

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil



Uso de Dispositivos Pasivos de Disipación de Energía en Puentes y Pasarelas Peatonales Comunes en Chile

Por

Ignacio Alejandro Leiva Palma

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Alejandro Morales Gómez

Diciembre, 2021

“Si uno quiere saber quién es en realidad, tiene que mirarse a sí mismo y aceptarse, los que no son capaces de aceptarse a sí mismos, terminarán fracasando”

Anónimo.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por todo el apoyo y confianza entregado en todos estos años. A mis padres Atilio y Patricia en creer en mí y jamás haber dudado de mis capacidades. A mis abuelos Atilio y Paulina los cuales me enseñaron que la responsabilidad, la perseverancia y el trabajo duro es el único camino para triunfar. Mi tío Arturo que gracias a sus conversaciones y consejos me motivaron a seguir y creer en mis sueños desde pequeño para poder lograr mis objetivos como persona y profesional. Mi hermana Andrea con sus palabras de aliento y consejos lograron levantarme en momentos de adversidades.

A mi profesor guía, Alejandro Morales por su paciencia, tiempo y dedicación, admirando como trasmite a sus alumnos su profesionalismo y ética. A todos los profesores de la escuela de ingeniería civil que fueron contribuyentes de formar mi carácter, potenciar mis habilidades y mi formación académica en todo mi proceso universitario.

A mi polola Nicol, mi pilar fundamental y mi motivación a continuar en los momentos en donde ya no sentía más fuerzas para batallar. A mis más grandes amigos, Gianfranco, Julio, José, Andrés, Bairon, Benjamín y Gustavo quienes me sacaron muchas veces una sonrisa en momentos difíciles. Gracias a todos ustedes logré llegar hasta aquí.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	10
1. Introducción	16
1.1 Motivación	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo principal.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Metodología.....	17
2. Revisión Bibliográfica y Antecedentes	18
2.1 Código de diseño de puentes	18
2.1.1 Manual de carreteras	18
2.2 Caracterización de los Puentes y Pasarelas Chilenas.....	19
2.3 Principales Daños y Fallas.....	21
2.4 Puentes	22
2.5 Pasarelas Peatonales	23
2.6 Disipadores de energía	26
2.6.1 Comportamiento histerético de elementos de acero	26
2.6.2 Amortiguadores histerético metálicos	26
2.6.3 Disipador de energía ADAS	30
2.6.4 Estudio experimentales con dispositivos ADAS	32
2.6.5 Amortiguadores Viscosos	33
2.6.6 Comportamiento Histerético de Amortiguadores Viscosos.....	33
3. Caso Estudio	37
3.1 Descripción de las Estructuras.....	37
3.1.1 Paso Inferior Chada	37
3.1.2 Paso Inferior Las Mercedes	42
3.1.3 Pasarela Chada.....	45
3.2 Daños Observados en el Paso Inferior Chada	48
3.3 Daños Observados en Paso inferior Las Mercedes	50
3.4 Daños observados Pasarela Chada	52
4. Modelación Analítica	53
4.1 Modelación Paso Inferior Chada.....	57
4.1.1 Superestructura	58

4.1.2 Subestructura	59
4.1.3 Conexión Rígida.....	60
4.1.4 Masas Sísmicas y Peso del Puente	60
4.1.5 Apoyos Elastoméricos.....	61
4.2 Elemento de Impacto	63
4.2.1 Topes Laterales.....	64
4.2.2 Análisis Modal Paso Inferior Chada	67
4.2.3 Análisis y Resultados del Modelo Paso Inferior Chada	68
4.2.4 Aceleraciones	71
4.3 Modelación paso inferior Las Mercedes	73
4.3.1 Superestructura	75
4.3.2 Subestructura	76
4.3.3 Conexión Rígida.....	76
4.3.4 Masas Sísmicas y Peso del Puente	76
4.3.5 Apoyos Elastoméricos.....	78
4.4 Elemento de Impacto	79
4.4.1 Topes Laterales.....	80
4.4.2 Análisis del Paso Inferior Las Mercedes	82
4.4.3 Aceleraciones	85
4.5 Modelación Pasarela Chada	87
4.5.1 Superestructura	87
4.5.2 Subestructura	88
4.5.3 Masas Sísmicas y Peso de la Pasarela.	89
4.5.4 Apoyos Elastoméricos y Elementos de Impactos	90
4.5.5 Análisis de la pasarela Chada.....	94
4.5.5.1 Aceleraciones.....	98
5 Amortiguadores de disipación de energía	100
5.1 Dispositivos ADAS	100
5.1.1 Dispositivos ADAS en Paso inferior Chada	102
5.1.2 Dispositivos ADAS en Paso inferior Las Mercedes	108
5.1.3 Dispositivos ADAS en Pasarela Chada	114
5.2 Amortiguadores viscosos	120
5.2.1 Amortiguador viscoso en Paso inferior Chada.....	121
5.2.2 Amortiguador viscoso en Paso inferior Las Mercedes.....	126
5.2.3 Amortiguador viscoso en Pasarela Chada.....	130
6. Conclusiones	137

Bibliografía 139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.: Número de pasarelas según nivel de daño.	25
Tabla 3.1: Clasificación y Resistencia de Elementos Estructurales.	38
Tabla 3: Longitudes de cepas, pasarela Chada.	46
Tabla 4.1: Propiedades geométricas del tablero.	58
Tabla 4.2: Propiedades mecánicas vigas longitudinales.	59
Tabla 4.3: Propiedades geométricas cepa central.	59
Tabla 4.4: Masas sísmicas y pesos superestructura.	60
Tabla 4.5: Masas sísmicas y pesos subestructura.	60
Tabla 4.6: Masas concentradas asignadas, en toneladas.	61
Tabla 4.7: Propiedades y Rigideces de los Apoyos Elastoméricos [17].	62
Tabla 4.8: Cargas y coeficientes de roce en apoyos elastoméricos [17].	62
Tabla 4.9: Resistencia y desplazamiento al deslizamiento.	63
Tabla 4.10: Parámetros de los elementos de impacto.	64
Tabla 4.11: Propiedades de los elementos Contac.	67
Tabla 4.12: Primeros seis modos de vibrar del análisis modal.	67
Tabla 4.13 desplazamiento transversales del tablero.	68
Tabla 4.14: desplazamientos longitudinales del tablero.	69
Tabla 4.15: Propiedades geométricas del tablero, paso inferior Las Mercedes.	75
Tabla 4.16: Propiedades geométricas cepa centra paso inferior Las Mercedes.	76
Tabla 4.17: Masas sísmicas y pesos superestructura paso inferior Las Mercedes.	76
Tabla 4.18: Masas sísmicas y pesos subestructura paso inferior Las Mercedes.	77
Tabla 4.19: Pesos concentradas asignadas en [kN], paso inferior Las Mercedes.	78
Tabla 4.20 : Propiedades de los apoyos elastoméricos, rigidez y fuerza laterales de fluencia [9].	79
Tabla 4.21: Parámetros de los elementos de impacto, paso inferior Las Mercedes.	80
Tabla 4.22: Resistencia del hormigón en tapas del paso inferior Las Mercedes.	80
Tabla 4.23: Propiedades de los elementos Contac en tapas en el paso inferior Las Mercedes.	81
Tabla 4.24: Primeros seis modos de vibrar del análisis modal.	82
Tabla 4.25: Desplazamiento transversal del tablero, paso inferior Las Mercedes.	82
Tabla 4.26: Desplazamiento longitudinal del tablero, paso inferior Las Mercedes.	83
Tabla 4.27: Propiedades Mecánicas de vigas pasarela Chada.	88
Tabla 4.28: Propiedades geométricas de cepas en pasarela Chada.	88
Tabla 4.29: Masas sísmicas y pesos superestructura.	89
Tabla 4.30: Pesos concentrados asignados en [kN].	90
Tabla 4.31: Propiedades de los apoyos elastoméricos, rampa izquierda.	91

Tabla 4.32: Propiedades de los apoyos elastoméricos, cepa central.....	91
Tabla 4.33: Propiedades de los apoyos elastoméricos, rampa derecha.....	91
Tabla 4.34: Parámetros de los elementos impacto, pasarela Chada.....	92
Tabla 4.35: Resistencia del hormigón en tapas de la pasarela Chada.....	93
Tabla 4.36: Propiedades de los elementos Contac en tapas en la pasarela Chada.....	93
Tabla 4.37: Primeros seis modos de vibrar del análisis modal, pasarela Chada.....	94
Tabla 4.38: Desplazamiento dirección en el eje “x”, pasarela Chada.....	95
Tabla 4.39: Desplazamiento dirección en el eje “z”, pasarela Chada.....	95
Tabla 5.1: Dispositivo ADAS, paso inferior Chada.....	101
Tabla 5.2: Dispositivo ADAS, paso inferior Las Mercedes.....	101
Tabla 5.3: Dispositivo ADAS, pasarela Chada.....	101
Tabla 5.4: Disminución de desplazamientos en paso inferior Chada bajo la acción de dispositivos ADAS.....	103
Figura 5.4: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) ADAS 25% ,b) ADAS 45%, c) ADAS 70%.....	104
Tabla 5.5: Desplazamientos nodales en los extremos del tablero bajo la acción del registro de Concepción.....	105
Tabla 5.6: Valores de períodos con y sin dispositivos.....	107
Tabla 5.7: Disminución de desplazamientos en paso inferior Las Mercedes bajo la acción de dispositivos ADAS.....	109
Tabla 5.8: Desplazamientos nodales en los extremos del tablero bajo la acción del registro de Concepción.....	111
Tabla 5.9: Valores de períodos con y sin dispositivos.....	112
Tabla 5.10: Disminución de desplazamientos en pasarela Chada bajo la acción de dispositivos ADAS.....	116
Tabla 5.11: Desplazamientos nodales en los extremos de la viga bajo la acción del registro de Viña del Mar.....	118
Tabla 5.12: parámetros utilizados para el diseño de amortiguadores viscosos.....	121
Tabla 5.13 : Disminución de desplazamientos en paso inferior Las Chada bajo la acción de amortiguadores viscosos.....	123
Tabla 5.14: Desplazamientos nodales en los extremos de la viga bajo la acción del registro Concepción.....	124
Tabla 5.15: Disminución de desplazamientos en paso inferior Las Chada bajo la acción de amortiguadores viscosos.....	127
Tabla 5.16: Desplazamientos nodales en los extremos del tablero bajo la acción del registro Concepción.....	128
Tabla 5.17: Periodos naturales del paso inferior Las Mercedes bajo la acción de los amortiguadores.....	130
Tabla 5.17: Disminución de desplazamientos en pasarela Chada bajo la acción de amortiguadores viscosos.....	132

Tabla 5.18: Desplazamientos nodales en los extremos de la viga bajo la acción del registro de Viña del Mar. 134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diafragma en puentes chilenos [9]	19
Figura 2.2: Vista transversal de puentes, (a) tipo I, (b) tipo II. [9].....	19
Figura 2.3: Puente (a) topes laterales de Hormigón armado, (b) tapa de Hormigón armado. [2]	20
Figura 2.4: Elementos que aportan al comportamiento transversal del puente [9].	21
Figura 2.5: Nivel de daño general en pasos inferiores. [2]	22
Figura 2.6: Número de pasos de inferiores con tapa y tope lateral de hormigón armado según nivel de daño global. [2].....	22
Figura 2.7: Porcentaje de pasos inferiores con distinto nivel de daño global según zona sísmica. [2]	23
Figura 2.8: Ubicación de pasos niveles colapsados y nivel de daño en zona sísmica 3 y zona sísmica 2. [2].....	23
Figura 2.9: Daños tipo ND-2. Tope (A) y junta de expansión (B) [2].	24
Figura 2.10: Daños tipo ND-3. Caída de terraplén (A), rotura de topes sísmicos (B) [2].	24
Figura 2.11: Daños tipos ND-4. Colapso total (A) y (B) [2].	25
Figura 2.12: Ubicación de pasarelas peatonales y nivel de daño en zonas sísmica 3 y zona sísmica 2 [2].....	25
Figura 2.13: Histéresis tensión-deformación cíclica en elementos de acero [14].....	26
Figura 2.14: Relación idealizada carga-desplazamiento para amortiguadores metálicos y de fricción [14].....	27
Figura 2.15: Sistema de un grado de libertad que incorpora amortiguador histerético [14].....	27
Figura 2.16: Amplitud de respuesta de un estado estacionario del sistema de un grado de libertad con amortiguador histerético bajo excitación de base armónica $kdk = 0.55$ [14].	29
Figura 2.17: Uso de dispositivo ADAS sobre contraviento Chevrón [15].	30
Figura 2.18: Geometría optima de amortiguadores ADAS, a) Ancho constante y profundidad variable, b) Profundidad constante y ancho variable [14].....	31
Figura 2.19: Bucles de histéresis de elementos ADAS en un marco de placa con cargas de gravedad [14].....	32
Figura 2.20: Comportamiento Histerético de un amortiguador viscoso lineal [14].	34
Figura 2.21: Propiedades fuerza – velocidad para diferentes amortiguadores viscosos no lineales [14].....	35
Figura 2.22: Comportamiento histerético del amortiguador viscoso no lineal, para tres valores de αvd [14].	35
Figura 2.23: Comparación de energía absorbida con distintas variaciones del exponente αvd en amortiguamientos viscosos no lineales [16].	36
Figura 3.1: Ubicación Puente Chada en la ruta Acceso Sur (Fuente: GoogleEarth).	37
Figura 3.2: Elevación Puente Chada [17].	38
Figura 3.3: Sección transversal viga pretensada puente Chada [17].	38

Figura: 3.4: Corte Transversal Puente Chada [17].	39
Figura 3.5: Elevación de estribos [17].	40
Figura 3.6: Sección transversal estribos: a) sección con ala y b) sección sin ala [17].	40
Figura 3.7: Apoyo elastoméricos a) estribos y b) cepa, Puente Chada [17].	41
Figura 3.9: Dimensiones tope lateral de la cepa puente Chada [17].	41
Figura 3.10: Ubicación del Paso Inferior Las Mercedes (Fuente: GoogleEarth).	42
Figura 3.11: Elevación puente las Mercedes [9].	42
Figura 3.12: Sección transversal viga pretensada Puente Las Mercedes [9].	43
Figura 3.13: Corte transversal Puente las Mercedes [9].	43
Figura 3.14: Apoyo elastoméricos Puente las Mercedes [9].	44
Figura 3.15: Vista en planta de apoyos elastoméricos y barras sísmicas, Puente las Mercedes [9].	44
Figura 3.16: Ubicación Pasarela Chada (Fuente: GoogleEarth).	45
Figura 3.17: Elevación tramo central, Pasarela Chada [16].	45
Figura 3.18: Corte transversal vigas, Pasarela Chada [16].	46
Figura 3.19: Elevación rampa izquierda, Pasarela Chada [16].	47
Figura 3.20: Elevación rampa derecha, Pasarela Chada [16].	47
Figura 3.21: Tapas laterales y barras sísmicas en sección transversa [16].	47
Figura 3.22: Vista planta, Pasarela Chada [16].	48
Figura 3.23: Rotación del Tablero, Puente Chada [17].	49
Figura 3.24: Desplazamiento relativo en extremos, Puente Chada [9].	49
Figura 3.25: a) Daños en tope lateral de estribo, b) daños en viga pretensada [17].	49
Figura 3.26: a) Deformación en barras sísmicas y b) desprendimiento del suelo en columnas [9].	50
Figura 3.27: a) Fallo en tapa en los estribos y b) Grietas en tapas en cepas centrales [9].	50
Figura 3.29: Rotación del tablero durante el Terremoto del Maule 2010 [9].	51
Figura 3.30: Rampa izquierda Colapsada [16].	52
Figura 3.31: Cepas apuntaladas [16].	52
Figura 4.1 Elemento Frame en Software Ruaumoko [19].	53
Figura 4.2: Elemento Resorte en software Ruaumoko [19].	53
Figura 4.3 Elemento Contac, Software Ruaumoko [19].	54
Figura 4.4 Elemento amortiguamiento, Software Ruaumoko [19].	54
Figura 4.5: Registro sísmico Viña del Mar, N-S.	55
Figura 4.6: Registro sísmico Viña del Mar, E-W.	55
Figura 4.7: Registro sísmico Concepción, N-S.	56
Figura 4.8: Registro sísmico Concepción, E-W.	56
Figura 4.9: Modelo del Paso inferior Chada [17].	57

Figura 4.10: Elevación transversal en cepa [17].	Figura 4.11: Elevación transversal estribo [17].	57
Figura 4.12: Sección transversal del tablero [17].		58
Figura 4.13: Deformación lateral de viga pretensada [17].		58
Figura 4.14: Viga deformada SAP2000 [17].		59
Figura 4.15: Masas concentradas en modelo tridimensional. a) Masas en tablero. b) Masas en cepa [17].		61
Figura 4.16: Relación fuerza desplazamiento para apoyos en la cepa [17].		62
Figura 4.17: Elementos de Impacto en paso inferior Chada.		63
Figura 4.18: Curva bilineal elemento de impacto.		64
Figura 4.19: Curva constitutiva fuerza-desplazamiento en estribo.		65
Figura 4.20: Curva constitutiva fuerza-desplazamiento en cepa.		65
Figura 4.21: Curva bilineal vs Curva constitutiva de topes en estribo.		66
Figura 4.22: Curva bilineal vs Curva constitutiva de topes en Cepa.		66
Figura 4.23: Primeros tres modos a) transversal, b) longitudinal y c) rotacional.		67
Figura 4.24: Nodos en el tablero.		68
Figura 4.25: a) Desplazamiento transversal del tablero, b) desplazamiento longitudinal del tablero.		69
Figura 4.26: Relación fuerza – desplazamiento del análisis tiempo historia Concepción.		70
Figura 4.27: Histéresis elastómero cepa central, registro Concepción.		70
Figura 4.28: desplazamientos máximos relativos de apoyos elastoméricos del paso inferior Chada.		71
Figura 4.29: Aceleraciones máximas en la dirección longitudinal, paso inferior Chada.		72
Figura 4.31: Modelo paso inferior Las Mercedes.		73
Figura 4.32: Elevación transversal en cepa, paso inferior Las Mercedes.		74
Figura 4.33: Elevación transversal en estribo, paso inferior Las Mercedes.		74
Figura 4.34: Sección transversal del tablero, paso inferior Las Mercedes.		75
Figura 4.35: Viga longitudinal pretensada y modelada mediante SAP2000 para obtención de la rigidez lateral, paso inferior Las Mercedes.		75
Figura 4.36: Masas concentradas en modelo tridimensional, masas en tablero y cepa paso inferior Las Mercedes.		77
Figura 4.37: Apoyo elastomérico y modelo constitutivo, paso inferior Las Mercedes [9].		78
Figura 4.38: Elementos de impactos, paso inferior Las Mercedes.		79
		80
Figura 4.39: Curva bilineal elemento de impacto, paso inferior Las Mercedes.		80
Figura 4.40: Curva bilineal tapa en estribo, paso inferior Las Mercedes.		81
Figura 4.41: Curva bilineal tapa en cepa, paso inferior Las Mercedes.		81
Figura 4.42: Nodos en el tablero, paso inferior Las Mercedes.		82

Figura 4.43: a) Desplazamiento transversal del tablero, b) Desplazamiento longitudinal del tablero.	83
Figura 4.44: Relación fuerza – desplazamiento Contac del análisis tiempo historia Concepción. ..	84
Figura 4.45: Relación fuerza desplazamiento, en apoyo elastómero en cepa central del elemento 8.	84
Figura 4.46: Desplazamiento elastoméricos del paso inferior Las Mercedes en la dirección longitudinal	85
Figura 4.47: Desplazamiento elastoméricos del paso inferior Las Mercedes en la dirección transversal.	85
Figura 4.48: Nodos elastoméricos en el paso inferior Las Mercedes.	86
Figura 4.49: Aceleraciones máximas en la dirección longitudinal, paso inferior Las Mercedes.	86
Figura 4.50: Aceleraciones máximas en la dirección transversal, paso inferior Las Mercedes.	86
Figura 4.51: Modelo pasarela Chada.	87
Figura 4.52: Sección transversal de las vigas principales en [cm] en pasarela Chada.	87
Figura 4.53: Elementos que componen la pasarela Chada en planta.	88
Figura 4.54: Masas concentradas en modelo tridimensional de pasarela Chada.	89
Figura 4.55: Comportamiento elastoplástico de apoyos elastoméricos en pasarela Chada.	90
Figura 4.55: Curva bilineal elemento de impacto, rampa izquierda y derecha, pasarela Chada.	92
Figura 4.56: Curva bilineal elemento de impacto en tapas laterales, pasarela Chada.	93
Figura 4.57: Nodos de vigas pretensadas en pasarela Chada.	94
Figura 4.58: Desplazamientos dirección “x”, pasarela Chada.	96
Figura 4.59: Desplazamientos dirección “z”, pasarela Chada.	96
Figura 4.60: Relación fuerza-desplazamiento del análisis tiempo historia Concepción.	97
Figura 4.61: Relación fuerza – desplazamiento, en apoyo elastómero, dirección eje “x”.	97
Figura 4.62: Relación fuerza – desplazamiento, en apoyo elastomérico del elemento 47, dirección eje “z”.	98
Figura 4.63: Nodos elastoméricos en la pasarela Chada.	99
Figura 4.64: Aceleraciones máximas en la dirección “x”, pasarela Chada.	99
Figura 4.65: Aceleraciones máximas en la dirección “z”, pasarela Chada.	99
5	100
Figura 5.1: Dispositivo Metálico ADAS [23]	100
Figura 5.2: Dispositivo ADAS en paso inferior Chada.	102
Figura 5.3: Desplazamientos Máximos transversales en el paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	103
Figura 5.5: Aceleración de nodos sobre los elastómeros.	106
Figura 5.6: Aceleraciones Máximas transversales en el paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	106
Figura 5.7: Espectro de aceleración bajo la acción del registro sísmico de Viña del Mar.	107

.....	109
Figura 5.9: Desplazamientos Máximos transversales en el paso Las Mercedes: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	109
Figura 5.10: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) ADAS 25% ,b) ADAS 45%, c) ADAS 70%.	110
Figura 5.11: Nodos elastoméricos en el paso inferior Las Mercedes.	112
Figura 5.12: Aceleraciones Máximas transversales en el paso inferior Las Mercedes en nodos 54 – 65 : a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	112
Figura 5.13: Espectro de aceleración bajo la acción del registro sísmico de Concepción.	113
Figura 5.14: Espectro de aceleración bajo la acción del registro sísmico de Viña del Mar.	113
Figura 5.15: Dispositivos ADAS pasarela Chada.	114
Figura 5.16: Elementos que componen la pasarela Chada.	114
Figura 5.17: Ubicación de los nodos en vigas pretensadas en la pasarela Chada.	115
Figura 5.18: Desplazamientos Máximos transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	115
Figura 5.19: Desplazamientos Máximos transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	116
Figura 5.20: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 136 para el registro sísmico Viña del Mar: a) ADAS 25% ,b) ADAS 45%, c) ADAS 70%.	117
Figura 5.21: Aceleraciones Máximas transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	119
Figura 5.22: Comparación de Aceleraciones en dirección z, modelo original versus modelo ADAS70% en registro de Concepción y Viña del Mar	119
Figura 5.23: Amortiguador viscoso [16].	120
Figura 5.24: Modelo del amortiguador viscoso utilizado.	121
Figura 5.25: Paso inferior Chada con amortiguadores viscosos.	122
Figura 5.26: Desplazamientos Máximos transversales en el paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	122
Figura 5.27: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) Amortiguador 17130 ,b) Amortiguador 17150, c) Amortiguador 17160. ...	124
Figura 5.28: Aceleración nodal sobre elastómeros del tablero.	125
Figura 5.30: Paso inferior las mercedes con amortiguadores viscosos.	126
Figura 5.32: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) Amortiguador 17130 ,b) Amortiguador 17150, c) Amortiguador 17160. ...	128
Figura 5.33: : Aceleraciones Máximas transversales en paso inferior Las Mercedes: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	129
Figura 5.34: Espectro de aceleraciones con amortiguamiento, modelo 17130.	130
Figura 5.35: Amortiguadores viscosos en pasarela Chada.	131
Figura 5.35: Nodos en pasarela Chada, vista en planta.	131
.....	132

Figura 5.36: Desplazamientos Máximos transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	132
Figura 5.37: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 136 para el registro sísmico Concepción: a) Amortiguador 17130 ,b) Amortiguador 17150, c) Amortiguador 17160. ...	133
Figura 5.38: Aceleraciones en nodos elastoméricos pasarela Chada.....	135
Figura 5.39: Aceleraciones Máximas transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.	135
Figura 5.40: Comparación de Aceleraciones en dirección z, modelo original versus modelo 17160 en registro de Concepción y Viña del Mar.	136

1. Introducción

1.1 Motivación

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo. En promedio, un terremoto de magnitud superior a 8 [M_w] se produce cada diez años. El nivel de sismicidad es tal que, en los últimos 35 años, desde 1962, se han producido más de 4.000 sismos de magnitud superior a 5 [M_w] [1].

El terremoto del Maule con magnitud de $M_w = 8,8$ del año 2010, desencadenó consecuencias en varias infraestructuras y en lamentables pérdidas de vidas humanas. Alrededor de 300.000 edificaciones sufrieron daños en menor o mayor grado, incluso colapso total en estructuras principales, incluyendo en estos daños estructuras utilizadas para la conectividad vial, quedando de manifiesto la vulnerabilidad sísmica de estructuras como puentes, pasos niveles y pasarelas peatonales. Las pérdidas económicas debido al terremoto se estimaron en 30.000 millones de dólares, esto es equivalente a aproximadamente 17% del PIB de Chile. El costo de reparación de los daños de infraestructura vial se estimó en US\$850 millones. La emergencia y programa de reconstrucción del Ministerio de Obras Públicas consideraron alrededor de US\$500 millones para reparar la infraestructura pública [2].

Las estructuras de los puentes chilenos se clasifican en puentes, pasos niveles y pasarelas peatonales. El puente es una estructura que cuya finalidad es el cruce de ríos, arroyos y otros obstáculos naturales o artificiales, por otra parte, los pasos niveles conectan su ruta principal sobre o por debajo de rutas secundarias. Y finalmente las pasarelas peatonales, son estructuras que permiten el libre tránsito de peatones sobre la carretera de altas velocidades [2]. Los daños típicos fueron generados por grandes desplazamientos transversales y longitudinales, provocando problemas de conexión entre la superestructura y la subestructura [3].

En este contexto, este trabajo estudiará el uso de dispositivos pasivos de disipación de energía del tipo viscoso e histerético en puentes, paso niveles y pasarelas peatonales. Estos dispositivos permitirán controlar desplazamientos relativos de la subestructura y superestructura por medio de disipación de energía, para así asegurar el correcto funcionamiento después de eventos catastróficos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Evaluar la influencia en el desempeño sísmico que tiene la inclusión de dispositivos de disipación de energía pasivos en puentes y pasarelas peatonales comunes en Chile.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fallas recurrentes en los puentes y pasarelas peatonales en Chile.
- Definir tres casos de estudios (puente, paso nivel y pasarela) con una modelación completa, incluyendo elementos de disipación.
- Evaluar el efecto que tiene los elementos de disipación utilizados sobre la respuesta sísmica en los casos en estudio.

1.3 Metodología

- Revisión bibliográfica, para una caracterización del tipo de daños sufridos por puentes y pasarelas peatonales durante el terremoto del Maule 2010.
- Análisis de los casos de estudio: puente Chada, paso inferior Las Mercedes y pasarela Chada.
- Modelación de los casos estudios en las condiciones que estaban durante el terremoto del Maule.
- Realización de análisis no-lineal tiempo-historia a los casos en estudio, evaluar el desempeño bajo la acción de dos registros sísmicos naturales chilenos.
- Modelación de los casos en estudio incluyendo dispositivos tipo ADAS. Evaluar su desempeño con análisis no-lineal tiempo-historia, considerando los mismos registros del punto anterior.
- Modelación de los casos en estudio incluyendo amortiguadores viscosos. Evaluar su desempeño con análisis no-lineal tiempo-historia considerando los mismos registros del punto anterior.
- Análisis y comparación de resultados.
- Conclusiones y comentarios relevantes en relación con los objetivos del trabajo.

2. Revisión Bibliográficas y Antecedentes

En este capítulo se estudian y describen tres estructuras de hormigón armado ubicadas en la zona central de Chile, estas corresponden a un puente, una pasarela y un paso nivel. Dichas estructuras en Chile se establecen bajo diseño sísmico en la ASSHTO [4] y el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (MOP) [5]. El gran objetivo es que las estructuras logren resistir daños inducidos por movimientos sísmicos de intensidad moderada, limitar daños por mediana intensidad y prevenir el colapso total o parcial durante sismos de intensidad severa [5].

El Terremoto del Maule originó daños y colapsos en diversas estructuras a nivel país, con el trabajo de campo desarrollado por muchos profesionales se elaboró una base de datos en la zona central compuesto por un total 211 puentes, 188 pasarelas y 88 paso niveles [2]. El análisis arrojó que la mayoría de estas estructuras sufrió daño reparable, no reparable y dentro del total de base de la base de datos 24 puentes, 19 pasarelas y 3 pasos niveles colapsaron [2].

Se recopiló información bibliográfica sobre las estructuras descritas. El objetivo es conocer su construcción y las relaciones intrínsecas que han utilizado distintos autores para representar el comportamiento sísmico de estas estructuras y sus componentes.

2.1 Código de diseño de puentes

2.1.1 Manual de carreteras

El Manual de Carreteras es un documento de la Dirección de Vialidad del MOP, elaborado con el propósito de establecer políticas y uniformar procedimientos e instrucciones a especialistas encargados de diseños, función de planificación, construir, conservar, operar las carreteras y caminos que componen la red vial del país, sobre todo velando por la seguridad vial [5]. En sus volúmenes se abarcan diversos temas relacionados con el área técnica, por lo que es necesario mencionar que el presente documento tiene como base el capítulo 3.1000, el cual especifica puentes y estructuras afines.

El código de diseño de puentes en Chile se basa en el código AASHTO y especifica cuatro procedimientos de análisis sísmico según características de los puentes: método de coeficiente sísmico (SC), método SC modificado, análisis modal espectral y análisis tiempo historia. El método SC utiliza una constante $SA^0/2g \geq 0.1$, donde A^0 es la aceleración efectiva que representa el riesgo sísmico y S depende de la clasificación del suelo [6]. El riesgo sísmico de puentes, pasarelas y paso niveles se especifica en el código de diseño del Manual de Carreteras [7] y este divide a Chile en tres zonas sísmicas, según en qué lugar se encuentra la estructura con respecto a la zona geográfica. Al oeste, centro y este de Chile se define como zonas sísmicas tipo 3, 2 y 1 con una aceleración efectiva de 0.4g, 0.3g y 0.2g respectivamente [8].

2.2 Caracterización de los Puentes y Pasarelas Chilenas.

En general, en Chile los puentes, pasarelas y pasos niveles están compuestos en su superestructura de un tablero, diafragmas, vigas cabezales y vigas pretensadas. Para restringir el desplazamiento lateral de la superestructura en estos tipos de estructuras se utilizan topes laterales pudiendo así restringir los desacoples de los apoyos elastoméricos en direcciones transversales [2].

El diafragma (ver Figura 2.1) es un elemento estructural utilizado para transmitir fuerzas laterales desde la superestructura (se ejemplifica la subestructura y superestructuras en el capítulo 3) a los apoyos elastoméricos, sin embargo, estos elementos no restringen desplazamientos transversales [4]. Hasta los años 90, los diafragmas eran únicamente obligatorios en Zonas sísmicas 3. En las zonas sísmicas 1 y 2, se podía omitir el diseño de diafragmas únicamente si se demostraba mediante un análisis estructural que podían resistir sin riesgos eventuales solicitaciones [9].

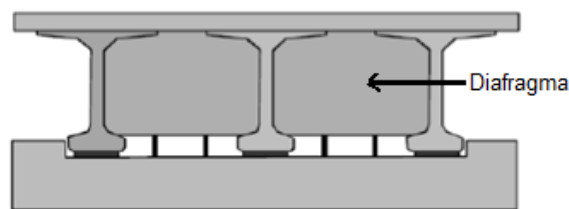


Figura 2.1: Diafragma en puentes chilenos [9]

Los topes laterales y centrales son elementos estructurales utilizados para restringir excesivos desplazamientos (transversales al puente) del tablero. Estos elementos al momento de ser diseñados deben cumplir un comportamiento dúctil, para así evitar la caída del tablero [7]. En Chile, a partir del año 2000 se implementó dos tipos de puentes. El Tipo I, aquel mantuvo las barras sísmicas o llaves de corte (más adelante se explicará el uso de barras sísmicas), pero eliminó los diafragmas (ver Figura 2.2a) y el Tipo II que únicamente utilizó topes de acero (ver Figura 2.2b), sustituyendo las llaves de corte [10].

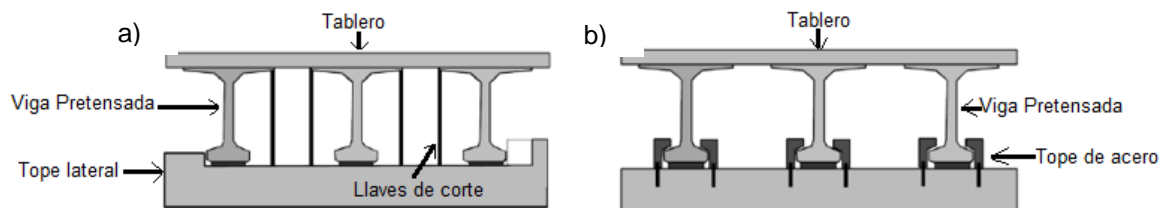


Figura 2.2: Vista transversal de puentes, (a) tipo I, (b) tipo II. [9]

Las tapas son elementos verticales de hormigón armado, ubicados en los extremos de vigas y mesa de apoyo, estas tienen un rol meramente estético, no siendo diseñados para limitar desplazamientos transversales (las tapas están construidas con solo hormigón, sin acero de esta manera la resistencia máxima lo aporta el hormigón sin presentar ductilidad de deformación), a diferencia de su contraparte: los topes laterales. En la Figura 2.3 se muestran ambos tipos de elementos [2].

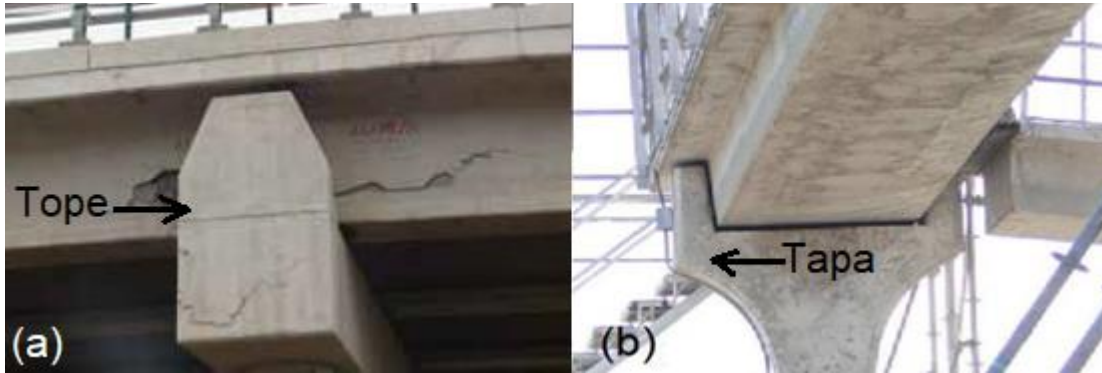


Figura 2.3: Puente (a) topes laterales de Hormigón armado, (b) tapa de Hormigón armado. [2]

Los apoyos elastoméricos son elementos de unión entre vigas pretensadas con vigas cabezales, usualmente se componen de neopreno reforzado con placas de acero. Principalmente su función es ser un apoyo, sin embargo, dada su rigidez lateral también aislar la mesa de apoyo de la superestructura. En otras palabras, el neopreno permite dar flexibilidad transversal para compensar deformaciones originados por excitaciones sísmicas, mientras que las placas de acero aportan rigidez vertical. [9]

Los puentes en Chile son diseñados con barras sísmicas, estando estas definidas por el Manual de Carreteras [7], como elementos de acero que ayudan a evitar desplazamientos verticales entre la superestructura y la subestructura [9]. A pesar de que las barras sísmicas cumplen un diseño de restringir levantamientos, estas barras aportan cierto grado de rigidez lateral al puente, ya que estas unen los elementos compuestos por la superestructura y la subestructura, cuando cada uno de estos elementos se ven sometidos a movimientos relativos, las barras sísmicas experimentan esfuerzos axiales, corte y momento [9]. Algunos autores desprecian el análisis de desplazamientos transversales en barras sísmicas, sin embargo, existen otros autores, que concluyeron que las barras sísmicas si aportaron en disminuir desplazamientos en superestructuras durante el Terremoto del Maule 2010 [11]. Estudios respaldan que el uso de las barras sísmicas previene el movimiento vertical de la superestructura, además de reducir fuerzas de impacto en la mesa de apoyo y limitar el daño en vigas y columnas [12]. En la Figura 2.4 se observan elementos estructurales de la superestructura.

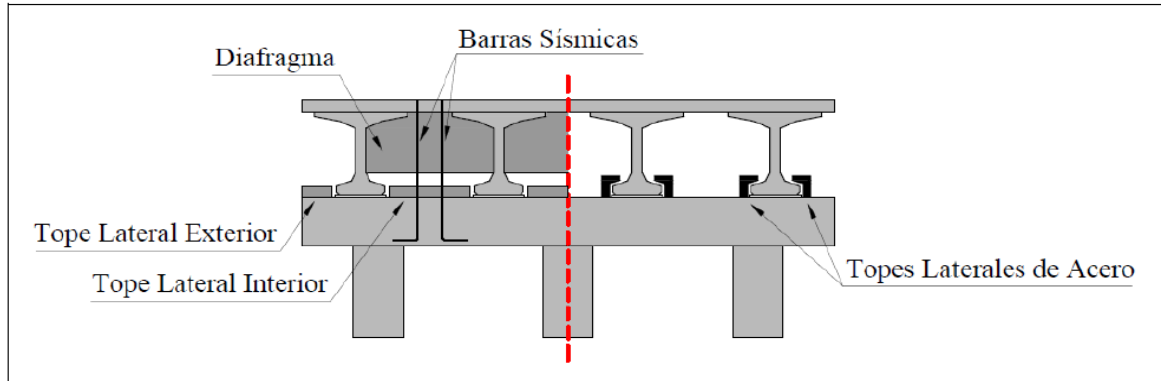


Figura 2.4: Elementos que aportan al comportamiento transversal del puente [9].

2.3 Principales Daños y Fallas

Se llevaron a cabo diversas investigaciones por Buckle y Elnashai S.A [11] posteriores al Terremoto del Maule, los estudios lograron cuantificar los daños de diversos puentes en Chile. Una de las conclusiones más importantes obtenidas en este reporte, fue que los puentes más nuevos sufrieron mayor daño que los puentes más antiguos [11]. Esto se debe que luego de los años 90 nuevas empresas concesionarias encargadas tanto en el diseño y construcción de puentes comenzaron a eliminar diafragmas y topes laterales para disminuir costos y tiempos de construcción [13]. Estos cambios de diseño y construcción fueron vistos por varios autores como la principal causa de daño observado durante el Terremoto del Maule, identificando que el daño más común fue el desplazamiento transversal excesivo de la superestructura debido a la rotación en el tablero [3], originando diversos daños y colapsos.

Los modos de fallas típicos se resumen a continuación [3]:

1. Daños en la conexión entre superestructuras y subestructuras.
2. Desmontaje de vanos por inclinación.
3. Daño en columnas y elastómeros por el movimiento permanente suelo.
4. Desmontaje de vanos debido al movimiento permanente del suelo.

Daños Recurrentes en puentes, Pasarelas Peatonales en Chile [3]

1. Grandes desplazamientos, llevando la estructura al punto del colapso.
2. Daño en barras sísmicas.
3. Desplazamientos en apoyos elastoméricos, desmontando parcialmente vigas en mesa de apoyo.
4. Desmontaje de vigas pretensadas por uso tapas sin considerar topes.

2.4 Puentes

En relación con los tipos de daño de puentes, Hernán Santa María [2] realizó un análisis estadístico de pasos inferiores el que contempló la elaboración de una base de datos de 88 estructuras. Este número corresponde al total de pasos inferiores existentes en la Ruta 5 Sur (desde la Región Metropolitana hacia la Región del Biobío). La base de datos se elaboró usando planos estructurales, reportes, inspecciones de daños e informes de mecánica de suelos en la mayoría de los puentes [2].

El daño global de cada puente se clasificó usando cuatro niveles de daño (ND): ND-1 corresponde a puentes sin daño, ND-2 corresponde a puentes con daño leve, ND-3 corresponde a puentes con daños que requirieron reparación mayor y ND-4 corresponde a colapso total, ver Figura 2.6. En la Figura 2.5, se presentan algunos daños en puentes y en vigas de hormigón pretensado.



Figura 2.5: Nivel de daño general en pasos inferiores. [2]

En la Figura 2.7 se muestra el número pasos inferiores con tapa y tope lateral de hormigón armado con su respectivo nivel de daño (ND):

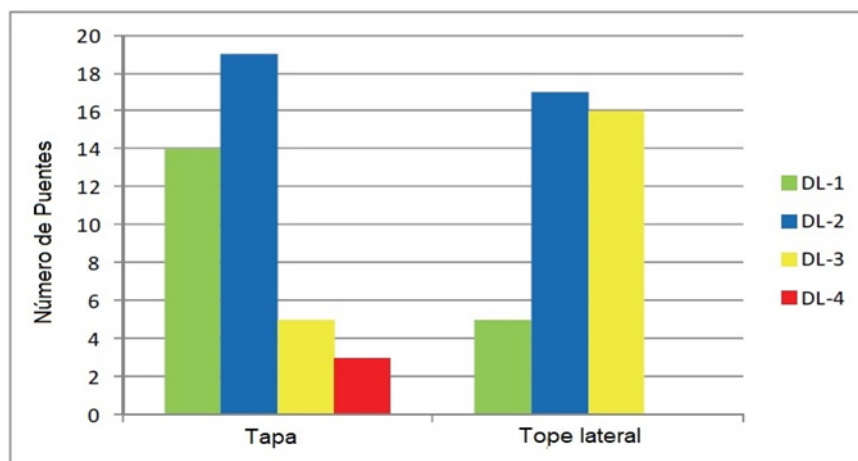


Figura 2.6: Número de pasos de inferiores con tapa y tope lateral de hormigón armado según nivel de daño global. [2]

De acuerdo con la base de datos, el número de pasos inferiores ubicados en las zonas sísmicas 2 y 3 son 64 y 24 respectivamente. El porcentaje de puentes con distinto nivel de daño, según la Zona Sísmica, se muestra en la Figura 2.7. Se puede identificar en esta figura que el porcentaje de puentes sin daño ND-1 es similar para puentes ubicados en ambas zonas sísmicas. Los 3 puentes que colapsaron (ND-4) estaban ubicados en zona sísmicas 2, y representan un 5% de los puentes en esta zona. Los puentes que colapsaron fueron diseñados con una fuerza 33% menor que la de los puentes ubicados en Zona Sísmica 3 [2].

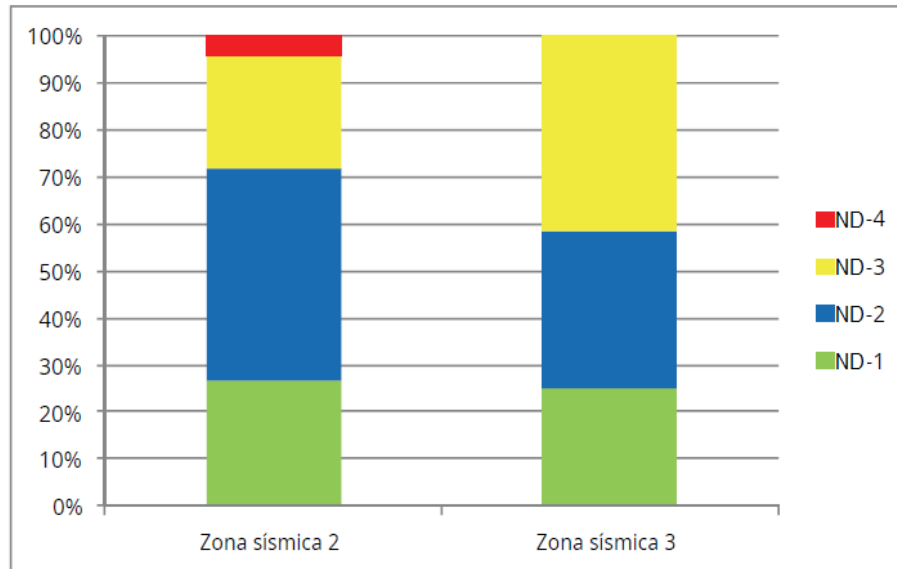


Figura 2.7: Porcentaje de pasos inferiores con distinto nivel de daño global según zona sísmica. [2]

De los 88 pasos inferiores del estudio estadístico, su nivel de daño y la definición de las zonas sísmicas se muestran la Figura 2.8. Se observa que los pasos inferiores más dañados, incluyendo los 3 puentes colapsados, están ubicados al sur de Santiago entre los Km 40 y 80. El daño localizado de estos puentes se podrían explicar por efecto de sitio y al distinto diseño por diferentes zonas Sísmicas [2].

