cuerda sintética de $\Phi=1/8''$ determinó que ésta presentaba una capacidad resistente frente a cargas axiales de tracción de 1.3kN y al estudio de Blondet (2016) que recomienda considerar un factor de seguridad de 2 para la resistencia de la cuerda sintética, se procedió a evaluar los resultados obtenidos de los modelos ensayados considerando la fuerza resistente de la cuerda sintética, $F_{UC} = 650N$.

Finalmente, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en la presente tesis se determinó que la capacidad resistente de las cuerdas sintéticas horizontales instaladas llegó a ser aprovechada al 50%. Por lo tanto, se podría comentar que una sola cuerda como refuerzo horizontal sería suficiente para hacer frente ante sismos con desplazamientos máximos en la base de 60mm. Asimismo, se logró identificar que cuando el modelo es sometido a distintas fases de desplazamiento en la base de forma gradual, las fuerzas máximas en las cuerdas se producen en el primer nivel a comparación del otro tipo de ensayo cuando el modelo es sometido directamente al máximo desplazamiento en la base que puede ejercer la mesa vibradora, donde las fuerzas máximas en las cuerdas se presentan en el segundo nivel.

7.5.1 MODELO SRM-2S-1

La Tabla 25 muestra que durante la primera fase de ensayo ($\Delta_{m\acute{a}x} = 15mm$) las fuerzas que se registraron en las celdas de carga L1 y L2 fueron del 10% y 4% de la capacidad total del refuerzo instalado, respectivamente.

Durante la segunda fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 30mm$) las fuerzas que se presentaron en las celdas de carga L1 y L2 fueron del 23% y 9% de la capacidad total del refuerzo instalado, respectivamente.

Durante la tercera fase ($\Delta_{m\acute{a}x} = 60mm$) las fuerzas que se registraron en las celdas de carga L1 y L2 fueron del 44% y 11% de la capacidad total del refuerzo instalado, respectivamente. Cabe señalar que durante esta fase la cuerda en la que se había instalado la celda de carga del segundo nivel (L2) perdió tensión por el propio movimiento y formación de los bloques de adobe.

Durante la cuarta fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) la fuerza que se presentó en la celda de carga L1 fue del 50% de la capacidad total del refuerzo instalado.

Tabla 25 Fuerzas en las celdas de carga L1 y L2 (N), SRM-2S-1

Fase	L1 - (N)	L2 - (N)	# Cuerdas	F _{UC} (N)	F _{UC} Total (N)	Coefficiente L1/ F _{UC} TOTAL	Coefficiente L2/ F _{UC} TOTAL
Fase 1 ($\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$)	126.84	57.21	2.00	650.00	1,300.00	0.10	0.04
Fase 2 ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$)	304.03	117.69	2.00	650.00	1,300.00	0.23	0.09
Fase 3 ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$)	571.10	141.65	2.00	650.00	1,300.00	0.44	0.11
Fase 4 ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$)	646.98	57.37	2.00	650.00	1,300.00	0.50	0.04

La Figura 7.100 y Figura 7.101 muestran durante la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 15\text{mm}$) la historia en el tiempo de las fuerzas en las cuerdas, donde se alcanzó valores máximos de 126.84N y 57.21N para las celdas de carga L1 y L2, respectivamente.

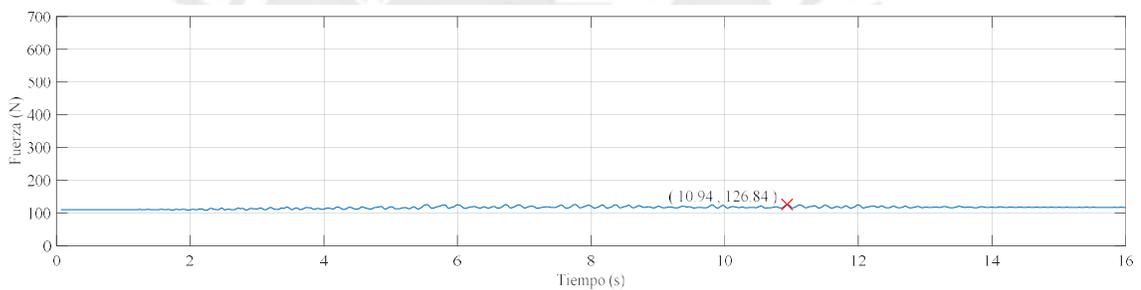


Figura 7.100 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

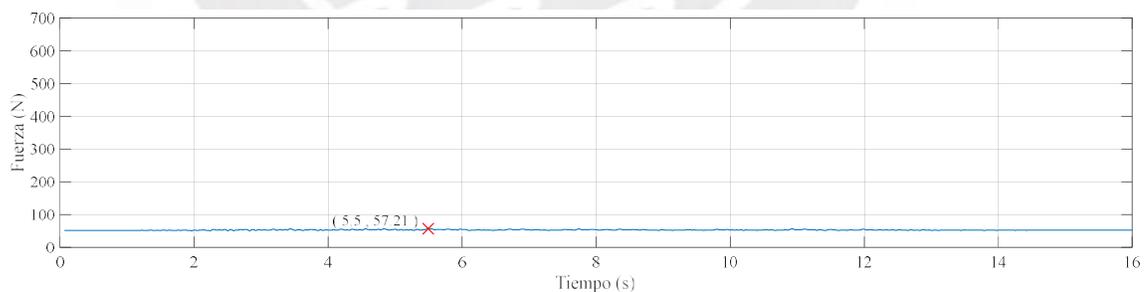


Figura 7.101 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

La Figura 7.102 y Figura 7.103 muestra durante la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 30\text{mm}$) la historia en el tiempo de las fuerzas en las cuerdas, donde se alcanzó valores máximos de 340.03N y 117.69N para las celdas de carga L1 y L2, respectivamente.

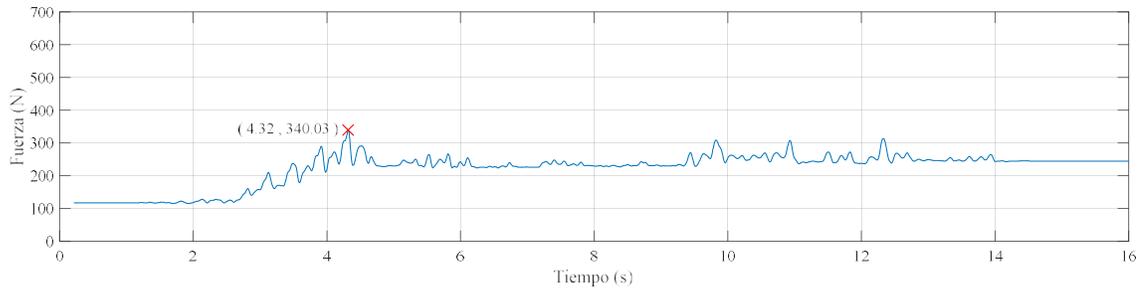


Figura 7.102 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

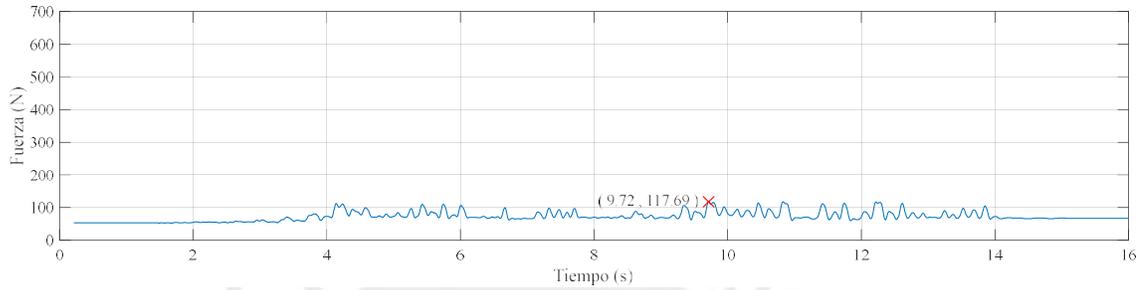


Figura 7.103 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

La Figura 7.104 y Figura 7.105 muestra durante la tercera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) la historia en el tiempo de las fuerzas en las cuerdas, donde se alcanzó valores máximos de 571.7N y 141.65N para las celdas de carga L1 y L2, respectivamente.