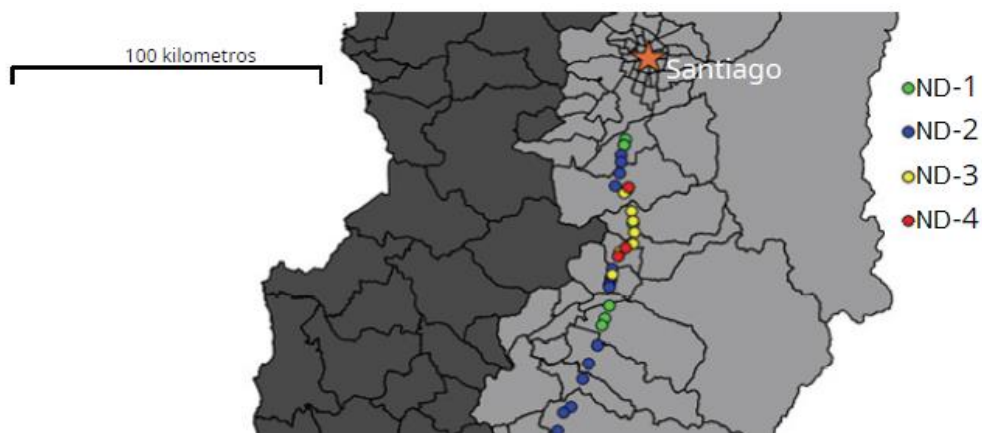


Figura 2.8: Ubicación de pasos niveles colapsados y nivel de daño en zona sísmica 3 y zona sísmica 2. [2]

2.5 Pasarelas Peatonales

En cuanto a las pasarelas peatonales, se definieron igualmente cuatro niveles de daño (ND) y se asignaron respectivamente a cada pasarela. ND-1 corresponde a pasarela sin daño, ND-2 corresponde a pasarelas con daños leves o que requirió reparación, ND-3 corresponde a pasarela con daños grave que requirió reparación mayor y ND-4 corresponde a colapso total de la viga principal o de sus rampas de acceso [2].

En las Figuras 2.9, 2.10 y 2.11 se presentan algunos ejemplos de los distintos niveles de daños en pasarelas peatonales.



(A)



(B)

Figura 2.9: Daños tipo ND-2. Tope (A) y junta de expansión (B) [2].



(A)



(B)

Figura 2.10: Daños tipo ND-3. Caída de terraplén (A), rotura de topes sísmicos (B) [2].



(A)



(B)

Figura 2.11: Daños tipos ND-4. Colapso total (A) y (B) [2].

La distribución de daño de las 188 pasarelas se resume en la tabla 2.1. De las 188 pasarelas, 19 sufrieron colapso (ND-4), lo que representa un 10% del total, y 34 necesitaron reparación o reconstrucción (ND-3 y ND-4), lo que representa un 18% de las pasarelas [2].

Tabla 2.1: Número de pasarelas según nivel de daño.

Nivel de daño	ND-1	ND-2	ND-3	ND-4
Total	81 (43%)	73 (39%)	15 (8%)	19 (10%)

125 pasarelas estaban situadas en la Zona Sísmica 2 (gris claro, Figura 2.13), 63 en la Zona Sísmica 3 (gris oscuro, Figura 2.12) y ninguna en la Zona Sísmica 1. La mayoría de los colapsos ocurrieron en el norte de Santiago; las pasarelas ubicadas en la Zona Sísmica 3 se desempeñaron peor que aquellas ubicadas en la Zona Sísmica 2, el 14% de las estructuras en zona sísmica 3 colapsaron. En la Zona Norte de Santiago se clasificó un suelo tipo III de acuerdo con la norma Nch433 [8], que es un suelo blando. Para el análisis total se descartó la Zona Norte de Santiago, ya que Hernán Santa María determinó que la concentración de daños de estos puentes está relacionada con la configuración estructural (puentes sin diafragmas rígidos y topes laterales) y/o efecto de sitio y no relacionado con una mayor demanda sísmica.

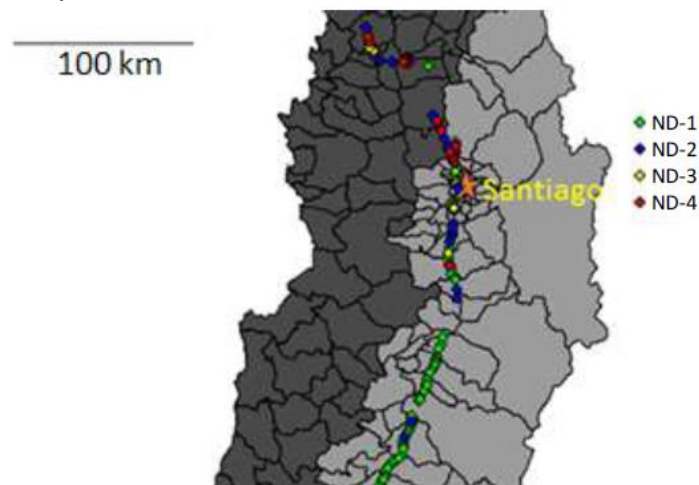


Figura 2.12: Ubicación de pasarelas peatonales y nivel de daño en zonas sísmica 3 y zona sísmica 2 [2].

2.6 Disipadores de energía

2.6.1 Comportamiento histerético de elementos de acero

Cuando el acero estructural es tensionado más allá de su límite elástico, el material comienza a plastificarse, mostrando una meseta plana. Si se continúa tensionando después de su meseta, el material entra en el rango de endurecimiento, alcanzando su resistencia máxima. Se muestra en línea negrita en la Figura 2.13, la relación tensión-deformación de un elemento de acero sometido a una tensión monótonamente creciente.

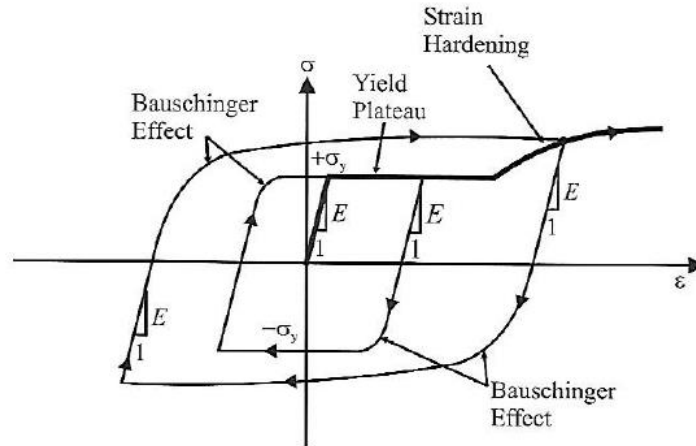


Figura 2.13: Histéresis tensión-deformación cíclica en elementos de acero [14].

La relación real tensión-deformación del acero, a menudo es aproximado por la teoría de modelos perfectamente elastoplásticos y/o elastoplástico bilineal. Para cada ciclo en el que el material es sometido a tensiones más allá de su límite elástico, su área bajo la curva tensión-deformación corresponde a la energía histerética disipada mediante calor [14]. El acero posee una gran capacidad de ductilidad para ser sometido grandes números de ciclos inelásticos antes de fallar, teniendo una gran capacidad de disipación de energía, por este motivo el acero es utilizado para desarrollar amortiguadores histeréticos diseñados para rendir cuando la estructura que está conectada es sometida a deformaciones.

2.6.2 Amortiguadores histerético metálicos

Los amortiguadores metálicos y de fricción se encuentran en la categoría de sistema de amortiguación activados por desplazamientos. Los amortiguadores metálicos aprovechan el comportamiento histerético del metal cuando son sometidos a deformaciones en el rango no lineal para luego disipar energía. Por otro lado, los amortiguadores friccionales disipan energía sísmica por medio de fricción el cual es desarrollado por el contacto entre dos cuerpos sólidos que se desliza uno sobre otro. Ambos tipos de amortiguadores presentan comportamiento histerético que es idealizado por una relación de carga desplazamiento, perfectamente elastoplástico como se muestra en la Figura 2.14.

Para un amortiguador metálico, la carga F_a de la Figura 2.15 es la carga que activa los amortiguadores, que corresponde a la carga de fluencia. Para los amortiguadores de fricción F_a corresponde a la carga de deslizamiento del amortiguador.

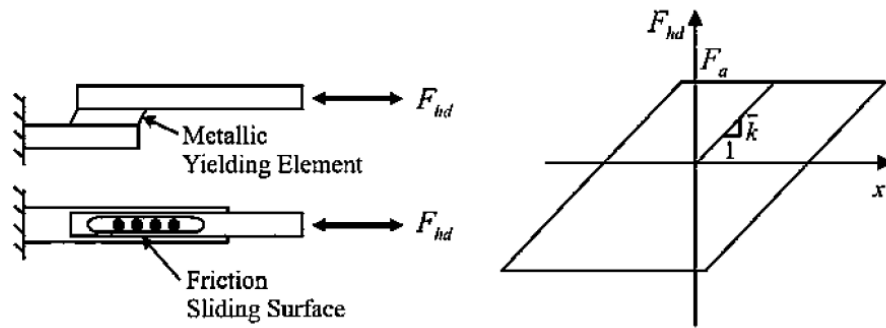


Figura 2.14: Relación idealizada carga-desplazamiento para amortiguadores metálicos y de fricción [14].

Para comenzar el estudio del efecto de los amortiguadores histerético enfocada en la respuesta dinámica de las estructuras, se añade un dispositivo histerético genérico a un sistema lineal simple de un grado de libertad sometido a aceleración del suelo $\ddot{x}_g(t)$ como se muestra en la Figura 2.15.

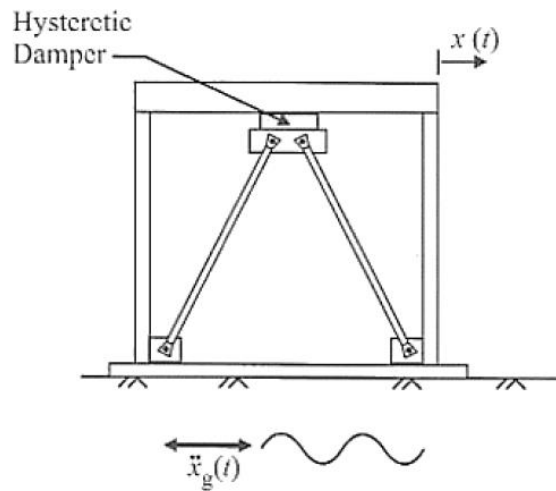


Figura 2.15: Sistema de un grado de libertad que incorpora amortiguador histerético [14].

La ecuación de movimiento para el sistema combinado se puede definir como:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + F_{hd}(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad 2.1$$

Donde m es la masa, c la constante de amortiguación viscosa y k la rigidez lateral de la estructura, $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$ y $x(t)$ simbolizan la aceleración, velocidad y el desplazamiento relativo respectivamente; $F_{hd}(t)$ es la fuerza horizontal no lineal proporcionada por el amortiguador histerético.

La estructura está sometida a la excitación armónica dada por:

$$\ddot{x}_g(t) = a_g \sin(\omega_g t) = -\frac{p_0}{m} \sin(\omega_g t) \quad 2.2$$

Donde ω_g es la frecuencia angular de excitación del suelo, a_g es la máxima aceleración del suelo y p_0 es la amplitud de la carga equivalente aplicada.

Mediante análisis dinámicos no lineales de tiempo historia, se logra obtener la amplitud de la respuesta en estado estacionario. Si la amplitud de la respuesta con respecto a la amplitud de excitaciones se normaliza, se puede apreciar los diferentes efectos del amortiguador histerético añadido en la respuesta de la estructura principal.

Primero se define la relación de frecuencia σ se define como:

$$\sigma = \frac{\omega_g}{\omega_0} \quad 2.3$$

Donde

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k + k_d}{m}} \quad 2.4$$

Además, donde ω_0 es la frecuencia natural de la estructura equipada con el amortiguador antes que se active el amortiguador, k la rigidez lateral del marco y k_d la rigidez lateral proporcionada por el amortiguador añadido antes que se active.

El desplazamiento lateral estático equivalente de la estructura x_{st} se define como:

$$x_{st} = \frac{p_0}{k} \quad 2.5$$

La deflexión lateral del sistema necesaria para activar el amortiguador histerético x_0 puede expresarse como:

$$x_0 = \frac{F_{lat}}{k_d} \quad 2.6$$

Donde F_{lat} es la carga lateral horizontal que activa el amortiguador.

En la Figura 2.17, la amplitud de la respuesta A normalizada por x_{st} se muestra para sistemas con $k_d/k = 0.55$ para diferentes valores de x_{st}/x_0 . La relación x_{st}/x_0 se puede expresar como:

$$\Lambda_{hd} = \frac{x_{st}}{x_0} = \frac{k_d}{k} = \frac{p_0}{F_{lat}} \quad 2.7$$

El parámetro Λ_{hd} del sistema amortiguado histerético se expresa en función tanto de la rigidez lateral del amortiguador añadido con respecto a la rigidez estructural original (k_d/k) como también a la carga de activación del amortiguador en relación con la amplitud de la excitación aplicada (p_0/F_{lat}).

Como se puede observar en la Figura 2.17 ($k_d/k = 0.55$) para valores de Λ_{hd} por encima de 0.85, la frecuencia natural del sistema con el amortiguador histerético es similar a la del sistema inicial. El efecto del amortiguador añadido es semejante a un aumento en la cantidad de amortiguación viscosa, con amplitudes pequeñas de vibración para valores más bajos de Λ_{hd} . Sin embargo, para valores de Λ_{hd} por debajo de 0.85, la frecuencia natural aparente del sistema se ve afectada por la adición del amortiguador histerético. El efecto del dispositivo aumenta la cantidad de amortiguación en el sistema como también alterar sus propiedades dinámicas. Cuando Λ_{hd} es menor que 0.15, el periodo natural del sistema se vuelve similar al del sistema completamente arriestrado. En este

rango, sin embargo, los valores más bajo de Λ_{hd} resultan en amplitudes de respuestas más altas. En la Figura 2.16, el sistema correspondiente al valor $\Lambda_{hd} \approx 0.45$ muestra la respuesta más baja.

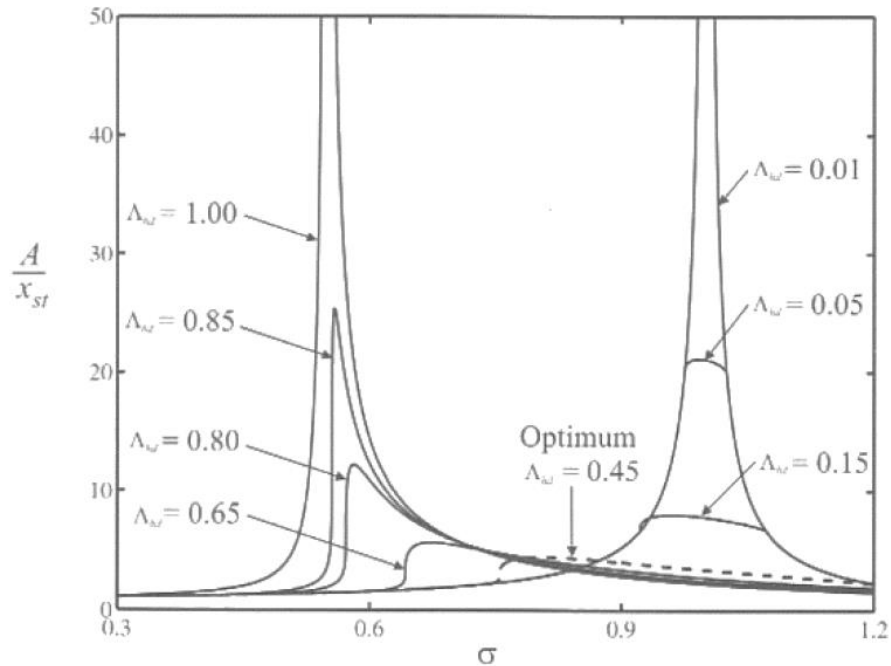


Figura 2.16: Amplitud de respuesta de un estado estacionario del sistema de un grado de libertad con amortiguador histéretico bajo excitación de base armónica $k_d/k = 0.55$ [14].

Sobre la base de los resultados numéricos anteriores, la adición de los amortiguadores histeréticos en un sistema puede deducirse teniendo tres efectos posibles:

1. La adición de amortiguación suplementaria sin modificar significativamente las propiedades dinámicas del sistema ($\Lambda_{hd} \geq 0.85$ en la figura 2.16).
2. La adición de amortiguación suplementaria junto con una modificación de las propiedades dinámicas del sistema que optimiza el uso de amortiguador añadido ($\Lambda_{hd} \approx 0.45$ en la figura 2.17).
3. La adición de amortiguación suplementaria junto con un efecto significativo en las propiedades dinámicas del sistema. ($\Lambda_{hd} \leq 0.15$).

2.6.3 Disipador de energía ADAS

Los dispositivos ADAS son utilizados en varias estructuras un uso común son en edificios donde en sus marcos se instalan sistemas de refuerzos de contraviento Chevrón, como se muestra en la Figura 2.17. En esta configuración, los dispositivos disipan energía a través de desplazamientos horizontales, entre la viga superior y la viga del contraviento. En el disipador actúan fuerzas sísmicas equivalente F , generando desplazamientos relativos, que da origen a disipaciones de energía por medio de la fluencia del material. Las diagonales del contraviento deben ser suficientemente rígidas para asegurar que se encuentren dentro del rango elástico en sismos de altas intensidades y que los desplazamientos relativos sean lo mínimo posible.

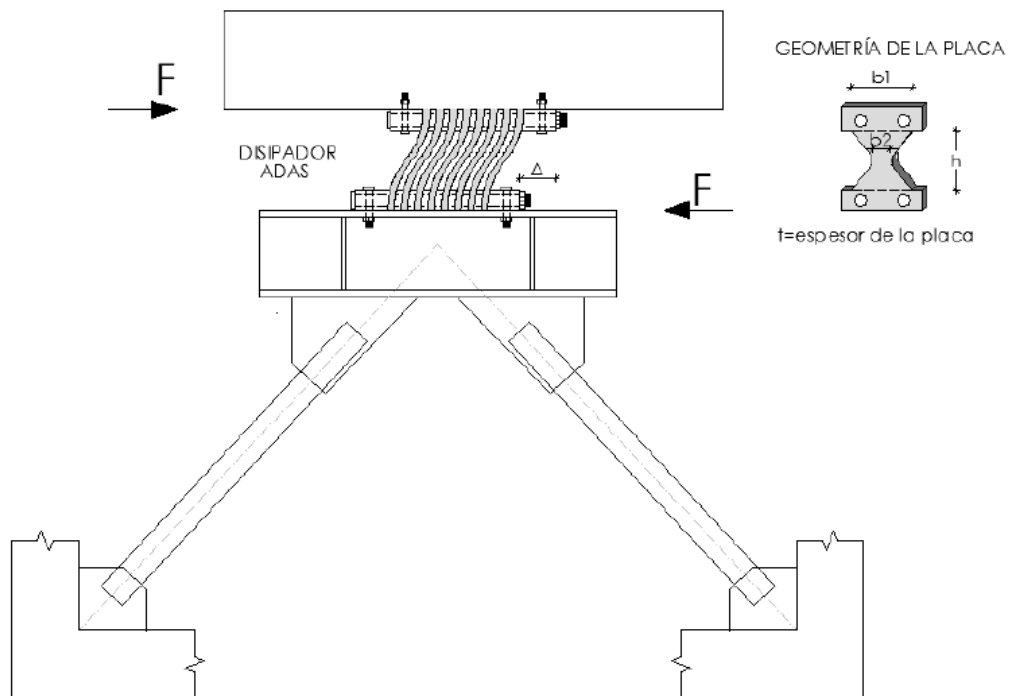


Figura 2.17: Uso de dispositivo ADAS sobre contraviento Chevrón [15].

Para maximizar la disipación de energía del dispositivo, se requiere que se alcance simultáneamente el momento plástico en cualquier sección de las placas, así optimizando la geometría del dispositivo para que cumpla tal propósito.

Considerando en primer lugar, un amortiguador de una sola placa de acero con un ancho constante b_0 y una profundidad variable $d(x)$ como se aprecia en la Figura 2.18a. Cuando se alcanza el momento plástico en los extremos de los dispositivos, el momento en cualquier sección del dispositivo $M(x)$ está dada por la siguiente ecuación:

$$M(x) = \frac{2M_{po}}{h} x = \left(\frac{2}{h}\right) \left(\frac{b_0 d_0^2}{4}\right) F_y x, \text{ para } -\frac{h}{2} \leq x \leq \frac{h}{2} \quad 2.8$$

Donde M_{po} es el momento plástico en los extremos en el dispositivo, h es la altura de la placa, d_0 es la profundidad en los extremos, x es la distancia considerada en la altura media en la placa y F_y es la fluencia del acero.

El momento plástico en cualquier sección de la placa $M_p(x)$ se define a partir de la siguiente ecuación

$$M_p(x) = \frac{b_0 d(x)^2}{4} F_y \quad 2.9$$

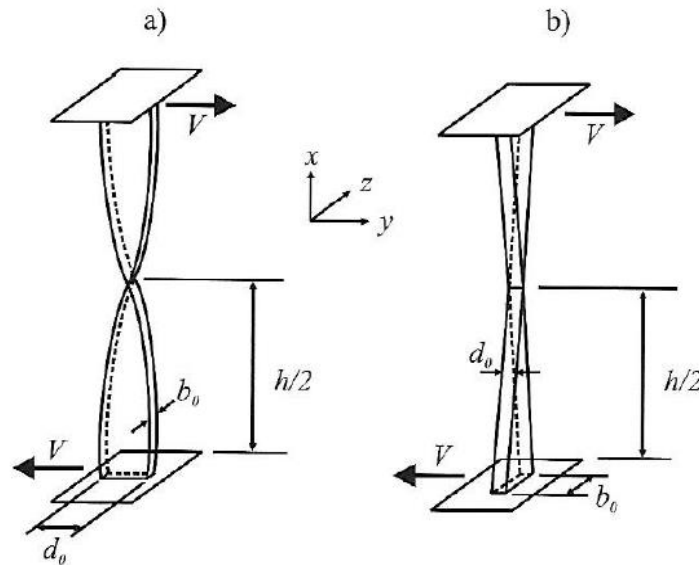


Figura 2.18: Geometría óptima de amortiguadores ADAS, a) Ancho constante y profundidad variable, b) Profundidad constante y ancho variable [14].

El momento que actúa en cada sección debe ser igual al momento plástico. Esto se logra igualando las ecuaciones (2.8) y (2.9), despreciando los efectos de fuerzas axiales y corte que actúan sobre el elemento. Por lo tanto, para maximizar la disipación de energía en función a la variación de profundidad de amortiguación metálica, es dada por la ecuación:

$$d(x) = d_0 \sqrt{\frac{2x}{h}} \quad 2.10$$

La geometría óptima se ilustra en la figura 2.19a. Sin embargo, desde un punto de vista constructivo la profundidad de la placa no puede ser cero a media altura, ya que la placa debe tener resistencia al corte:

$$V = \frac{2M_{po}}{h} \quad 2.11$$

Ahora considerando un amortiguador metálico hecho de una sola placa de acero con una profundidad constante y un ancho variable $b(x)$. El momento plástico en cualquier sección de la placa $M_p(x)$ está dado por la siguiente ecuación:

$$M_p(x) = \frac{b(x)d^2}{4} F_y \quad 2.12$$

Para asegurar que se plastifique simultáneamente todas las secciones la ecuación (2.12) se igualan con la ecuación (2.8), realizando procedimiento algebraico, da como resultado la variación del ancho de la placa y esta es representada por la siguiente ecuación:

$$b(x) = \frac{2x}{h} b_0 \quad 2.13$$

Como se muestra en la figura 2.19b, la geometría óptima da como resultado una variación lineal del ancho a lo largo de la altura de la placa. Recordar de forma análoga, desde un punto de vista constructivo, el ancho del dispositivo no puede ser cero a media altura.

2.6.4 Estudio experimentales con dispositivos ADAS

Extensas investigaciones se llevaron a cabo sobre el comportamiento de sistemas estructurales incluyendo dispositivos ADAS. En la Figura 2.19 se ilustra las pruebas cíclicas de un marco plano, incluyendo cargas de gravedad y este describió un comportamiento histerético estable. Estas pruebas arrojaron que los elementos ADAS eran capaces de sostener 100 ciclos de carga a una deformación equivalente a tres veces el desplazamiento medio δ_y , sin signos de degradación de la rigidez. Se concluyó que los elementos ADAS se pueden diseñar de forma segura hasta un rango máximo de desplazamiento de $10 \delta_y$, donde δ_y es la deformación de fluencia[14].

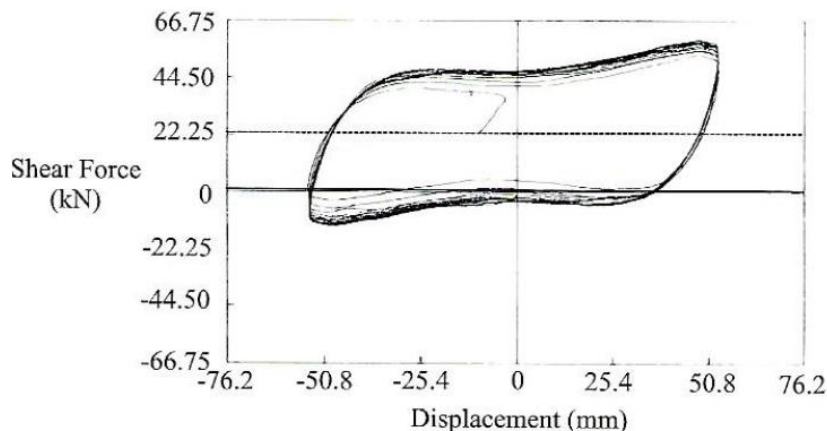


Figura 2.19: Bucles de histéresis de elementos ADAS en un marco de placa con cargas de gravedad [14].

2.6.5 Amortiguadores Viscosos

Los amortiguadores viscosos han sido ampliamente utilizados durante décadas en aeronaves y estructuras aeroespaciales. Sin embargo, en estructuras de ingeniería civil, su primer uso remonta desde 1969, cuando fueron instaladas 10.000 amortiguadores viscoelásticos en cada una de las torres gemelas (World Trade Center) en New York. El propósito de estos amortiguadores fue su diseño para vibraciones producidos por vientos, solo en la última década se utiliza también amortiguadores viscosos en excitaciones producidos por sismos [14].

2.6.6 Comportamiento Histerético de Amortiguadores Viscosos

Considerando un elemento viscoso sometido a un desplazamiento axial en función del tiempo $x(t)$ dado por la ecuación:

$$x(t) = X_0 \sin \omega t \quad 2.14$$

$$\dot{x}(t) = X_0 \omega \cos \omega t \quad 2.15$$

Donde X_0 es la amplitud de desplazamiento en los extremos del elemento y ω es la frecuencia de la excitación. La fuerza axial $F(t)$ inducida al elemento es linealmente proporcional a la velocidad relativa en sus dos extremos.

$$F(t) = C_L \dot{x}(t) \quad 2.16$$

Donde C_L es una constante de amortiguación viscosa lineal. Sustituyendo la ecuación (2.15) en (2.16) se obtiene la siguiente ecuación:

$$F(t) = C_L X_0 \omega \cos \omega t \quad 2.17$$

Por medio de trigonometría:

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1 \quad 2.18$$

$$\cos \omega t = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \omega t} \quad 2.19$$

Sustituyendo la ecuación (2.19) en la ecuación (2.17) se obtiene una nueva ecuación de la forma:

$$F(t) = \pm C_L X_0 \omega \sqrt{1 - \sin^2 \omega t} \quad 2.20$$

Finalmente reemplazando la ecuación (2.14) en la ecuación (2.20) se obtiene la relación fuerza-desplazamiento para el amortiguador viscoso lineal, ilustrada en la siguiente ecuación:

$$\frac{F(t)}{C_L X_0 \omega} = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{x_0}\right)^2} \quad 2.21$$

El bucle de histéresis es descrito por la ecuación (2.21), tiene forma de elipse como se muestra en la Figura 2.20. La amplitud máxima inducida por la fuerza viscosa es linealmente proporcional a la frecuencia de excitación, a la frecuencia de desplazamiento y a la constante de amortiguación. Además, la fuerza máxima del amortiguador es producida con desplazamiento igual a cero. Esto representa una ventaja significativa en amortiguadores viscosos, cuando el sistema tiene máximos desplazamientos, el amortiguador genera máximas fuerzas.

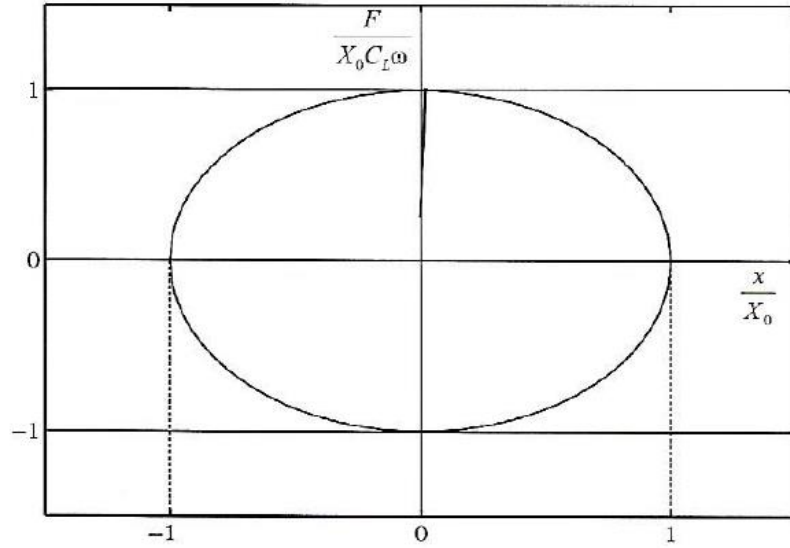


Figura 2.20: Comportamiento Histerético de un amortiguador viscoso lineal [14].

La energía disipada por el amortiguador es representada por el área bajo la relación fuerza-desplazamiento:

$$E_{vd} = \int_0^{2\pi/\omega} F(t)\dot{x}(t)dt = C_L \omega^2 X_0^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2 \omega t dt \quad 2.22$$

La energía disipada por ciclo es linealmente proporcional a la constante de amortiguación lineal, a la frecuencia de excitación y proporcional al cuadrado de la amplitud de desplazamiento.

$$E_{vd} = C_L \omega^2 X_0^2 \left[\frac{t}{2} + \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t \right]_0^{2\pi/\omega} = C_L \pi \omega X_0^2 \quad 2.23$$

Por otra parte, también los amortiguadores viscosos se diseñan para comportamientos no lineal, la principal ventaja de los amortiguadores viscosos no lineales es que en un caso de un peak de velocidad se activan estos dispositivos proporcionando fuerza de resistencia. No agregan rigidez estructural de esta manera no se cambian las propiedades dinámicas de las estructuras y además no están diseñadas para soportar cargas estáticas [14].

La fuerza axial que proporciona el amortiguador se expresa por medio de la ecuación:

$$F(t) = C_{NL} \text{sgn}(\dot{x}(t)) |\dot{x}(t)|^{\alpha_{vd}} \quad 2.24$$

Donde C_{NL} es la constante de amortiguación viscoso no lineal y α_{vd} es un coeficiente de velocidad determinado en el rango de $0.2 \leq \alpha_{vd} \leq 1$. Cuando $\alpha_{vd} = 1$, los dispositivos actúan de forma lineal. En la Figura 2.21 se ilustra la ventaja de usar amortiguadores viscosos no lineales con $\alpha_{vd} \leq 1$, reduciendo las fuerzas de amortiguamiento a altas velocidades.

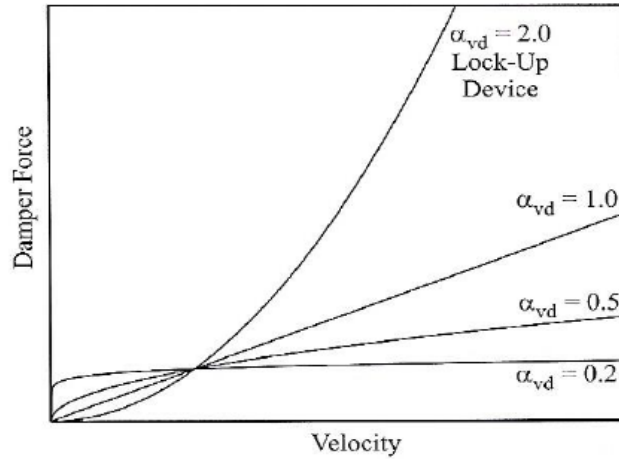


Figura 2.21: Propiedades fuerza – velocidad para diferentes amortiguadores viscosos no lineales [14].

De manera análoga como en los amortiguadores viscosos lineales, el amortiguador viscoso no lineal se puede expresar el desplazamiento relativo armónico $x(t)$ por medio de la ecuación 2.25:

$$x(t) = X_0 \sin \omega t \quad 2.25$$

Sustituyendo la ecuación 2.25 en la ecuación 2.24 se obtiene:

$$F(t) = C_{NL} \text{sgn}(\dot{x}(t)) |\omega X_0 \cos \omega t|^{\alpha_{vd}} \quad 2.26$$

Obteniendo finalmente la relación fuerza – desplazamiento para el amortiguador viscoso no lineal.

$$\frac{F(t)}{C_L X_0 \omega} = \pm \left(1 - \left(\frac{x(t)}{X_0}\right)^2\right)^{\frac{\alpha_{vd}}{2}} \quad 2.27$$

Se ilustra el bucle de histéresis descrito por la ecuación 2.27 para tres valores de α_{vd} en la Figura 2.22.

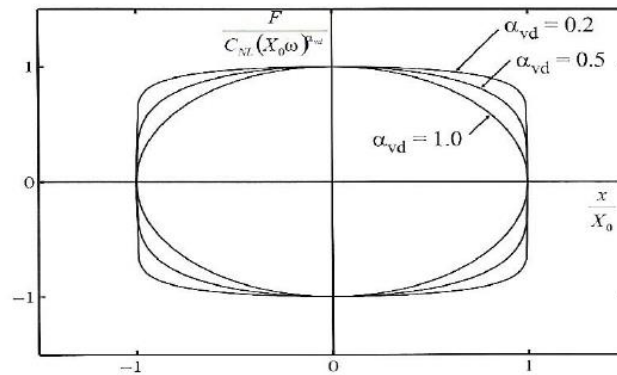


Figura 2.22: Comportamiento histérico del amortiguador viscoso no lineal, para tres valores de α_{vd} [14].

La energía disipada por el amortiguador es representada por el área bajo la relación fuerza-desplazamiento:

$$E_{vd} = \int_0^{2\pi/\omega} F(t)\dot{x}(t)dt = 4C_L(X_0\omega)^{\alpha_{vd}+1} \int_0^{2\pi/\omega} \cos^{\alpha_{vd}+1} \omega t dt$$

La energía disipada por un amortiguador viscoso no lineal E_{vd} en cada ciclo es representada por la ecuación 2.29:

$$E_{vd} = 4C_L(X_0\omega)^{\alpha_{vd}+1} \frac{\sqrt{\pi} \tau (1 + \frac{\alpha_{vd}}{2})}{2\omega \tau (\frac{3}{2} + \frac{\alpha_{vd}}{2})} \quad 2.29$$

La empresa Taylor Devices es un distribuidor de dispositivos de disipación de energía por medio de del Manual “General Guidelines For Engineers” [16] demuestra que un amortiguador viscoso con un exponente α_{vd} más bajo, absorbe más energía por ciclo que con uno con un exponente más alto, se puede observar con más detalle en la Figura 2.23.

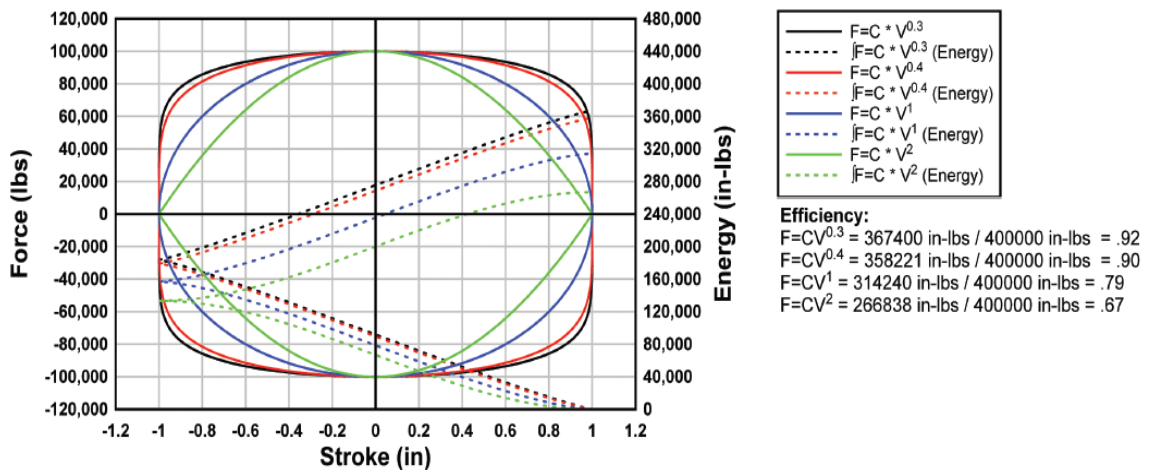


Figura 2.23: Comparación de energía absorbida con distintas variaciones del exponente α_{vd} en amortiguamientos viscosos no lineales [16].

De esta manera se le incorporará a la pasarela Chada y a los pasos inferiores Chada y Las Mercedes disipadores viscosos no lineales con un exponente α_{vd} igual a 0.3. Se abordará este tema con más detalle en el capítulo 5.2.

3. Caso de Estudio

En este capítulo se describe el paso inferior Chada, paso nivel Mercedes y pasarela Chada, que corresponden a los casos de estudios. La información mostrada en este capítulo está basada en planos de estructuras, concesionaria Autopista del Maipo S.A (2000), el estudio de Buckle et al. (2012) y los trabajos de títulos de Felipe Toro (2014) [16], Felipe Rubilar (2015) [6] y Leonel Peralta (2018) [17]. En primer lugar, se representan las descripciones generales de las estructuras. Esta descripción incluye, ubicación, caracterización de elementos principales, elementos que lo componen y la descripción de las propiedades geométricas de los elementos estructurales y no estructurales del puente. En segundo lugar, se resumen los daños observados en las estructuras tras el Terremoto del Maule del año 2010.

3.1 Descripción de las Estructuras

3.1.1 Paso Inferior Chada

El puente Chada es un paso inferior que se encuentra en el kilómetro 43.3 de la Ruta acceso sur, con coordenadas $33^{\circ}52'11.96\text{S}$ $70^{\circ}43'34.30\text{O}$, ubicado en la Región Metropolitana, comuna de Paine. La Figura 3.1 muestra la ubicación del puente (destacado con un círculo rojo) en dos escalas distintas.

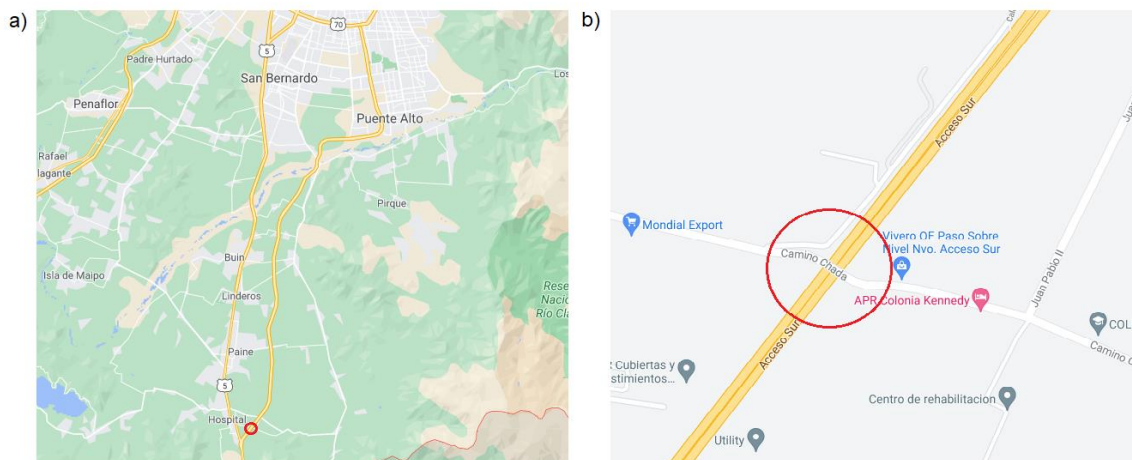


Figura 3.1: Ubicación Puente Chada en la ruta Acceso Sur (Fuente: GoogleEarth).

Los planos estructurales ilustran que el paso inferior Chada se compone por un tablero continuo de dos vanos con cuatro vigas pretensadas, dos estribos, una cepa central, 16 apoyos elastoméricos, 6 topes laterales de hormigón armado, nueve pilotes, y 24 barras sísmicas. La superestructura no posee diafragma transversal y los elementos no estructurales del puente son las barandas anti-impacto, la carpeta asfáltica y aceras.

La Tabla 3.1 muestra las diferentes clasificaciones y resistencias de elementos estructurales según el plano estructural del puente.

Tabla 3.1: Clasificación y Resistencia de Elementos Estructurales.

Materiales	Clasificación	Resistencia [kgf/cm ²]
Acero refuerzo	A630-420H	4200
Sello de fundación	G5	50
Superestructura	G30	300
Subestructura	G25	250

El Puente Chada posee una longitud de 56 [m] con dos vanos de 28 [m] cada uno y un ancho de 13 [m]. El tablero tiene una losa de 20 [cm] de espesor, dos aceras de 1.5 [m] de ancho y espesor variable, una carpeta asfáltica de 5 [cm] de espesor, y con cuatro vigas pretensadas de 1.51 [m] altura [17].

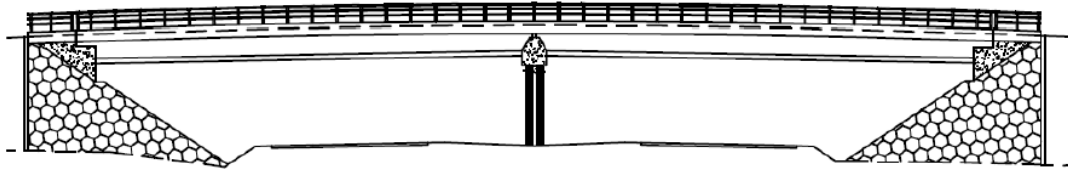


Figura 3.2: Elevación Puente Chada [17].

Las vigas son de sección doble T como se muestra en la Figura 3.3 y están espaciadas a 3.73 [m] en sus extremos y a 3.74 [m] en el centro. La junta de dilatación entre el tablero y estribos está espaciada a 8 [cm].

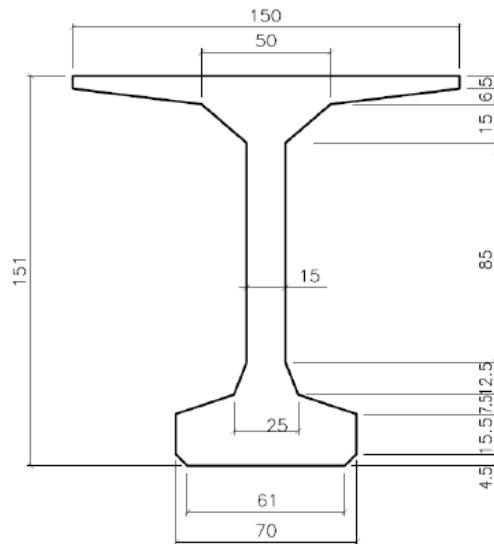


Figura 3.3: Sección transversal viga pretensada puente Chada [17].

La viga central se compone de tres columnas, una viga cabezal, una fundación corrida y tres pilotes como se muestra en la Figura 3.4. Las columnas tienen un diámetro de 1 [m], 5.6 [m] de altura y están espaciadas a 5 [m]. La viga cabezal posee una altura variable entre 1.33 y 1.2 [m], ancho de 1.5 [m] y un largo de 13 [m]. La fundación corrida está compuesta por una sección cuadrada de 1.5 [m] cada lado y de 12.1 [m] de largo. Los pilotes tienen un diámetro de 1.5 [m] y 17.07 [m] de largo.

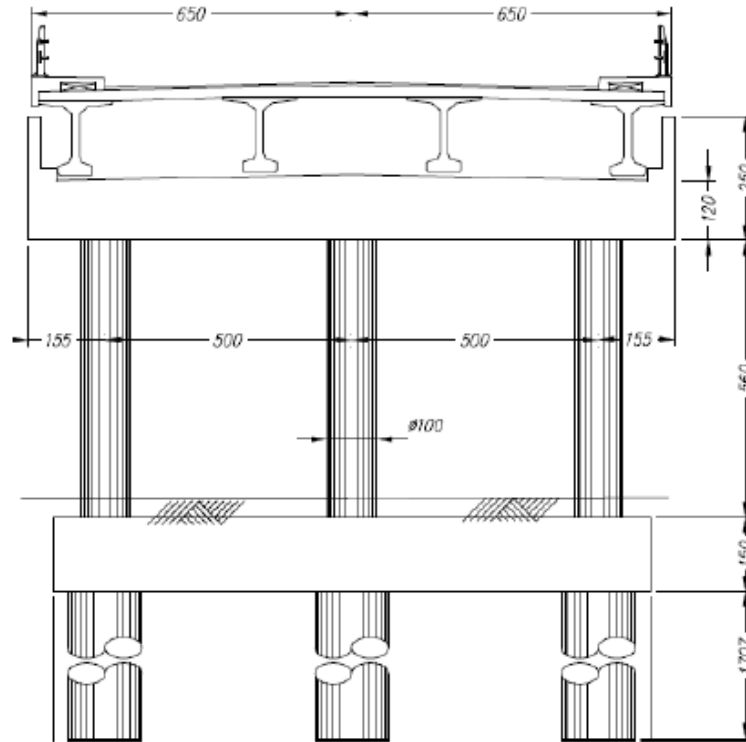


Figura: 3.4: Corte Transversal Puente Chada [17].

Los estribos tienen una viga que conforma la mesa de apoyo, un muro espaldar, dos alas y tres pilotes. La viga tiene una altura variable entre 1.5 a 1.63 [m], un ancho de 1.7 [m] y un largo de 13 [m]. El muro espaldar tiene un espesor de 45 [cm] en la zona inferior y una altura de 1.81 [m]. Las alas son trapecios irregulares de 3.45 [m] de altura y con bases de 3.35 y 1.23 [m]. Los pilotes tienen un diámetro de 1.5 [m] y un largo de 23.2 [m]. En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran una elevación y corte transversal de los estribos respectivamente.

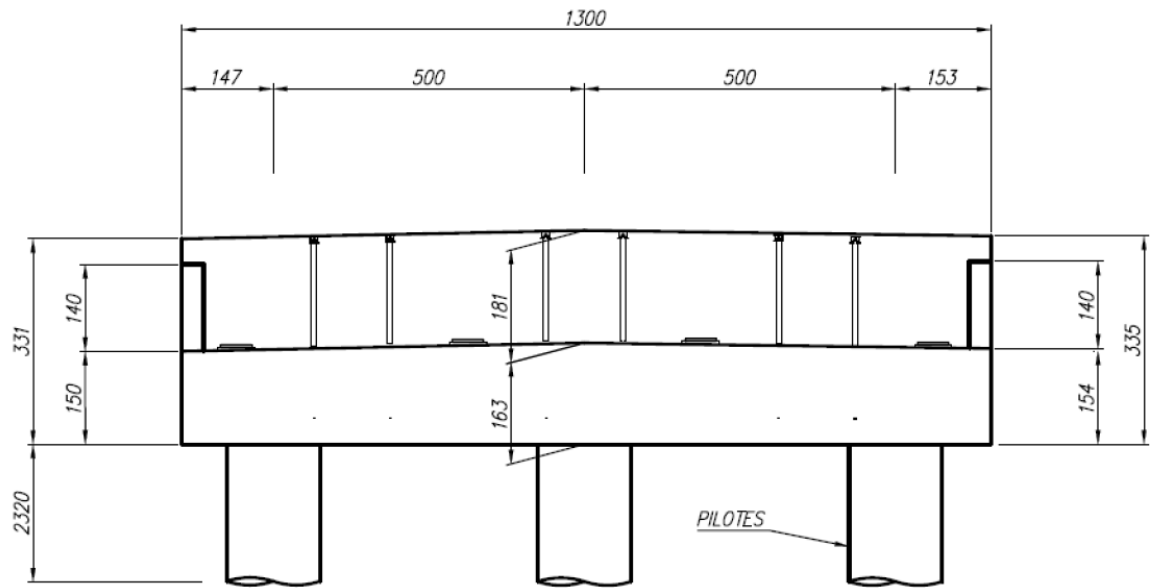


Figura 3.5: Elevación de estribos [17].

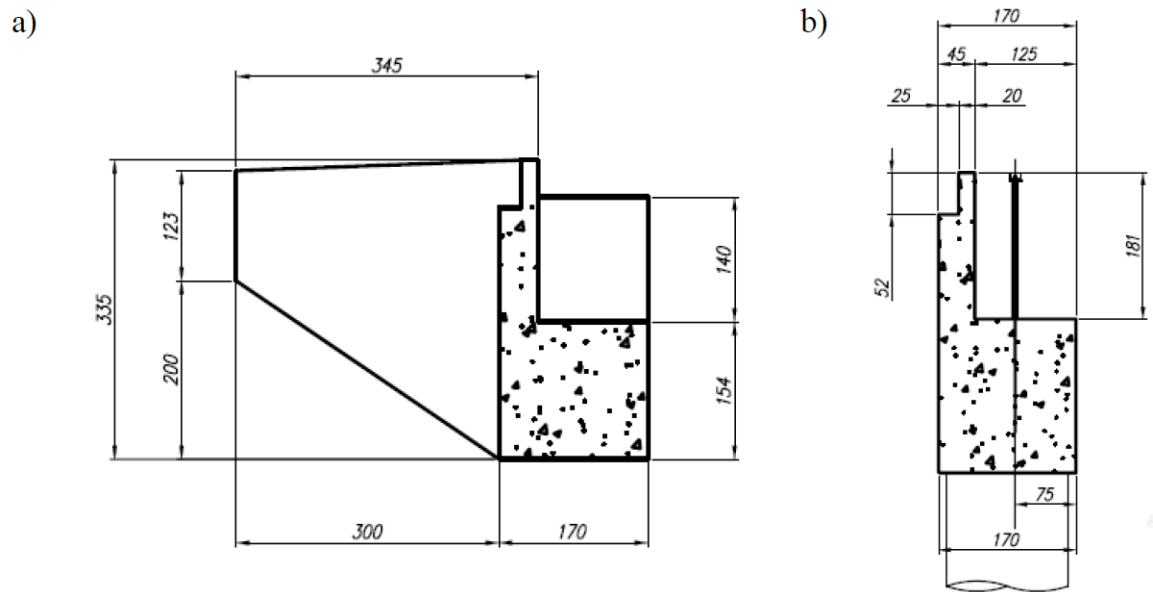


Figura 3.6: Sección transversal estribos: a) sección con ala y b) sección sin ala [17].

El puente posee 16 apoyos elastoméricos con sección rectangular de 30x50 [cm]. Los apoyos se componen de goma de neopreno y planchas de acero. El puente Chada posee dos tipos de apoyos, uno de 47 [mm] de altura ubicados en los estribos y otro de 34 [mm] de altura ubicado en la cepa, en la Figura 3.7 se ilustra sus dimensiones. En cada estribo tienen cuatro apoyos elastoméricos (uno en cada viga apoyada) y en la cepa central un total de ocho apoyos ilustrados en la Figura 3.8.

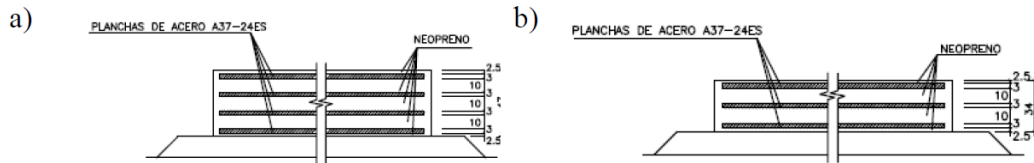


Figura 3.7: Apoyo elastoméricos a) estribos y b) cepa, Puente Chada [17].

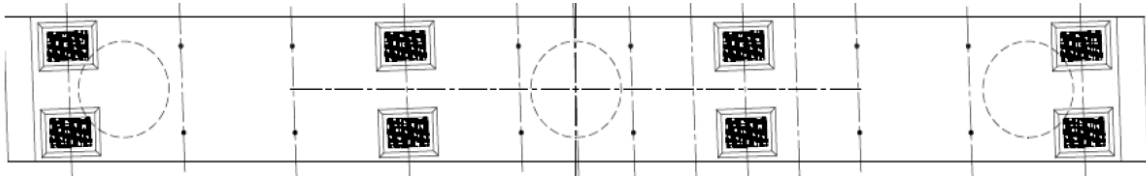


Figura 3.8: Vista en planta de apoyos elastoméricos y barras sísmicas, Puente Chada [15].

El puente Chada posee un total de 24 barras sísmicas, 6 en cada estribo y 12 en la cepa. Estas barras sísmicas están compuestas por pernos de anclajes de 22 [m] de diámetro, estos cumplen la función de conectar la cepa con los estribos y los estribos a la losa. El puente tiene dos topes laterales de hormigón armado en estribos y dos en la cepa. Los topes de la cepa son poligonales de ancho variable entre 150 y 80 [cm], una altura de 130 [cm] y un espesor variable entre 55 y 25 [cm], se aprecia con más detalle en la Figura 3.9. finalmente, los topes de los estribos son rectangulares ancho 125 [cm], altura 140 [cm] y espesor 35 [cm]. Los planos indican que el espaciamiento entre las vigas pretensadas y los topes laterales son de 5.6 [cm].

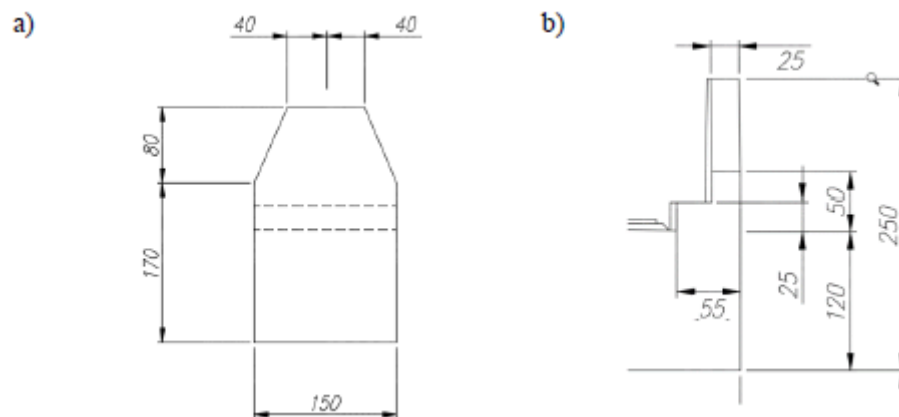


Figura 3.9: Dimensiones tope lateral de la cepa puente Chada [17].

3.1.2 Paso Inferior Las Mercedes

El puente Las Mercedes es un paso inferior que se encuentra en el kilómetro 76 de la Ruta 5 sur ($34^{\circ}04'19''S$ $70^{\circ}45'42''W$), ubicado en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en el enlace By-Pass Rancagua. Esta estructura tiene la función de conectar el sector las Mercedes con la parte Sur de Graneros. Según el Manual de Carreteras [5], el paso inferior Las Mercedes se encuentra en la Zona Sísmica 2 ($A^{\circ} = 0.3g$). La Figura 3.10 muestra la ubicación del puente (destacado con un círculo rojo) en dos escalas distintas.

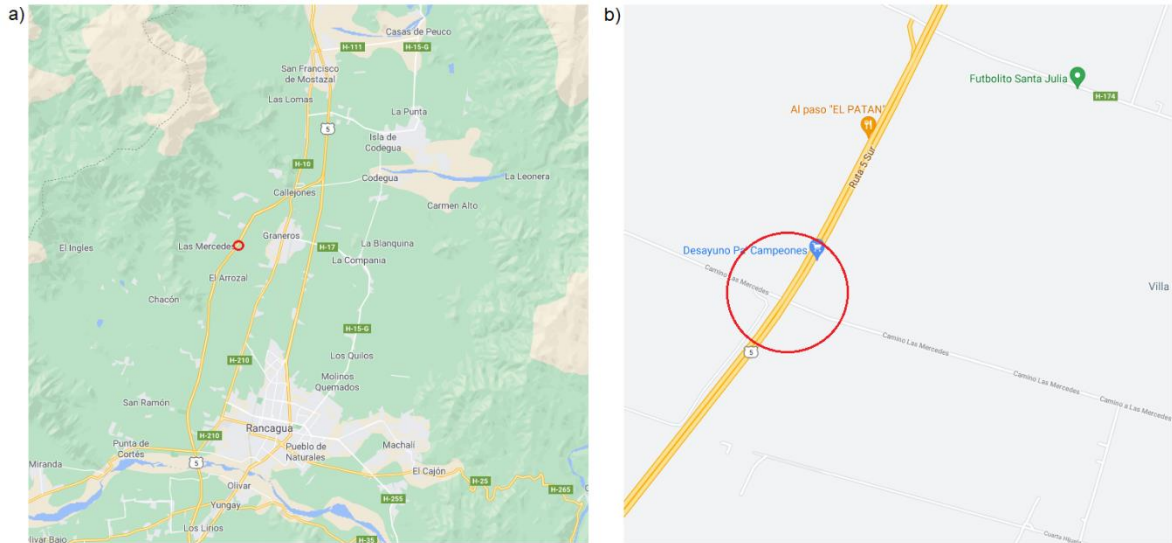


Figura 3.10: Ubicación del Paso Inferior Las Mercedes (Fuente: GoogleEarth).

Los planos estructurales ilustran [9], que el paso inferior las Mercedes, se compone por un tablero continuo de dos vanos, tres vigas pretensadas, dos estribos, una cepa central, 12 apoyos elastoméricos, 6 topes laterales de hormigón armado y 16 barras sísmicas. La superestructura no posee diafragma transversal y los elementos no estructurales del puente son barandas anti-impacto, carpeta asfáltica y aceras.

El puente las Mercedes posee una longitud de 54 [m] con dos vanos de 27 [m] cada uno con un ancho de 9.1 [m]. El tablero tiene una losa de 20 [cm] de espesor, dos aceras de 0.6 [m] y 1.5 [m] de ancho y con tres vigas pretensadas de 1.51 [m] de alto.

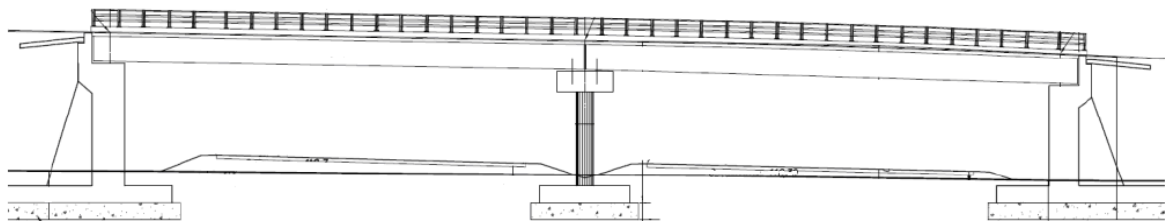


Figura 3.11: Elevación puente las Mercedes [9].

Las vigas son de sección doble T como se muestra en la Figura 3.12 y se encuentran espaciadas a 3.65 [m]. Su junta de dilatación a 8 [cm] entre tablero y estribo.

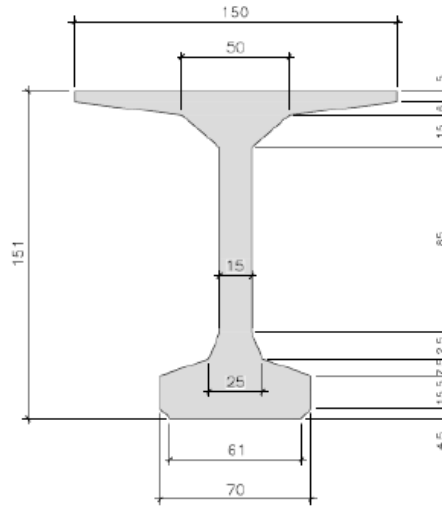


Figura 3.12: Sección transversal viga pretensada Puente Las Mercedes [9].

La viga central se compone de dos columnas, una viga cabezal. Las columnas tienen un diámetro de 1 [m], 7.57 [m] de altura y están espaciadas a 5 [m]. Los estribos, están estructurados por muros espaldares.

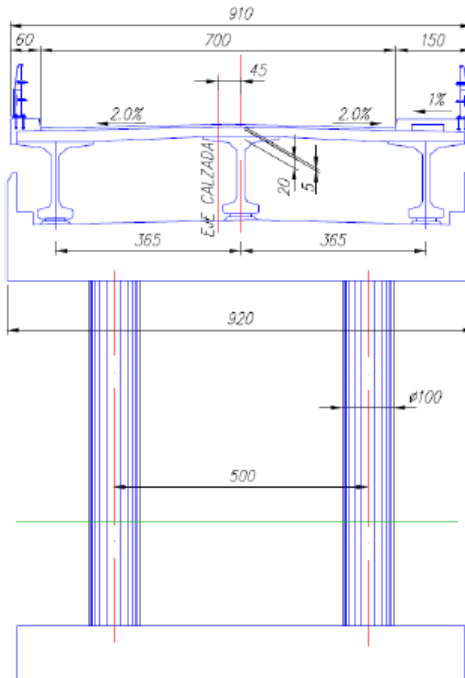


Figura 3.13: Corte transversal Puente las Mercedes [9].

El paso inferior tiene 12 apoyos elastoméricos con sección rectangular de 30x50 [cm]. Los apoyos se componen de goma de neopreno y planchas de acero. Este puente posee un solo tipo de apoyo elastoméricos de 34 [mm] de altura ubicado en los estribos y cepas, en la Figura 3.14 se ilustra sus dimensiones. En cada estribo tiene tres apoyos elastoméricos (uno en cada viga apoyada) y en la ceba central un total de ocho apoyos ilustrados en la Figura 3.15.

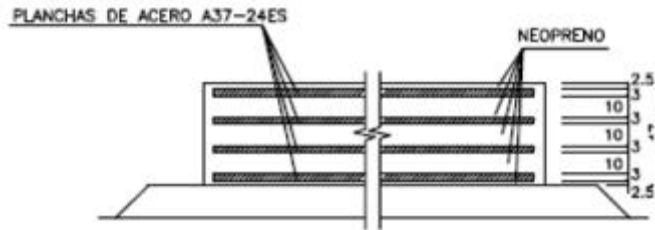


Figura 3.14: Apoyo elastoméricos Puente las Mercedes [9].

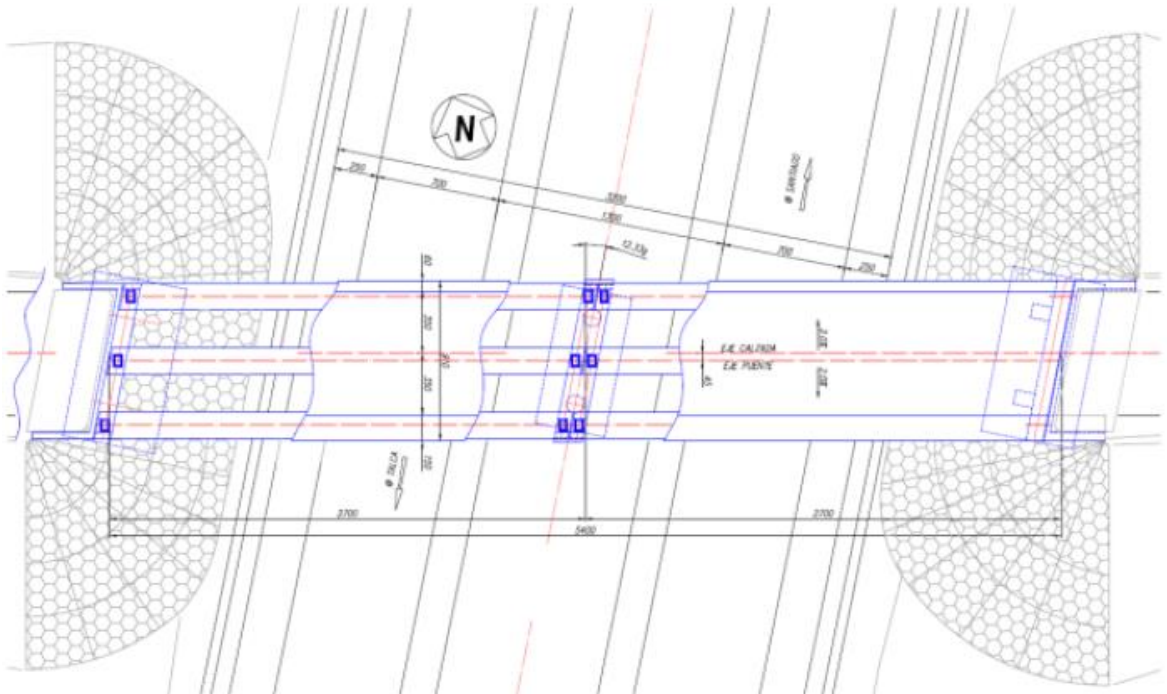


Figura 3.15: Vista en planta de apoyos elastoméricos y barras sísmicas, Puente las Mercedes [9].

3.1.3 Pasarela Chada

La pasarela Chada se encuentra en el kilómetro 49 de la Ruta 5 Sur ($33^{\circ}15'59''S$ $70^{\circ}44'29''W$), Ubicado en la Región Metropolitana, comuna de Paine. La Figura 3.16 muestra la ubicación de la Pasarela (destacado con un círculo rojo) en dos escalas distintas.

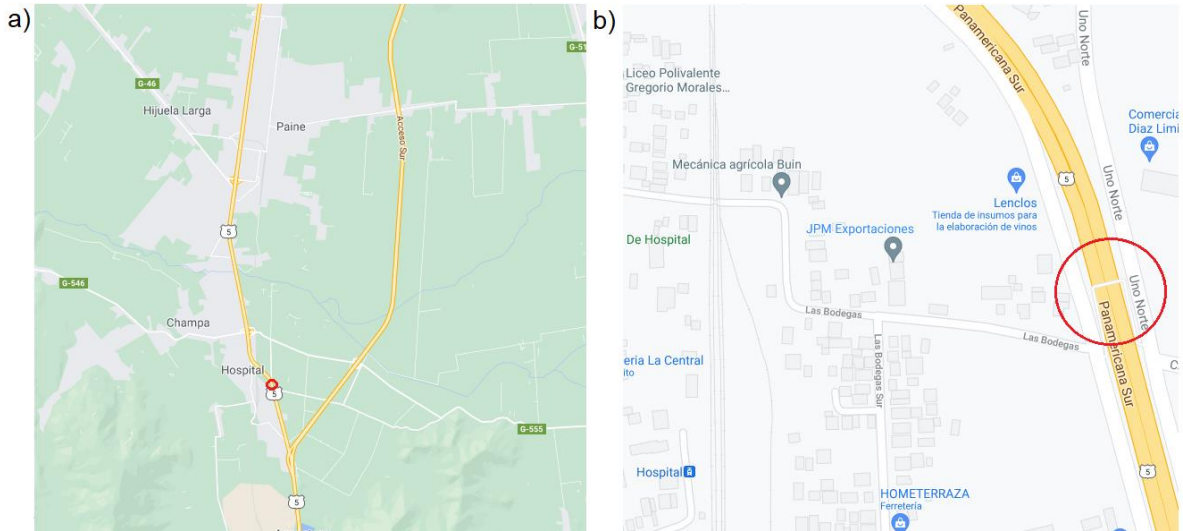


Figura 3.16: Ubicación Pasarela Chada (Fuente: GoogleEarth).

Los planos estructurales ilustran [16], que la pasarela Chada se compone de 9 pilares de hormigón armado sección cuadrada, 10 vigas cajón hormigón armado pretensado (ver Figura 3.18), 18 apoyos elastoméricos, 18 topes laterales de hormigón armado y 18 barras sísmicas. La superestructura tiene barandas peatonales y estas no se consideran como elementos estructurales.

La pasarela Chada posee una longitud de 32 [m] en su tramo central con dos vanos de 16 [m] con un ancho de 2 [m]. Por otro lado, tiene dos rampas en mismo sentido en dirección izquierda y derecha, con longitudes 50.9[m] y 47.8[m] respectivamente (ver Figuras 3.19 y 3.20).

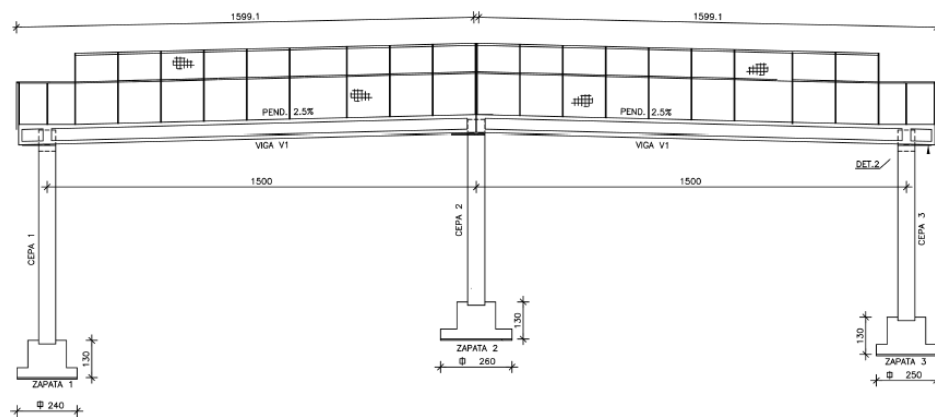


Figura 3.17: Elevación tramo central, Pasarela Chada [16].

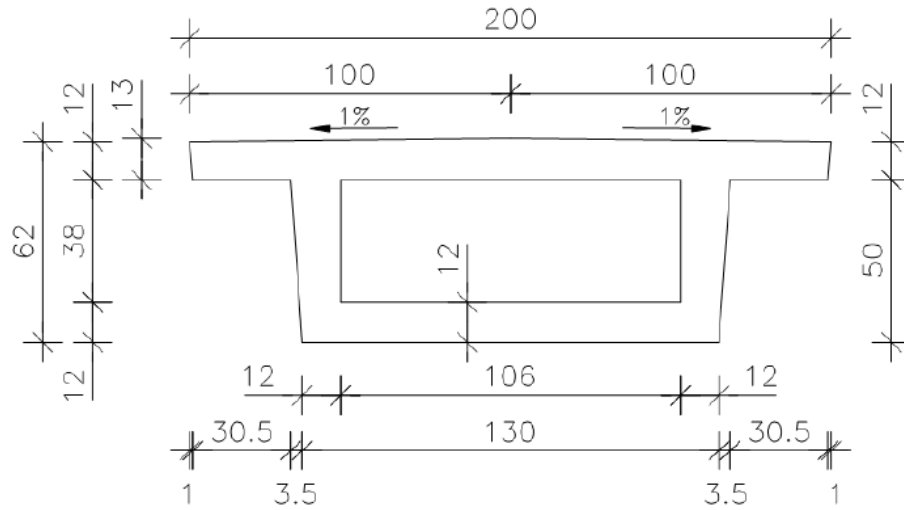


Figura 3.18: Corte transversal vigas, Pasarela Chada [16].

La viga central se compone de tres columnas, estas son de 60x60 [cm], espaciadas a 15 [m] (ver Figura 3.17), con alturas variables las cuales se encuentran detalladas en la Tabla 3.2. Por otra parte, la Figura 3.21 muestra la sección transversal de las cepas, donde se identifica el tablero y sus tapas laterales. Finalmente, en planta se observan las ubicaciones de las vigas pretensadas unidas a sus cepas, ver Figura 3.22.

Tabla 3.2: Longitudes de cepas, pasarela Chada.

Cepa	Altura [m]
1	6,05
2	5,68
3	5,68
4	5,71
5	5,34
6	3,39
7	3,02
8	1,05
9	0,68

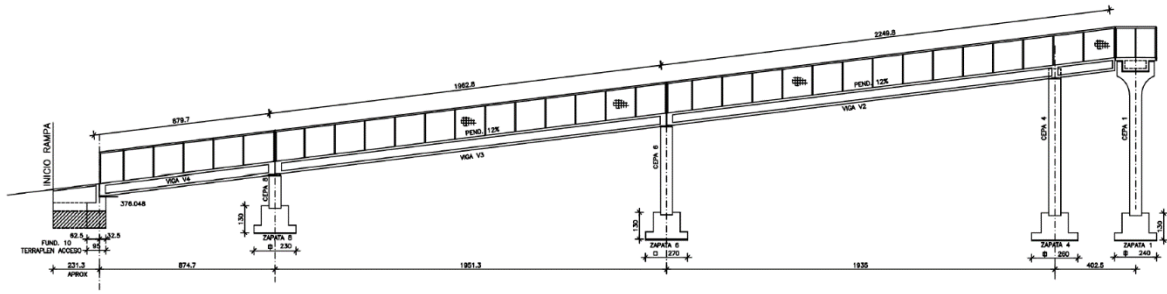


Figura 3.19: Elevación rampa izquierda, Pasarela Chada [16].

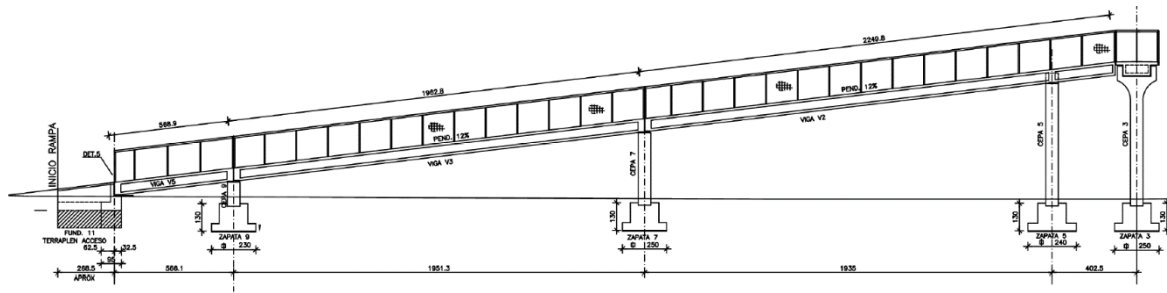


Figura 3.20: Elevación rampa derecha, Pasarela Chada [16].

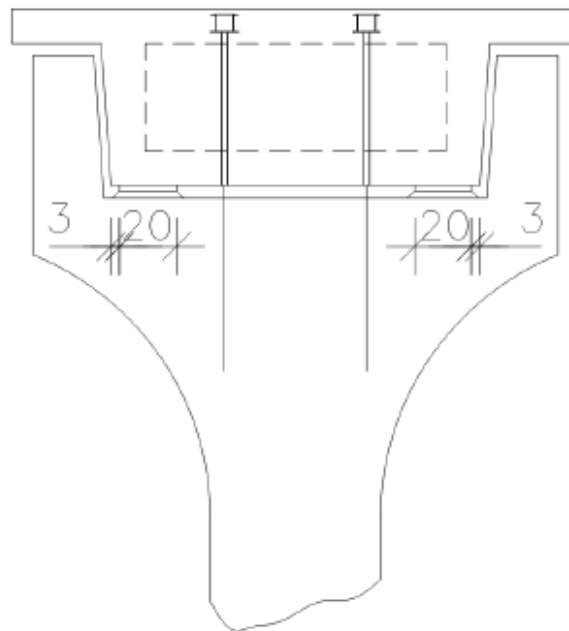


Figura 3.21: Tapas laterales y barras sísmicas en sección transversa [16].

La pasarela tiene 18 apoyos elastoméricos con sección rectangular de 15x20 [cm]. Los apoyos se componen de goma de neopreno y planchas de acero. Este puente posee dos apoyos elastoméricos de 32 [mm] de altura en cada columna.

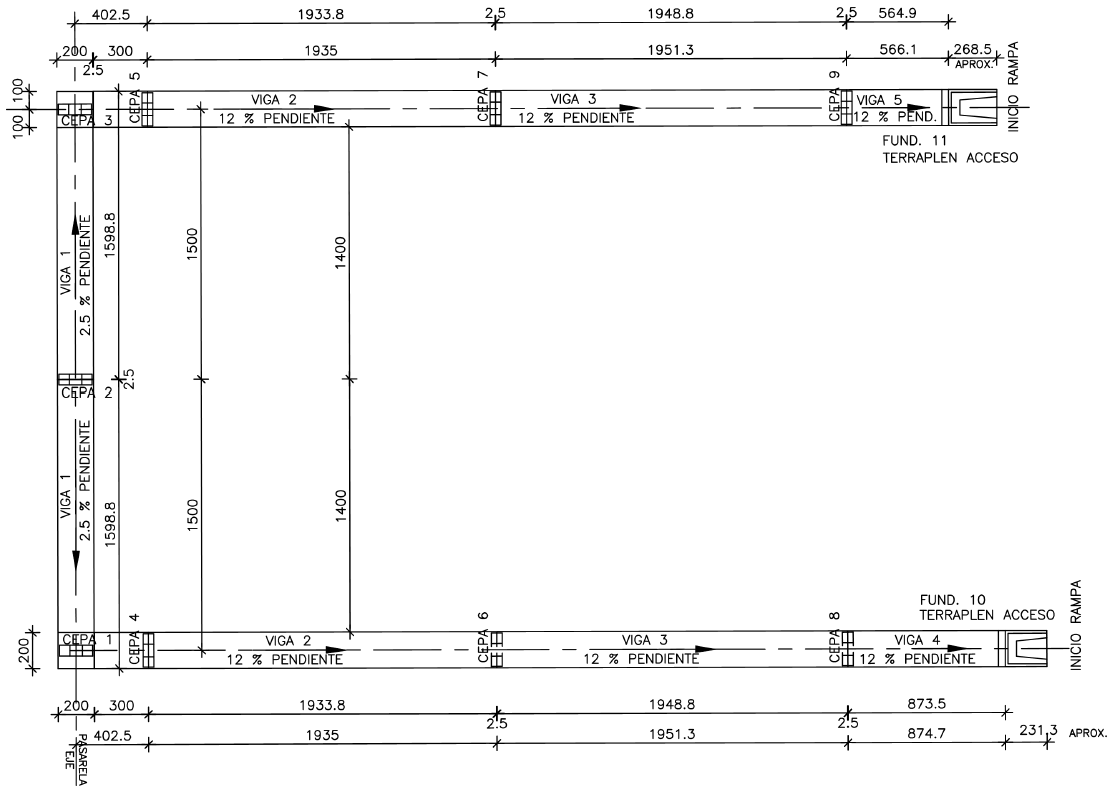


Figura 3.22: Vista planta, Pasarela Chada [16].

3.2 Daños Observados en el Paso Inferior Chada

Los principales daños observados en el paso inferior Chada fue una rotación en el tablero en sentido antihorario, ilustrada en la Figura 3.23. Las consecuencias de esta rotación fueron grandes desplazamientos horizontales del tablero en los estribos los cuales variaron entre 0.64 a 0.78 [m]. El desplazamiento relativo entre los dos extremos del puente equivale a 1.42 [m] (ver Figura 3.24). El reporte de daños fue realizado por la *Federal Highway Administration (FHWA)* [17] y *Buckle et al* [3].

Según FHWA el modo rotacional de vibración era más corto y fue fuertemente excitado con respecto a los otros modos. Por otra parte, señala que la sensibilidad del modo rotacional pudo originarse por diversas razones sin embargo se destacan dos importantes.

- 1- Excentricidad entre el centro de rigidez y el centro de masa.
- 2- Mayor relevancia en la componente rotacional del movimiento del suelo.

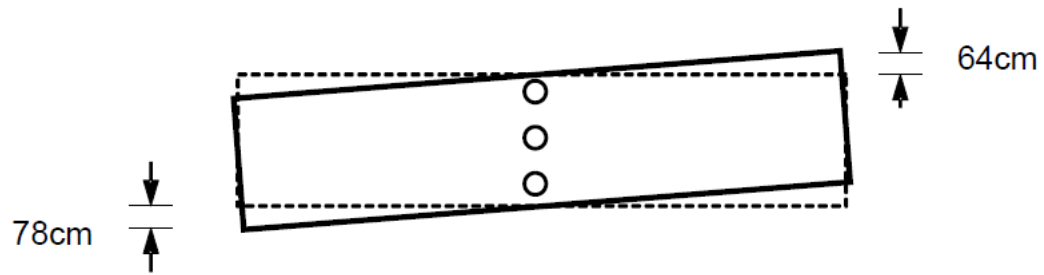


Figura 3.23: Rotación del Tablero, Puente Chada [17].



Figura 3.24: Desplazamiento relativo en extremos, Puente Chada [9].

También hubo daño entre vigas pretensadas y topes laterales de los estribos y cepa central. Los daños se observaron en las vigas externas y según FHWA estas fallas se produjeron por fuerzas de corte producto al impacto de ambos elementos, se ilustran los daños en la Figura 3.25.

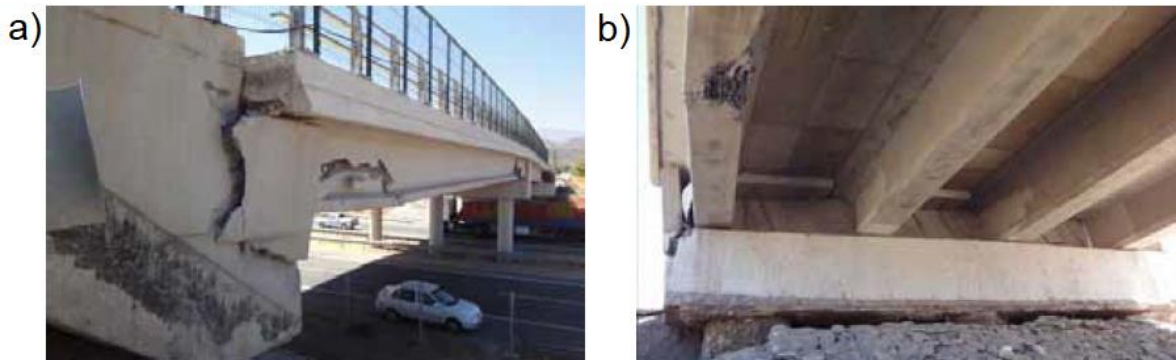


Figura 3.25: a) Daños en tope lateral de estribo, b) daños en viga pretensada [17]

El puente Chada no sufrió daños en sus barras sísmicas, estas solo experimentaron deformaciones por desplazamientos laterales, donde se ilustra en la Figura 3.26a. Según FHWA [18] solo los casos donde se presentaron daños en barras sísmicas fueron en pasos inferiores que sufrieron colapso del tablero, Por otra parte, las columnas del paso inferior no presentaron daños, solo presentando movimiento permanente del suelo, la Figura 3.26b muestra separaciones entre el suelo y la base de la columna, donde está separación se estimó entre 15 a 20 [cm].

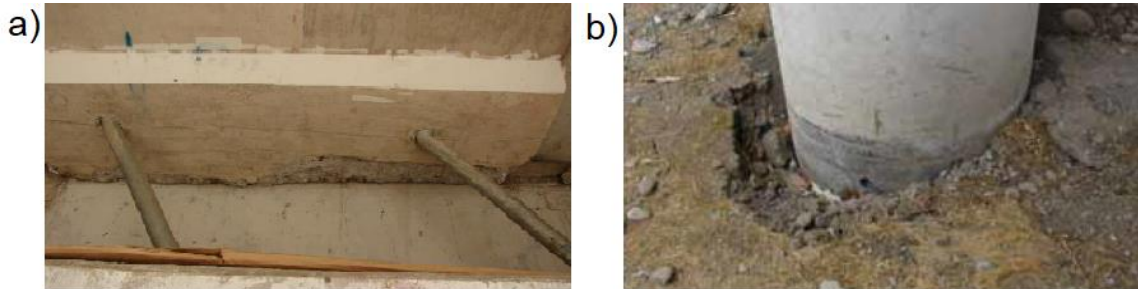


Figura 3.26: a) Deformación en barras sísmicas y b) desprendimiento del suelo en columnas [9].

3.3 Daños Observados en Paso inferior Las Mercedes

El mayor daño observado en este paso inferior fue causado por la rotación del tablero, la que provocó fallas de las tapas laterales en los estribos (ver Figura 3.27a). En la Figura 3.27b se muestra las grietas que fueron provocadas en las tapas laterales de la cepa. Las consecuencias de esta rotación fueron grandes desplazamientos horizontales del tablero que al impactar los estribos provocó un desplazamiento residual en los estribos mostrados en las Figuras 3.27a y 3.28b.

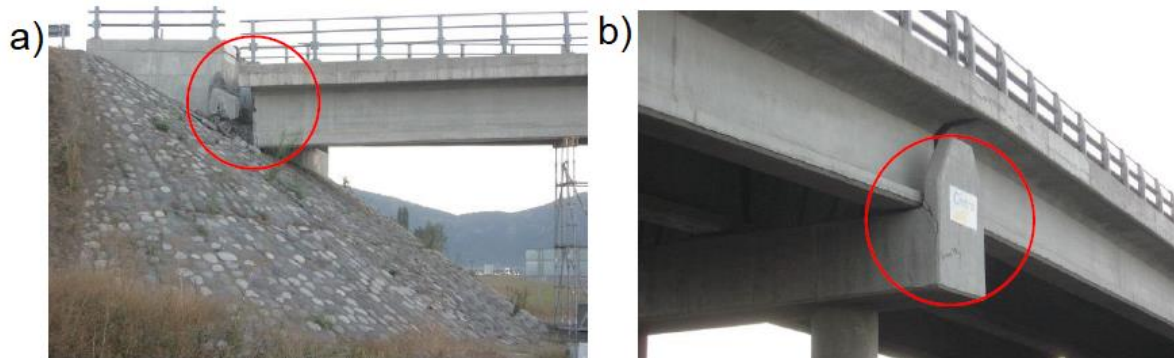


Figura 3.27: a) Fallo en tapa en los estribos y b) Grietas en tapas en cepas centrales [9].

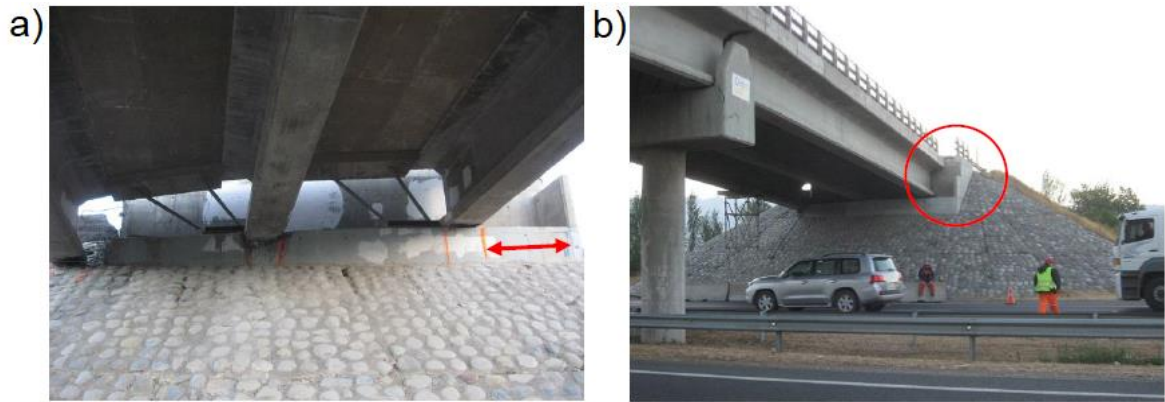


Figura 3.28: Desplazamiento lateral del tablero, PI Las Mercedes [9].