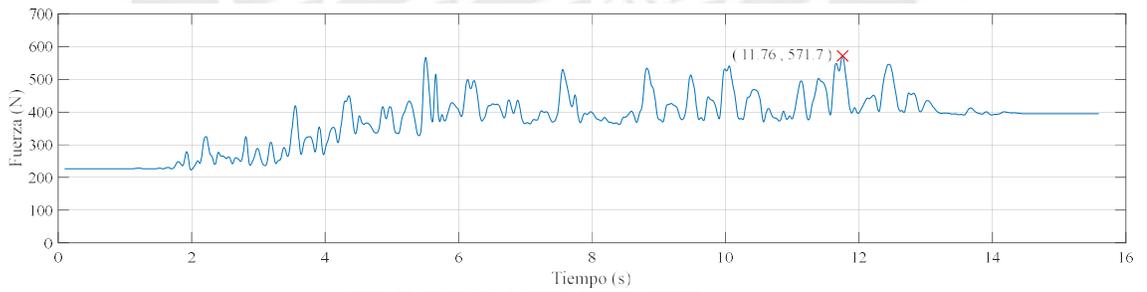


Figura 7.104 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

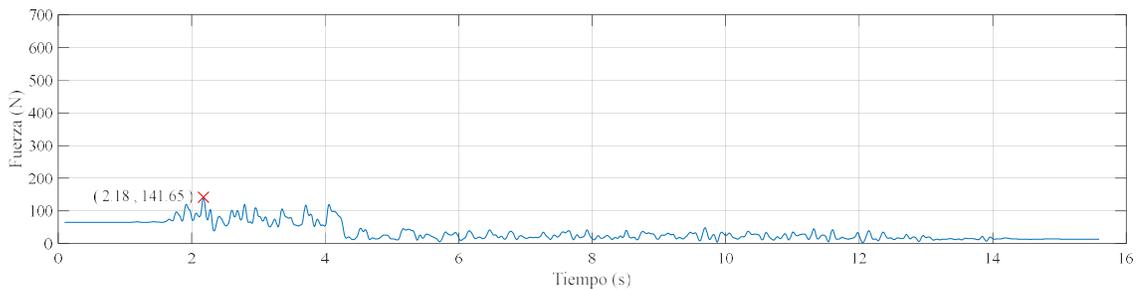


Figura 7.105 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

La Figura 7.106 y Figura 7.107 muestra durante la cuarta fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) la historia en el tiempo de las fuerzas en las cuerdas, donde se alcanzó valores máximos de 646.98 N y 57.37 N para las celdas de carga L1 y L2, respectivamente. Se observa claramente la pérdida de tensión en las cuerdas lo cual se debió a que la cuerda ingresó a una de las grietas que se había formado.

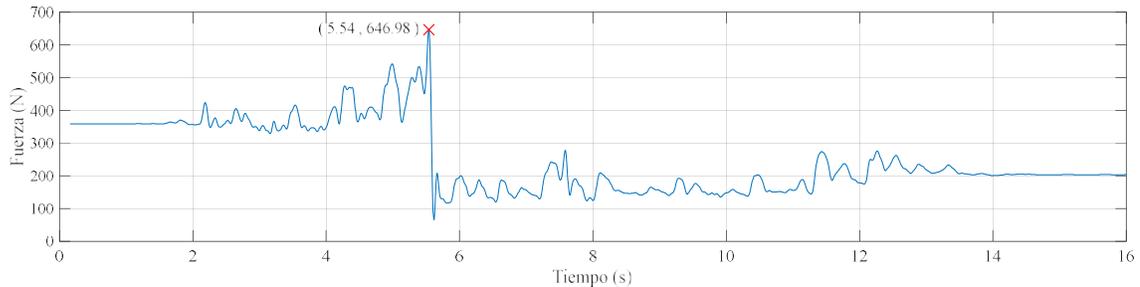


Figura 7.106 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

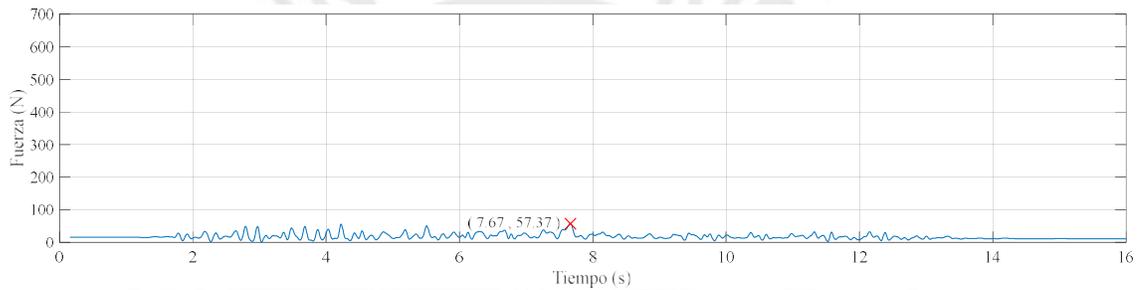


Figura 7.107 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

7.5.2 MODELO SRM-2S-2

La Tabla 26 muestra que durante la primera fase de ensayo ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) las fuerzas que se registraron en las celdas de carga L1 y L2 fueron del 10% y 19% de la capacidad total del refuerzo instalado, respectivamente.

Durante la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) la fuerzas que se presentaron en las celdas de carga L1 y L2 fueron del 13% y 14% de la capacidad total del refuerzo instalado, respectivamente.

Tabla 26 Fuerzas en las celdas de carga L1 y L2 (N), SRM-2S-2

Fase	L1 - (N)	L2 - (N)	# Cuerdas	F _{UC} (N)	F _{UC} Total (N)	Coefficiente L1/ F _{UC} TOTAL	Coefficiente L2/ F _{UC} TOTAL
Fase 1 ($\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm}$)	134.78	251.02	2.00	650.00	1,300.00	0.10	0.19
Fase 2 ($\Delta_{\text{máx}} = 60 \text{ mm}$)	163.70	187.92	2.00	650.00	1,300.00	0.13	0.14

La Figura 7.108 y Figura 7.109 muestra durante la primera fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{mm}$) la historia en el tiempo de las fuerzas en las cuerdas, donde se alcanzó valores máximos de 134.78N y 251.02N para las celdas de carga L1 y L2, respectivamente.

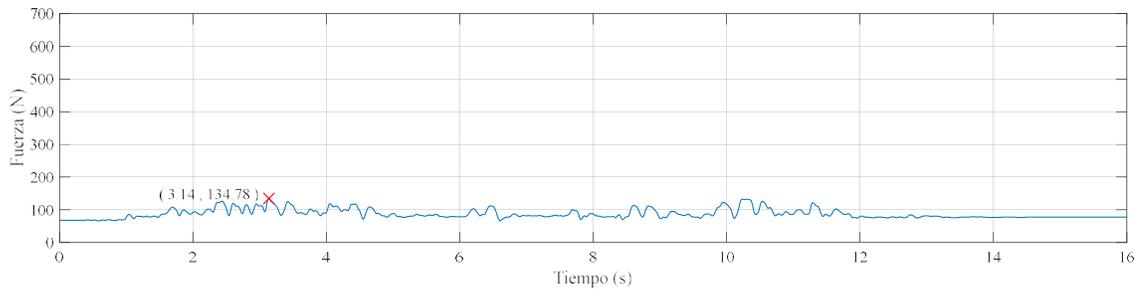


Figura 7.108 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

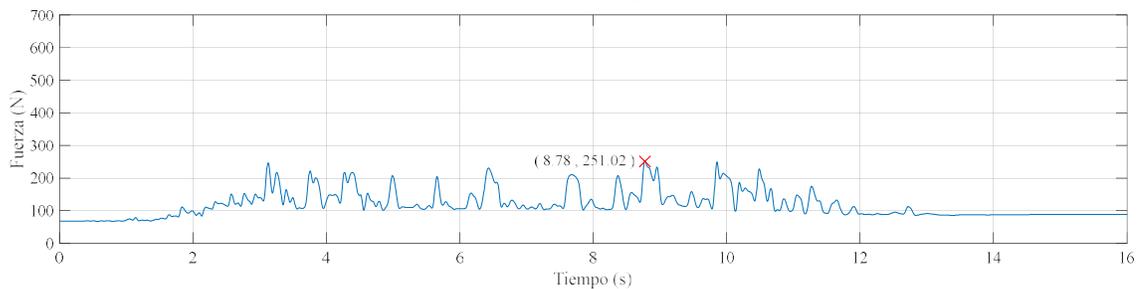


Figura 7.109 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

La Figura 7.110 y Figura 7.111 muestra durante la segunda fase ($\Delta_{\text{máx}} = 60\text{ mm}$) la historia en el tiempo de las fuerzas en las cuerdas, donde se alcanzó valores máximos de 163.70N y 187.92N para las celdas de carga L1 y L2, respectivamente.