Elnashai et al [11], describió que la rotación experimentada por paso inferior Las Mercedes a pesar de que el centro de rigidez coincidía con el centro de masa, la superestructura de igual manera está expuesto a experimentar fuertes rotaciones, (ver figura 3.29) esto se debe que los centros de masa y rigidez coinciden hasta que el tablero al rotar impacta con el estribo. En ese instante, se genera una excentricidad permitiendo a su vez que las demandas sísmicas traslacionales se transformen en demandas sísmicas rotacionales.

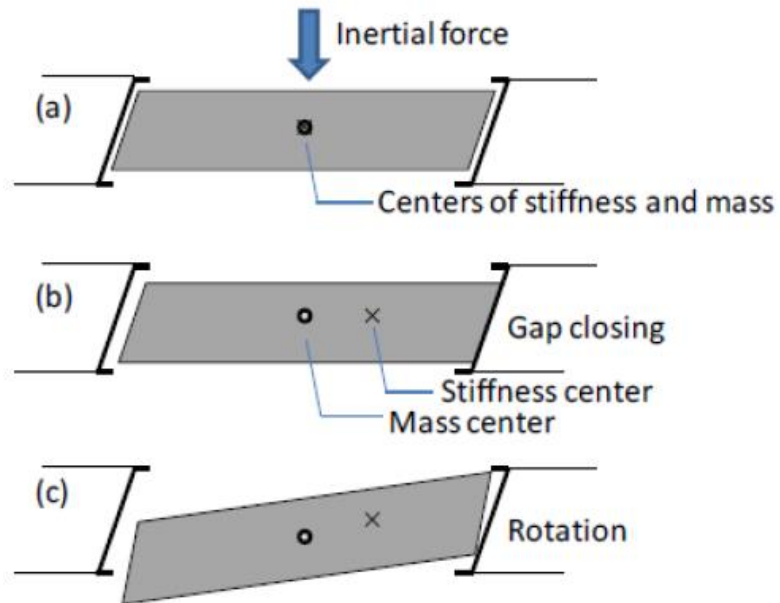


Figura 3.29: Rotación del tablero durante el Terremoto del Maule 2010 [9].

3.4 Daños observados Pasarela Chada

El daño producido en la Pasarela Chada durante el terremoto del Maule fue su colapso en la rampa Poniente, produciéndose daño también en la mayoría de sus elementos en sus juntas de dilatación, ya que los desplazamientos relativos entre vigas impactaron entre ellas. Las cepas fueron apuntaladas para el propósito de habilitarse de forma temporal ya que las cepas experimento movimiento permanente del suelo, en las Figuras 3.30 y 3.31 se aprecia las desconexiones de las vigas y el apuntalamiento de las cepas.



(A)



(B)

Figura 3.30: Rampa izquierda Colapsada [16].



(A)



(B)

Figura 3.31: Cepas apuntaladas [16].

4. Modelación Analítica

En el presente capítulo se describe los modelos tridimensionales utilizados para los casos estudios del Capítulo 3. Para la realización de los modelos se utilizó el programa Ruaumoko [19], para la modelación se consideraron cuatro tipos de elementos: Frame member (elemento barra), Spring member (elemento resorte), Contac (elemento de contacto o impacto) y Damper (amortiguamiento).

Cada uno de estos elementos describen propiedades mecánicas intrínsecas de cada sección del puente, como también su respectiva curva de histéresis.

- Elementos Frame, son miembros tridimensionales utilizados en elementos vigas o columnas, estos elementos usan todas las reglas de histéresis. Las cuales pueden ser modeladas para comportamiento lineal elásticos y no lineales. Ver Figura 4.1.

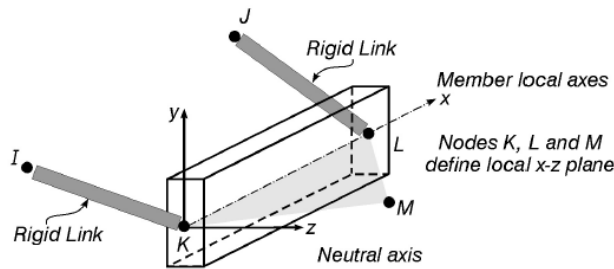


Figura 4.1 Elemento Frame en Software Ruaumoko [19].

- Elementos Spring, son miembros utilizados para modelar efectos específicos: elastómeros, dispositivos de disipación de energía. En el programa tridimensional es utilizado para resortes longitudinales, transversales, torsionales y estos utilizan todas las reglas de histéresis. Ver Figura 4.2.

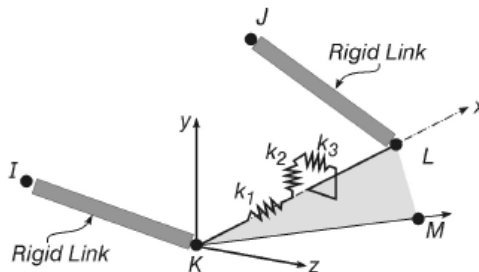


Figura 4.2: Elemento Resorte en software Ruaumoko [19].

- Elementos Contac, son miembros utilizados para representar comportamiento entre miembros donde experimentan impactos producidos por excitaciones, generalmente son modelados en la interacción de dos elementos estructurales, principalmente los impactos en las juntas de dilatación. Estos elementos tienen rigidez, amortiguamiento y fuerzas de fricción. Ver Figura 4.3.

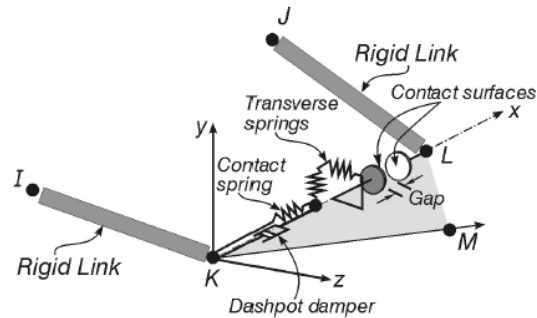


Figura 4.3 Elemento Contac, Software Ruaumoko [19].

- Elemento Damper, proporciona amortiguamiento lineal, no lineal viscoso a la estructura, sin aportarle rigidez, utiliza el coeficiente de amortiguamiento en las tres direcciones principales ("x", "y", "z") y tres coeficientes de amortiguamientos de rotación en los ejes (x-x, y-y, z-z), y así obteniendo fuerzas de amortiguamiento activados por velocidades. Ver Figura 4.4.

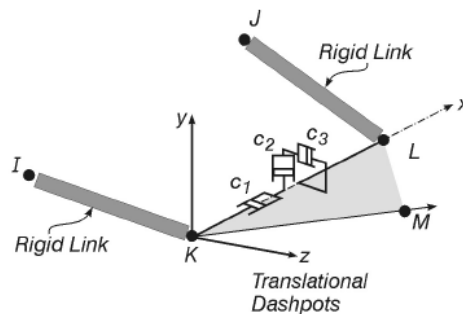


Figura 4.4 Elemento amortiguamiento, Software Ruaumoko [19]

Por otra parte, en las modelaciones del paso Inferior Chada, Paso inferior las Mercedes y pasarela Chada se utilizó componentes horizontales de dos registros sísmicos del Terremoto del Maule de 2010. Estos tienen direcciones Norte-Sur y Este-Oeste. Los registros corresponden a Marga-Marga, ciudad de Viña del Mar y Región de Valparaíso. El de Concepción, ciudad de Concepción, Región del Bío-Bío. En las Figuras 4.5 ,4.6 ,4.7 y 4.8 se aprecian los registros.

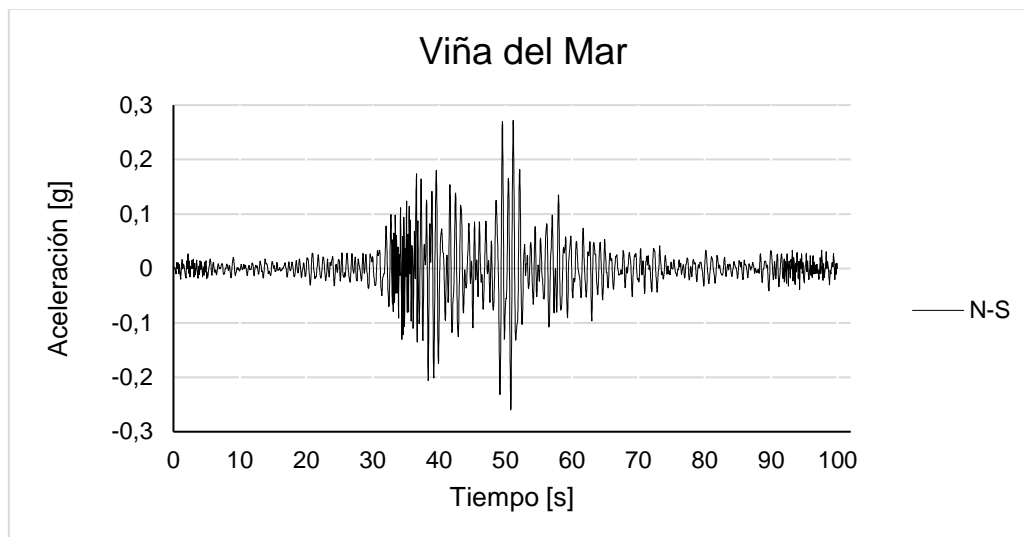


Figura 4.5: Registro sísmico Viña del Mar, N-S.

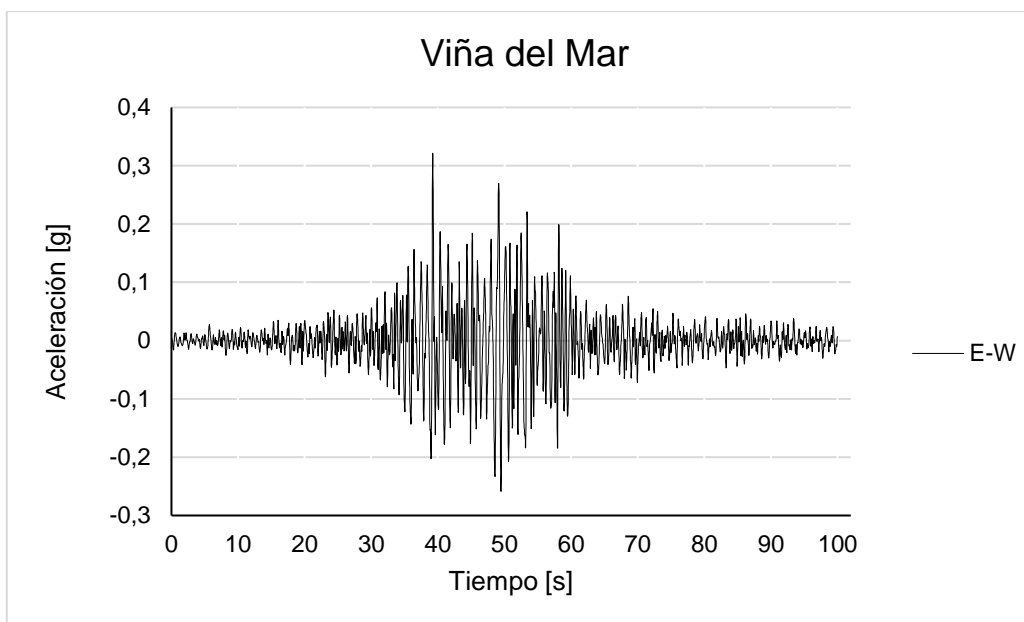


Figura 4.6: Registro sísmico Viña del Mar, E-W.

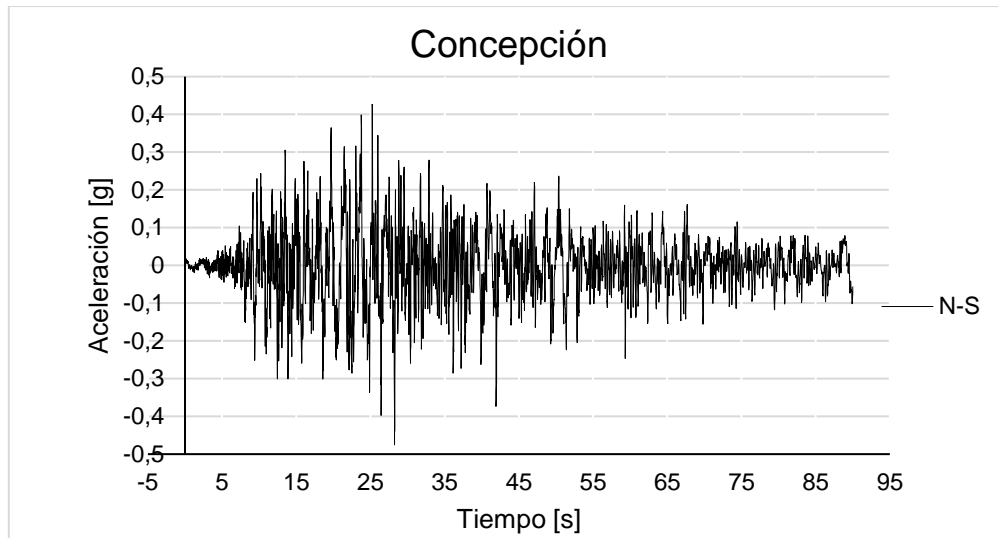


Figura 4.7: Registro sísmico Concepción, N-S.

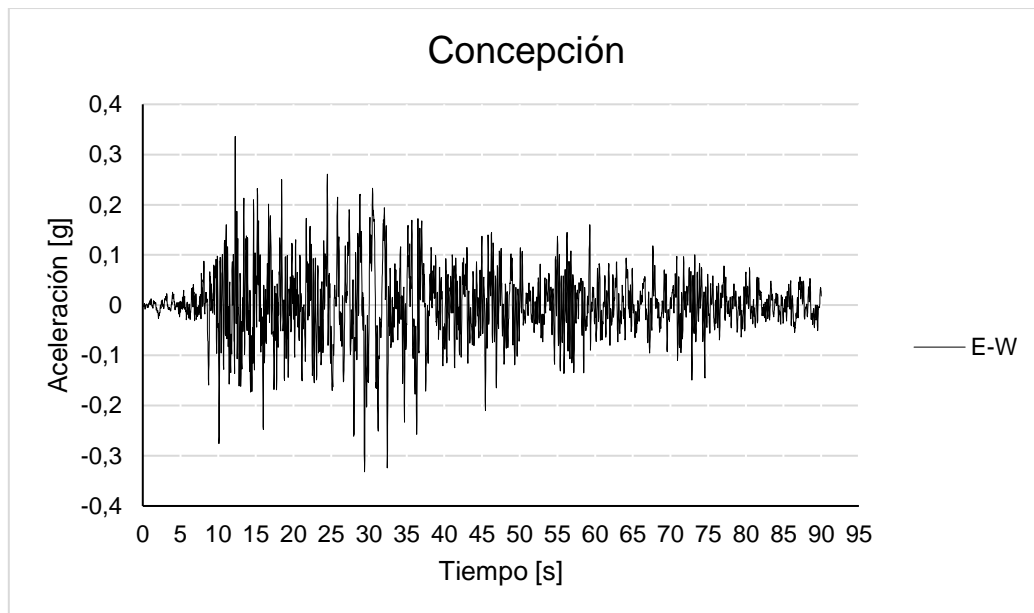


Figura 4.8: Registro sísmico Concepción, E-W.

4.1 Modelación Paso Inferior Chada

El modelo tridimensional del Paso Inferior Chada se elaboró con elementos tipo Frame, Spring y Contac. En la figura 4.9 se muestra un esquema que representa la estructuración del Paso Inferior. Se resalta el tablero, vigas pretensadas, cepa central, conexión entre super, subestructura y finalmente los elementos de impacto. En los puentes chilenos los daños se concentran entre la super y subestructura, por lo tanto, se consideran lineal elástico vigas pretensadas, tableros y cepas.

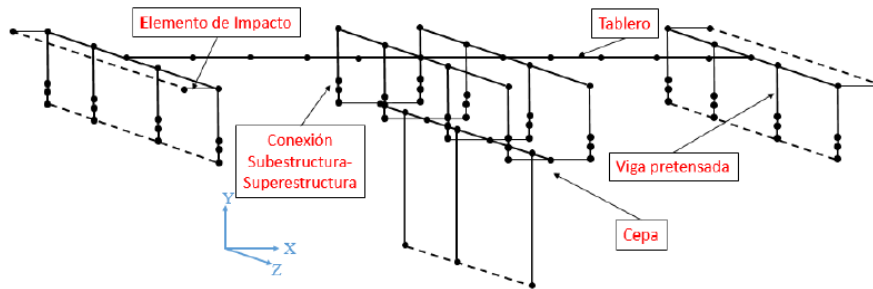


Figura 4.9: Modelo del Paso inferior Chada [17].

En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestran la elevación de la cepa central y la elevación de los estribos respectivamente, el detalle de las conexiones de la superestructura con la subestructura. Para representar el eje central del tablero se utilizó un nodo ubicado en el centro de la losa del tablero. Además, se observa en la elevación de los estribos (Figura 4.11) el tablero, las vigas pretensadas, los apoyos Elastoméricos, llaves de corte y la mesa de apoyo. Los apoyos elastómeros van posicionados sobre elementos rígidos en distintas partes de la estructura, de esta manera se da compatibilidad geométrica. Con este propósito los elementos se modelan para describir lo más real posible el comportamiento del puente.

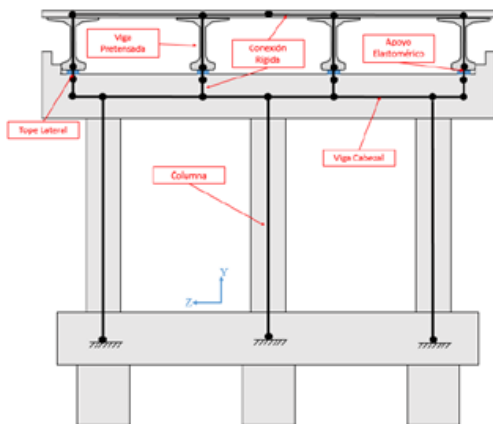


Figura 4.10: Elevación transversal en cepa [17].

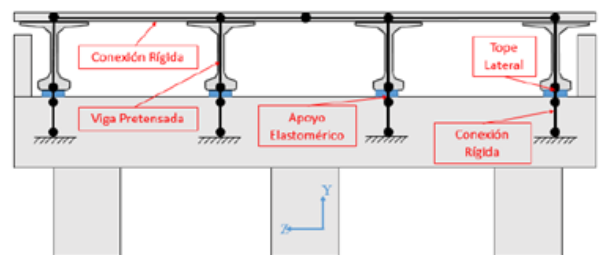


Figura 4.11: Elevación transversal estribo [17].

4.1.1 Superestructura

El paso inferior Chada se modeló con elementos lineales elásticos en su superestructura, este representa el tablero mediante un eje central en la dirección longitudinal. La superestructura utilizó un hormigón G-25, con una resistencia equivalente $f'c$ de 25 [Mpa], con un módulo de elasticidad de 23500 [Mpa], para el módulo de corte (G) se consideró un 40% del módulo de elasticidad utilizando 9400 [Mpa]. Las propiedades de estos elementos fueron determinadas con la sección transversal de la Figura 4.12. Las propiedades se calcularon con sección bruta y se resumen en la Tabla 4.1.

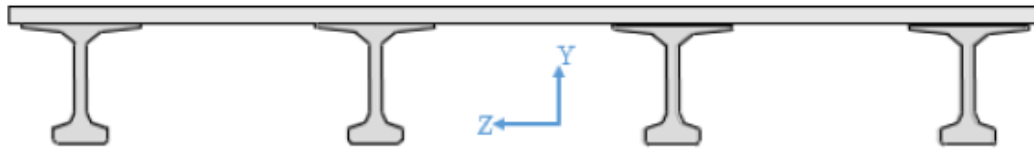


Figura 4.12: Sección transversal del tablero [17].

Tabla 4.1: Propiedades geométricas del tablero.

Área [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	I _p [m ⁴]
4.67	1.46	72.83	0.11

El paso inferior Chada antes del Terremoto del Maule, no disponía de diagrama rígido entre sus vigas pretensadas. En el modelo se consideró la rigidez lateral de todas las vigas pretensadas al estar sometidas a fuerzas laterales en la zona de contacto con apoyos elastómeros. Leonel Peralta [17] por medio de SAP2000 utilizó un modelo simplificado para el cálculo de la rigidez lateral utilizando una fuerza unitaria (ver Figura 4.13).

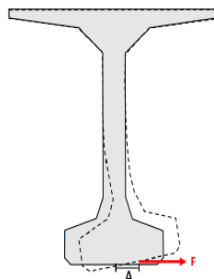


Figura 4.13: Deformación lateral de viga pretensada [17].

El alma de la viga posee una sección uniforme de espesor 15 [cm], el ala superior con un espesor de 8 [cm] y el ala inferior con un espesor de 25 [cm]. La carga lateral se aplicó en el extremo inferior tal como se muestra en la Figura 4.14. y se determinó la rigidez lateral de la viga de 15000 [kN/m].

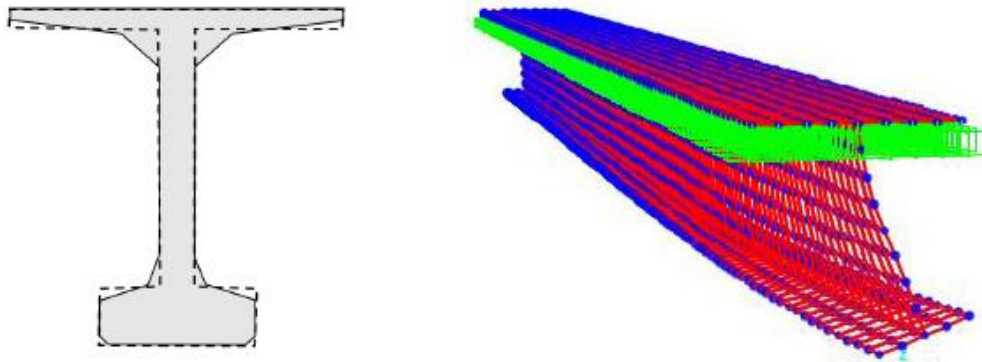


Figura 4.14: Viga deformada SAP2000 [17].

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas vigas longitudinales.

Área [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	k [kN/m]
0.051	1.84e-4	1.84e-4	15000

4.1.2 Subestructura

La subestructura se conforma por una cepa central que posee tres columnas y una viga cabezal. Las propiedades geométricas de los elementos se resumen en la Tabla 4.3. se utilizó un hormigón G-20 con una resistencia equivalente f'_c de 20 [Mpa] y módulo de elasticidad de 21000 [Mpa]. para el módulo de corte (G) se consideró un 40% del módulo de elasticidad utilizando 8408 [Mpa].

Las columnas y la viga cabezal se modelaron como elemento frame elástico ya que posterior al Terremoto del Maule 2010, no presentaron daños.

Tabla 4.3: Propiedades geométricas cepa central.

Elemento	Área [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	I _p [m ⁴]
Columna	0.79	0.05	0.05	0.1
Viga cabezal	1.91	0.36	0.26	0.5

4.1.3 Conexión Rígida

Las conexiones rígidas se utilizan para dar una compatibilidad geométrica de los grados de libertad entre los nodos. Para modelar las conexiones rígidas se consideraron elemento Frame elástico. Se utilizó una sección cuadrada de lado 15 [cm] y un módulo de elasticidad 100000 veces el módulo de elasticidad del hormigón en la superestructura.

4.1.4 Masas Sísmicas y Peso del Puente

La masa y peso del puente se obtuvieron considerando el peso propio de los elementos. En las Tablas 4.4 y 4.5 se resume las masas sísmicas y el peso de los elementos de la superestructura y subestructura. El peso total del puente es 10045 [kN]. Para la subestructura se consideran la mitad de las columnas dando como resultado un peso total 9398 [kN].

Tabla 4.4: Masas sísmicas y pesos superestructura.

Elemento	Masa [ton]	Peso [kN]
Losa	364	3571
Carpesa Asfáltica	84	824
Viga pretensada	291	2855
Baranda y Aceras	91	893
Total Superestructura	830	8143

Tabla 4.5: Masas sísmicas y pesos subestructura

Elemento	Masa [ton]	Peso [kN]
Viga cabezal	62	608
Columnas	66	647
Total Subestructura	128	1255

Para calcular las masas concentradas se realizó una distribución de cargas mediante área tributaria. Se discretizó el tablero y se consideró solo la mitad de las columnas como masas sísmicas. Se definieron 'm1', 'm2' y 'm3' en el tablero, 'm5', 'm6' en la viga cabezal y 'm4' sobre las columnas, ver Figura 4.15.

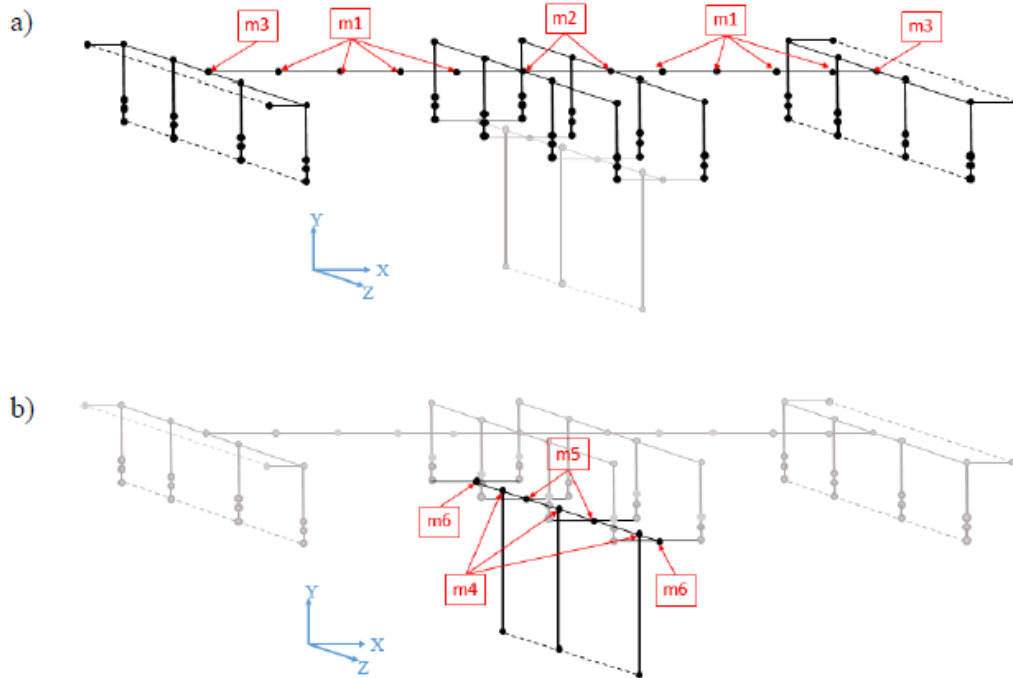


Figura 4.15: Masas concentradas en modelo tridimensional. a) Masas en tablero. b) Masas en cepa [17].

Tabla 4.6: Masas concentradas asignadas, en toneladas.

m1	m2	m3	m4	m5	m6	Total
82	40	47	22	28	14	958

4.1.5 Apoyos Elastoméricos

Los apoyos elastoméricos se modelaron como elementos no lineales Spring. Bajo este propósito se permite simular el comportamiento no lineal asociado a la capacidad de deslizamiento en ambas direcciones horizontales en los apoyos. Los apoyos elastoméricos fueron considerados en el modelo como material uniaxial del tipo elastoplástico. Para estos elementos es necesario definir las propiedades elásticas de los apoyos y el coeficiente de roce de la goma con el hormigón, sin considerar la compresibilidad de la goma, con el propósito de calcular la fuerza de fluencia sobre el elastómero.

Las ecuaciones que definen módulo elástico (E_c), el factor de forma (S), rigidez lateral y vertical son definidas a partir de las recomendaciones de Kelly y Konstantinidis (2011) [18].

Tabla 4.7: Propiedades y Rigideces de los Apoyos Elastoméricos [17].

Propiedades	Apoyos en Ceba	Apoyo en Estribos
Espesor goma [m]	0.01	0.01
Área [m ²]	0.15	0.15
Altura goma [m]	0.035	0.025
Inercia dirección X [m ⁴]	1.1e-03	1.1e-03
Inercia dirección Z [m ⁴]	3.1e-03	3.1e-03
Rigidez vertical, K_v [kN/m]	4.6e+06	4.6e+06
Rigidez lateral, K_l [kN/m]	7800	5500

Tabla 4.8: Cargas y coeficientes de roce en apoyos elastoméricos [17].

Propiedad	Ceba-Estribo
Peso total superestructura [kN]	8143
Esfuerzo Axial [kN]	509
Tensión de Compresión [MPa]	3.4
Coefficiente de roce (-)	0.3

El modelo de fricción de Coulomb consiste en un bilineal elastoplástica perfecta ver Figura 4.16. La fuerza F_s produce deslizamiento en los apoyos y es calculada mediante la ecuación 4.1, utilizando las variables (μ) coeficiente de roce y la fuerza de compresión de los apoyos. Para calcular el coeficiente de roce se usó el modelo de Steelman et al (2013) [19]. Este coeficiente depende de la tensión de compresión (σ) en el apoyo según la ecuación 4.2

$$F_s = \mu \cdot F_c \quad 4.1$$

$$\mu = 0.18 + \frac{0.37}{\sigma} \quad 4.2$$

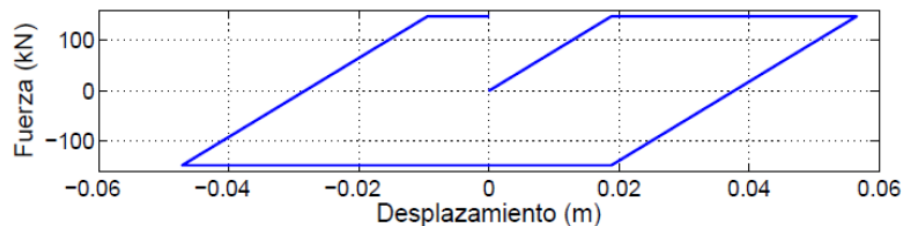


Figura 4.16: Relación fuerza desplazamiento para apoyos en la ceba [17].

Se dividió el peso total de la superestructura entre el total de apoyos elastoméricos. Utilizando las ecuaciones 4.1, 4.2 y la Tabla 4.8 se calculó la fuerza de fluencia, ver tabla 4.9.

Tabla 4.9: Resistencia y desplazamiento al deslizamiento.

Propiedad	Cepa	Estribo
Fuerza de Fluencia [kN]	147	147
Desplazamiento de fluencia [m]	0.019	0.026

4.2 Elemento de Impacto

Los elementos de impactos se modelaron con la interacción entre el tablero y los estribos incorporando los efectos de la fuerza pasiva del suelo, despreciando resistencia y rigidez del muro espaldar. Para el paso inferior Chada estos elementos fueron simulados con elementos Contac, ubicados en los nodos empotrados de los estribos y los nodos extremos del tablero: 6,7,75,76 (ver Figura 4.17). Además, se definieron en la dirección axial, solo considerando fuerzas de impacto del tablero con el estribo y despreciando el roce entre ambos elementos.

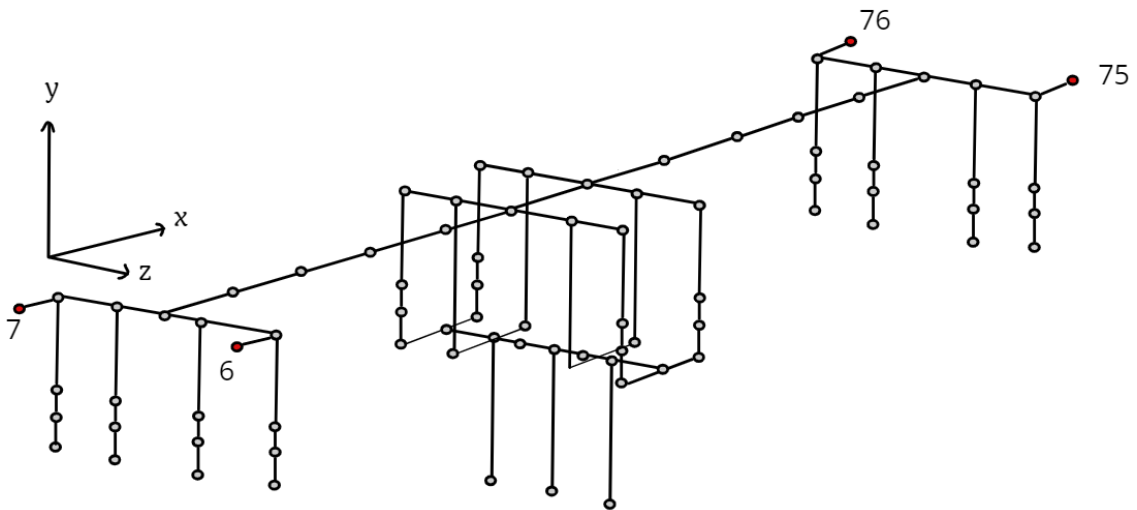


Figura 4.17: Elementos de Impacto en paso inferior Chada.

Se detalló un espaciamiento inicial, una resistencia última y una rigidez inicial, en la Tabla 4.10 se describen los parámetros utilizados.

Tabla 4.10: Parámetros de los elementos de impacto.

Parámetros	Valores
Espaciamiento [m]	0.08
Rigidez inicial [kN/m]	3.58e06
Resistencia última [kN]	3900

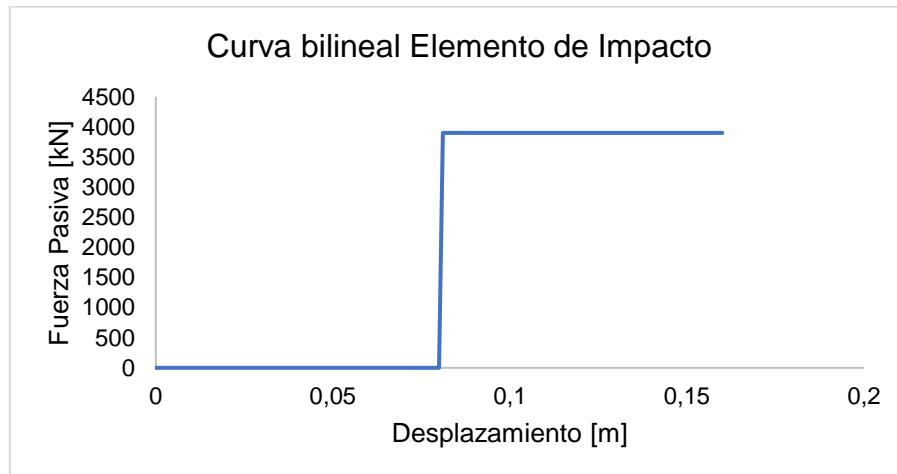


Figura 4.18: Curva bilineal elemento de impacto.

4.2.1 Topes Laterales

En el modelo que describe el puente Chada se consideró en los topes que la falla debe ser de forma dúctil, la curva de histéresis de los topes laterales originalmente lo propuso Leonel peralta [18] y se observan en las Figuras 4.19 y 4.20 para la representación de los topes laterales.

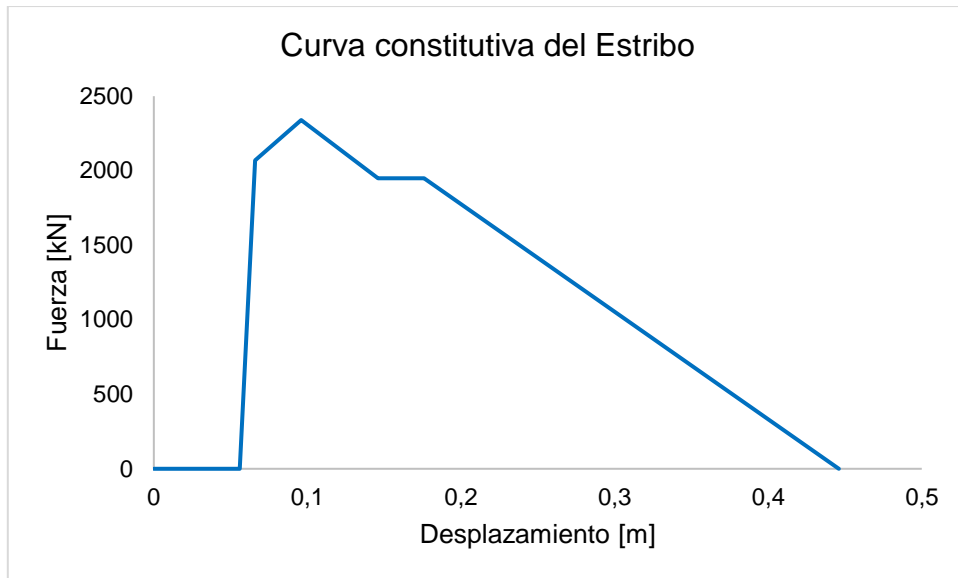


Figura 4.19: Curva constitutiva fuerza-desplazamiento en estribo.

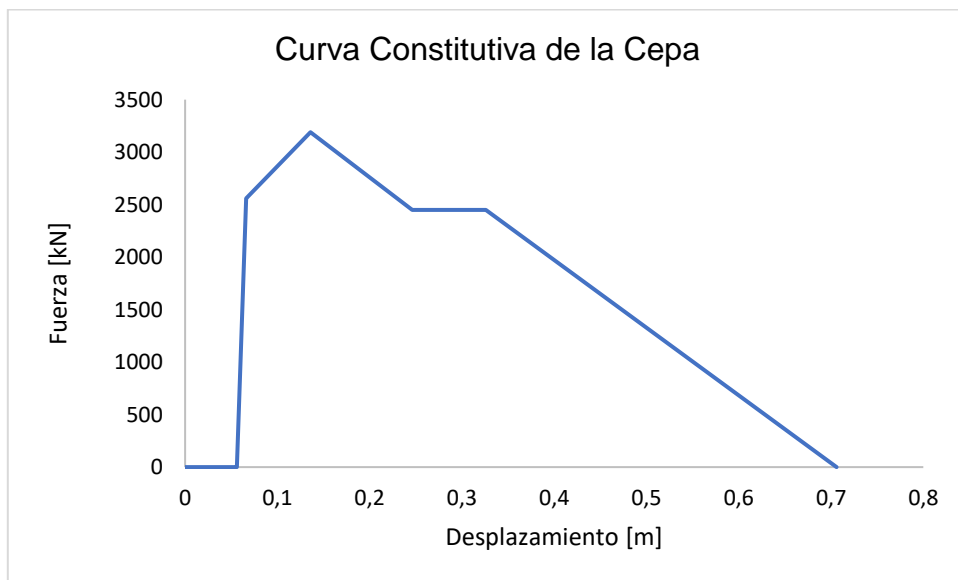


Figura 4.20: Curva constitutiva fuerza-desplazamiento en cepa.

Para representar las curvas constitutivas en Ruaumoko [19] se empleó una modificación en las Figuras 4.19 y 4.20 se propuso una curva bilineal. Las nuevas figuras bilineales (ver Figuras 4.21 y 4.22) Se consideró como esfuerzo máximo del aporte de V_s (acero) más un tercio del esfuerzo máximo V_c (concreto) para así sobre estimar levemente la resistencia antes de la falla. Las propiedades de los elementos Contac se muestran en las tablas 4.11.

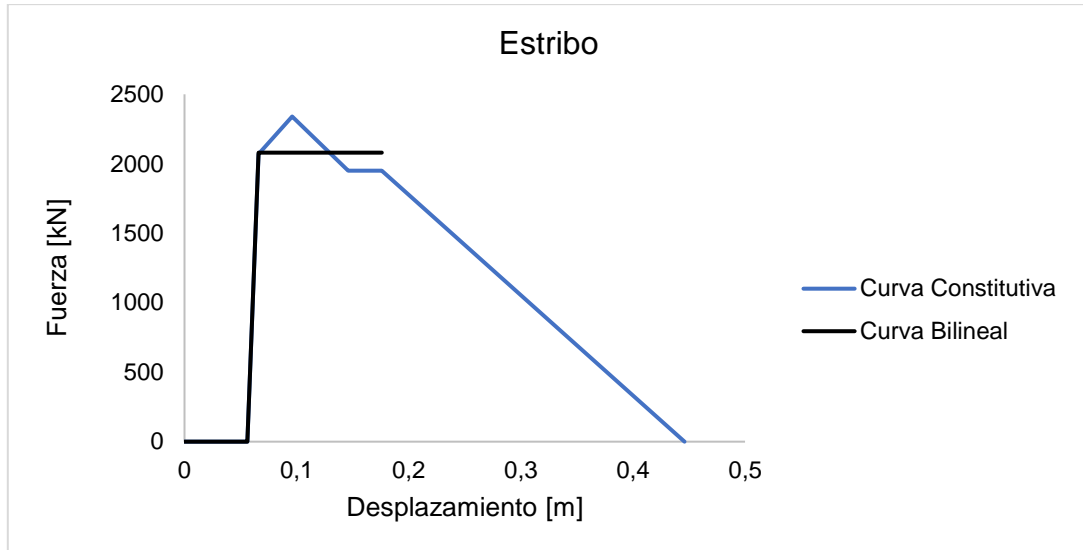


Figura 4.21: Curva bilineal vs Curva constitutiva de topes en estribo.

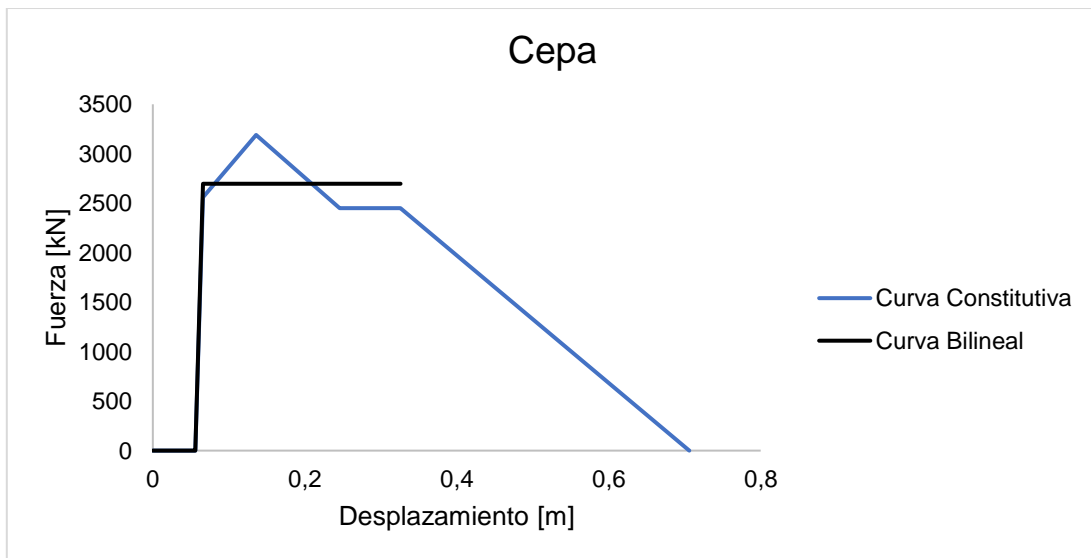


Figura 4.22: Curva bilineal vs Curva constitutiva de topes en Cepa.

Tabla 4.11: Propiedades de los elementos Contac

Propiedades	Estribo	Cepa
Rigidez [kN/m]	20800	20800
Esfuerzo último [kN]	2080	2697
Espaciamiento [m]	0.056	0.056

4.2.2 Análisis Modal Paso Inferior Chada

Se realizó un análisis modal del modelo del puente Chada. Los periodos obtenidos fueron considerando topes laterales tanto en estribos y cepas. En la Tabla 4.12 se pueden apreciar los seis periodos principales obtenidos en Ruaumoko.

Tabla 4.12: Primeros seis modos de vibrar del análisis modal

Modos	1	2	3	4	5	6
Periodos [s]	0.709	0.705	0.579	0.146	0.145	0.144

Se observa que los primeros dos modos de vibrar son los más importantes en las direcciones longitudinales y transversales.

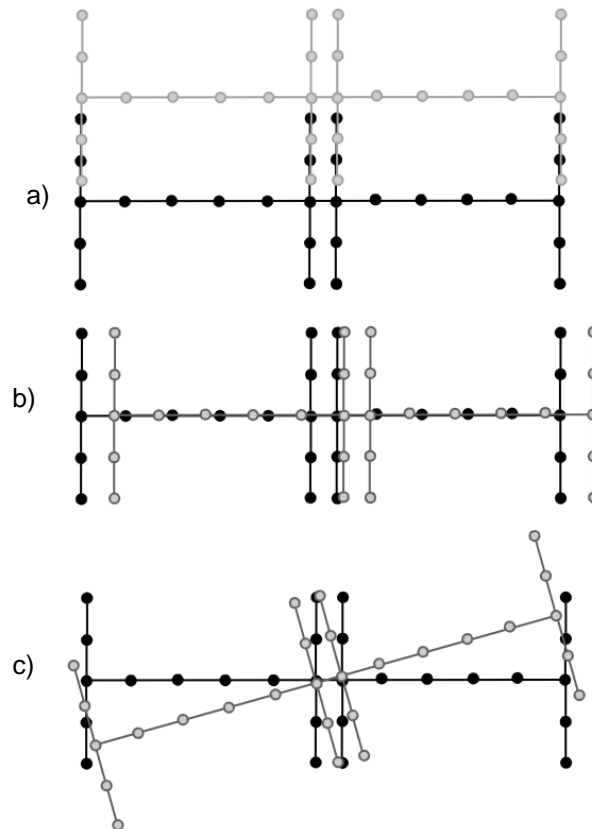


Figura 4.23: Primeros tres modos a) transversal, b) longitudinal y c) rotacional.

4.2.3 Análisis y Resultados del Modelo Paso Inferior Chada

Se analizaron los desplazamientos relativos de la superestructura con respecto a la subestructura. La Figura 4.24 muestra el tablero en planta, destacando en rojo los nodos 1,5,24,54,64,74 y 77. La gráfica de desplazamientos relativos máximos de los dos registros se muestra en la Figura 4.25a y 4.25b, considerando desplazamientos longitudinales y transversales de Viña del Mar y Concepción.

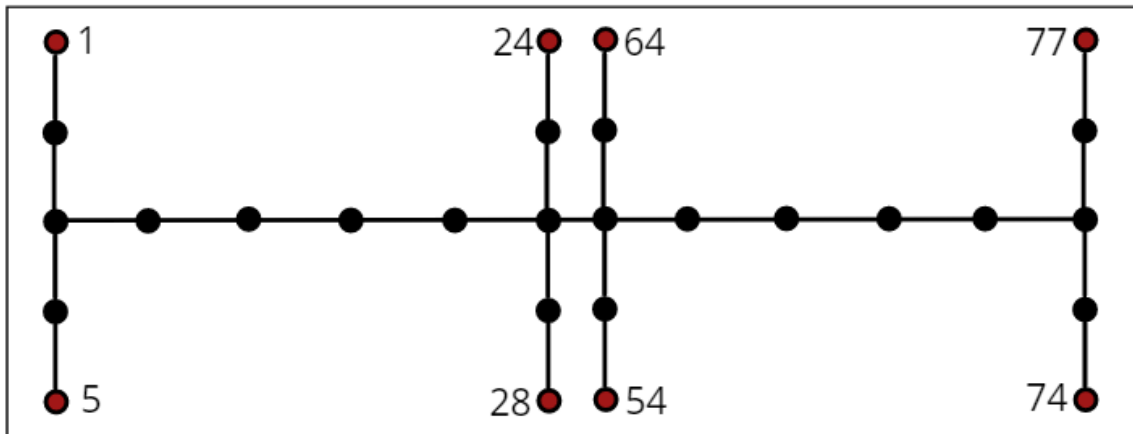


Figura 4.24: Nodos en el tablero.

El registro sísmico de Viña del Mar, presentó desplazamientos relativos máximos en dirección transversal de 6.63 [cm] y 6.67 [cm]. Por otra parte, los desplazamientos máximos relativos en dirección longitudinal fueron de 7 [cm] y 7.03 [cm]. Mientras que el registro sísmico de Concepción presentó desplazamientos máximos relativos en dirección transversal de 12.1 [cm] y 13.5 [cm]. Los nodos “28” y “54” en dirección longitudinal presentaron desplazamientos relativos máximos de 10.1 [cm]. Estos valores se muestran en las Tablas 4.13 y 4.14.

Los resultados de los análisis concluyen que el tablero del paso inferior Chada sobrepasa los desplazamientos entre topes laterales, los topes tienen una distancia de 5.6 [cm] con respecto al tablero. Además, los desplazamientos longitudinales sobrepasan la distancia de los impactos ya que la distancia es de 8 [cm] con respecto al tablero.

Tabla 4.13 desplazamiento transversales del tablero.

Nodos	Dirección	Concepción [m]	Viña del Mar [m]
1 - 5	Z	0.118	0.0646
24 - 28	Z	0.120	0.0665
54 - 64	Z	0.121	0.0665
74 - 77	Z	0.135	0.0667

Tabla 4.14: desplazamientos longitudinales del tablero.

Nodos	Dirección	Concepción [m]	Viña del Mar [m]
1 - 5	X	0.100	0.0690
24 - 28	X	0.101	0.0700
54 - 64	X	0.101	0.0700
74 - 77	X	0.101	0.0703

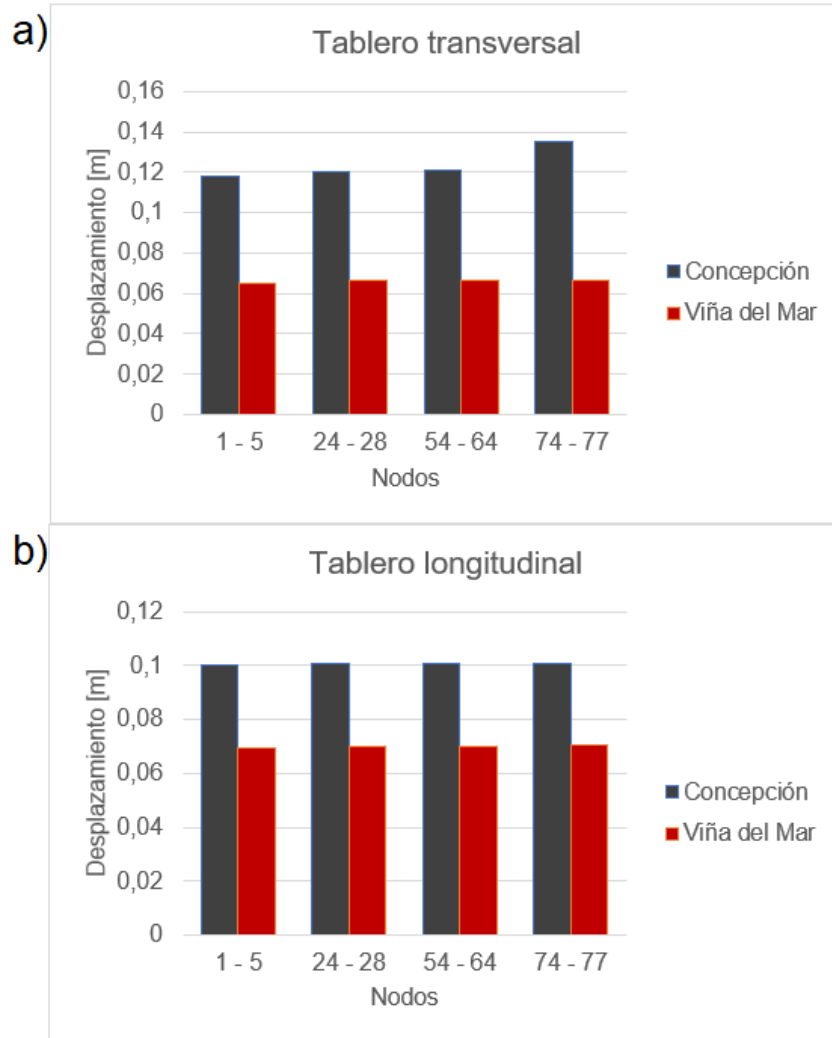


Figura 4.25: a) Desplazamiento transversal del tablero, b) desplazamiento longitudinal del tablero.

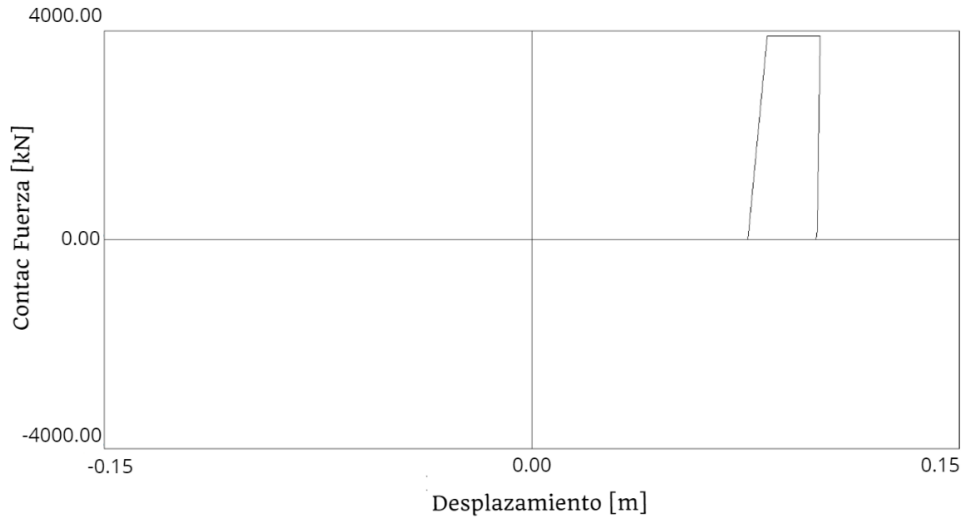


Figura 4.26: Relación fuerza – desplazamiento del análisis tiempo historia Concepción.

Los apoyos elastoméricos presentan desplazamientos que sobrepasan las distancias de los Contac, tanto para el registro de Viña del Mar y Concepción. En la Figura 4.27 se observa el comportamiento de la curva fuerza desplazamiento de un apoyo elastomérico. El análisis tiempo historia demostró que se superó el límite de deformación elástica en las direcciones transversales y longitudinales de 12.6 [cm] y 5.64 [cm] respectivamente. La Figura 4.28 muestran los gráficos de desplazamientos longitudinales en los apoyos del paso inferior Chada.

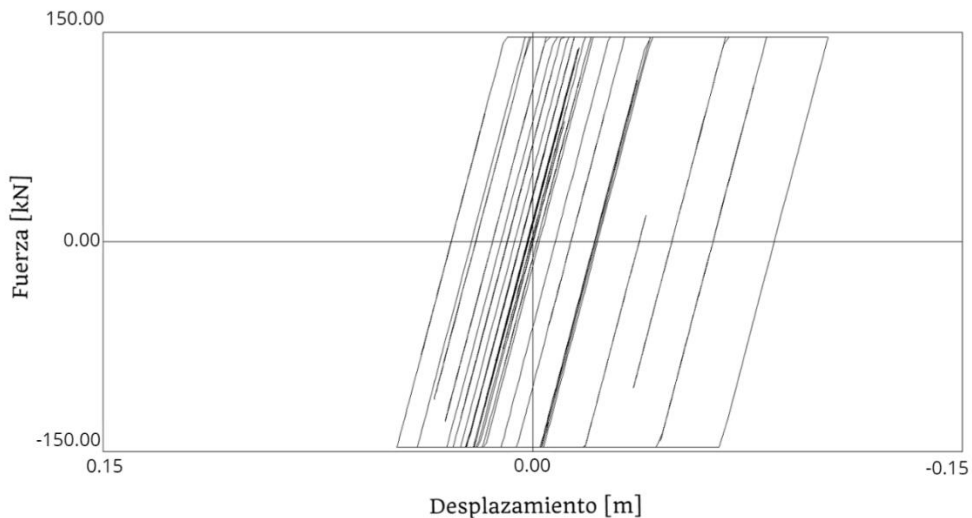


Figura 4.27: Histéresis elastómero cepa central, registro Concepción.

Por otra parte, en las Tablas 4.13 y 4.14 se muestra que los desplazamientos relativos máximos están bajo la acción del registro de Concepción, el análisis tiempo historia arrojó que el desplazamiento máximo transversal lo percibe los nodos “74 – 77” alcanzando un desplazamiento de 10.1 [cm] en el instante de tiempo de 23.93 [s]. En cambio, el máximo desplazamiento longitudinal lo perciben los nodos “74 – 77 “ alcanzando un desplazamiento de 13.5 [m] en el instante de tiempo

19.84 [s]. En la dirección longitudinal los nodos 1 y 77 posee un desplazamiento relativo de 0.1 [cm] por otra parte en la dirección transversal los nodos 1 y 77 posee un desplazamiento relativo de 1.7 [cm], estos desplazamientos tienen los tres primeros modos fundamentales en el tablero, transversal, longitudinal y rotacional.

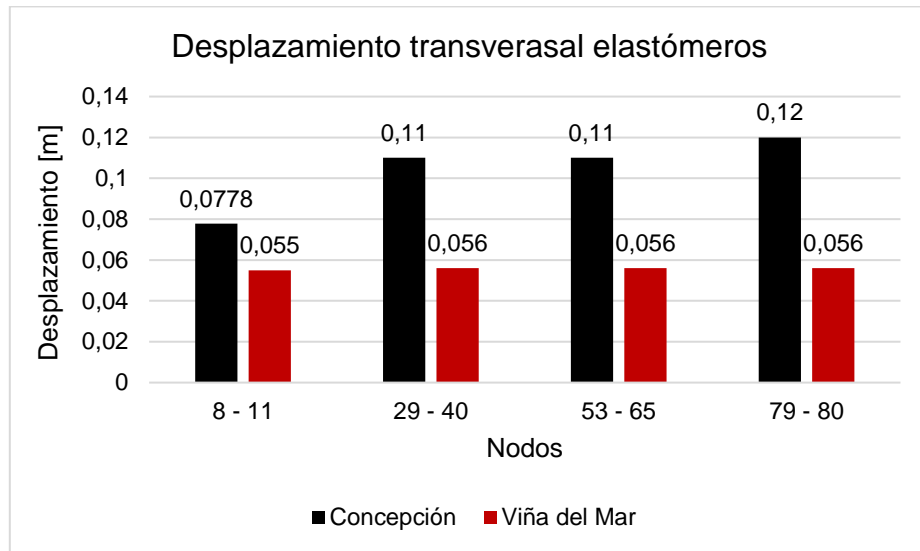


Figura 4.28: desplazamientos máximos relativos de apoyos elastoméricos del paso inferior Chada.

4.2.4 Aceleraciones

Se analizaron ocho nodos principales y estos se encuentran sobre los apoyos elastoméricos, la Figura 4.28 da a conocer la vista en planta de estos elementos señalando las direcciones de análisis.

Las aceleraciones longitudinales máximas bajo la acción del registro de Concepción, ocurre en los nodos "29- 40" ubicados en la cepa central alcanzando valores de $24.9[m/s^2]$. Sin embargo, para el registro de Viña del Mar la máxima aceleración longitudinal para los mismos nodos alcanzó valores de $30.8[m/s^2]$. Por otra parte, el registro de Viña del Mar obtuvo máximas aceleraciones transversales sobre los nodos "8 – 11" alcanzando una aceleración de $7.12 m/s^2$. Finalmente, para el registro de Concepción los nodos "8 – 11" superaron los $12.8 m/s^2$. Estos valores se aprecian en las Figuras 4.29 y 4.30.

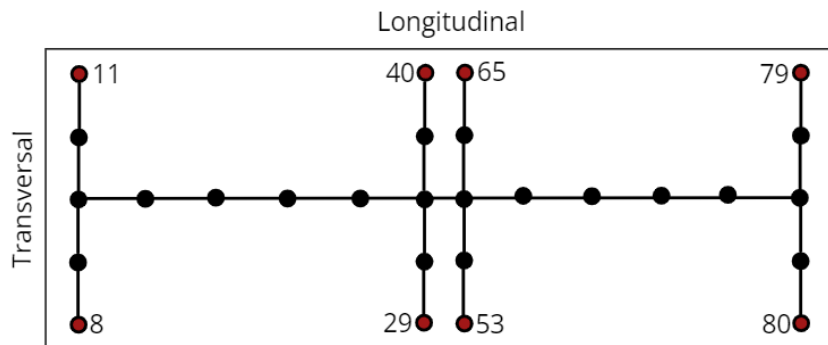


Figura 4.28: Nodos elastoméricos en el paso inferior Chada

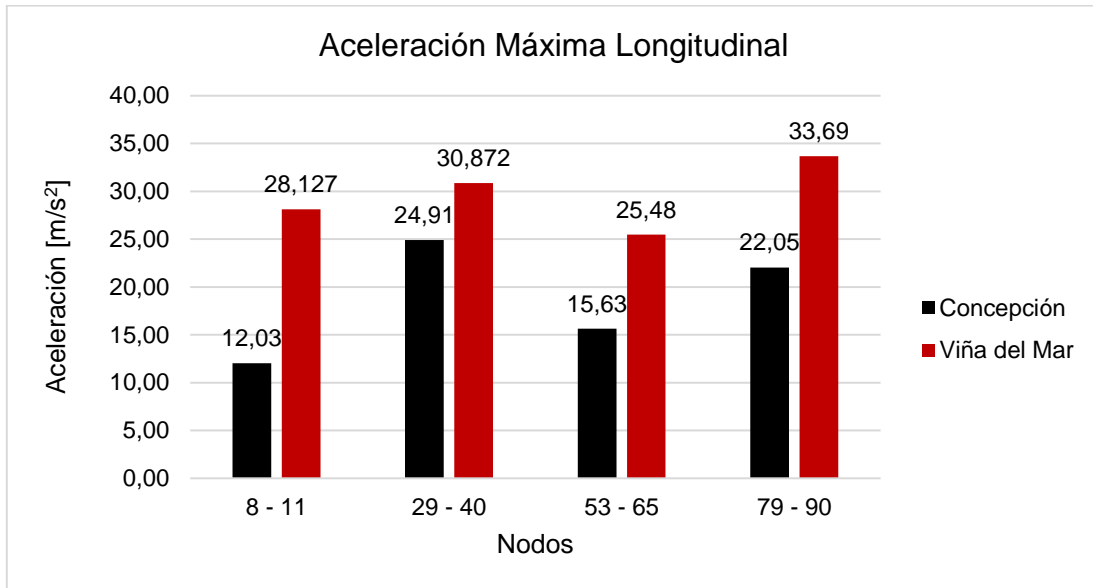


Figura 4.29: Aceleraciones máximas en la dirección longitudinal, paso inferior Chada.

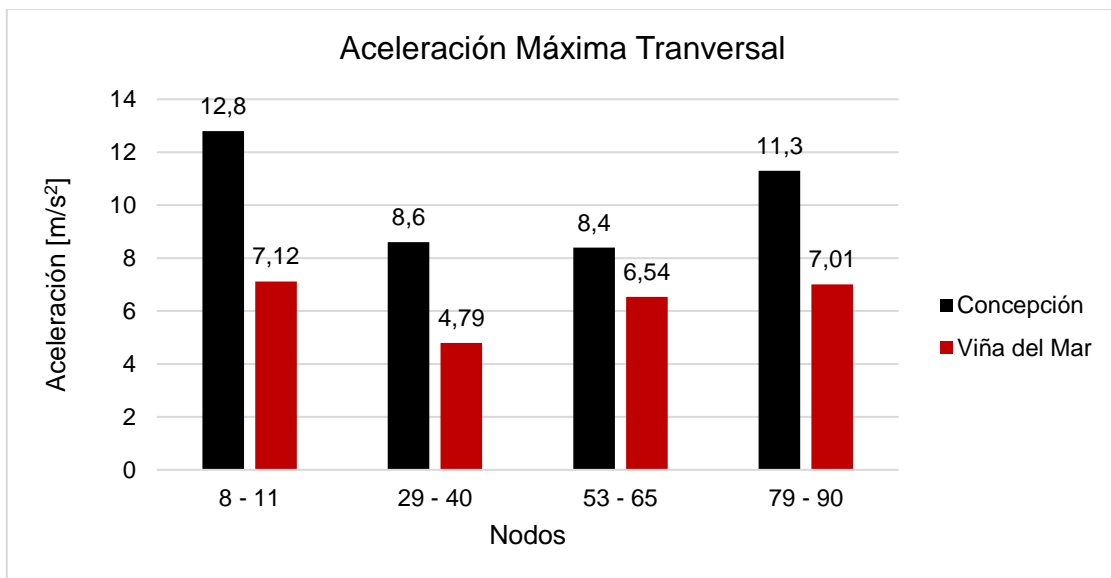


Figura 4.30: Aceleraciones máximas en la dirección transversal, paso inferior Chada

4.3 Modelación paso inferior Las Mercedes

El modelo tridimensional del Paso Inferior las Mercedes también se elaboró con elementos tipo Frame, Spring y Contac. En la Figura 4.31 se presenta un esquema que representa la estructuración general del Paso Inferior. A diferencia del paso inferior Chada está solo dispone de tres vigas longitudinales y dos columnas en su cepa central. En el paso inferior Las Mercedes los daños se concentraron en los estribos debido a la rotación del tablero.

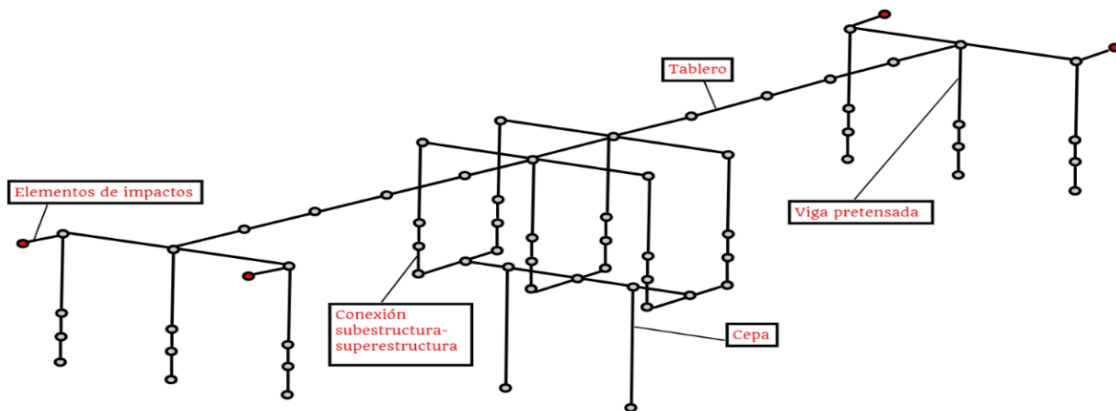


Figura 4.31: Modelo paso inferior Las Mercedes.

Las Figuras 4.32 y 4.33 muestran las elevaciones de la cepa central y la elevación de los estribos respectivamente, el detalle de las conexiones de la superestructura con la subestructura. Para representar el eje central del tablero se utilizó un nodo ubicado en el centro de la losa del tablero. Se observa en el paso inferior Las Mercedes elevación de los estribos (Figura 4.32), el tablero, las vigas pretensadas, los apoyos elastoméricos, llaves de corte y la mesa de apoyo. Además, los apoyos elastoméricos se posicionan igualmente sobre elementos rígidos en tres partes de la viga cabezal, de esta manera se da compatibilidad geométrica de los elementos.

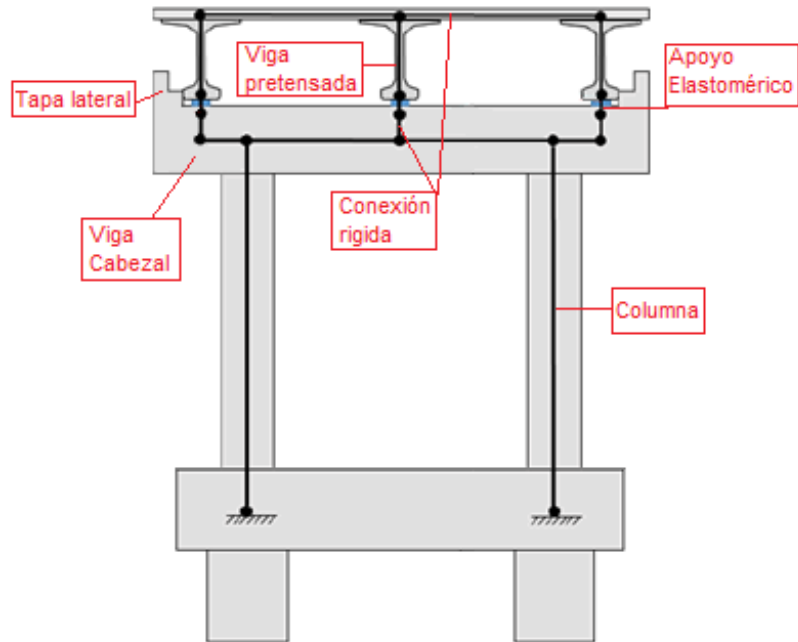


Figura 4.32: Elevación transversal en cepa, paso inferior Las Mercedes.

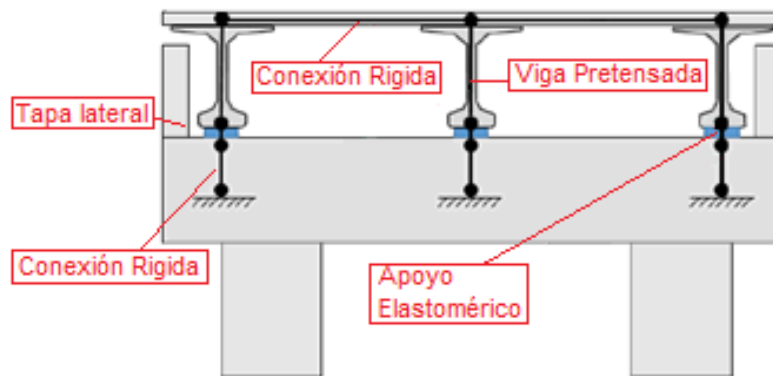


Figura 4.33: Elevación transversal en estribo, paso inferior Las Mercedes.

4.3.1 Superestructura

El paso inferior Las Mercedes se modelo con elementos lineales elásticos en su superestructura, este representa el tablero mediante un eje central en la dirección longitudinal. La superestructura al igual que el paso inferior Chada posee un hormigón G-25, con una resistencia equivalente $f'c$ de 25 [Mpa], con un módulo de elasticidad de 23500 [Mpa], para el módulo de corte (G) se consideró un 40% del módulo de elasticidad equivalente a 9400 [Mpa]. Las propiedades de estos elementos fueron determinadas mediante la sección transversal de la Figura 4.34. Las propiedades se calcularon con la sección bruta y se resume en la Tabla 4.15.

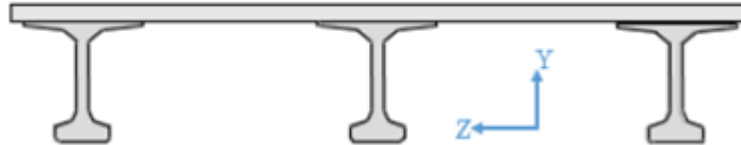


Figura 4.34: Sección transversal del tablero, paso inferior Las Mercedes.

Tabla 4.15: Propiedades geométricas del tablero, paso inferior Las Mercedes.

Área [m ²]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]	lp [m ⁴]
2.99	1.01	15.15	0.08

Las vigas longitudinales junto con la losa no presentaron daño durante el Terremoto del Maule 2010, por lo tanto, se asumió un comportamiento lineal elástico. Las vigas fueron modeladas como elementos frame, considerando una rigidez lineal en la dirección horizontal. Esa rigidez se obtuvo de la misma manera que el paso inferior Chada [15]. El alma de la viga posee una sección uniforme de espesor 15 [cm], el ala superior con un espesor de 8 [cm] y el ala inferior con un espesor de 25 [cm]. La carga lateral se aplicó en un extremo inferior tal como muestra en la Figura 4.35. y se determinó la rigidez lateral de la viga de 16200 [kN/m].

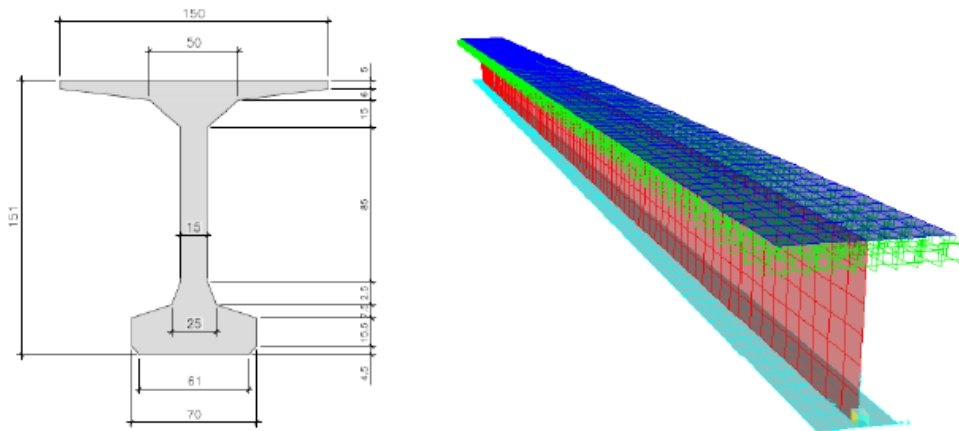


Figura 4.35: Viga longitudinal pretensada y modelada mediante SAP2000 para obtención de la rigidez lateral, paso inferior Las Mercedes.

4.3.2 Subestructura

La subestructura se conforma de la cepa central, de igual manera que las vigas longitudinales, no presento daño durante el terremoto del Maule 2010. Las columnas y la viga cabezal se modelaron elásticamente utilizando elementos Frame. Las propiedades geométricas de los elementos se resumen en la Tabla 4.16. Se utilizo un hormigón G-20 con una resistencia equivalente $f'c$ de 20 [Mpa] y módulo de elasticidad de 21000 [Mpa]. Para el módulo de corte (G) se consideró un 40% del módulo de elasticidad utilizando 8408 [Mpa].

Tabla 4.16: Propiedades geométricas cepa centra paso inferior Las Mercedes.

Elemento	Área [m ²]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]	lp [m ⁴]
Columna	0.79	0.05	0.05	0.1
Viga cabezal	1.82	0.39	0.20	0.3

4.3.3 Conexión Rígida

Las conexiones rígidas o también llamados cachos rígidos se utilizan para dar compatibilidad geométrica de los grados de libertad entre nodos. Para modelar las conexiones rígidas se consideraron elementos Frame elástico. El área considerada fue de 1.0 [m²], la inercia de 0.98 [m⁴], y el módulo de elasticidad 21.02 [GPa].

4.3.4 Masas Sísmicas y Peso del Puente

La masa y peso del puente se obtuvieron considerando el peso propio de cada elemento. En las Tablas 4.17 y 4.18 se resumen las masas sísmicas y el peso de los elementos de la superestructura y subestructura. El peso total del puente es 3390 [kN]. Para la subestructura se consideran al igual que el paso inferior Chada la mitad de las columnas dando como resultado un peso total 3174 [kN].

Tabla 4.17: Masas sísmicas y pesos superestructura paso inferior Las Mercedes.

Elemento	Masa [ton]	Peso [kN]
Losa	125	1229
Carpeta Asfáltica	30	295
Viga Pretensada	104	1021
Baranda y Aceras	22	211
Total Superestructura	281	2756

Tabla 4.18: Masas sísmicas y pesos subestructura paso inferior Las Mercedes.

Elemento	Masa [ton]	Peso [kN]
Viga Cabezal	21	203
Columnas	162	3174

Para las masas concentradas se realizó una distribución de cargas mediante área tributaria. Se discretizó el tablero y se consideró solo la mitad de las columnas como masas sísmicas. Se definió de “m1” hasta “m12” en el tablero, “m13”, “m15”, “m17” en la viga cabezal, “m14” y “m16” sobre las columnas, ver Figura 4.36. La Tabla 4.19 muestra los valores que se consideraron para cada masa en el tablero.

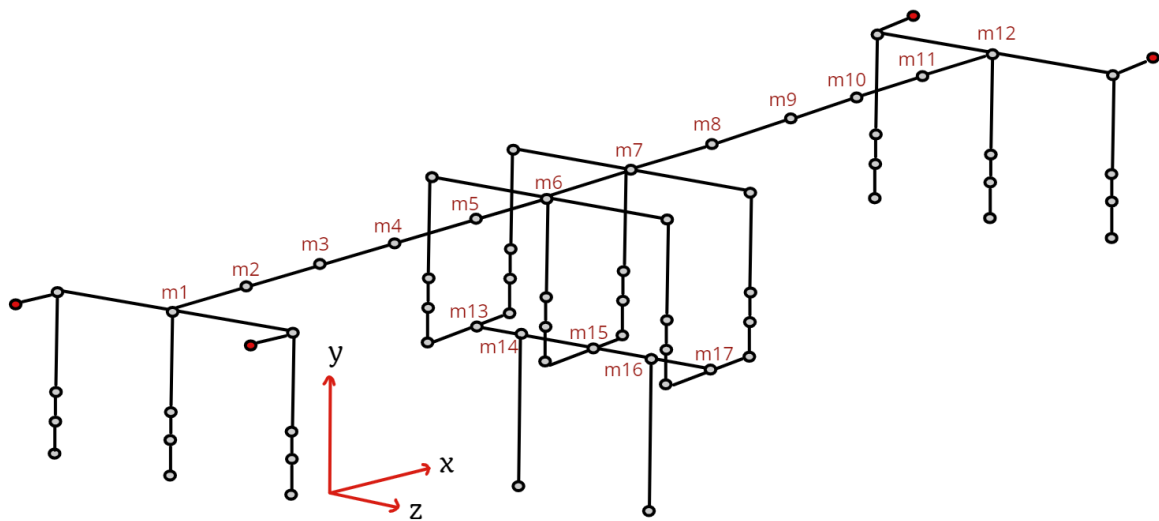


Figura 4.36: Masas concentradas en modelo tridimensional, masas en tablero y cepa paso inferior Las Mercedes.

Tabla 4.19: Pesos concentradas asignadas en [kN], paso inferior Las Mercedes.

Masas	Peso [kN]
m1	135.5
m2	270.9
m3	270.9
m4	270.9
m5	158.4
m6	158.4
m7	270.9
m8	81.1
m9	257.5
m10	257.5
m11	352.8
m12	81.1
m13	270.9
m14	270.9
m15	270.9
m16	270.9
m17	135.5

4.3.5 Apoyos Elastoméricos

Los apoyos elastoméricos en el paso inferior Las Mercedes, se utilizó elementos no lineales Spring, de esta manera de permite simular el comportamiento asociado a la capacidad de deslizamiento en direcciones horizontales en los apoyos. Los apoyos elastoméricos en la Figura 4.37 fueron considerados en el modelo como material uniaxial de tipo elastoplástico.

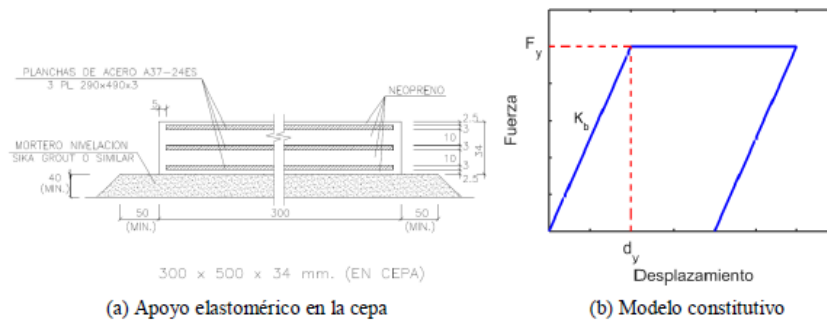


Figura 4.37: Apoyo elastomérico y modelo constitutivo, paso inferior Las Mercedes [9].

La fuerza lateral de fluencia del apoyo elastomérico se obtuvo a partir de la ecuación 4.12 calculado por Antonio Martínez [9], donde μ es el coeficiente de roce del apoyo elastomérico, calculado según la ecuación 4.13 propuesto por Steelman (2013) [19], y N es la carga axial sobre el apoyo elastomérico. Los parámetros de los apoyos elastoméricos, fuerza lateral de fluencia y la rigidez utilizada en el modelo Ruaumoko [19] se resume en la Tabla 4.20.

$$F_{yb} = \mu N \quad 4.12$$

$$\mu = 0.18 + \frac{0.37}{N/A} \quad 4.13$$

Tabla 4.20 : Propiedades de los apoyos elastoméricos, rigidez y fuerza laterales de fluencia [9] .

Propiedad	Valor
N [kN]	377
A [m]	0.15
μ	0.33
G _b [MPa]	1.30
h _r [m]	0.025
F _{yb} [kN]	123.4
K _b [kN/m]	7800
d _y [m]	0.016

4.4 Elemento de Impacto

El paso inferior Las Mercedes se modeló tomando en cuenta la interacción entre el tablero y los estribos incorporando los esfuerzos de la fuerza pasiva del suelo. Estos elementos fueron simulados con elementos Contac, ubicados en los nodos empotrados de los estribos y los nodos extremos del tablero: “4”, “3”, “56” y “63” ver Figura 4.38. Estos se definieron en dirección uniaxial. Los detalles del espaciamiento y parámetros se muestran en la Tabla 4.21. La curva de histéresis de la interacción del tablero y mesa de apoyo se aprecia en la Figura 4.39.

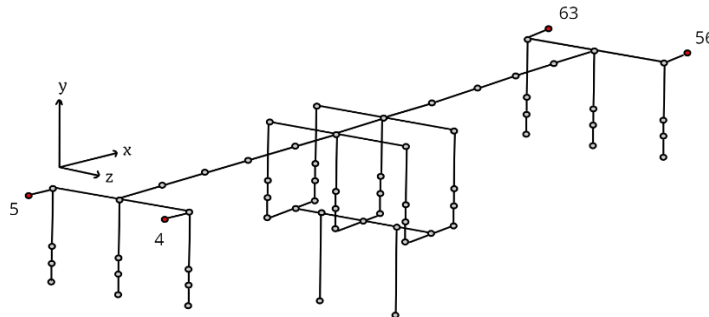


Figura 4.38: Elementos de impactos, paso inferior Las Mercedes.

Tabla 4.21: Parámetros de los elementos de impacto, paso inferior Las Mercedes.

Parámetros	Valores
Espaciamiento [m]	0.05
Rigidez inicial [kN/m]	3.58e06
Resistencia última [kN]	3900

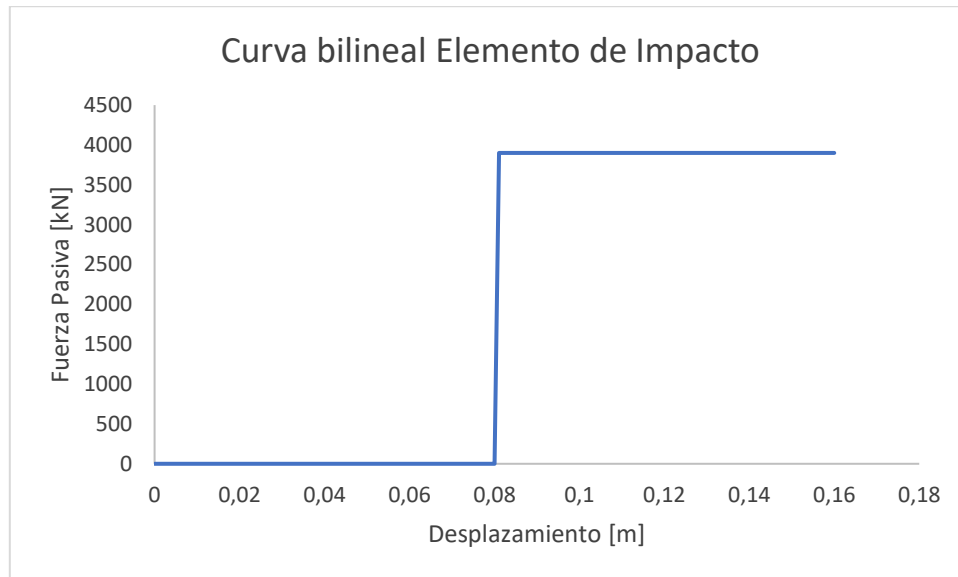


Figura 4.39: Curva bilineal elemento de impacto, paso inferior Las Mercedes.

4.4.1 Topes Laterales

El paso inferior Las Mercedes, no tenía topes laterales, este paso inferior estaba construido antes del Terremoto del Maule 2010 con tapas laterales, las tapas ya mencionado en capítulos anteriores no son elementos estructurales, por lo tanto, el comportamiento esperado no es dúctil. de igual manera se modelo con elementos Contac solo considerando la resistencia al corte del hormigón y un espaciamiento entre viga pretensada y tapa lateral de 8.4 [cm], las características de las tapas se aprecia en las Tablas 4.22 y 4.23. Las curvas de histéresis tanto para las tapas de los estribos y las cepas se modelaron como curvas bilineales, se muestra con detalles en las Figuras 4.40 y 4.41.

Tabla 4.22: Resistencia del hormigón en tapas del paso inferior Las Mercedes.

Propiedades	Estribo	Cepa
Resistencia del hormigón $f'c$ [MPa]	20	20
Vc [kN]	390	740

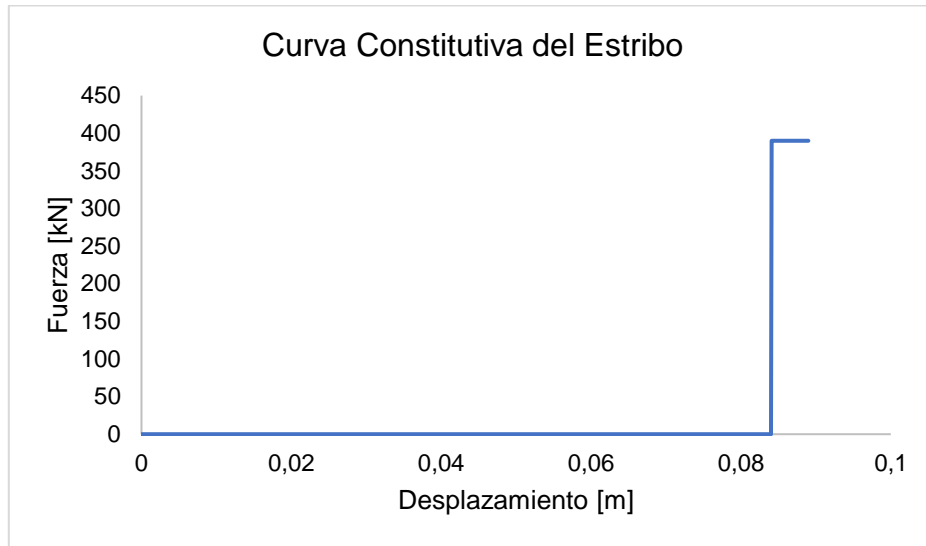


Figura 4.40: Curva bilineal tapa en estribo, paso inferior Las Mercedes.

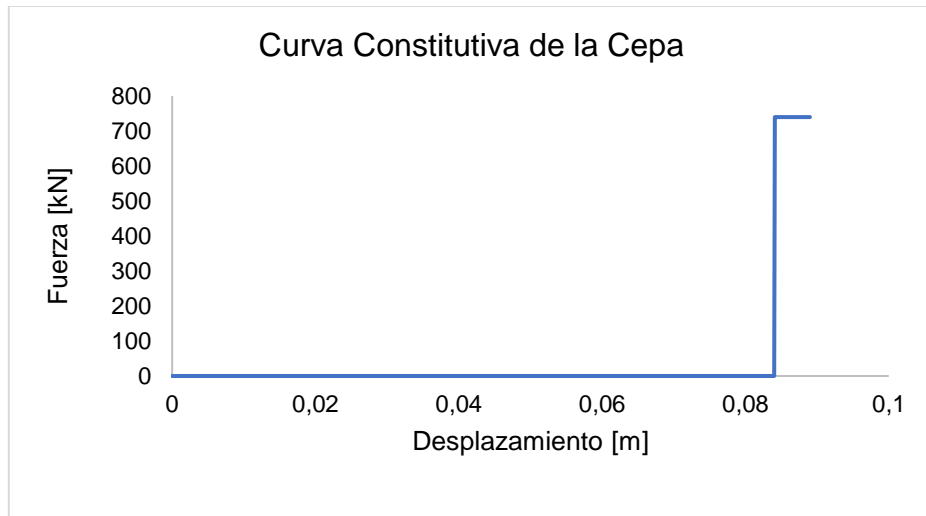


Figura 4.41: Curva bilineal tapa en cepa, paso inferior Las Mercedes.

Tabla 4.23: Propiedades de los elementos Contac en tapas en el paso inferior Las Mercedes.