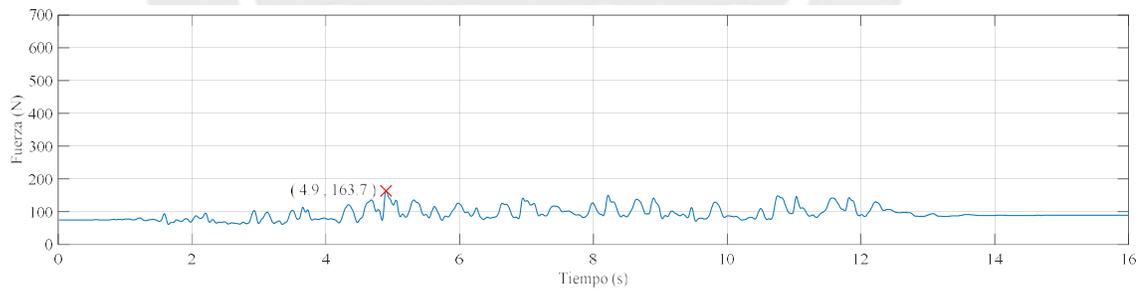


Figura 7.110 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L1 – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

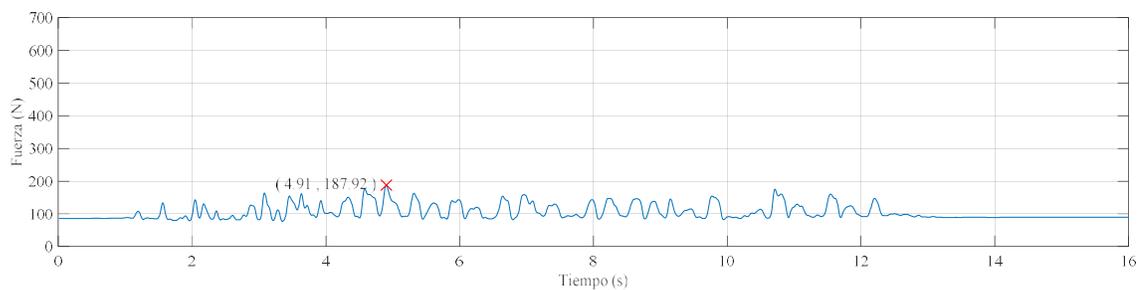


Figura 7.111 Fuerza en la cuerda – Celda de carga L2 – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

7.6 FUERZA CORTANTE vs DESPLAZAMIENTO

Se elaboraron gráficos de Fuerza Cortante en la base vs Desplazamiento Relativo para las fases de ensayo a las que fueron sometidos los 04 modelos durante las simulaciones sísmicas. Estos gráficos fueron desarrollados a partir de la historia en el tiempo de las fuerzas cortantes en la base y los desplazamientos relativos de los dispositivos instalados en los muros del primer piso, los cuales fueron D1 ubicado en el muro lateral izquierdo; D2 y D8 ubicados en el muro posterior y D3 y D10 ambos ubicados en el muro frontal.

Es importante mencionar que se optó solo por analizar el primer nivel debido a que se habían recopilado los datos de forma directa a través de la instrumentación instalada de la cortante en la base y de los desplazamientos relativos del primer nivel cercanos al entrepiso. En cambio, para analizar el segundo nivel se requería conocer la cortante de entrepiso, que, si bien era posible determinarla bajo ciertas suposiciones, estas hubiesen podido considerarse como subjetivas.

Por otra parte, durante los ensayos de simulación sísmica con desplazamiento máximo en la base de 15mm, se observó un comportamiento aparentemente similar entre los modelos reforzado y no reforzado. Con la finalidad de corroborar esta hipótesis inicial, se elaboró la Figura 7.112 que permite comparar el comportamiento de ambos modelos durante la fase de ensayo anteriormente mencionada.

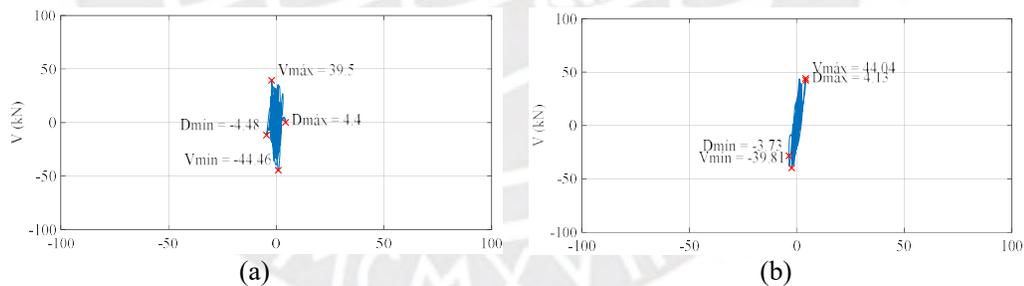


Figura 7.112 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 15 mm: a) URM-2S-1; b) SRM-2S-1

A partir de la Figura 7.112 se puede interpretar que el modelo no reforzado (URM-2S-1) presentó un comportamiento similar al del modelo reforzado (SRM-2S-1), tal es así que, ambos modelos registraron prácticamente los mismos desplazamientos máximos y las mismas cortantes basales. De la misma manera, tal como se identificó a lo largo de éste Capítulo, para esta fase de ensayo, las propiedades dinámicas de ambos modelos no se vieron alteradas por la presencia del refuerzo. Todo lo anteriormente expuesto nos permite determinar que ambos modelos con y sin refuerzo presentaron rigideces laterales muy similares y un comportamiento dentro del rango lineal.

Por otro lado, al realizar un análisis comparativo entre los modelos reforzado y no reforzado para un desplazamiento máximo en la base de 30mm, se determinó que, si bien el modelo reforzado sufre una considerable degradación de su rigidez lateral, aún así gracias al aporte del refuerzo de malla de cuerdas sintéticas, este valor es aproximadamente 5 veces mayor que la rigidez lateral que presenta el modelo no reforzado.

Ahora bien, al comparar los modelos reforzado y no reforzado para un desplazamiento máximo en la base de 60mm, la rigidez lateral en ambos modelos es casi nula, por lo que para esta fase el sistema de refuerzo no mejora la rigidez lateral sino mas bien ayuda a reducir los desplazamientos.

Por lo anteriormente expuesto, se profundiza el análisis en el modelo reforzado donde se elaboró la Tabla 27, la cual detalla la rigidez lateral estimada a partir de los gráficos de Cortante en la Base vs Desplazamiento Relativo para cada fase a las que fueron sometidos los modelos reforzados.

Tabla 27 Rigidez Lateral (kN/m) – Modelos Reforzados

Instrumento	Modelo SRM-2S-1				Modelo SRM-2S-2	
	$\Delta_{\text{máx}}$ 15 mm	$\Delta_{\text{máx}}$ 30 mm	$\Delta_{\text{máx}}$ 60 mm	$\Delta_{\text{máx}}$ 60 mm(2)	$\Delta_{\text{máx}}$ 60 mm	$\Delta_{\text{máx}}$ 60 mm(2)
D1	11,440	2,150	1,060	360	460	20
D2	6,120	1,840	880	620	140	120
D3	10,820	2,290	1,200	910	320	140
D8	10,600	2,360	1,210	940	320	40
D10	10,110	2,230	1,270	940	290	150

A partir de la Tabla 27 se puede interpretar que el modelo cuando es sometido a fases con desplazamientos máximos en la base que se van incrementando de forma gradual, sufre la degradación del 80% de su rigidez lateral tal como se da para la fase de desplazamiento máximo en la base de 30mm. Mientras que para las fases con desplazamiento máximo en la base de 60mm, la rigidez lateral se vuelve prácticamente nula. Lo mismo se da cuando el modelo es sometido al máximo desplazamiento en la base que puede ejercer la mesa vibradora de 60mm, la rigidez lateral puede considerarse como nula, con lo cual se determina que para este caso el refuerzo de malla sintéticas no mejora la rigidez lateral del modelo.

7.6.1 MODELO URM-2S-1

La Figura 7.113 presenta los diagramas de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 15mm.