Propiedades	Estribo	Cepa
Rigidez [kN/m]	20800	20800
Esfuerzo último [kN]	390	740
Espaciamiento [m]	0.084	0.084

4.4.2 Análisis del Paso Inferior Las Mercedes

Para el modelo del paso inferior Las Mercedes, se realizó un análisis modal. Los periodos obtenidos fueron considerados con el uso de las tapas laterales en estribos y cepas. En la Tabla 4.24 se aprecian los seis periodos principales obtenidos en Ruaumoko [19].

Tabla 4.24: Primeros seis modos de vibrar del análisis modal.

Modos	1	2	3	4	5	6
Periodos [s]	0.615	0.613	0.521	0.224	0.224	0.172

Se analizó los desplazamientos relativos de la superestructura con respecto a la subestructura. La Figura 4.42 muestra el tablero del paso inferior Las Mercedes en planta, destacando en rojo los nodos "1 - 3", "20 - 21", "34 - 39" y "55 - 64". Considerando desplazamientos longitudinales y transversales obtenidos de los registros de Viña del Mar y Concepción.

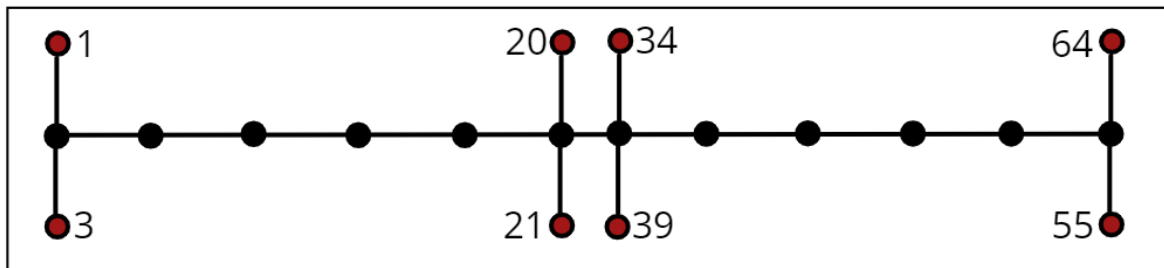


Figura 4.42: Nodos en el tablero, paso inferior Las Mercedes.

El registro sísmico de Viña del Mar, presentó desplazamientos relativos máximos en dirección transversal de 3.93 [cm] y 3.97 [cm]. Por otra parte, los desplazamientos máximos relativos en dirección longitudinal fueron 6.34 [cm] y 6.44 [cm]. Mientras que el registro sísmico de Concepción presentó desplazamientos máximos relativos en dirección transversal de 4.82[cm] y 5.92[cm]. Finalmente, los desplazamientos máximos relativos en dirección longitudinal fueron 7.94 [cm] y 8.05 [cm] (ver Figuras 4.43a y 4.43b). Se realizó el mismo análisis que el paso inferior Chada deduciendo que para el registro sísmico de Concepción no sobrepasaron los desplazamientos entre topes laterales, pero si sobrepasó la distancia de impacto entre el tablero y estribos en 8.05[cm]. Sin embargo, para el registro sísmico de Viña del Mar los resultados revelaron que los desplazamientos entre los topes laterales no fueron sobre pasados, pero arrojó que se superaron los desplazamientos de impacto del tablero y estribos en 6.44[cm]. Se pueden apreciar estos valores en las Tablas 4.25 y 4.26.

Tabla 4.25: Desplazamiento transversal del tablero, paso inferior Las Mercedes.

Nodos	Dirección	Concepción [m]	Viña del Mar [m]
1 - 3	Z	0.0482	0.0369
20 - 21	Z	0.0409	0.0393
34 - 39	Z	0.0411	0.0393
55 - 64	Z	0.0592	0.0397

Tabla 4.26: Desplazamiento longitudinal del tablero, paso inferior Las Mercedes.

Nodos	Dirección	Concepción [m]	Viña del Mar [m]
1 - 3	X	0.0758	0.0625
20 - 21	X	0.0793	0.0633
34 - 39	X	0.0794	0.0634
55 - 64	X	0.0805	0.0644

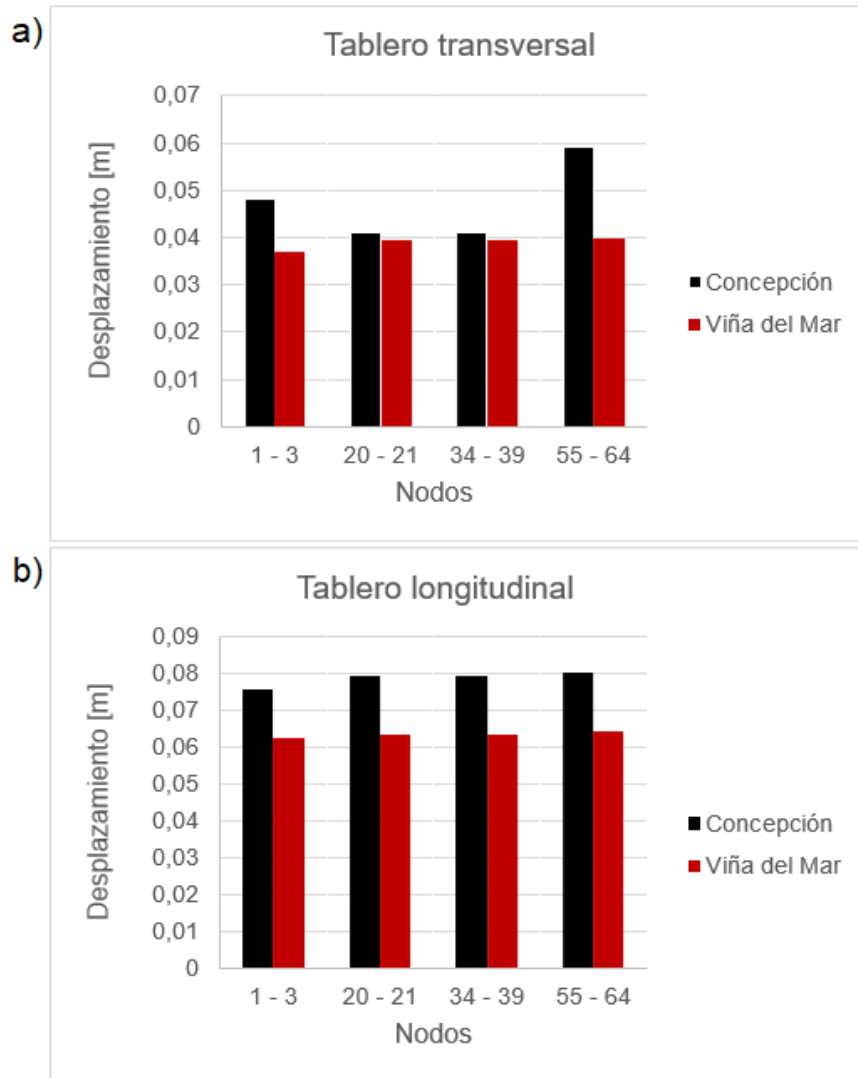


Figura 4.43: a) Desplazamiento transversal del tablero, b) Desplazamiento longitudinal del tablero.

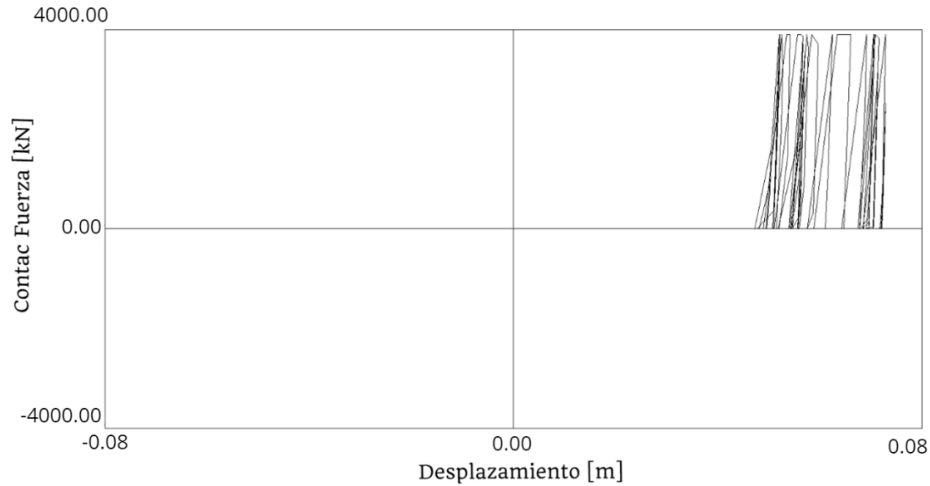


Figura 4.44: Relación fuerza – desplazamiento Contac del análisis tiempo historia Concepción.

Los apoyos elastoméricos presentan desplazamientos que sobrepasan las distancias en los Contac tanto para la dirección longitudinal y transversal. En la Figura 4.45, se observa el comportamiento de la curva fuerza desplazamiento de un apoyo elastomérico. Los resultados del análisis tiempo historia, arrojaron que los elastómeros superaron el desplazamiento límite de fluencia. El desplazamiento máximo relativo en la dirección longitudinal fue de 6.6 [cm] bajo la acción del registro de Concepción. Además, el desplazamiento máximo relativo en la misma dirección bajo el registro de Viña del Mar fue de 5.5 [cm]. Se muestra con más detalle en la Figura 4.46. Por otra parte, el desplazamiento máximo relativos en la dirección transversal fue de 1.97 [cm] bajo la acción del registro de Viña del Mar, finalmente el desplazamiento máximo relativo transversal bajo el registro de Concepción fue de 5.4 [cm], ver Figura 4.47.

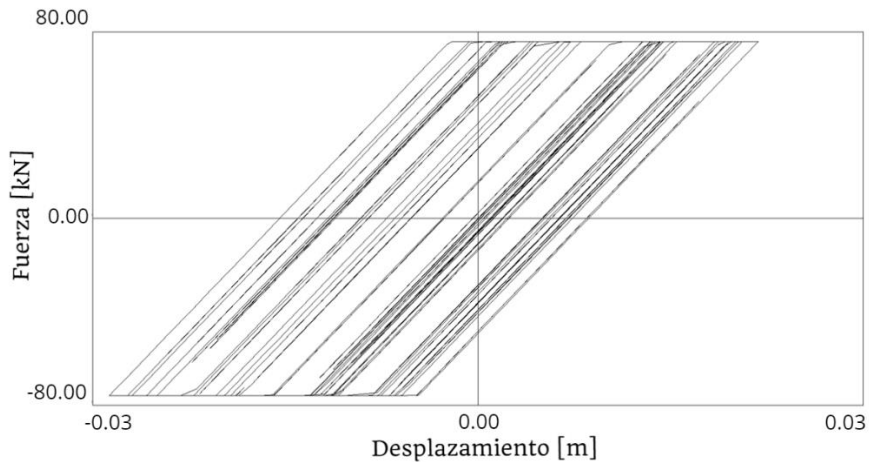


Figura 4.45: Relación fuerza desplazamiento, en apoyo elastómero en cepa central del elemento 8.

Por otra parte, en las Tablas 4.25 y 4.26 se muestra que los desplazamientos relativos máximos están bajo la acción del registro de Concepción, el análisis tiempo historia arrojó que el desplazamiento máximo transversal lo percibe los nodos “55 – 64” alcanzando un desplazamiento de 8.05 [cm] en el instante de tiempo de 37.91 [s]. En cambio, el máximo desplazamiento longitudinal lo perciben los nodos “55 – 64 “ alcanzando un desplazamiento de 5.92 [cm] en el instante de tiempo

36.24 [s]. En la dirección longitudinal los nodos 1 y 64 posee un desplazamiento relativo de 0.47 [cm] por otra parte en la dirección transversal los nodos 1 y 64 posee un desplazamiento relativo de 1.1 [cm], estos desplazamientos tienen los tres primeros modos fundamentales en el tablero, transversal, longitudinal y rotacional.

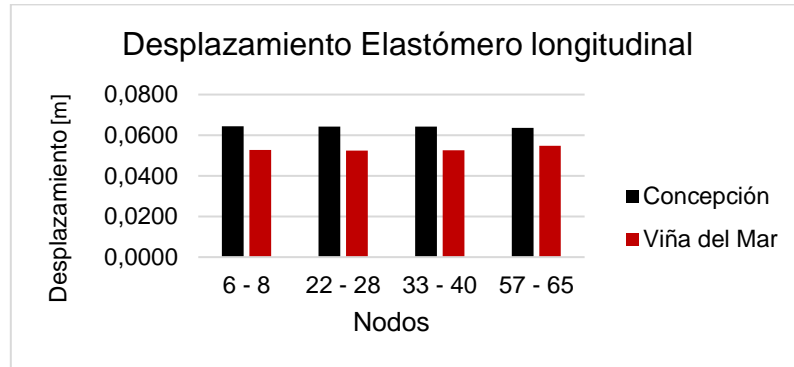


Figura 4.46: Desplazamiento elastoméricos del paso inferior Las Mercedes en la dirección longitudinal.

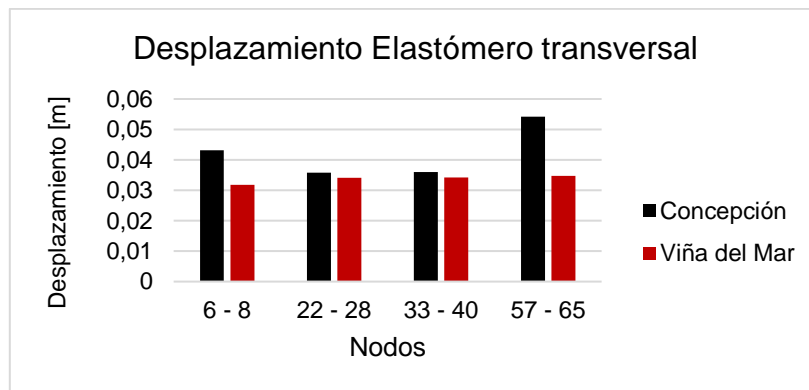


Figura 4.47: Desplazamiento elastoméricos del paso inferior Las Mercedes en la dirección transversal.

4.4.3 Aceleraciones

Se analizaron ocho nodos y estos se encuentran sobre los apoyos elastoméricos, la Figura 4.48 da a conocer la vista en planta de estos elementos señalando las direcciones de análisis.

Las aceleraciones longitudinales máximas bajo la acción del registro de Concepción, ocurrió en el nodo "65" y este alcanzó un valor de $24.7 [m/s^2]$. Sin embargo, para el registro de Viña del Mar la máxima aceleración para el mismo nodo no superó los $13.2 [m/s^2]$. Por otra parte, el registro de Viña del Mar obtuvo máximas aceleraciones transversales sobre los nodos "57" y "65", alcanzando una aceleración de $15.05 [m/s^2]$. Finalmente, para el registro de Concepción en dirección transversal los nodos "57" y "65" no superaron los $24.5 [m/s^2]$. Estos valores se aprecian en las Figuras 4.49 y 4.50.

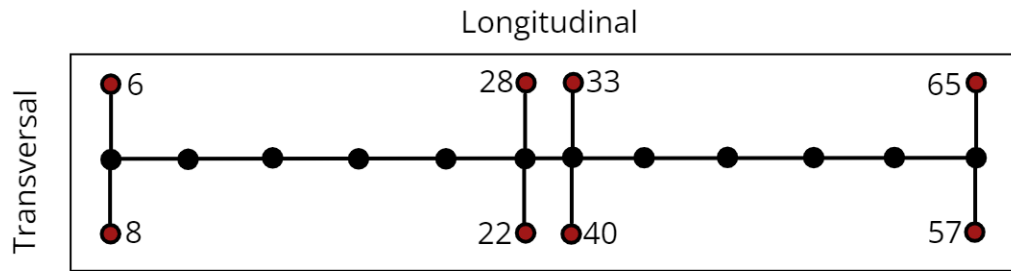


Figura 4.48: Nodos elastoméricos en el paso inferior Las Mercedes.

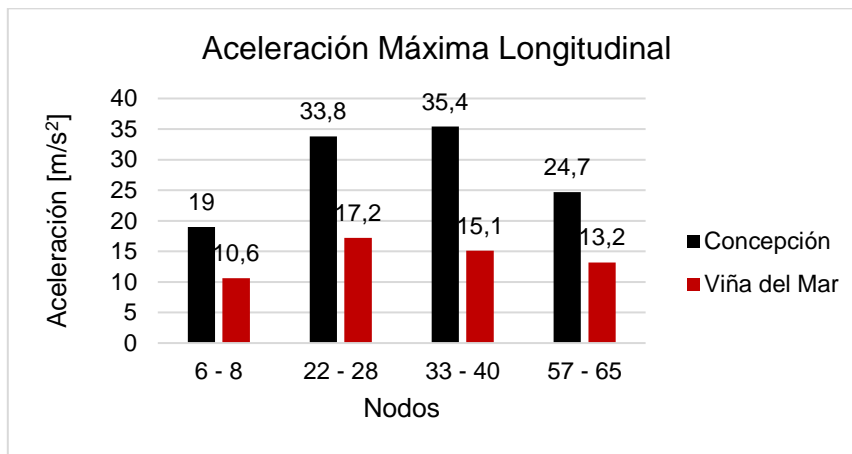


Figura 4.49: Aceleraciones máximas en la dirección longitudinal, paso inferior Las Mercedes.

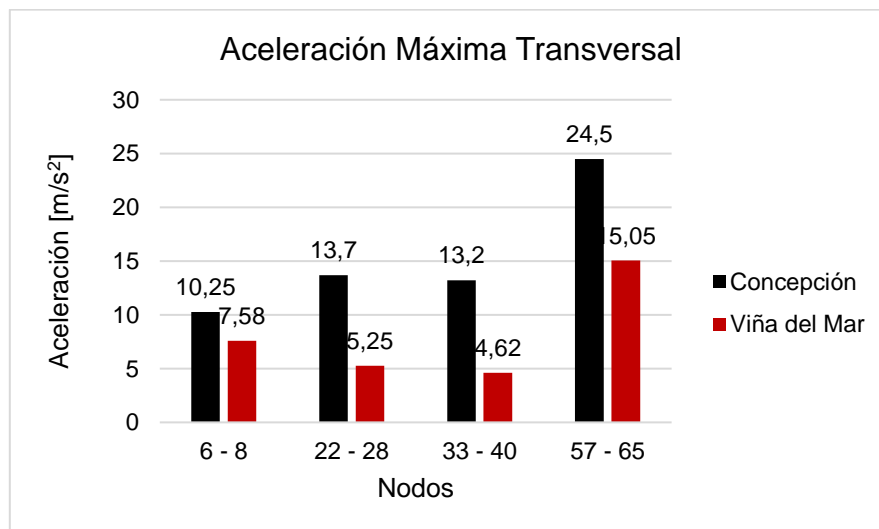


Figura 4.50: Aceleraciones máximas en la dirección transversal, paso inferior Las Mercedes.

4.5 Modelación Pasarela Chada

La pasarela Chada se modelo con elementos lineales elásticos, sin embargo, su superestructura solo se compone con una viga longitudinal, tapas, elastómeros y conexiones rígidas, la subestructura esta conformadas solo con columnas. La pasarela Chada los daños se concentraron en entre sus vigas, generando desconexiones en sus elastómeros. Se consideró lineal elástico, vigas y columnas, se muestran los elementos que se compone la pasarela en la Figura 5.41.

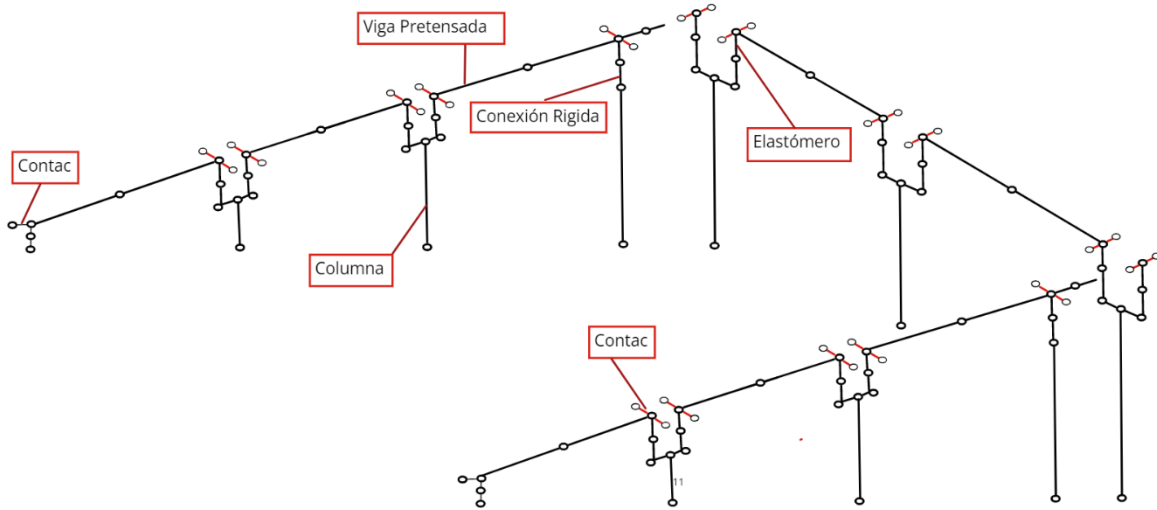


Figura 4.51: Modelo pasarela Chada.

4.5.1 Superestructura

La pasarela Chada se modelo con elementos lineales elásticos en su superestructura, este cumple la función tanto de tablero y viga. La superestructura posee un hormigón G-35, con una resistencia equivalente $f'c$ de 35 [Mpa], con un módulo de elasticidad de 38 785 [Mpa], para el módulo de corte (G) se consideró un 40% del módulo de elasticidad equivalente a 15515 [Mpa]. Las propiedades de las vigas principales fueron determinados con la sección transversal (ver Figura 4.52), las propiedades se resumen en la Tabla 4.27.

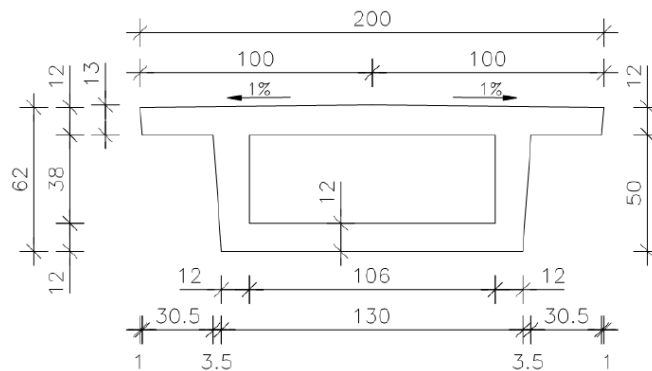


Figura 4.52: Sección transversal de las vigas principales en [cm] en pasarela Chada.

Tabla 4.27: Propiedades Mecánicas de vigas pasarela Chada.

Área [m ²]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]	lp [m ⁴]
0.502	0.027	0.14	0.025

La pasarela Chada posterior al Terremoto del Maule 2010, no sufrió daño en sus columnas, sin embargo, sufrió una desconexión de la VIGA 2 junto al apoyo elástico de la CEPA 6 ubicado en la rampa izquierda, en la Figura 4.53 se muestran las vigas y cepas que componen la pasarela Chada.

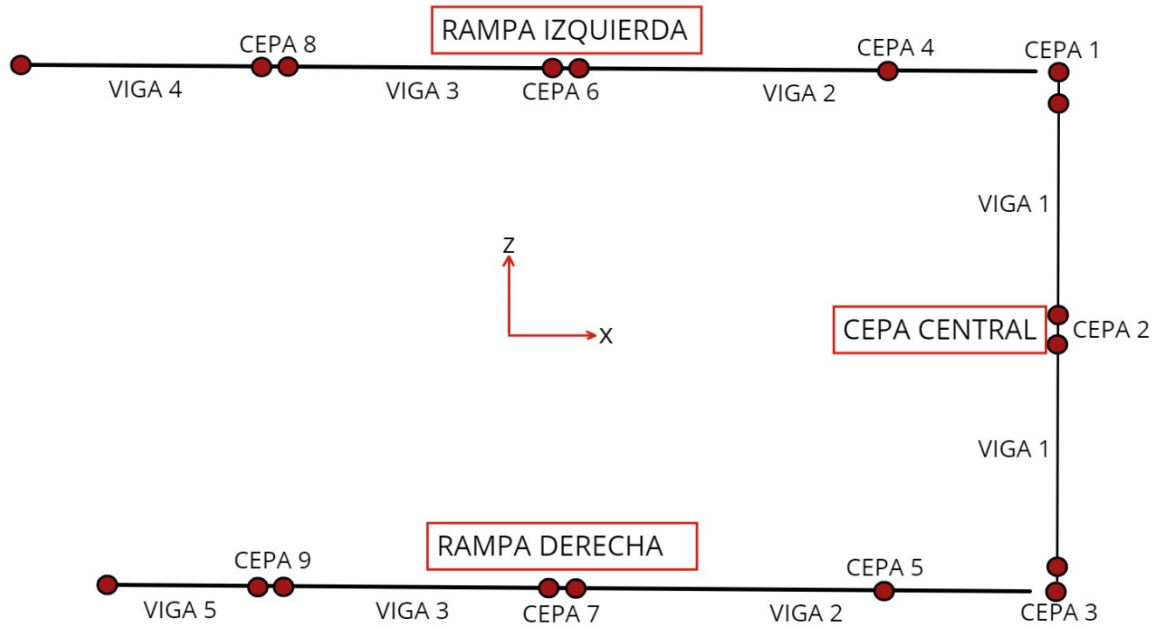


Figura 4.53: Elementos que componen la pasarela Chada en planta.

4.5.2 Subestructura

La subestructura se conforma de nueve columnas, tres en la rampa izquierda, dos en la cepa central y tres en la rampa derecha. Las propiedades geométricas de las cepas se resumen en la Tabla 4.28. Se utilizó un hormigón G-25 con una resistencia equivalente $f'c$ de 25 [Mpa] y módulo de elasticidad de 30440 [Mpa]. Para el módulo de corte (G) se consideró un 40% del módulo de elasticidad utilizando 12176 [Mpa].

Tabla 4.28: Propiedades geométricas de cepas en pasarela Chada.

Elemento	Área [m ²]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]	lp [m ⁴]
Columna	0.36	0.011	0.011	0.022

Las conexiones rígidas se utilizaron por sobre las columnas, los cachos rígidos fueron considerados para dar una compatibilidad geométrica de los grados de libertad. Se propuso para las conexiones rígidas elementos Frame elástico, estos tienen área igual a 1 [m²] y modulo elasticidad 100000 veces el módulo del hormigón de la superestructura.

4.5.3 Masas Sísmicas y Peso de la Pasarela.

Las masas y peso de la pasarela se obtuvieron considerando peso propio de los elementos. En la Tabla 4.29 se resume masas y de pesos de los elementos de la superestructura y subestructura. El peso total de la pasarela es de 1624 [kN].

Tabla 4.29: Masas sísmicas y pesos superestructura.

Elemento	Masa [ton]	Peso [kN]
Rampa Derecha	61.4	601.9
Cepa Central	38.8	380.4
Rampa Izquierda	65.4	641.6
Total Pasarela	165.6	1624

Las masas concentradas se calcularon con una distribución de cargas mediante área tributaria. Se discretizo las vigas pretensadas en diez nodos. Se definieron “m1” hasta “m4” para la rampa izquierda, “m5” junto a “m6” para la cepa central, y finalmente “m7” hasta “m10” para la rampa derecha. Ver Figura 4.54. Los valores de las masas nodales se observan en la Tabla 4.30.

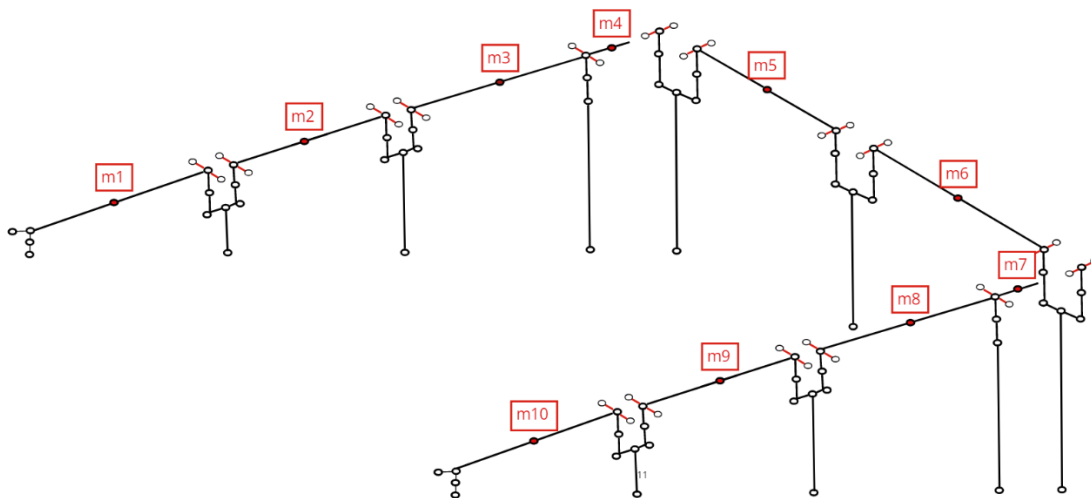


Figura 4.54: Masas concentradas en modelo tridimensional de pasarela Chada.

Tabla 4.30: Pesos concentrados asignados en [kN].

Masas	Peso [kN]
m1	150.6
m2	162.2
m3	161.7
m4	166.8
m5	190.2
m6	190.2
m7	174.2
m8	175.0
m9	150.8
m10	101.7

4.5.4 Apoyos Elastoméricos y Elementos de Impactos

Los apoyos elastoméricos se modelaron como elementos no lineales Spring (al igual que los pasos inferiores Chada y Las Mercedes). Se simuló el comportamiento no lineal asociado a la capacidad de deslizamiento en ambas direcciones horizontales en los apoyos, tal como se muestra en la Figura 4.55. Los apoyos elastoméricos fueron considerados en el modelo como material uniaxial del tipo elastoplástico.

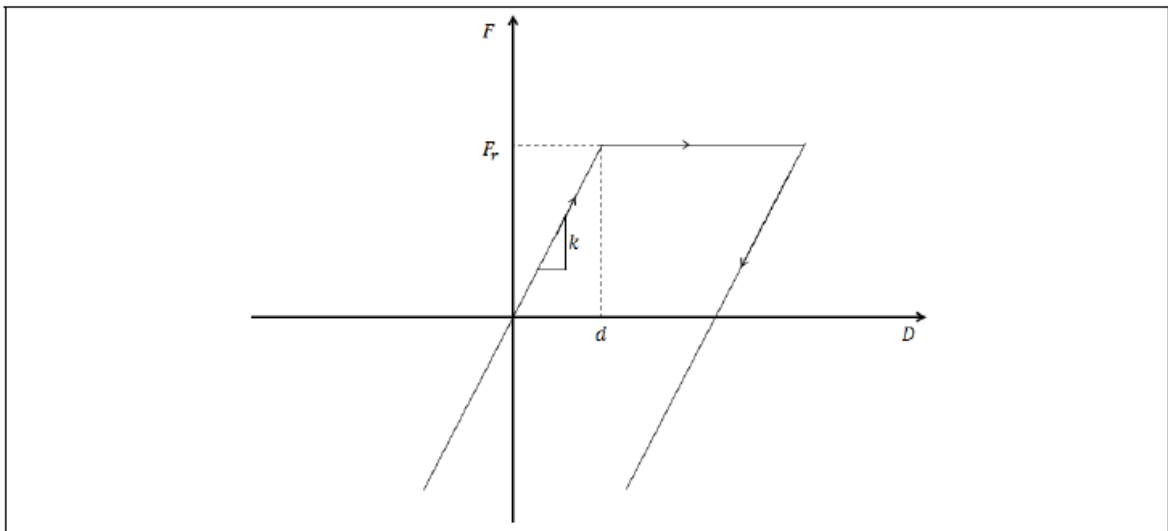


Figura 4.55: Comportamiento elastoplástico de apoyos elastoméricos en pasarela Chada.

Las fuerzas de fluencia de los apoyos elastoméricos se obtiene a partir de la ecuación 4.12, ya vista en la modelación de los pasos inferiores Chada y Las Mercedes. Felipe toro [6], calculó μ como 0.4, en las Tablas 4.31, 4.32 y 4.33 se muestran los detalles de las propiedades elastoméricos.

Tabla 4.31: Propiedades de los apoyos elastoméricos, rampa izquierda.

Propiedad	Valor
N [kN]	106.9
A [m]	0.038
μ	0.4
hr [m]	0.032
Fyb [kN]	42.75
Kb [kN/m]	2207
dy [m]	0.0193

Tabla 4.32: Propiedades de los apoyos elastoméricos, cepa central.

Propiedad	Valor
N [kN]	100.3
A [m]	0.038
μ	0.4
hr [m]	0.032
Fyb [kN]	40.13
Kb [kN/m]	2207
dy [m]	0.0181

Tabla 4.33: Propiedades de los apoyos elastoméricos, rampa derecha.

Propiedad	Valor
N [kN]	95.1
A [m]	0.038
μ	0.4
hr [m]	0.032
Fyb [kN]	38.04
Kb [kN/m]	2207
dy [m]	0.0172

Para los elementos de impactos la pasarela Chada se modelo tomando en cuenta la interacción entre las vigas pretensadas y el acceso de la rampa. Estos elementos fueron simulados con elementos Contac, ubicados cada uno en los accesos de cada rampa (derecha e izquierda), los Contac se definieron en dirección uniaxial. Los detalles del espaciamiento y parámetros se muestran en la Tabla 4.34. También se propuso una curva bilineal para simular los Contac en los accesos de las rampas, se muestra con más detalles en la Figura 4.55.

Tabla 4.34: Parámetros de los elementos impacto, pasarela Chada.

Parámetros	Valores
Espaciamiento [m]	0.02
Rigidez inicial [kN/m]	2.0e06
Resistencia última [kN]	2179

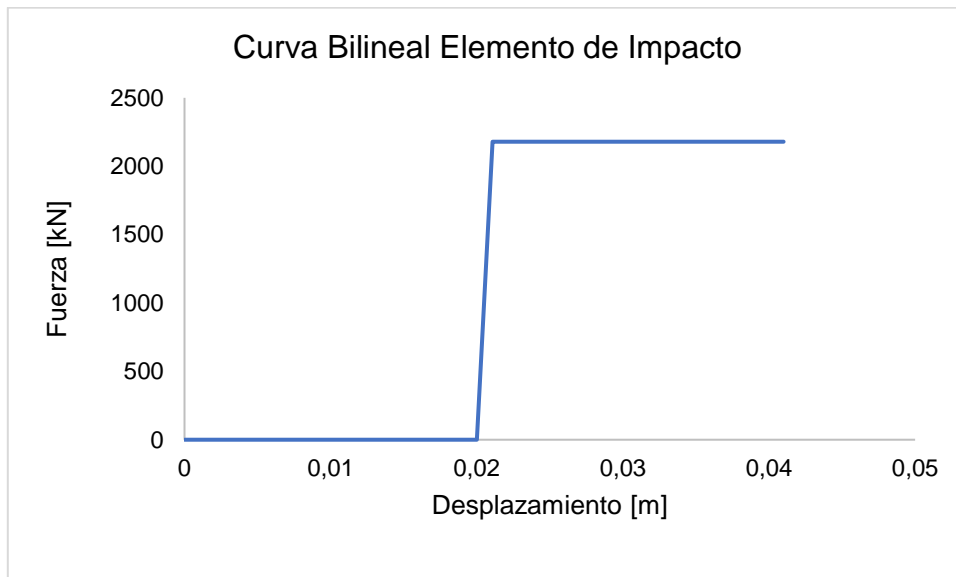


Figura 4.55: Curva bilineal elemento de impacto, rampa izquierda y derecha, pasarela Chada.

Por otra parte, la pasarela Chada no disponía de topes laterales, sin embargo, contaba con tapas, las tapas ya mencionado en capítulos anteriores no son elementos estructurales, por lo tanto, el comportamiento esperado no es dúctil. Su modelación fue similar al del paso inferior Las Mercedes. En la Figura 4.56 se muestra su curva de histéresis donde se simuló con elementos Contac, solo considerando la resistencia del hormigón teniendo un espaciamiento entre viga pretensada y la tapa lateral de 3 [cm], Las propiedades de las tapas de pueden observan en las Tablas 4.35 y 4.36.

Tabla 4.35: Resistencia del hormigón en tapas de la pasarela Chada.

Propiedades	Estribo	Cepa
Resistencia del hormigón $f'c$ [MPa]	20	20
V_c [kN]	390	740

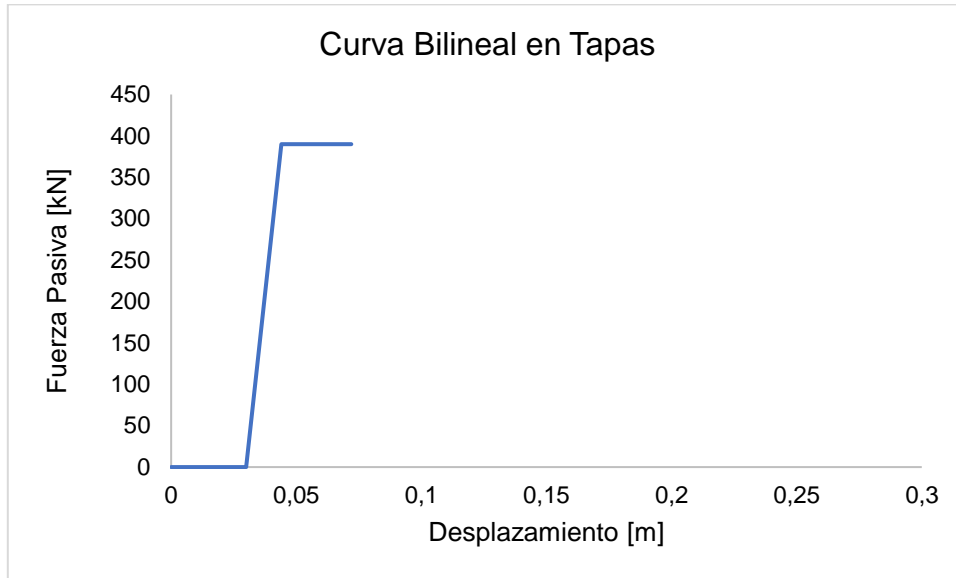


Figura 4.56: Curva bilineal elemento de impacto en tapas laterales, pasarela Chada.

Tabla 4.36: Propiedades de los elementos Contac en tapas en la pasarela Chada.

Propiedades	Rampa Izquierda	Cepa Central	Rampa Derecha
Rigidez [kN/m]	20800	20800	20800
Esfuerzo último [kN]	390	390	390
Espaciamiento [m]	0.03	0.03	0.03

4.5.5 Análisis de la pasarela Chada

Para el modelo de la pasarela se realizó un análisis modal. Los periodos obtenidos fueron considerados con el uso de las tapas laterales en las vigas pretensadas. En la tabla 4.37 se aprecian los seis periodos principales obtenidos en Ruaukoko [19].

Tabla 4.37: Primeros seis modos de vibrar del análisis modal, pasarela Chada.

Modos	1	2	3	4	5	6
Periodos [s]	0.679	0.672	0.503	0.519	0.480	0.466

Se analizó los desplazamientos relativos de la superestructura con respecto a la subestructura. La Figura 4.57 muestra las vigas pretensadas de la pasarela Chada vista en planta, destacando en rojo los nodos de análisis, además las rampas están desacopladas a la cepa central, dando respuestas independientes entre sí.

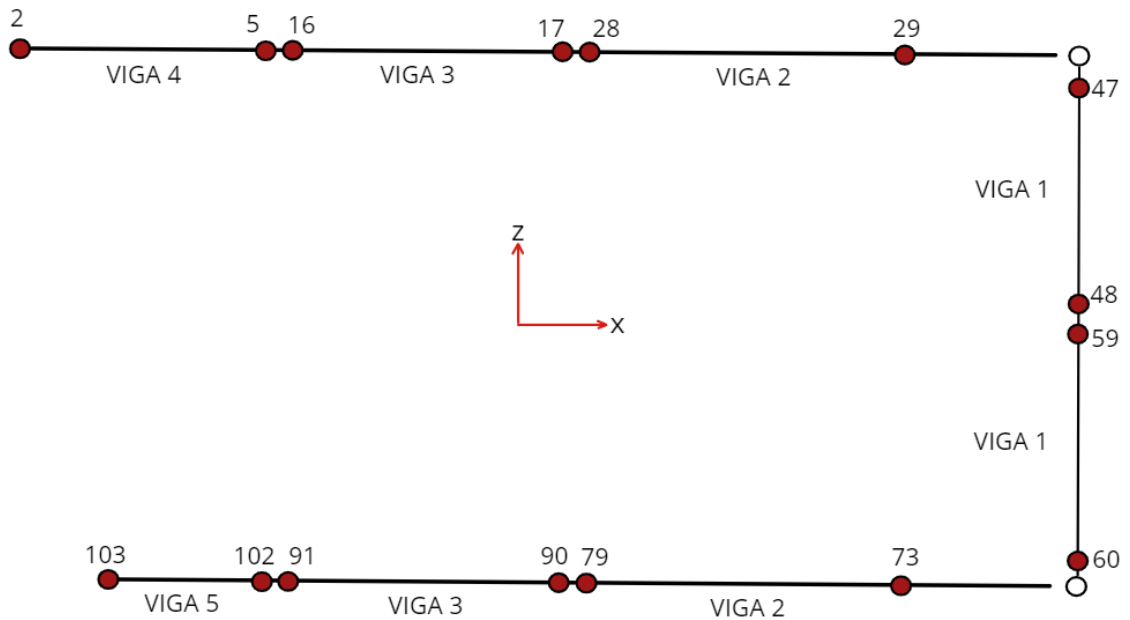


Figura 4.57: Nodos de vigas pretensadas en pasarela Chada.

El registro de Viña del Mar presentó desplazamientos relativos máximos en el eje "x" global de 6.9 [cm] y 7.1 [cm]. Por otra parte, los desplazamientos máximos relativos en dirección en el eje "z" global fueron de 4.8 [cm] y 6.4 [cm]. Mientras que el registro de Concepción presentó desplazamientos máximos relativos en dirección en el eje "x" global de 7.8 [cm] y 9.9 [cm]. Finalmente, los desplazamientos máximos relativos en dirección al eje "z" global fueron 5 [cm] y 5.9 [cm], ver Figuras 4.58 y 4.59. En la pasarela Chada el elemento que colapso fue la VIGA 2 que pertenece a la rampa izquierda. Los desplazamientos relativos de los nodos "28" y "29" que forman parte a la VIGA 2 sobrepasaron los 2 [cm], la junta de dilatación que unen la VIGA 2 y VIGA 3 es de 2 [cm], por lo tanto, se presume que unas de las causas de la falla fueron los excesivos desplazamientos que

provocaron el colapso de la VIGA 2 que pertenece a los nodos 28 y 29. Sin embargo, sin embargo, no fue la única viga que presentó desplazamientos excesivos, se detallan los desplazamientos relativos máximos en las Tablas 4.38 y 4.39.

Tabla 4.38: Desplazamiento dirección en el eje “x”, pasarela Chada.

Nodos	Dirección	Concepción [m]	Viña del Mar [m]
2 - 5	X	0.099	0.025
16 - 17	X	0.039	0.043
28 - 29	X	0.078	0.067
47 - 48	X	0.070	0.069
59 - 60	X	0.070	0.070
73 - 79	X	0.073	0.063
90 - 91	X	0.039	0.037
102 - 103	X	0.011	0.071

Tabla 4.39: Desplazamiento dirección en el eje “z”, pasarela Chada.