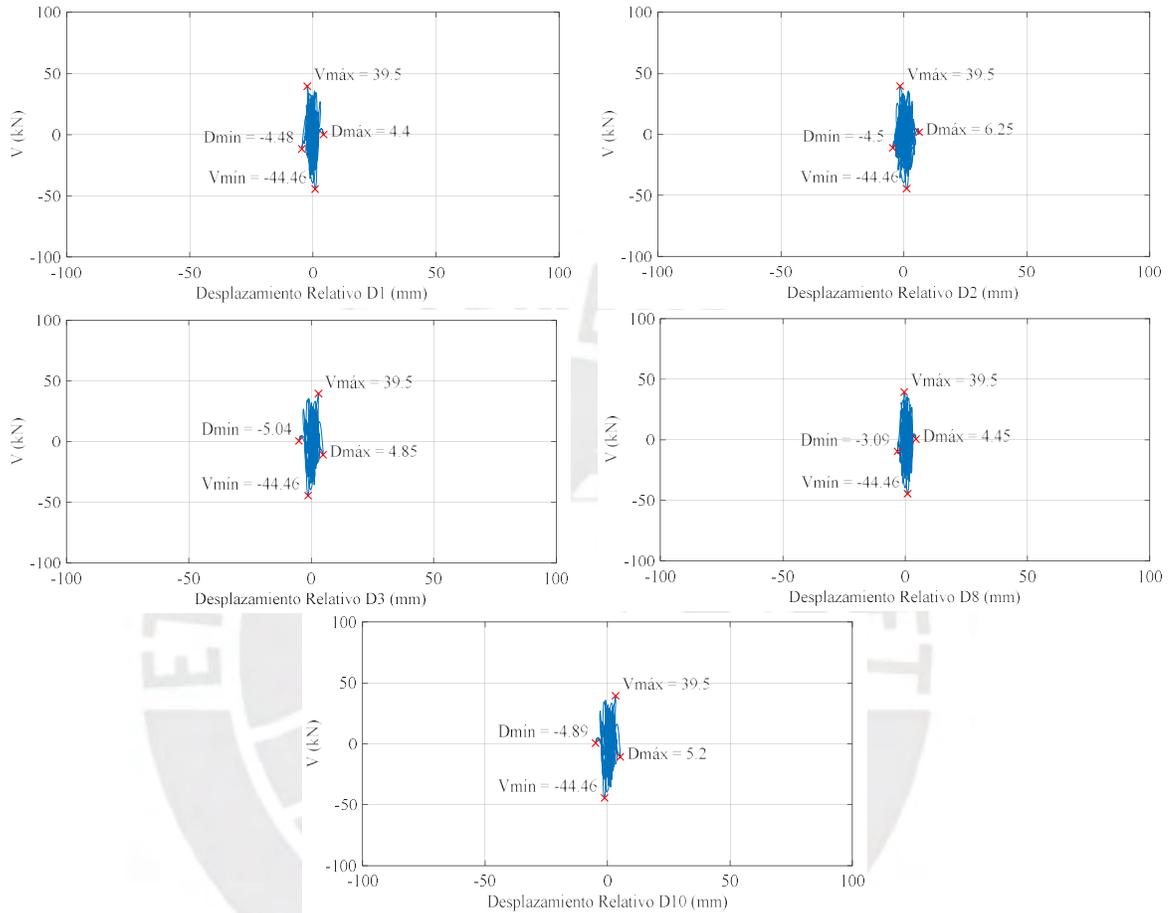


Figura 7.113 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (15 mm) - URM-2S-1

La Figura 7.114 detalla los gráficos de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer nivel para la fase de desplazamiento máximo en la base de 30mm, en los que ya se visualizan desplazamientos permanentes en los muros.

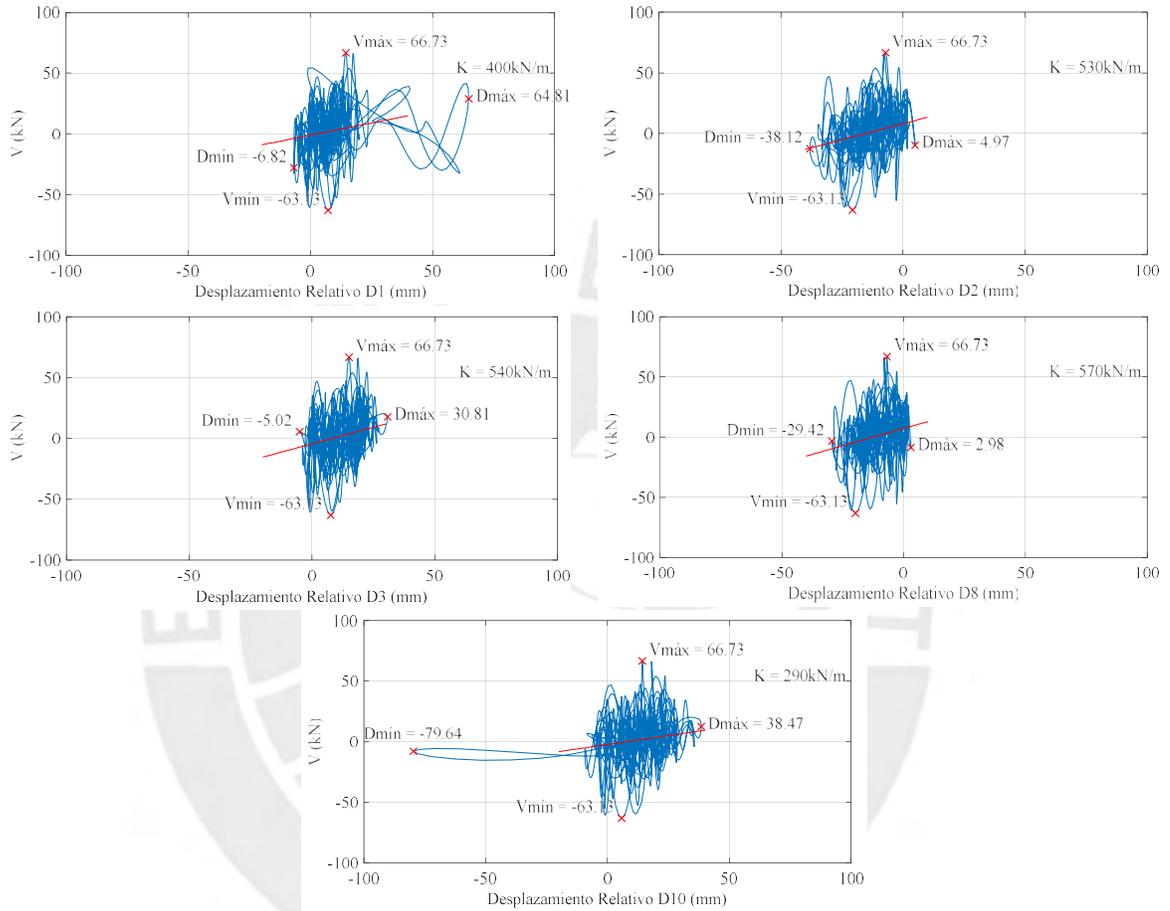


Figura 7.114 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (30 mm) - URM-2S-1

7.6.2 MODELO URM-2S-2

La Figura 7.115 presenta los diagramas de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 45mm. Se evidencia una rigidez lateral casi despreciable y desplazamientos permanentes excesivos en los muros.

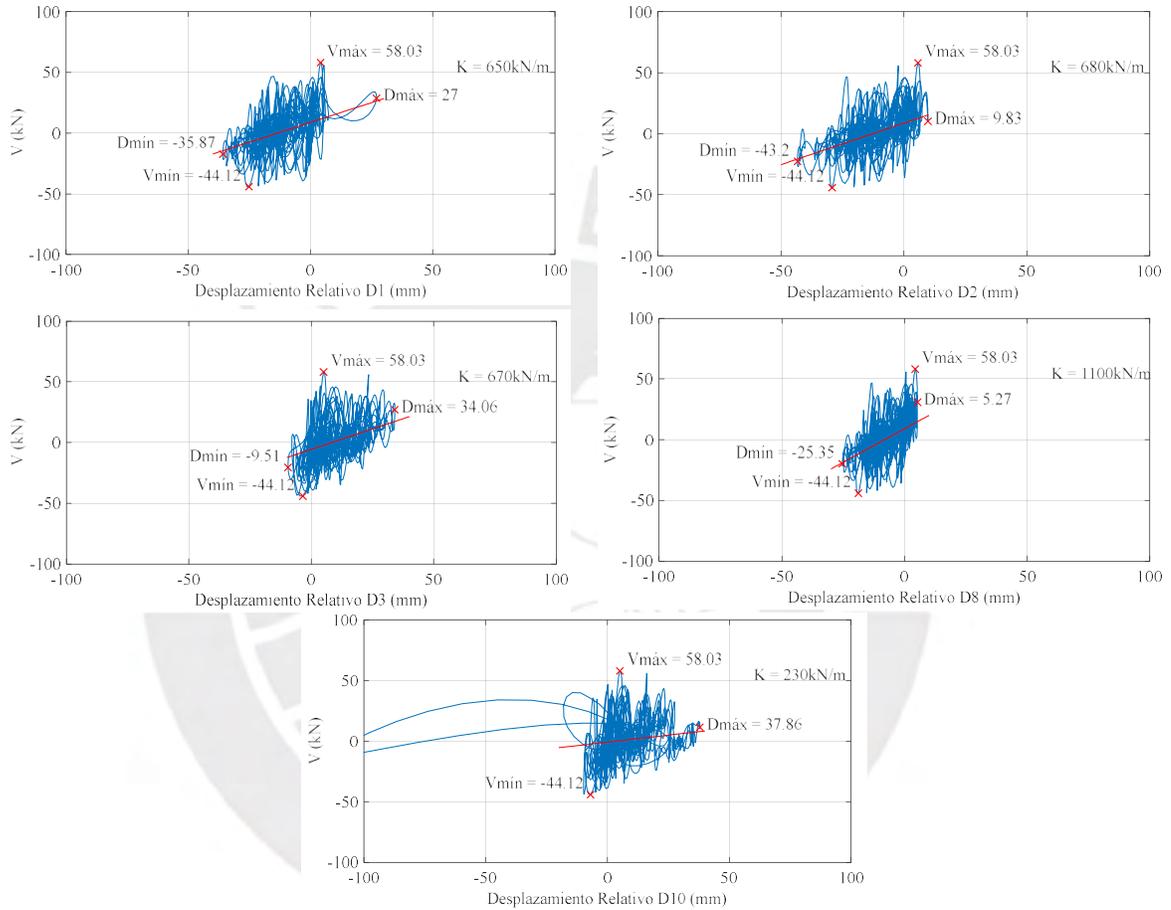


Figura 7.115 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (45 mm) - URM-2S-2

La Figura 7.116 presenta los diagramas de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 60mm. Se visualiza desplazamientos excesivos en los muros que pueden conllevar al colapso del modelo.

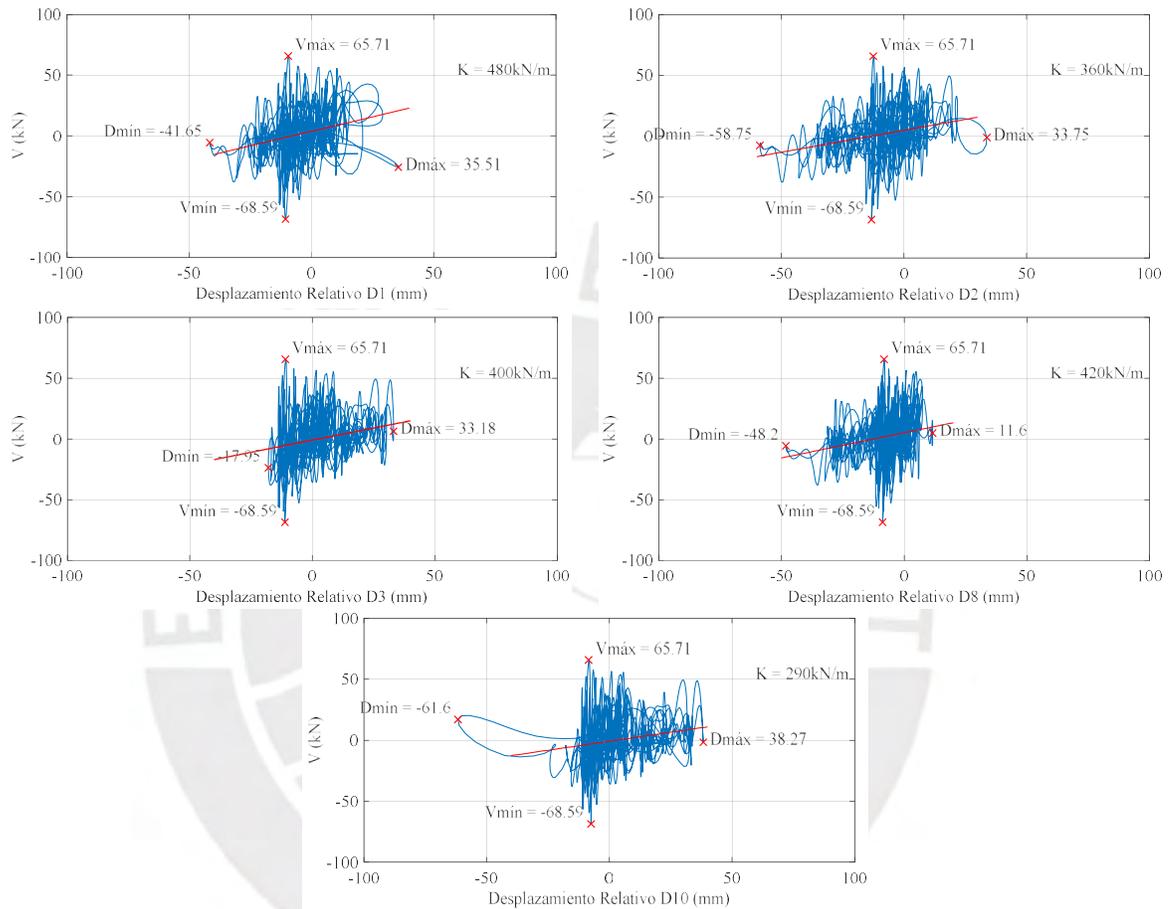


Figura 7.116 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (60 mm) - URM-2S-2

7.6.3 MODELO SRM-2S-1

La Figura 7.117 presenta los gráficos de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 15mm. Se observa un comportamiento lineal del modelo y se evidencia el aporte del refuerzo de cuerdas sintéticas mejorando su rigidez lateral.

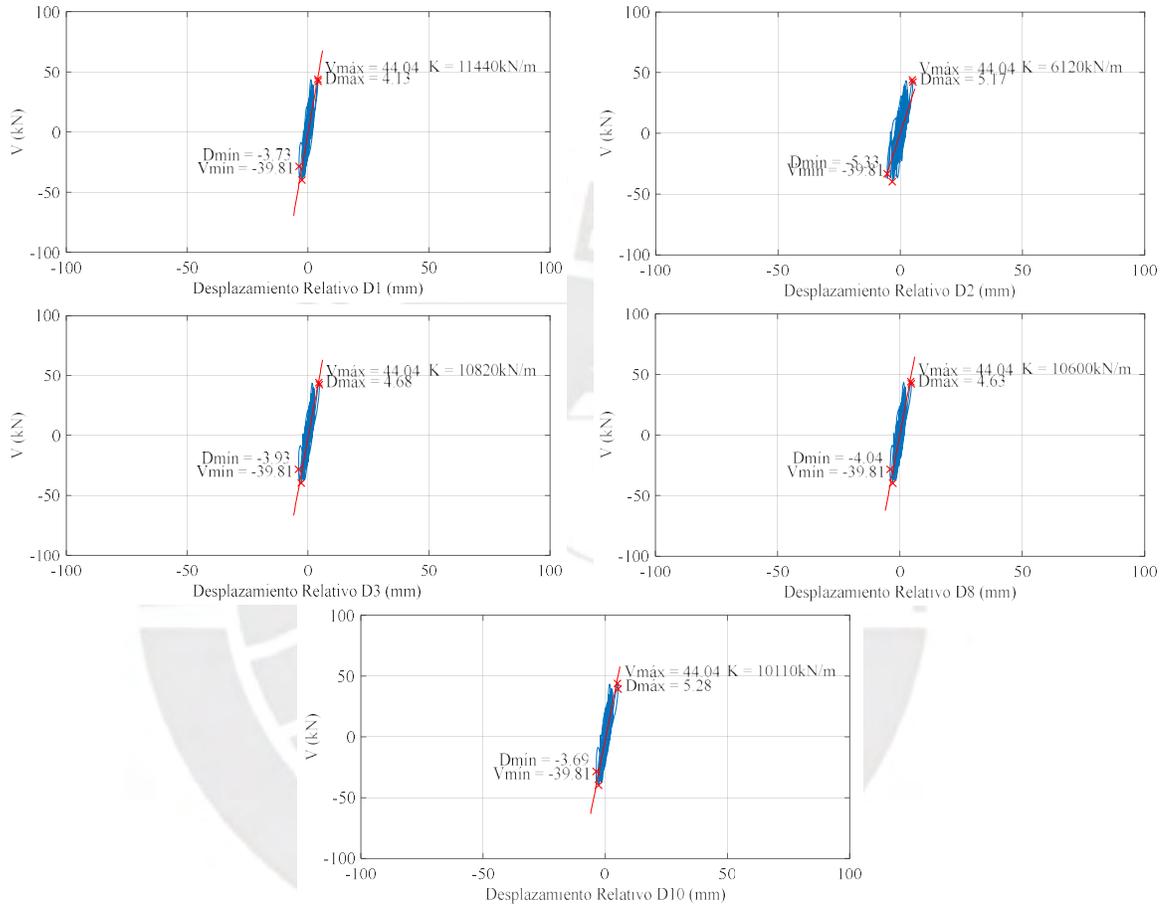


Figura 7.117 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (15 mm) - SRM-2S-1

La Figura 7.118 presenta los diagramas de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 30mm. Se observa una degradación considerable de la rigidez lateral del modelo.