Nodos	Dirección	Concepción [m]	Viña del Mar [m]
2 - 5	Z	0.028	0.028
16 - 17	Z	0.031	0.048
28 - 29	Z	0.046	0.064
47 - 48	Z	0.032	0.035
59 - 60	Z	0.056	0.043
73 - 79	Z	0.050	0.064
90 - 91	Z	0.022	0.032
102 - 103	Z	0.025	0.019

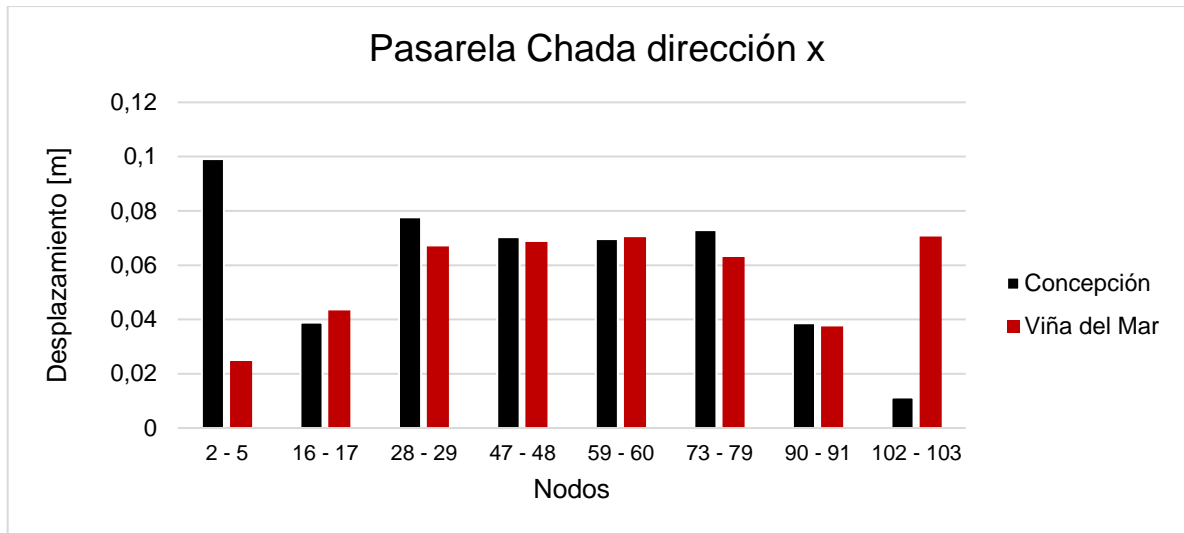


Figura 4.58: Desplazamientos dirección "x", pasarela Chada.

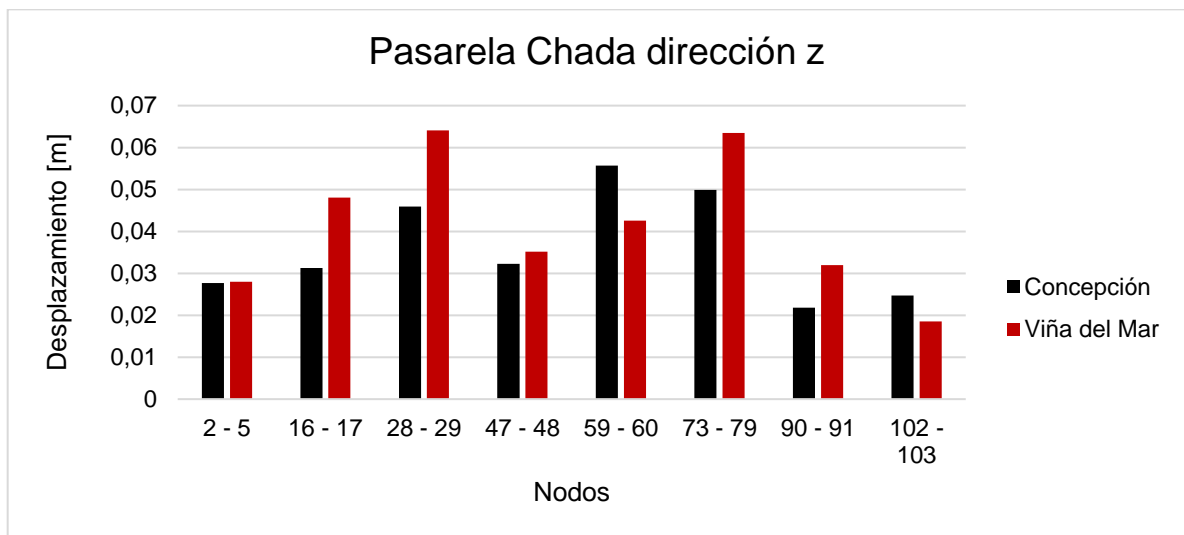


Figura 4.59: Desplazamientos dirección "z", pasarela Chada.

Por otra parte, se realizó el mismo análisis con los Contac, se superaron los desplazamientos tanto para las direcciones "x" y "z" superando las juntas de dilatación de 3 [cm] de las tapas. Además, los elementos impactados al comienzo de las rampas también sobrepasaron las juntas de dilatación de 2 [cm]. Se detalla la curva de histéresis al comienzo de la rampa izquierda en la Figura 4.60.

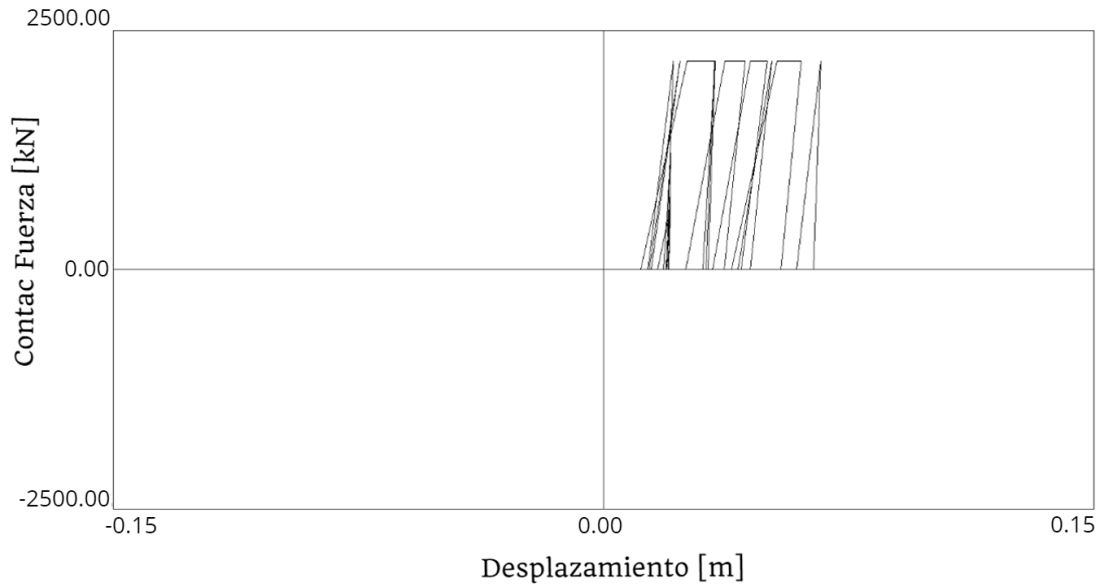


Figura 4.60: Relación fuerza-desplazamiento del análisis tiempo historia Concepción.

Los resultados del análisis tiempo historia arrojó que los elastómeros superaron el desplazamiento límite de fluencia. El desplazamiento máximo relativo en la dirección al eje “x” y “z” se muestran en las Tablas 4.38 y 4.39, estos son los desplazamientos de las vigas, las cuales son los mismos desplazamientos que los elastómeros. Se puede apreciar la curva de histéresis de elastómeros en las Figuras 4.61 y 4.62.

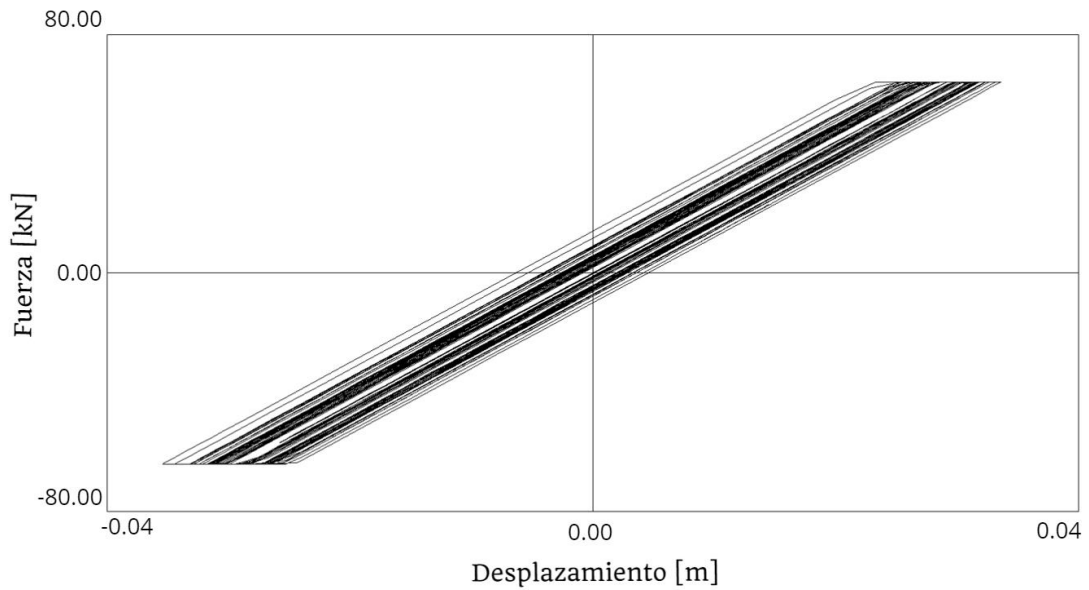


Figura 4.61: Relación fuerza – desplazamiento, en apoyo elastómero, dirección eje “x”.

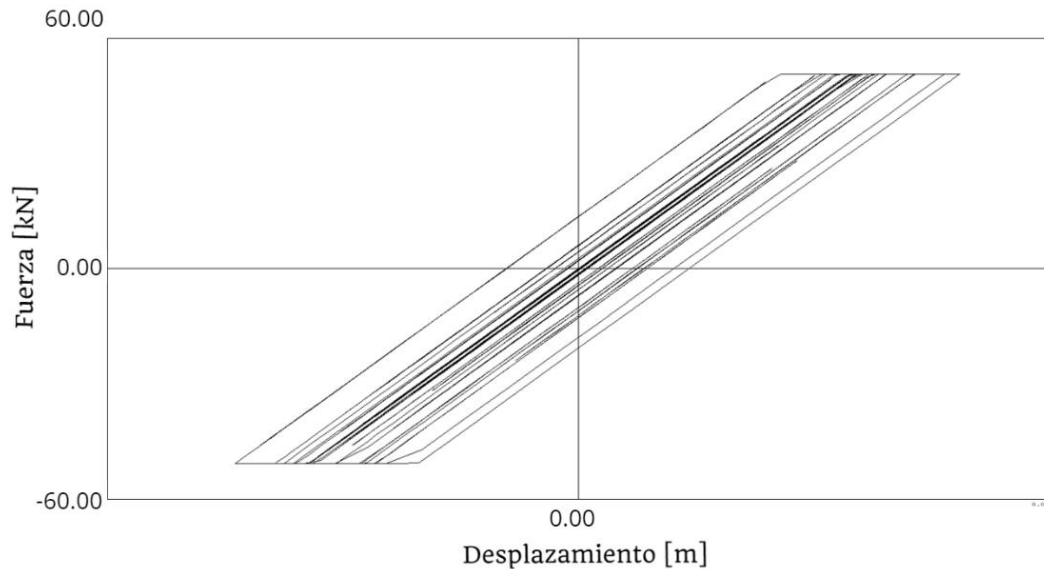


Figura 4.62: Relación fuerza – desplazamiento, en apoyo elastomérico del elemento 47, dirección eje “z”.

Por otra parte, en las Tablas 4.38 y 4.39 se muestra que los desplazamientos relativos máximos están bajo la acción del registro de Concepción, la viga dos se componen con los nodos 28 – 29 alcanzando un desplazamiento longitudinal de 7.8 [cm] en el instante de tiempo de 28.82 [s]. En cambio, el máximo desplazamiento transversal para los pares de nodos “55 – 64 “ alcanzan un desplazamiento de 4.6 [cm] en el instante de tiempo 32.62 [s]. En la dirección longitudinal los nodos 28 y 29 posee un desplazamiento relativo de 0.012 [cm]. Por otra parte, en la dirección transversal los nodos 28 y 29 posee un desplazamiento relativo de 3.2 [cm], estos desplazamientos tienen los tres primeros modos fundamentales en el tablero que compone los nodos “28 – 29”.

4.5.5.1 Aceleraciones

Se analizaron dieciséis nodos de los apoyos elastoméricos, la Figura 4.63 da a conocer la vista en planta de estos elementos señalando las direcciones de análisis.

Las aceleraciones máximas en dirección x bajo el registro de Concepción, ocurrió en el nodo “2” y este alcanza un valor de 17.63 [m/s^2]. Sin embargo, para el registro de Viña del Mar la máxima aceleración para el mismo nodo no supera los 13.7 [m/s^2]. Por otra parte, el registro de Viña del Mar obtuvo máximas aceleraciones en dirección “z” sobre el nodo “2” de 28.7 [m/s^2]. Finalmente, para el registro de Concepción el nodo “2” no supera 0.57 [m/s^2]. Estos valores se aprecian en las Figuras 4.64 y 4.65.

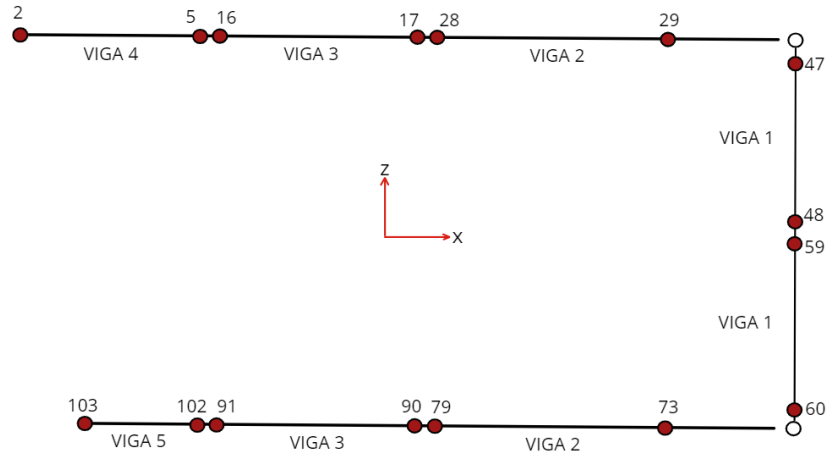


Figura 4.63: Nodos elastoméricos en la pasarela Chada.

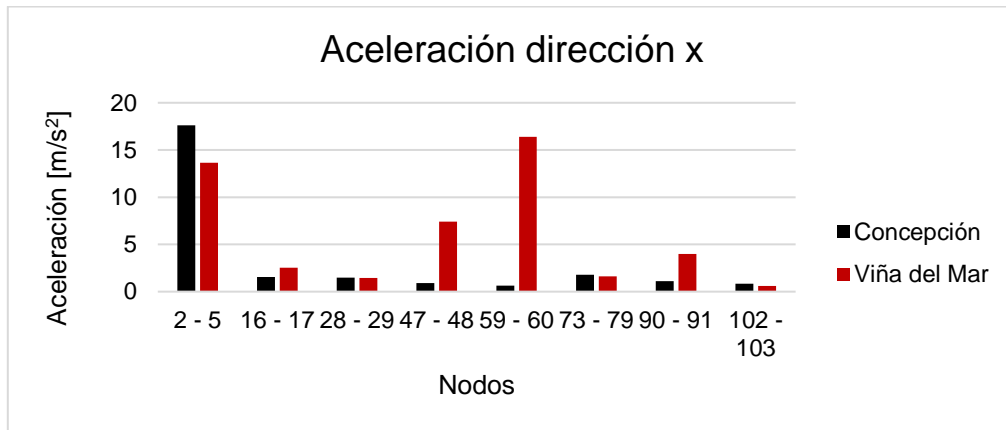


Figura 4.64: Aceleraciones máximas en la dirección "x", pasarela Chada.

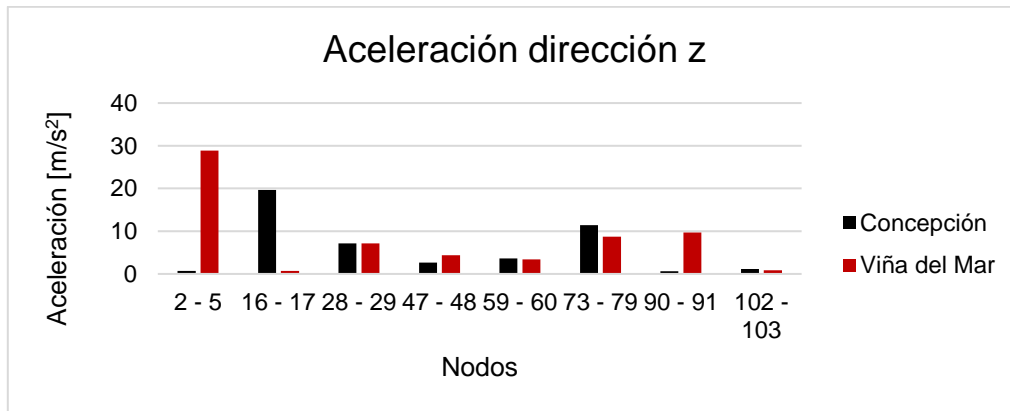


Figura 4.65: Aceleraciones máximas en la dirección "z", pasarela Chada.

5 Amortiguadores de disipación de energía

5.1 Dispositivos ADAS

Los disipadores metálicos son dispositivos que disipan energía por medio de fluencia sometidos a esfuerzos de flexión, corte y torsión. Este tipo de dispositivo permite añadir rigidez y amortiguación simultáneamente a la estructura. Las ventajas de los disipadores metálicos tipo ADAS es que pueden ser fabricados con materiales de uso común en la construcción, además la geometría del dispositivo ADAS permite la disipación de energía mediante la deformación plástica de las placas de acero [23]. En la Figura 5.1 se observa un tipo de dispositivo metálico ADAS.

En este capítulo se diseñará amortiguadores histéreticos, incorporándolos a los modelos tridimensionales de los pasos inferiores Chada, Las Mercedes, la pasarela Chada y finalmente estudiar la respuesta del sistema en términos de desplazamientos y aceleraciones. Para modelar los dispositivos ADAS en Ruaumoko [20] se utilizó elementos Spring con curva de histéresis Ramberg – Osgood modificada.

Los dispositivos ADAS fueron diseñados en función a la rigidez total de todos los apoyos elastoméricos de los pasos inferiores y la pasarela los cuales representan el 25%, 45% y 70% de la rigidez total. Se realizó este análisis para observar el comportamiento en la respuesta de las estructuras incorporando estos dispositivos. En las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran las características y propiedades del diseño de los dispositivos ADAS

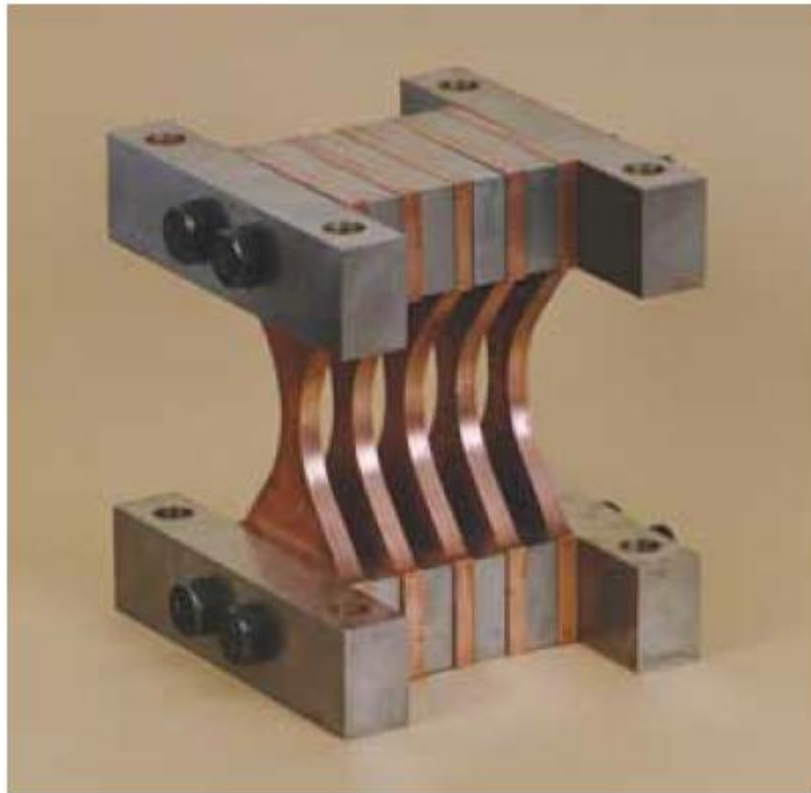


Figura 5.1: Dispositivo Metálico ADAS [23]

Tabla 5.1: Dispositivo ADAS, paso inferior Chada.

Propiedades	Valores		
% Rigidez	25	45	70
F_y [kN/m ²]	264780	264780	264780
K [kN/m]	26600	47880	74480
h [m]	0,4	0,4	0,4
b [m]	0,15	0,15	0,15
d [m]	0,035	0,04	0,046
M_p [kN-m]	12,16	15,9	21,0
N.º Placas	3	3	3
V [kN]	182,4	238,3	315,2
d [m]	0,0069	0,0050	0,0042

Tabla 5.2: Dispositivo ADAS, paso inferior Las Mercedes.

Propiedades	Valores		
% Rigidez	25	45	70
F_y [kN/m ²]	264780	264780	264780
K [kN/m]	12609	22696	35305
h [m]	0,4	0,4	0,4
b [m]	0,15	0,15	0,15
d [m]	0,025	0,028	0,032
M_p [kN-m]	6,21	7,78	10,17
N.º Placas	3	3	3
V [kN]	93,1	116,8	152,5
d [m]	0,0074	0,0051	0,0043

Tabla 5.3: Dispositivo ADAS, pasarela Chada.

Propiedades	Valores		
% Rigidez	25	45	70
F_y [kN/m ²]	264780	264780	264780
K [kN/m]	9381	16886	26267
h [m]	0,2	0,2	0,2
b [m]	0,1	0,1	0,1
d [m]	0,02	0,022	0,025
M_p [kN-m]	2,65	3,20	4,14
N.º Placas	3	3	3
V [kN]	79,4	96,1	124,1
d [m]	0,0085	0,0057	0,0047

Para métodos prácticos se diseñó los dispositivos ADAS para bajas deformaciones de fluencia, ya que se tiene en conocimiento que, en la realidad, cualquier excitación pequeña como viento, o carga viva podrían hacer entrar en funcionamiento al dispositivo y hacerlo fluir.

5.1.1 Dispositivos ADAS en Paso inferior Chada

En el Capítulo IV se analizó el paso inferior Chada en sus condiciones originales, los resultados indicaron que las demandas sísmicas provocaron que se sobrepasaran los desplazamientos límites tanto en dirección transversales y longitudinales. En este capítulo se enfocará el análisis en los desplazamientos transversales y rotacionales los cuales son responsables de los impactos del tablero entre los estribos.

Se aplicó al paso inferior Chada cuatro dispositivos ADAS, uno en cada estribo y dos en la cepa central, en la Figura 5.2 se muestra la ubicación de los dispositivos. Se diseñaron tres dispositivos ADAS cada uno con un porcentaje de rigidez en relación con la rigidez total de todos elastómeros en la superestructura. Se analizaron las respuestas para porcentajes de rigideces del 25%, 45% y 70%. El paso inferior en sus condiciones originales evidenció grandes desplazamientos transversales bajo la acción del registro sísmico de Concepción, el desplazamiento máximo se registró en los pares de nodos 74 – 77 alcanzando un desplazamiento de 13.5 [cm] sobrepasando el espaciamiento límite ubicado en los topes laterales de 5.6 [cm]. los dispositivos ADAS disminuyeron eficazmente los desplazamientos en topes laterales alcanzando valores por debajo de los límites. En la Figura 5.3 muestra la comparación de desplazamiento en el tablero bajo la acción de los registros sísmicos de Concepción y Viña del Mar.

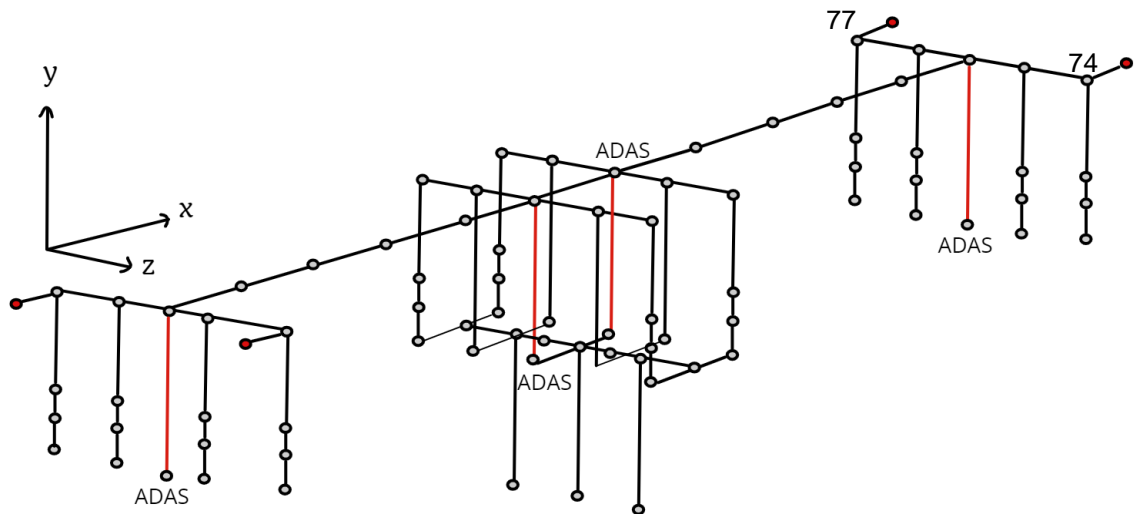


Figura 5.2: Dispositivo ADAS en paso inferior Chada.

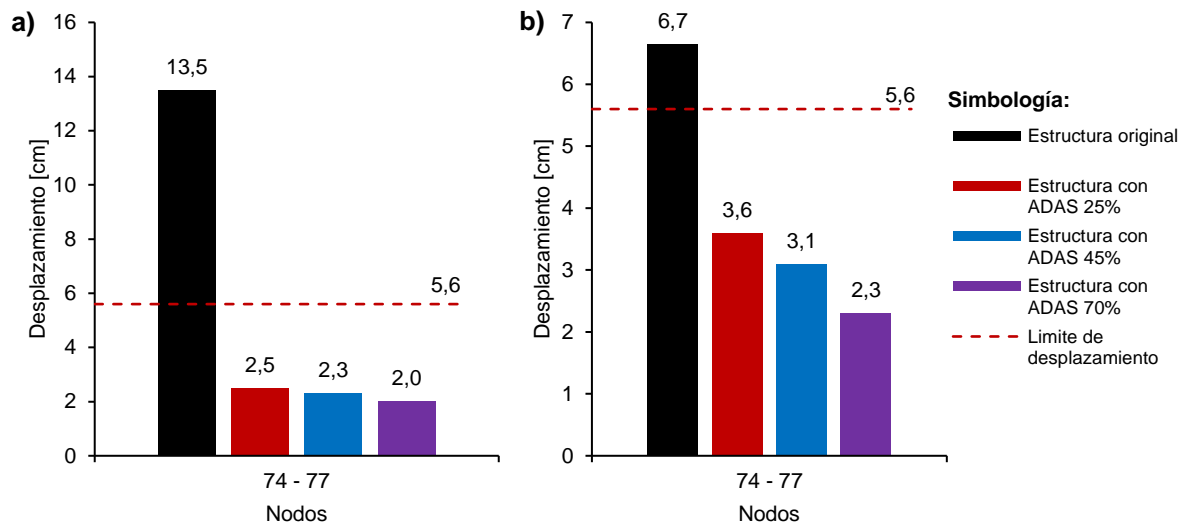


Figura 5.3: Desplazamientos Máximos transversales en el paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

El dispositivo que mejor se comportó en términos de disminución de desplazamientos fue el ADAS con un 70% de rigidez, disminuyendo en un 85.2% el registro de Concepción y con un 65.3% el registro de Viña del Mar (ver Tabla 5.4). No obstante, los tres dispositivos cumplieron el objetivo de restringir los desplazamientos sin sobrepasar los límites y así evitando el impacto entre tablero y topes laterales.

Tabla 5.4: Disminución de desplazamientos en paso inferior Chada bajo la acción de dispositivos ADAS.

Registro sísmico de Concepción			Registro sísmico de Viña del Mar		
Nodo	ADAS	% de disminución	Nodo	ADAS	% de disminución
74 - 77	25%	81,5	74 - 77	25%	46,0
74 - 77	45%	83,0	74 - 77	45%	53,9
74 - 77	70%	85,2	74 - 77	70%	65,3

Por otro lado, los elementos de impactos también superaron el distanciamiento máximo entre estribo y tablero de 8 [cm], en este capítulo no se consideró el análisis longitudinal debido que los dispositivos ADAS fueron ubicados para que aportaran rigidez transversal, por lo tanto, la disminución de desplazamiento es despreciable. Además, los problemas que originaron fallas en el colapso del tablero fue provocado por desplazamientos transversales y rotacionales.

La Figura 5.4 muestra la curva histerética de los dispositivos ADAS con 25%, 45% y 70% de rigidez ubicados en los pares de nodos 74 – 77. Las Figuras describen la máxima fuerza que alcanzan los dispositivos junto a la deformación del dispositivo y la disipación de energía.

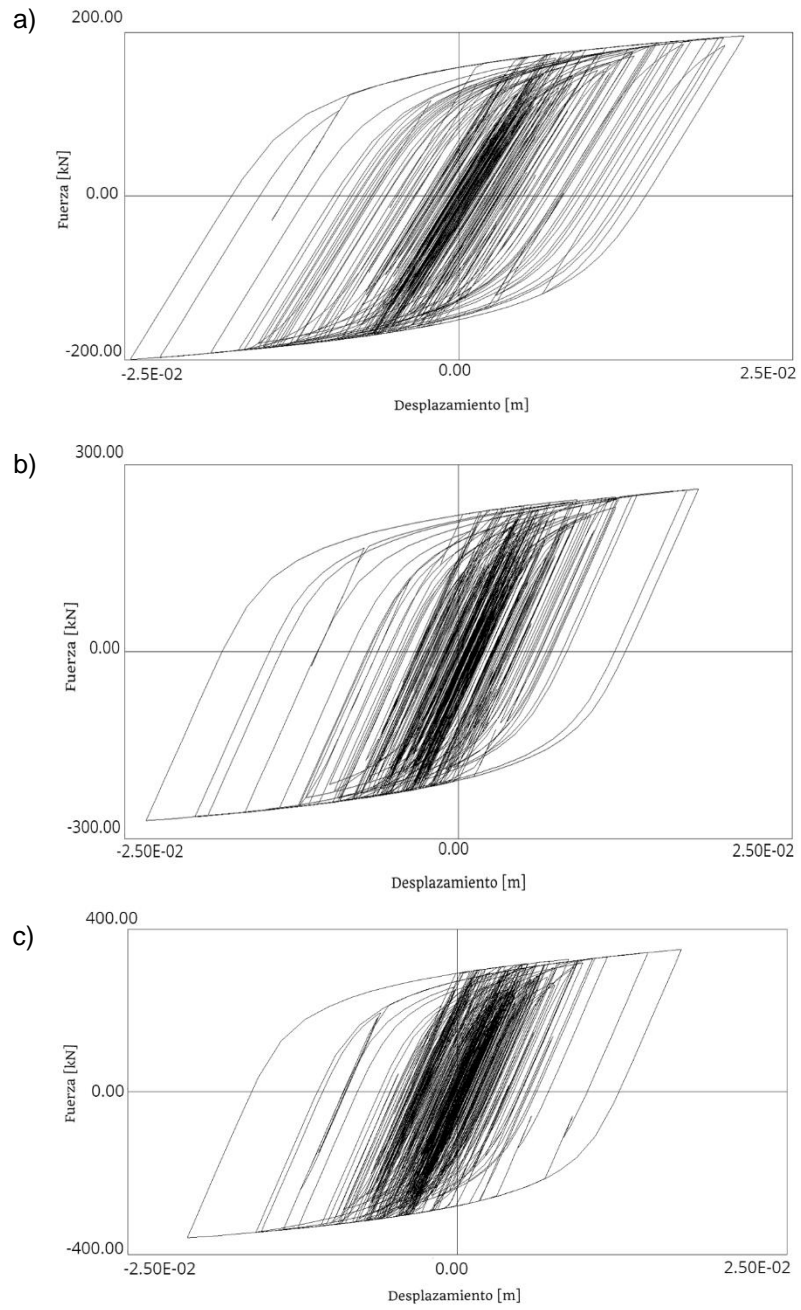


Figura 5.4: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) ADAS 25% ,b) ADAS 45%, c) ADAS 70%.

El análisis tiempo historia arrojó que los desplazamientos máximos relativos se producen bajo la acción del registro sísmico de Concepción. En la Tabla 5.5 se detallan los desplazamientos nodales en los extremos de la superestructura con el fin de analizar la diferencia que hay entre ellos para estimar la rotación que se experimenta en el tablero.

Tabla 5.5: Desplazamientos nodales en los extremos del tablero bajo la acción del registro de Concepción.

Desplazamiento transversal				Desplazamiento Longitudinal			
ADAS	Nodo	Dirección	Concepción [cm]	ADAS	Nodo	Dirección	Concepción [cm]
25%	1	Z	2,6	25%	1	X	6,9
	77	Z	2,5		77	X	6,9
45%	1	Z	2,2	45%	1	X	7,6
	77	Z	2,3		77	X	7,6
70%	1	Z	2,0	70%	1	X	7,9
	77	Z	2,0		77	X	7,9

- El dispositivo ADAS 25% el desplazamiento transversal máximo ocurre en el instante de tiempo $t = 28.17$ [s]. La diferencia entre los nodos 1 y 77 es de 0.1 [cm] Generando una pequeña rotación y con un desplazamiento 1.56 [cm] en su elastómero. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 19.85$ [s], la diferencia entre los nodos 1 y 77 es de 0 [cm].
- Para el dispositivo ADAS 45% su desplazamiento transversal máximo ocurre en el instante de tiempo $t = 32.59$ [s] y la diferencia entre los nodos 1 y 77 es de 0.1 [cm] obteniendo también pequeñas rotaciones, además el elastómero tiene una deformación de 1.44 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 19.85$ [s] y la diferencia es de 0 [cm] entre los nodos 1 y 77.
- Finalmente, el dispositivo ADAS 70% su desplazamiento transversal máximo se obtiene en el instante de tiempo $t = 32.57$ [s] con una diferencia 0 [cm] entre los nodos 1 y 77, no generando rotaciones, con una deformación en su elastómero de 1.28 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 31.15$ [s] y su diferencia también es de 0 [cm] entre los nodos 1 y 77.

Se observa que en la dirección longitudinal no se experimentan rotaciones con ningún dispositivo ADAS. Sin embargo, en la dirección transversal bajo la acción de los ADAS 25% y 45% alcanzan pequeñas rotaciones, de esta manera se evidencia que la disipación de energía controla los desplazamientos y también las rotaciones. Por último, el dispositivo ADAS 70% no genera rotación en ninguna dirección, demostrando que este disipador pasivo es una buena opción para mejorar la respuesta estructural.

Por otra parte, las aceleraciones máximas obtenidas se reflejaron en el par de nodos 8 – 11, los cuales se encuentran en los extremos de la superestructura, específicamente en los elastómeros tal y como lo presenta la Figura 5.5.

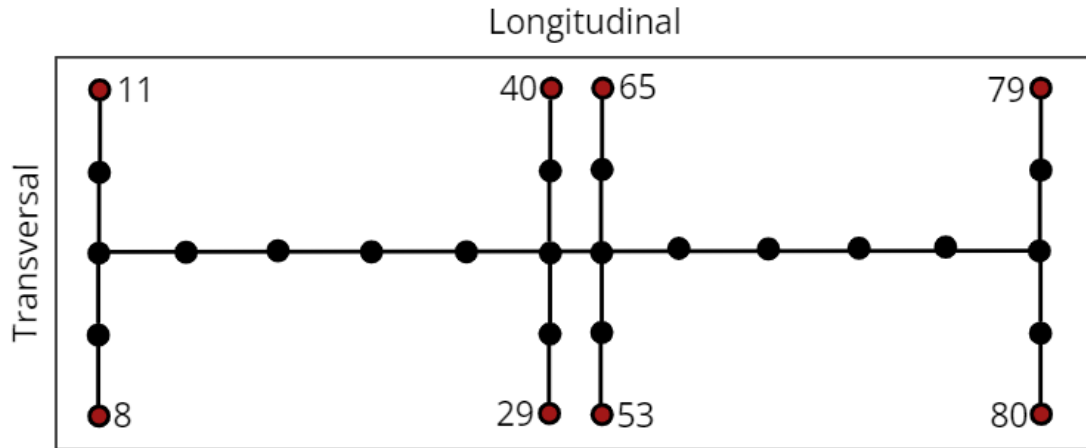


Figura 5.5: Aceleración de nodos sobre los elastómeros.

El paso inferior Chada en sus condiciones originales alcanzó en los nodos 8 – 11 una aceleración de 12.8 [m/s²] bajo la acción del registro de Concepción, en la Figura 5.6a se observan como fueron en descenso las aceleraciones con el uso de los dispositivos. Sin embargo, para el registro de Viña del Mar la aceleración máxima en su condición inicial fue de 7.12 [m/s²], en la Figura 5.6b se observa que para los dispositivos ADAS 25% y 45 % las aceleraciones se descontrolan aumentando significativamente. No obstante, para el uso del dispositivo ADAS 70% la aceleración comienza a descender con respecto al modelo original.

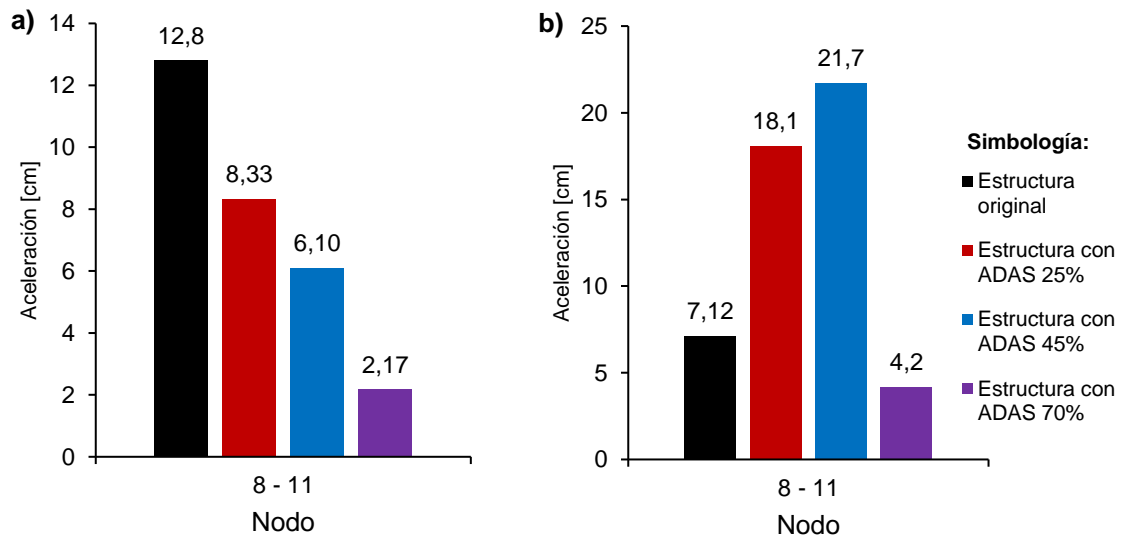


Figura 5.6: Aceleraciones Máximas transversales en el paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

Como se señaló previamente los ADAS son dispositivos que aportan rigidez a la estructura, esto provocó una tendencia en la disminución de los períodos naturales. En el contexto del paso inferior, mientras más rígida sea las estructuras los períodos tenderán a disminuir. En la Tabla 5.6 se muestran la comparación de los períodos respectivamente. El movimiento transversal es representado por el modo de vibrar 2, se aprecian que los dispositivos ADAS 25% y 45% coinciden sus peak de aceleración, esto explica el aumento considerable de aceleraciones.

Tabla 5.6: Valores de períodos con y sin dispositivos.

Modo	Período sin ADAS	Período con ADAS25%	Período con ADAS45%	Período con ADAS70%
1	0,705	0,678	0,678	0,678
2	0,704	0,434	0,360	0,306
3	0,579	0,364	0,301	0,256
4	0,146	0,105	0,101	0,098
5	0,145	0,070	0,070	0,070
6	0,114	0,070	0,070	0,070

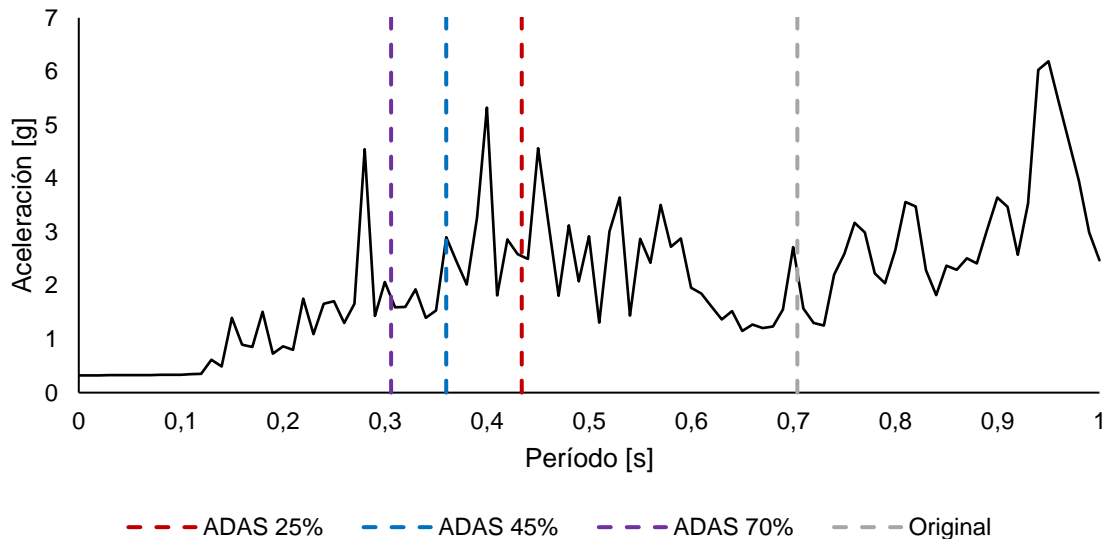


Figura 5.7: Espectro de aceleración bajo la acción del registro sísmico de Viña del Mar.

5.1.2 Dispositivos ADAS en Paso inferior Las Mercedes

En el paso inferior se aplicaron 8 dispositivos en la superestructura, dos en cada estribo y cuatro en la cepa central. En la Figura 5.8 se muestra la ubicación de los dispositivos. De forma análoga que el paso inferior Chada, se diseñaron tres dispositivos ADAS cada uno con un porcentaje de rigidez en relación con la rigidez total de todos elastómeros en la superestructura.

El paso inferior Las Mercedes en su modelo original alcanzó grandes desplazamientos transversales de 5.9 [cm] bajo la acción del registro sísmico de Concepción. En este estudio las tapas se encontraban espaciado a 8 [cm], mostrando que el modelo base no sobrepasan las distancias límites en el modelo inicial. Incluyendo los dispositivos pasivo de disipación de energía se logró disminuir la respuesta de la estructura. En la Figura 5.9 se observa los desplazamiento bajo la acción de cada dispositivo ADAS para los registros sísmico de Concepción y Viña del Mar.