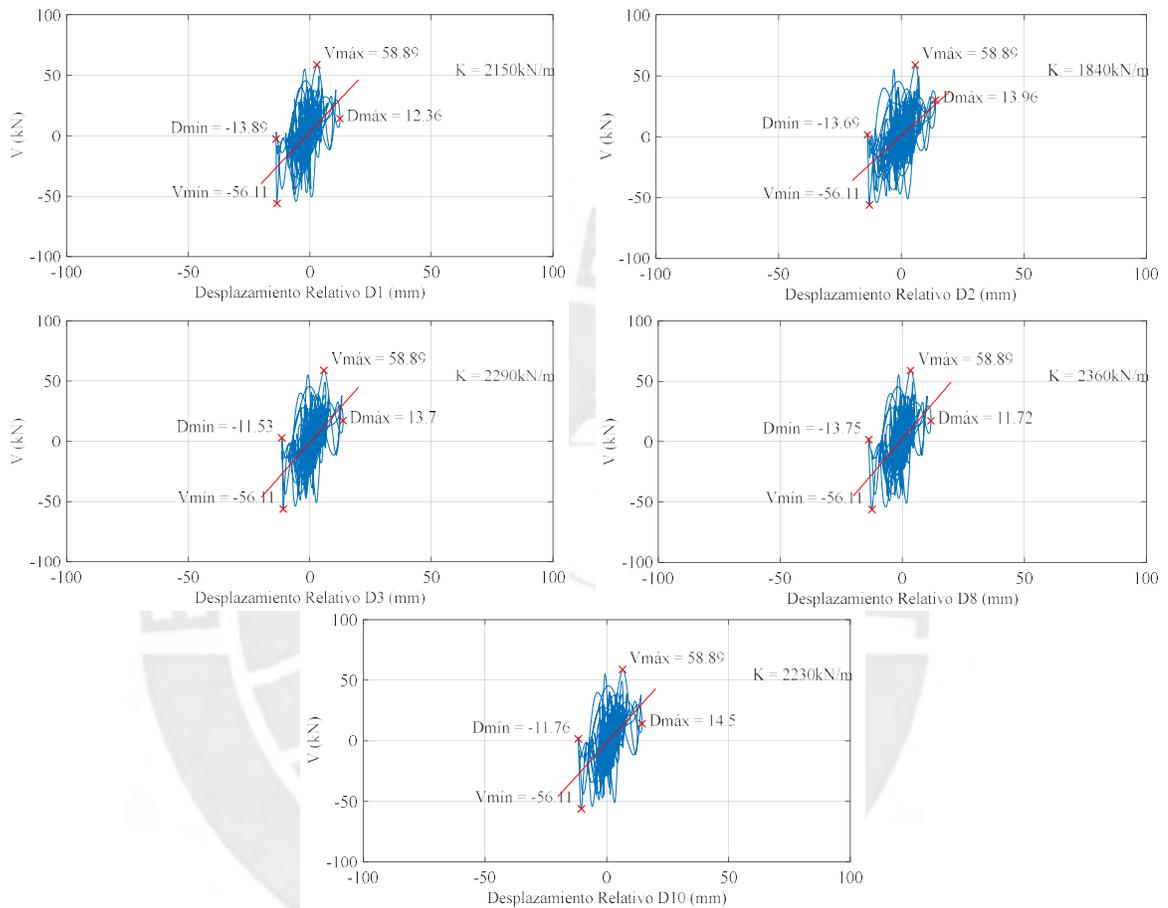


Figura 7.118 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (30 mm) - SRM-2S-1

La Figura 7.119 presenta los diagramas de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 60mm. El modelo presentó una rigidez lateral casi despreciable.

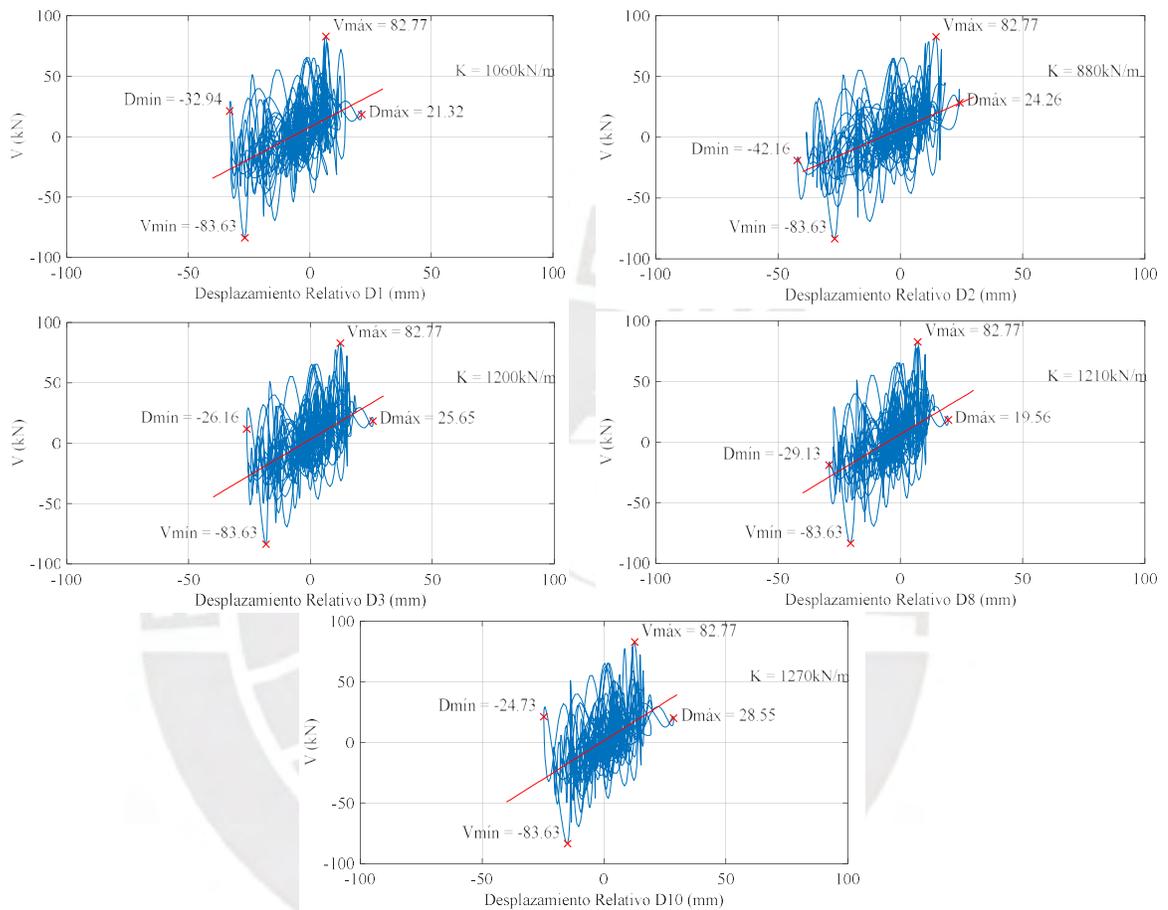


Figura 7.119 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 3 (60 mm) - SRM-2S-1

La Figura 7.102 presenta los diagramas de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para la segunda fase de desplazamiento máximo en la base de 60mm. El modelo presenta deformaciones excesivas.

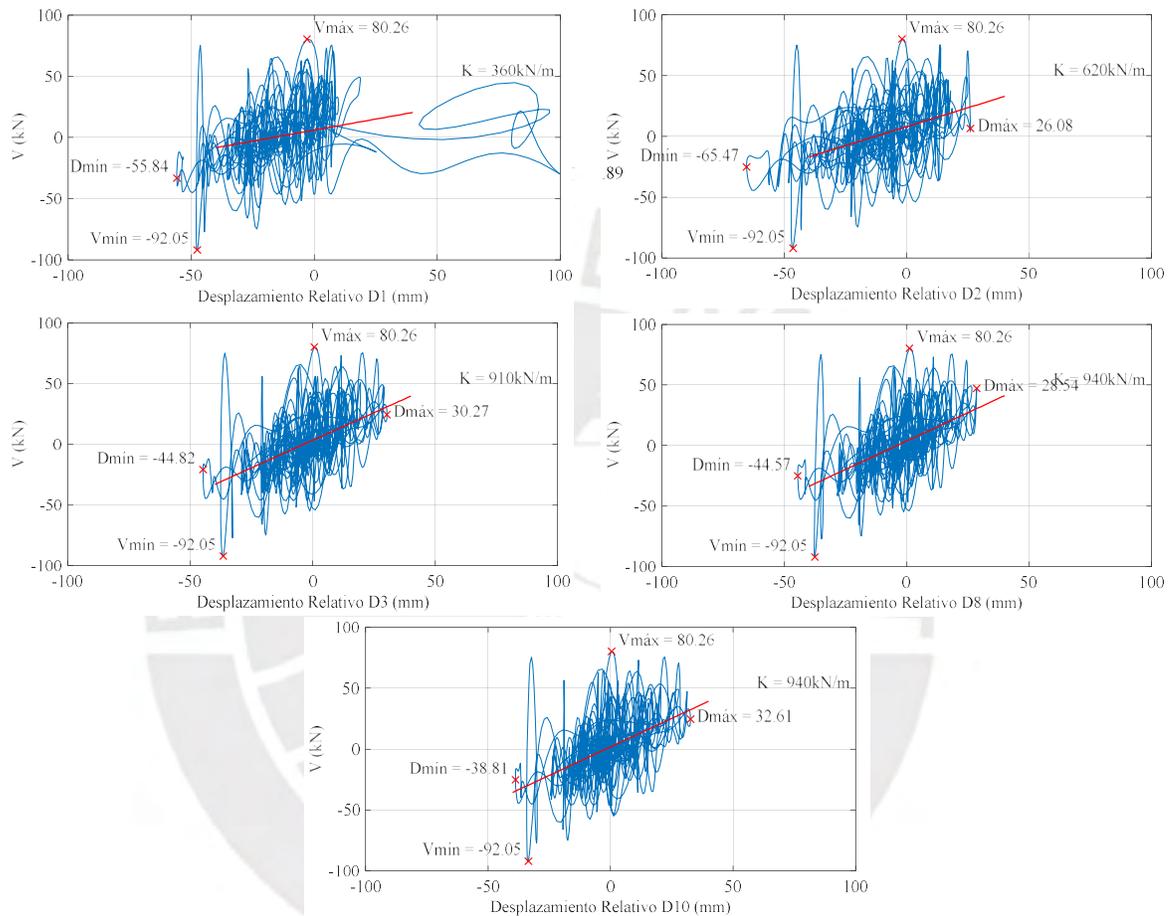


Figura 7.120 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 4 (60 mm) - SRM-2S-1

7.6.4 MODELO SRM-2S-2

La Figura 7.103 presenta los gráficos de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para un desplazamiento máximo en la base de 60mm. Se evidencia una rigidez lateral casi nula y desplazamientos excesivos.

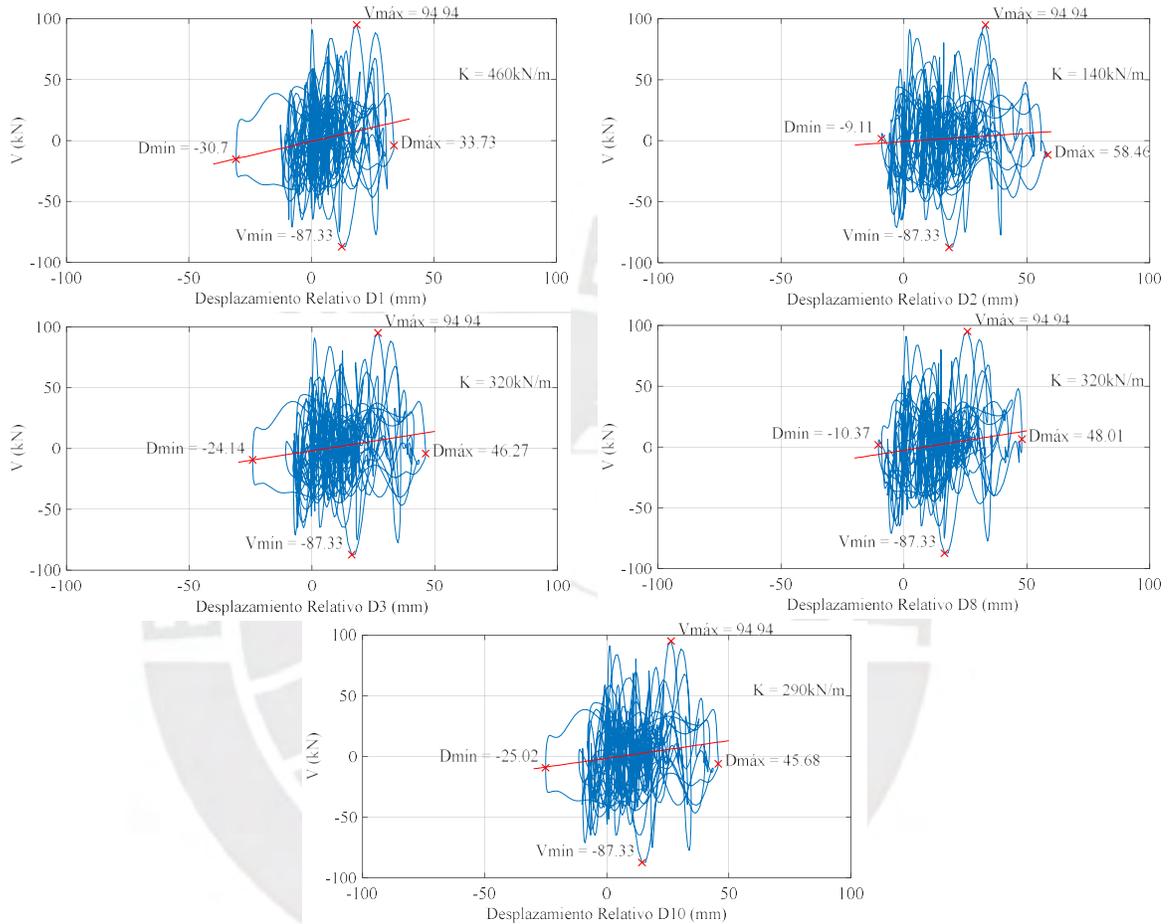


Figura 7.121 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 1 (60 mm) - SRM-2S-2

La Figura 7.104 presenta los gráficos de cortante en la base vs desplazamiento relativo del primer piso para la segunda fase de desplazamiento máximo en la base de 60mm. Se evidencia las mismas condiciones que en la fase anterior, es decir, rigidez lateral casi nula y desplazamientos excesivos.

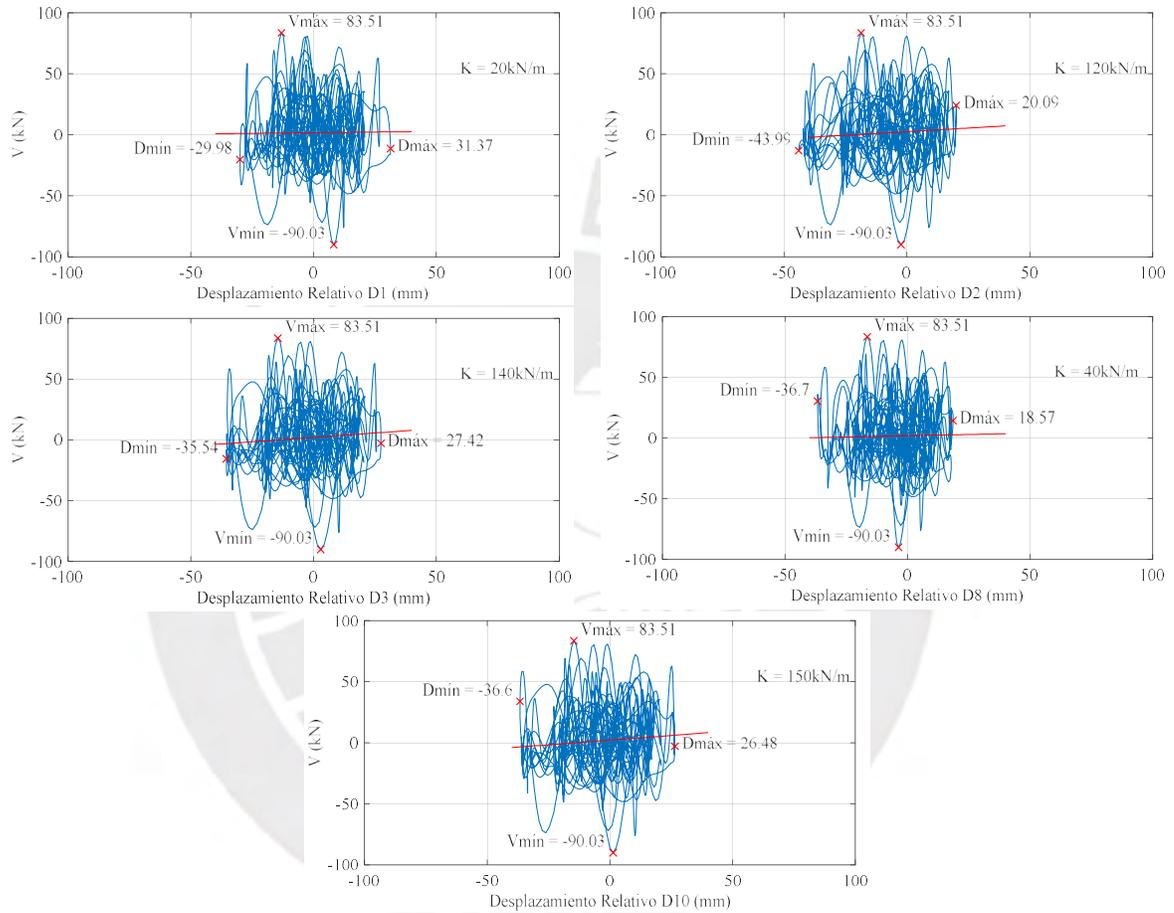


Figura 7.122 Fuerza Cortante vs Desplazamiento Relativo – Fase 2 (60 mm) - SRM-2S-2

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ensayos de simulación sísmica en viviendas de adobe de dos pisos a escala reducida

Las propiedades dinámicas en el estado inicial de los modelos con y sin refuerzo fueron similares, presentando un período natural de 0.10s ($T_{Prototipo} = 0.20$ s) y un coeficiente de razón de amortiguamiento de 5.6%. Es decir, que la malla de cuerdas sintéticas no altera ni modifica las propiedades dinámicas de la estructura.

Para la fase con desplazamiento máximo en la base de 15mm, que representa una aceleración máxima de 0.5g en la base ($A_{o Prototipo} = 0.25g$), los modelos con y sin refuerzo no presentaron ningún tipo de daño, solo pequeñas fisuras superficiales en el tarrajeo. En lo que respecta a las propiedades dinámicas de ambos modelos, posterior a la fase de ensayo, éstas no se vieron alteradas, es decir, mantuvieron los mismos valores de su estado inicial. Asimismo, ambos modelos presentaron cortantes en la base y desplazamientos relativos de entrepiso muy similares. De la misma manera, la rigidez lateral de los dos modelos fueron semejantes, donde el modelo reforzado presentó una rigidez lateral promedio de 10,700kN/m ($K_{L Prototipo} = 21,400kN/m$). Además, se logró verificar en base a las gráficas de Cortante en la Base vs Desplazamiento relativo que ambos modelos presentaron un comportamiento dentro del rango lineal. Por otra parte, en el modelo no reforzado se registró un factor de amplificación dinámica de 2.68, mientras que para el modelo reforzado fue 2.72.

Para la fase con desplazamiento máximo en la base de 30mm, que representa una aceleración máxima de 0.96g en la base ($A_{o Prototipo} = 0.48g$), el aporte de la malla de cuerdas sintéticas fue apreciable ya que evitó que se pierda la funcionalidad de la viga diafragma de madera del primer entrepiso, hecho que si sucedió en el modelo no reforzado. Así también, redujo los desplazamientos relativos de entrepiso en un 58% como valor promedio, alcanzándose inclusive valores de 82% en algunas partes del modelo. A su vez, se observó en el modelo reforzado, la degradación del 80% de su rigidez lateral, es decir, presentando un valor de 2,260kN/m en promedio, mientras que, en el modelo no reforzado, la rigidez lateral se podía considerar despreciable. Asimismo, en el modelo no reforzado se registró un factor de amplificación dinámica de 1.95, mientras que para el modelo reforzado fue 1.43. Posterior a esta fase, las propiedades dinámicas si se vieron alteradas debido al daño que sufrieron ambos modelos, el modelo no reforzado presentó un periodo natural de vibración de $T_n = 0.29s$ ($T_{n Prototipo} = 0.58s$) y un coeficiente de razón de amortiguamiento de $\xi = 11.3\%$, mientras que el modelo reforzado presentó $T_n = 0.22s$ ($T_{n Prototipo} = 0.44s$) y $\xi = 11.3\%$. Esto nos

permite concluir que el sistema de refuerzo conformado por mallas de cuerdas sintéticas reduce el nivel de daño y aumenta la capacidad de disipación de energía de la estructura.

Para la fase con desplazamiento máximo en la base de 45mm, que representa una aceleración máxima de 1.27g en la base ($A_{o\ Prototipo} = 0.635g$), el modelo no reforzado perdió la funcionalidad de sus diafragmas de madera de los dos entresijos. Asimismo, sufrió considerables desplazamientos relativos de entrepiso, siendo el máximo valor 149.12mm que se registró en el extremo del muro frontal del segundo nivel. También se registró un factor de amplificación dinámica de 1.56. Posterior a esta fase, las propiedades dinámicas del modelo se vieron alteradas, presentando un periodo natural de vibración de $T_n = 0.36s$ ($T_{n\ Prototipo} = 0.72s$) y un coeficiente de razón de amortiguamiento de $\xi = 8.6\%$.

Para la fase con desplazamiento máximo en la base de 60mm, que representa una aceleración máxima de 1.70g en la base ($A_{o\ Prototipo} = 0.85g$), el aporte de la malla de cuerdas sintéticas fue vital, ya que si bien no evitó la aparición de grietas y la formación de bloques rígidos, si logró evitar el colapso inminente de la estructura de adobe de dos pisos, tal es así, que fue capaz de soportar con éxito dos ensayos consecutivos con este desplazamiento en la base. Así también, redujo los desplazamientos relativos de entrepiso en un 29% como valor promedio, alcanzado inclusive valores de 59% en algunas partes del modelo. A su vez, la rigidez lateral de los modelos reforzado y no reforzado fue considerada como despreciable. Asimismo, en el modelo no reforzado se registró un factor de amplificación dinámica de 1.00, mientras que para el modelo reforzado fue 1.45. Por otra parte, las propiedades dinámicas que presentaron posterior a esta fase fue, se vieron afectadas por el severo daño que sufrieron ambos modelos, donde el modelo no reforzado presentó un periodo natural de vibración de $T_n = 0.48s$ ($T_{n\ Prototipo} = 0.96s$) y una razón de amortiguamiento de $\xi = 9.3\%$, mientras que el modelo reforzado presentó $T_n = 0.3s$ ($T_{n\ Prototipo} = 0.60s$) y $\xi = 10.9\%$.

El patrón de reforzamiento del sistema de malla de cuerdas sintéticas fue validado mediante los ensayos de simulación sísmica, el cual consistió en cuerdas verticales que recorrían el perímetro de cada muro, espaciados cada 11cm para modelos a escala reducida (para modelo a escala real, considerar espaciamiento de 22cm). Para el refuerzo horizontal se consideró doble cuerda, cuyo recorrido se dio a la mitad de la altura del ladrillo de adobe y se instaló cada dos hiladas.

El refuerzo horizontal (doble cuerda) del sistema de malla de cuerdas sintéticas fue sometido a fuerzas de tensión que alcanzaron solo el 50% de su capacidad resistente, considerando para ello un factor de seguridad de 2.

El sistema de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas modificó el patrón de aparición de grietas observado durante los ensayos de simulación sísmica de los modelos no reforzados, es decir, grietas diagonales que nacen a partir de los vanos de las ventanas, ya que durante los ensayos de simulación sísmica de los modelos reforzados se observó la formación de grietas horizontales a la mitad de la altura de los muros de cada nivel y a su vez la formación de planos de falla horizontales cercanos a la zona de los entrepisos del modelo. Esto se debe a que el sistema de refuerzo provocó que el modelo se comporte como si fuera una viga en voladizo.

Las bondades descritas anteriormente, permiten afirmar que el sistema de refuerzo de malla de cuerdas sintéticas mejora el comportamiento de las viviendas de adobe, dotándolas de una mayor capacidad de disipación de energía, reduciendo parcialmente los niveles de daño, pero principalmente evitando el colapso de las estructuras, permitiendo salvaguardar la vida de sus habitantes. Adicional a ello, es fácil de implementar, tiene un bajo costo y se encuentra disponible en el mercado, convirtiéndose en un sistema de refuerzo óptimo para viviendas de adobe de dos pisos.

Trabajos a futuro

Los resultados de los ensayos de simulación sísmica de los modelos de adobe de dos pisos servirán para futuras investigaciones en la elaboración de modelos numéricos que permitan representar el comportamiento estructural de las viviendas de adobe de dos pisos ante cargas sísmicas.

Con la finalidad de poder corroborar y validar la extensión de los resultados obtenidos de los modelos a escala reducida hacia modelos de viviendas prototipos es necesario realizar ensayos de simulación sísmica en modelos a escala natural. Para este tipo de ensayos que ejercen un nuevo desafío será necesario contar con el apoyo de entidades públicas y privadas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Jha, A (2004). *Dynamic testing of Structures Using Scale Models*. Tesis para optar el grado de Magister en Ciencias Aplicadas. Concordia University. Montreal, Canadá.
- Blondet M., Tarque N., Vargas J. (2018). *Using a nylon rope mesh as seismic reinforcement for earthen constructions*. En Kerpic 2018: 6th International Conference. Gaziantep. Turkey
- Blondet, M., Tarque, N., Soto, J., Sosa, C., & Sarmiento, J. (2016). *Seismic Protection of Earthen Vernacular and Historical Constructions*.
- Blondet M., Vargas J., Sosa C., Soto J. (2014). *Using mud injection and an external rope mesh to reinforce historical earthen buildings located in seismic areas*. En SAHC 2014: 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. México.
- Blondet, M., & Aguilar, R. (2007). *Seismic Protection of Earthen Buildings*. En Conferencia Internacional en Ingeniería Sísmica, Lima, Perú.
- Blondet, M., Torrealva, D., Vargas, J., Velasquez, J., & Tarque, N. (2006, September). *Seismic reinforcement of adobe houses using external polymer mesh*. In First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, Switzerland.
- Carazas, W. (2001). *Vivienda popular urbana en el Cusco, Perú*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, La Ciencia y La Cultura, UNESCO. París, Francia.
- Groenenberg, R. J. (2010). *Adobe Structures in Earthquake Zones - Experimental Study on the Repair of Adobe Constructions Damaged by Earthquake Loading and the Development of an ATENA-GiD Model to Simulate Shaking Table Tests for these Structures*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Harris, H., Sabnis, G. (1999). *Structural Modeling and Experimental Techniques*. 2th Edition. USA: CRC Press.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018). *Resultados del Censo Nacional 2017*. Lima, Perú.

Mattsson, E. (2015). *Improved Seismic-Resistant Design of Adobe Houses in Vulnerable Areas in Peru*. Upsala, Suecia: Universidad de Upsala.

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2017). Norma E.080 *Diseño y construcción con Tierra Reforzada*. Edición actualizada de la norma en el Reglamento Nacional de Edificaciones aprobado mediante el Anexo - Resolución Ministerial N° 121 – 2017 – Vivienda. Gobierno del Perú

Sosa, C., & Soto, J. (2014). *Reparación de muros de construcciones históricas de tierra mediante el sellado de fisuras y refuerzos estructurales adicionales*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Valle, A. (2019). Evaluación experimental del comportamiento de muros de adobe reforzados con cuerdas sometidos a carga lateral cíclica. Tesis presentada para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