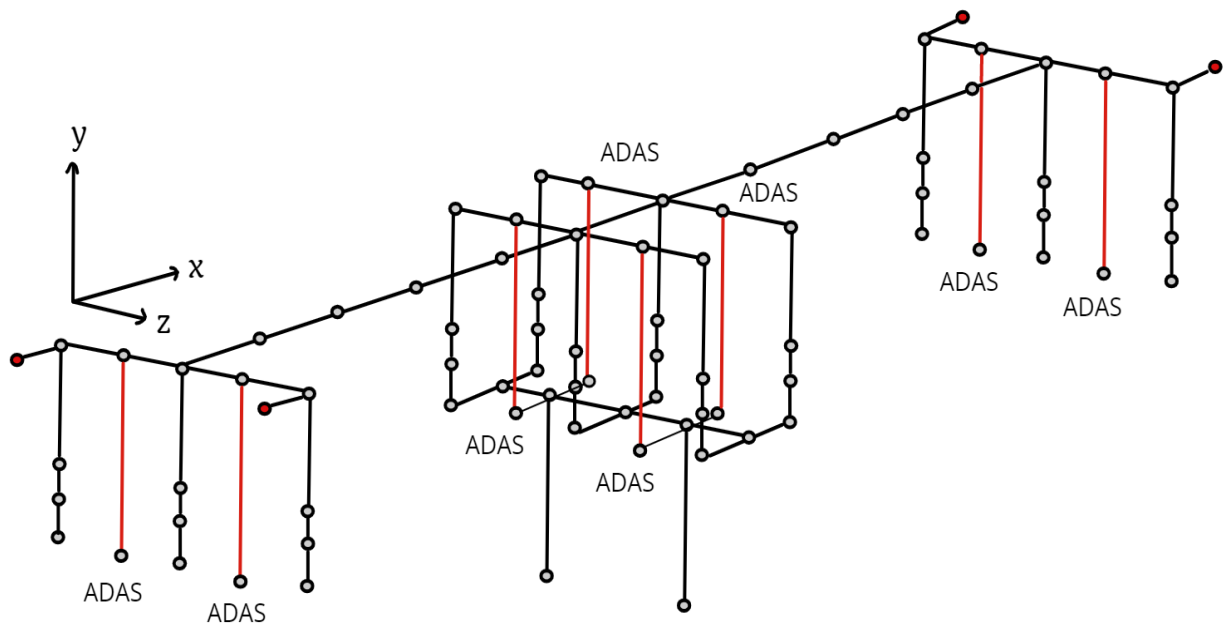


Figura 5.8: Dispositivo ADAS en paso inferior Las Mercedes

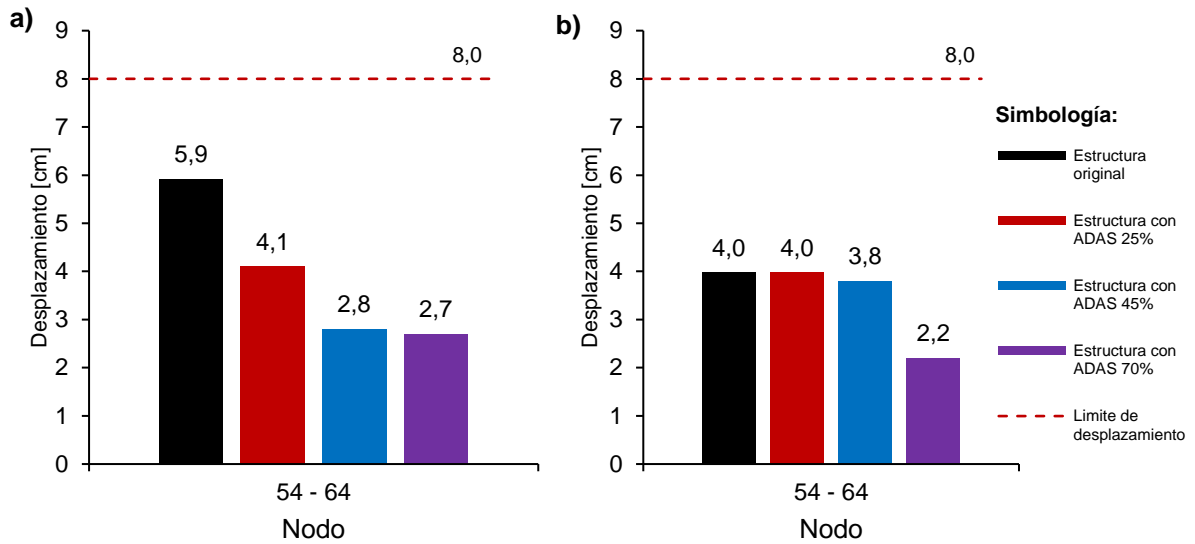


Figura 5.9: Desplazamientos Máximos transversales en el paso Las Mercedes: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

El dispositivo ADAS 70% tuvo el mejor comportamiento en la respuesta de desplazamientos, sin embargo, se aprecia que todos los dispositivos de disipación están dentro de los límites con una respuesta esperada. Los desplazamientos transversales en Concepción fue capaz de obtener mayores porcentajes de disminuciones. En cambio, los desplazamientos de Viña del Mar bajo la acción de los ADAS 25% y ADAS 45% obtuvieron porcentajes de 0.1% y 4.3% respectivamente. En la Tabla 5.7 se aprecian todos los porcentajes de disminuciones.

Tabla 5.7: Disminución de desplazamientos en paso inferior Las Mercedes bajo la acción de dispositivos ADAS.

Registro sísmico de Concepción			Registro sísmico de Viña del Mar		
Nodo	ADAS	% de disminución	Nodo	ADAS	% de disminución
54 - 64	25%	30,4	54 - 64	25%	0,1
54 - 64	45%	57,8	54 - 64	45%	4,3
54 - 64	70%	64,5	54 - 64	70%	44,6

Como ya se mencionó anteriormente los desplazamientos longitudinales no fueron relevantes en este capítulo debido que los dispositivo pasivos de disipación fueron aplicados dirección transversal aportando rigidez en esa dirección. Sin embargo, los elementos de impactos superaron los distanciamientos máximos entre estribo y tablero de 5 [cm].

La Figura 5.10 muestra la curva histerética de los dispositivos ADAS con 25%, 45% y 70% de rigidez ubicados en los pares de nodos 54 – 64. Las Figuras describen la máxima fuerza que alcanzan los dispositivos junto a la deformación del dispositivo y la disipación de energía bajo la curva.

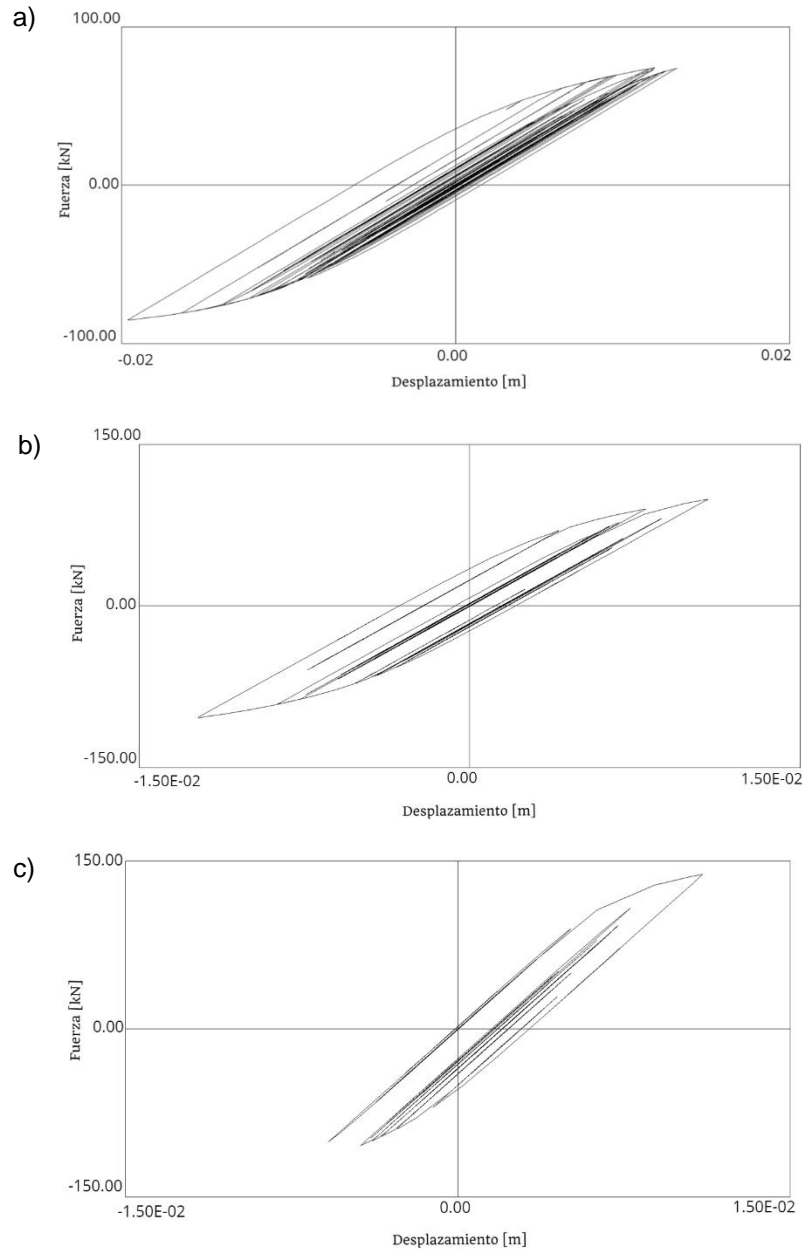


Figura 5.10: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) ADAS 25% ,b) ADAS 45%, c) ADAS 70%.

El análisis tiempo historia muestra que el registro de Concepción sigue teniendo máximas desplazamientos transversales para el paso inferior. La Tabla 5.8 señala los desplazamientos nodales en los extremos del tablero con el propósito de analizar la diferencia que existe entre ellos y así estimar la rotación que se experimenta en la superestructura.

Tabla 5.8: Desplazamientos nodales en los extremos del tablero bajo la acción del registro de Concepción

Desplazamiento transversal				Desplazamiento Longitudinal			
ADAS	Nodo	Dirección	Concepción [cm]	ADAS	Nodo	Dirección	Concepción [cm]
25%	1	Z	3,58	25%	1	X	6,9
	64	Z	4,12		64	X	7,4
45%	1	Z	2,70	45%	1	X	7,3
	64	Z	2,50		64	X	7,7
70%	1	Z	1,60	70%	1	X	7,3
	64	Z	2,10		64	X	7,7

- El desplazamiento transversal para el dispositivo ADAS 25% ocurre en el instante de tiempo $t = 28.17$ [s]. La diferencia de desplazamientos entre los nodos 1 y 64 es de 0.54 [cm] provocando pequeñas rotaciones en el tablero, además el elastómero alcanza una deformación de 3 [cm]. Siguiendo con la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 37.94$ [s] y su diferencia es de 0.5 [cm].
- El dispositivo ADAS 45% alcanza un desplazamiento máximo transversal en el instante de tiempo $t = 32.59$ [s], los nodos 1 y 64 alcanzan una diferencia de desplazamiento de 0.2 [cm], provocando una rotación en el tablero, La deformación máxima que alcanza el elastómero es de 2.29 [cm]. Por otro lado, la dirección longitudinal alcanza su máximo desplazamiento en el instante de tiempo $t = 37.93$ [s] y sus diferencias de desplazamientos es de 0.4 [cm].
- Finalmente, el dispositivo ADAS 70% su desplazamiento transversal máximo se obtiene en el instante de tiempo $t = 29.52$ [s] con una diferencia de 0.5 [cm] entre los nodos 1 y 64 generando también pequeñas rotaciones en la superestructura, el elastómero alcanza una deformación de 1.69 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 37.91$ [s] y su diferencia también es alcanza el valor de 0.4 [cm] entre los nodos 1 y 64.

El paso inferior experimentó rotaciones en dirección transversal y longitudinal, todos los desplazamientos relativos entre los nodos 1 y 64 alcanzan valores por debajo de 1 [cm], de esta manera se observa que los dispositivos pasivos de energía controlan las deformaciones evitando impactos entre el tablero y las tapas.

Por otra parte, las aceleraciones máximas obtenidas se alcanza en el par de nodos 6 – 8 para el registro sísmico de Concepción y en el par de nodos 57 – 65 para el registro sísmico de Viña del Mar. Estos nodos se encuentran ubicados en los extremos de la superestructura, específicamente en los elastómeros tal y como lo presenta la Figura 5.11.

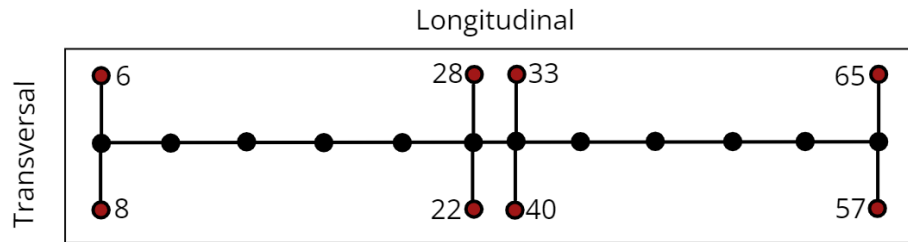


Figura 5.11: Nodos elastoméricos en el paso inferior Las Mercedes.

En la Figura 5.12 se observa un ascenso en la magnitud de aceleraciones bajo la acción de ambos registros sísmicos al implementar disipadores pasivos en el puente. Este comportamiento se explica porque al tener estructuras más rígidas hay una disminución en sus periodos naturales los cuales coinciden con el peak de los espectro de respuestas de aceleración. Lo anterior se encuentra plasmado en la Tabla 5.9 y Figuras 5.13 y 5.14, respectivamente.

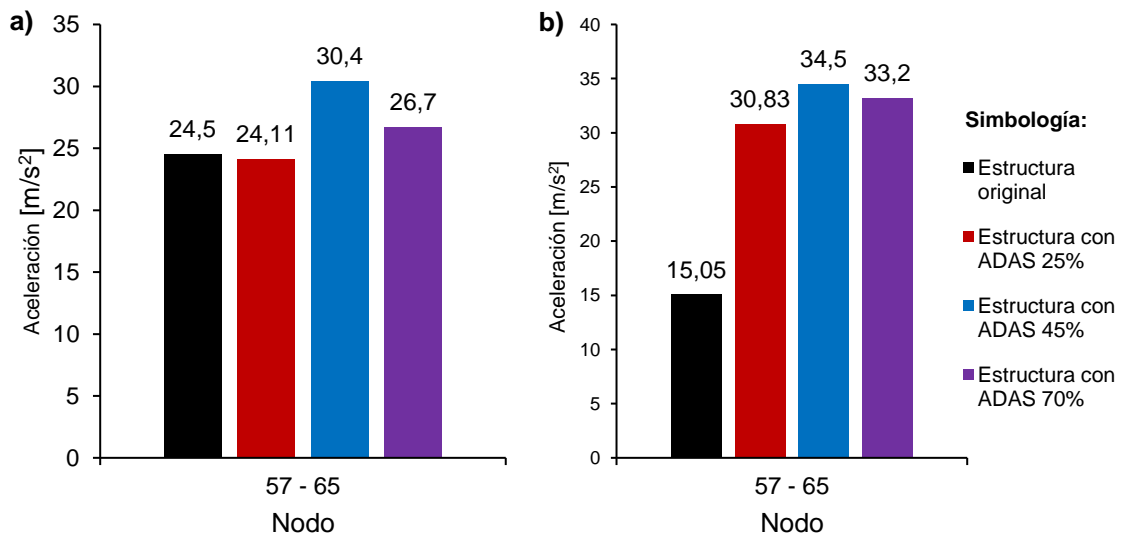


Figura 5.12: Aceleraciones Máximas transversales en el paso inferior Las Mercedes en nodos 54 – 65 : a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

Tabla 5.9: Valores de períodos con y sin dispositivos

Modo	Período sin ADAS	Período con ADAS25%	Período con ADAS45%	Período con ADAS70%
1	0,615	0,678	0,613	0,613
2	0,613	0,434	0,395	0,361
3	0,521	0,364	0,258	0,224
4	0,224	0,105	0,224	0,218
5	0,224	0,070	0,174	0,171
6	0,172	0,070	0,171	0,158

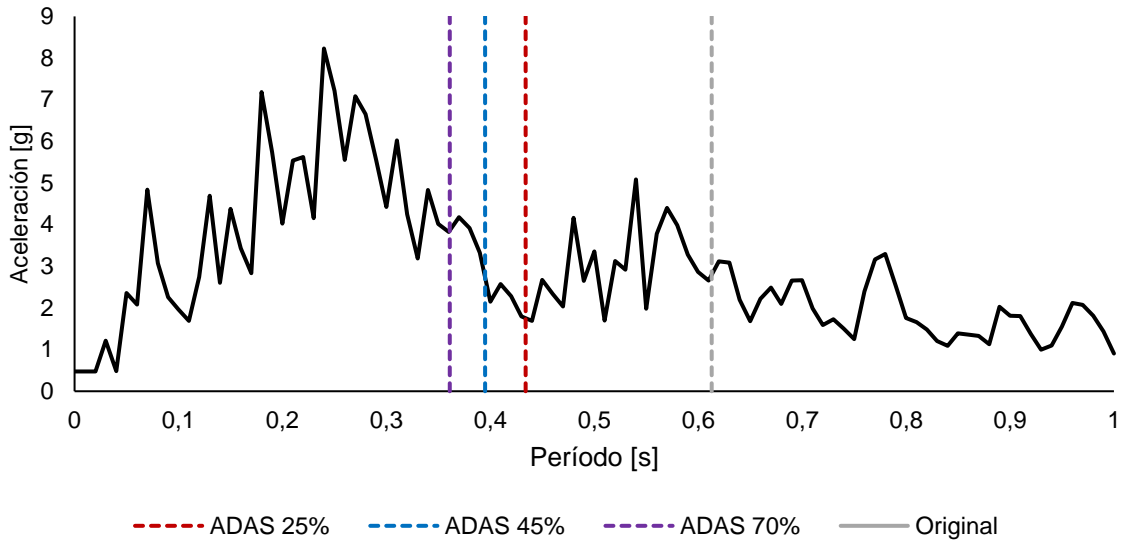


Figura 5.13: Espectro de aceleración bajo la acción del registro sísmico de Concepción.

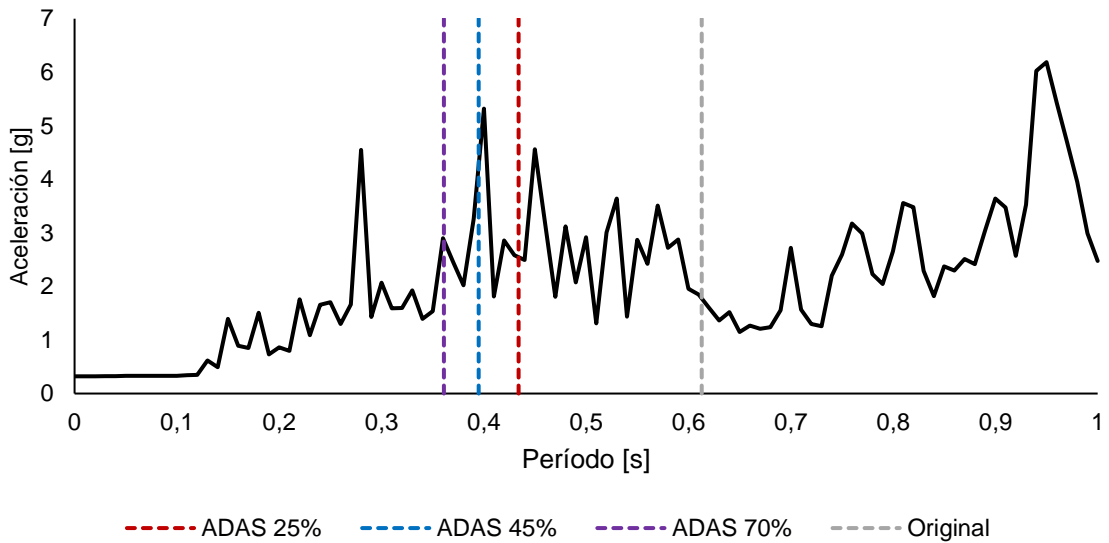


Figura 5.14: Espectro de aceleración bajo la acción del registro sísmico de Viña del Mar.

5.13 Dispositivos ADAS en Pasarela Chada

La pasarela Chada cuenta con un total de veintiocho dispositivos ADAS, dos en los extremos de cada viga, se propuso que los disipadores aportaran rigidez tanto transversal y longitudinal. Los disipadores pasivos se consideraron como el total de la rigidez de todos los elastómeros de la estructura, tomando cada caso con un 25%, 45% y 70% del total de su rigidez. En la Figura 5.15 se muestra la ubicación de los disipadores pasivos marcados en rojo.

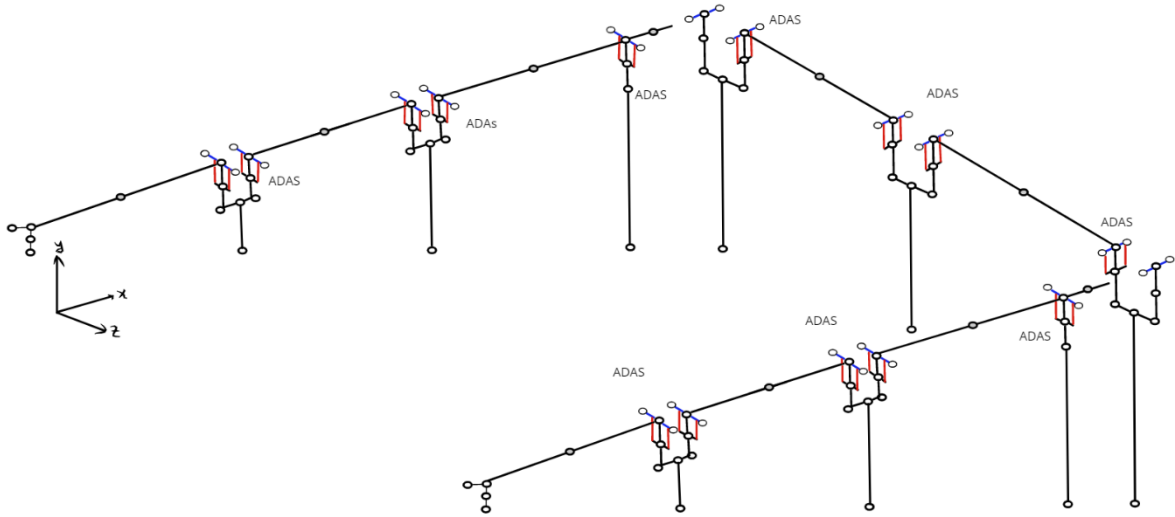


Figura 5.15: Dispositivos ADAS pasarela Chada.

En el Terremoto del Maule la pasarela Chada experimentó una falla en uno de sus elementos, se desconectó la viga 2 (rampa izquierda) con respecto a la cepa 6, dejándola inhabilitada para seguir su funcionamiento. En la Figura 5.16 se muestra las enumeraciones y las ubicaciones de los elementos estructurales que componen la pasarela.

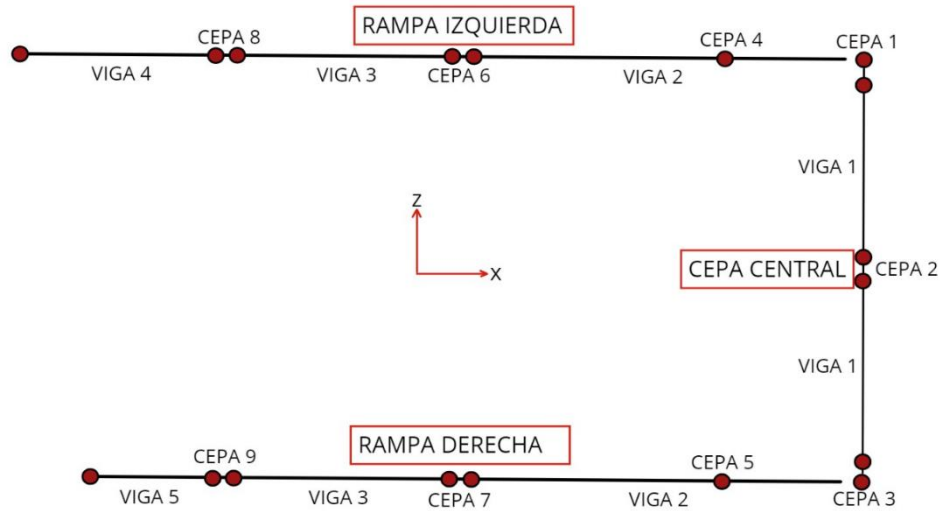


Figura 5.16: Elementos que componen la pasarela Chada.

Se realizó el análisis tiempo historia para los registros de Concepción y Viña del Mar, en la dirección transversal y longitudinal. Se revisó el desplazamiento relativo entre la viga 2 con respecto a la columna, ya que fue lo que determinó la caída y colapso de la viga en la rampa izquierda, en la Figura 5.17 se detallan las ubicaciones de los nodos sobre la pasarela. Los desplazamientos máximos relativos se observan en las Figuras 5.18 y 5.19. Cada gráfico corresponde a la respuesta estructural en términos de desplazamientos de los registros sísmicos.

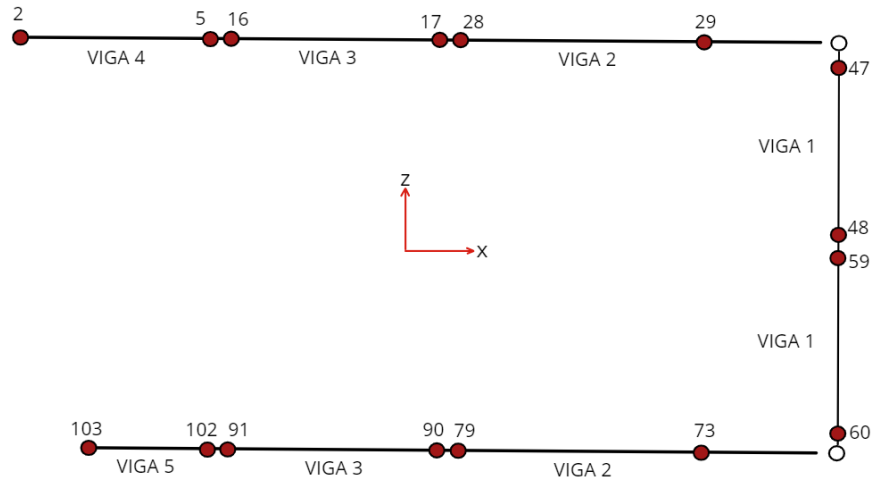


Figura 5.17: Ubicación de los nodos en vigas pretensadas en la pasarela Chada.

La pasarela en su modelo original alcanzó grandes desplazamientos transversales de 6.4 [cm] bajo la acción del registro sísmico de Viña del Mar. Las tapas se encuentran espaciadas a 3 [cm] con respecto a las vigas, por lo tanto, se sobrepasan las distancias límites en el modelo inicial. Incluyendo los dispositivos pasivo de disipación de energía se logró disminuir la respuesta de la estructura. En la Figura 5.18 se observa los desplazamiento bajo la acción de cada dispositivo ADAS.

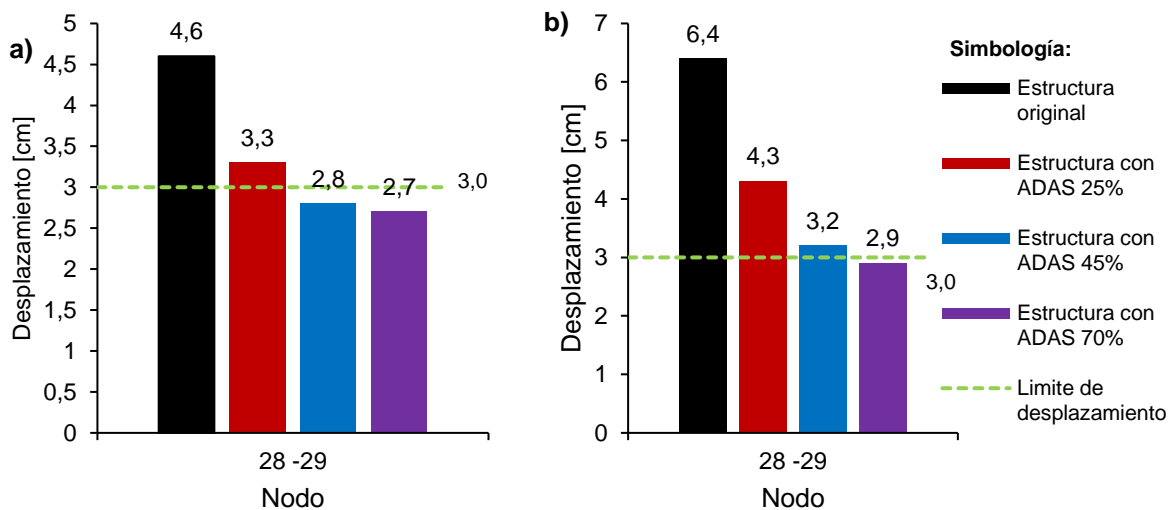


Figura 5.18: Desplazamientos Máximos transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

La viga 2 de la rampa derecha (nodos 73 – 79) es muy similar en sus dimensiones en la viga 2 en la rampa izquierda (nodos 28 – 29), se observó por medio del análisis tiempo historia resultados similares en su respuesta. Sin embargo, esta viga no presentó colapso en el Terremoto del Maule. En la Figura 5.19 se muestra los máximos desplazamientos transversales que experimentó el par de nodos 73 – 79.

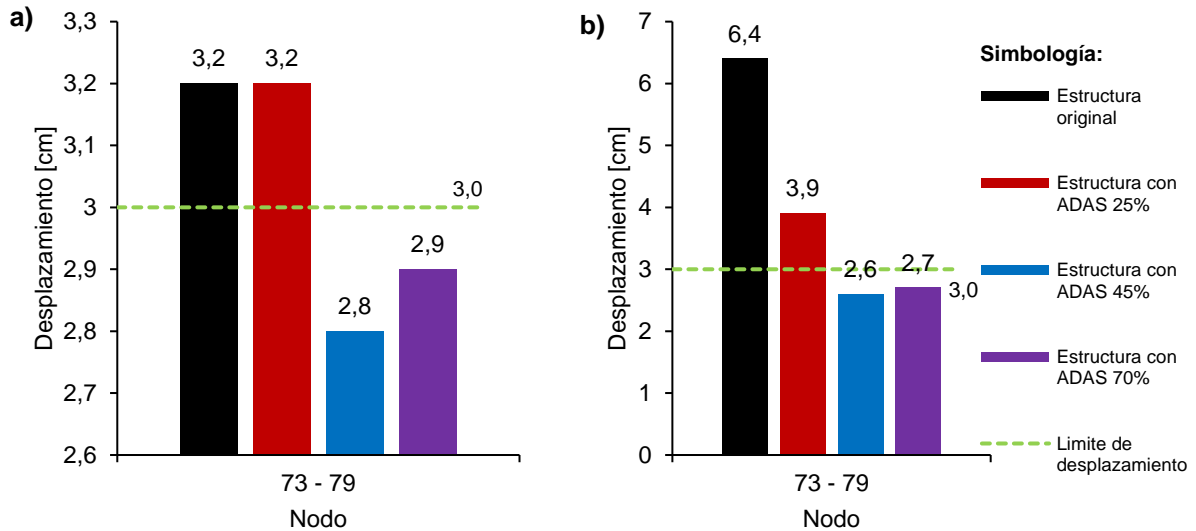


Figura 5.19: Desplazamientos Máximos transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

El dispositivo ADAS con 70% de rigidez tuvo el mejor comportamiento en la respuesta de desplazamientos relativos, se aprecia que el dispositivos ADAS 25% es el que peor se comportó sobrepasando los límites de las tapas laterales. Los desplazamientos transversales en Viña del Mar fueron capaces de obtener mayores porcentajes de disminuciones obteniendo un 85% de disminución de desplazamiento relativo. En cambio, los desplazamientos de Concepción alcanzaron un 79.9 % de disminución. En la Tabla 5.10 se aprecian todas las disminuciones expresados en porcentajes.

Tabla 5.10: Disminución de desplazamientos en pasarela Chada bajo la acción de dispositivos ADAS.

Registro sísmico de Concepción			Registro sísmico de Viña del Mar		
Nodo	ADAS	% de disminución	Nodo	ADAS	% de disminución
28 - 29	25%	28,3	28 - 29	25%	32,7
28 - 29	45%	39,1	28 - 29	45%	50,0
28 - 29	70%	79,9	28 - 29	70%	85,0

En este análisis se le implemento disipadores de energía longitudinales para prevenir excesivos desplazamientos en esa dirección, las distancias límites de 2 [cm] fueron sobrepasadas pero este problema no fue el responsable del colapso. La principal falla fue provocada por desplazamientos transversales y rotacionales en los extremos de la viga 2 en la rampa izquierda.

La Figura 5.20 muestra las curvas de histéresis de los dispositivos ADAS 25%, 45% y 70% ubicados en los nodos 28 – 29. Las Figuras describen un comportamiento lineal en los dispositivos, cuyas fuerzas máximas que experimentan los disipadores pasivos son de 30 [kN], está fuerza no activa el disipador solo aumentan la rigidez del elemento y no cumple la función principal de disipar energía.

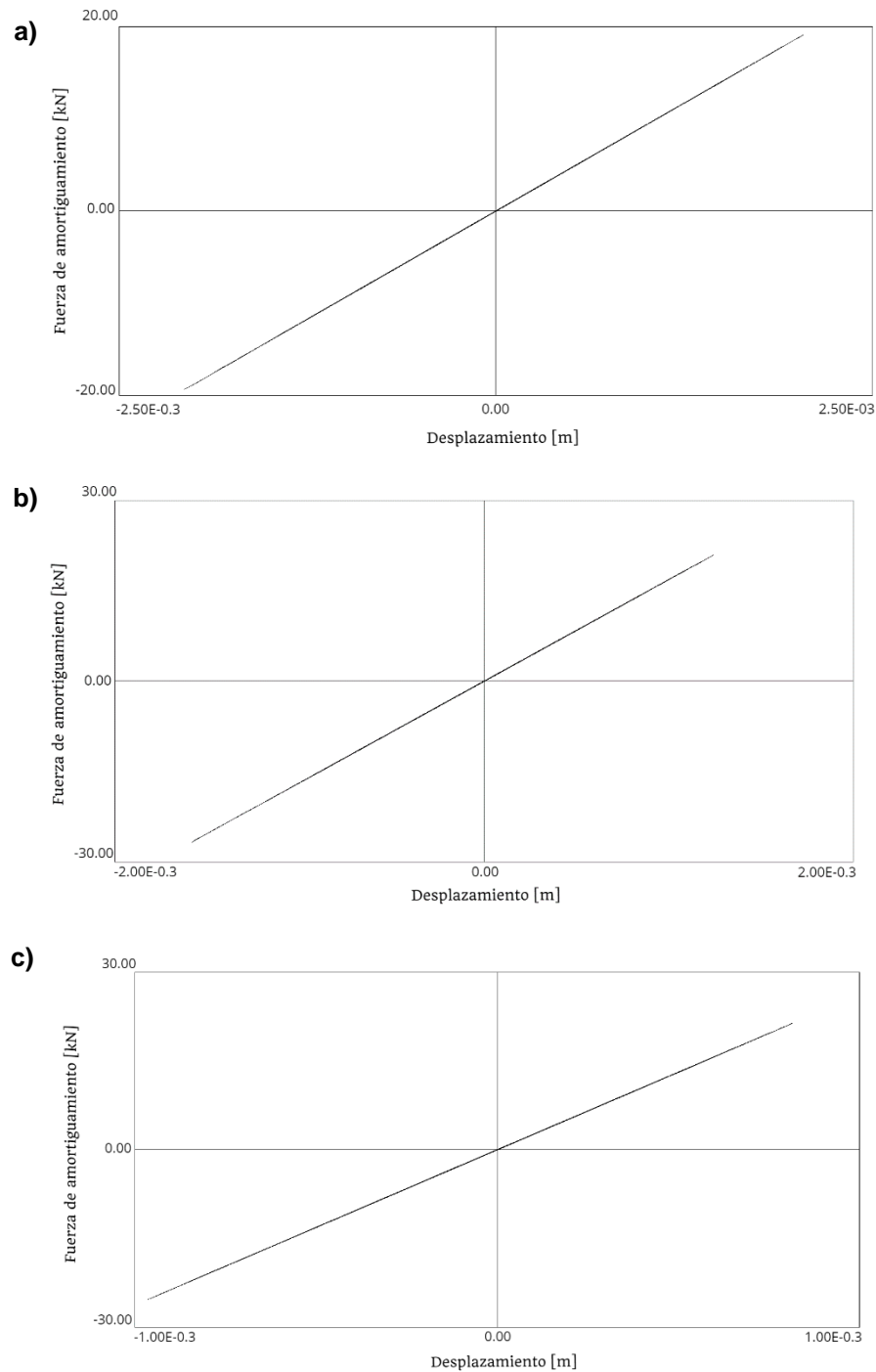


Figura 5.20: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 136 para el registro sísmico Viña del Mar: a) ADAS 25% ,b) ADAS 45%, c) ADAS 70%.

El análisis tiempo historia muestra que el registro de Viña del Mar sigue teniendo máximas desplazamientos transversales en la pasarela. La Tabla 5.11 señala los desplazamientos nodales en los extremos con el propósito de analizar la diferencia que existe entre ellos y así estimar la rotación que se experimenta en la viga 2 de la rampa izquierda.

Tabla 5.11: Desplazamientos nodales en los extremos de la viga bajo la acción del registro de Viña del Mar.

Desplazamiento transversal				Desplazamiento Longitudinal			
ADAS	Nodo	Dirección	Viña del Mar [cm]	ADAS	Nodo	Dirección	Viña del Mar [cm]
25%	28	Z	0,23	25%	28	X	1,65
	29	Z	4,31		29	X	1,67
45%	28	Z	0,20	45%	28	X	0,80
	29	Z	3,20		29	X	0,81
70%	28	Z	0,13	70%	28	X	0,99
	29	Z	2,93		29	X	1,01

- El desplazamiento transversal para el dispositivo ADAS 25% ocurre en el instante de tiempo $t = 49.57$ [s]. La diferencia de desplazamientos entre los nodos 28 y 29 es de 4.08 [cm] provocando rotaciones en la viga II, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.237 [cm]. Siguiendo con la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 52.36$ [s] y su diferencia es de 0.02 [cm].
- El dispositivo ADAS 45% alcanza un desplazamiento máximo transversal en el instante de tiempo $t = 39.32$ [s], los nodos 28 y 29 alcanzan una diferencia de desplazamiento de 3.0 [cm], provocando una rotación en el viga II, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.193 [cm]. Por otro lado, la dirección longitudinal alcanza su máximo desplazamiento en el instante de tiempo $t = 51.46$ [s] y sus diferencias de desplazamientos es de 0.01 [cm].
- Finalmente, el dispositivo ADAS 70% su desplazamiento transversal máximo se obtiene en el instante de tiempo $t = 58.26$ [s] con una diferencia de 2.8 [cm] entre los nodos 28 y 29 generando también rotaciones en la viga II, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.130 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 35.55$ [s] y su diferencia también alcanza el valor de 0.02 [cm] entre los nodos 28 y 29.

La pasarela Chada experimentó rotaciones en dirección transversal, solo el ADAS 70% alcanza desplazamientos relativos por debajo de 3 [cm], de esta manera se observa que este dispositivo pasivo de energía controla las deformaciones evitando impactos entre la viga y las tapas.

Se analizarán las aceleraciones en el par de nodos 28 – 29 para el registro sísmico de Concepción y el registro sísmico de Viña del Mar. Estos nodos se encuentran ubicados en los extremos de la viga 2 tal como lo presenta la Figura 5.17.

La pasarela en sus condiciones originales alcanzó en los nodos 28 – 29 una aceleración de 7.12 [m/s²] bajo la acción del registro de Concepción, en la Figura 5.12a se observa las aceleraciones descendiendo con el uso de los dispositivos pasivos. El registro de Viña del Mar presentó en sus condiciones iniciales una aceleración de 7.15 [m/s²], también presentando descensos en sus aceleraciones, se puede apreciar en la Figura 5.12b.

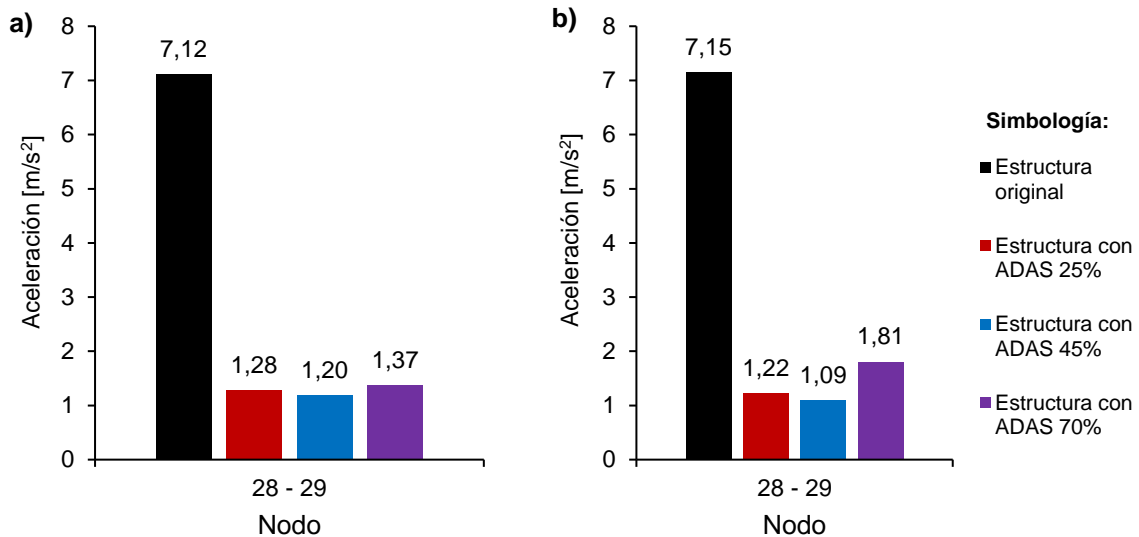


Figura 5.21: Aceleraciones Máximas transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

Los dispositivos de disipación pasivos lograron bajar las aceleraciones transversales en los nodos 28 – 29, sin embargo, para los otros nodos se observó un exceso de aceleraciones que no tienen explicación física, incluso sobrepasando las pseudos aceleraciones de los registros de Concepción y Viña del Mar, se puede observar esta anomalía en la Figura 5.22. Este fenómeno puede deberse a la calibración del modelo, para futuros trabajos de títulos se tendrá que trabajar en esta problemática.

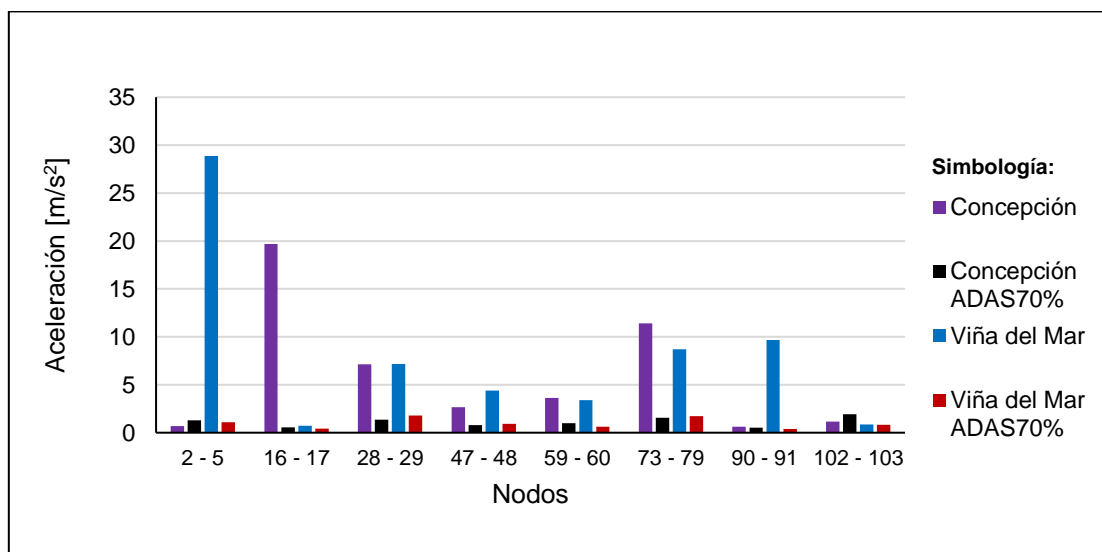


Figura 5.22: Comparación de Aceleraciones en dirección z, modelo original versus modelo ADAS70% en registro de Concepción y Viña del Mar

5.2 Amortiguadores viscosos

En esta sección se estudiará el análisis tiempo historia de los pasos inferiores Chada, Las Mercedes y la pasarela Chada. Se implementarán tres amortiguadores viscosos a cada modelo base del capítulo IV. Estos amortiguadores fueron elegidos por los catálogos de la empresa Taylor Devices [16].

Los amortiguadores viscosos funcionan proporcionando fuerzas de resistencia cuando una estructura experimenta movimientos, en el capítulo II se menciona que estos dispositivos no aportan rigidez estructural y no están diseñados para soportar cargas gravitacionales. El amortiguador viscoso se compone de un pistón el cual tiene movimientos axiales a través de un fluido generando altas presiones, cada diseño de un amortiguador viscoso produce una fuerza de resistencia máxima y ésta varía dependiendo del peak de velocidad que se alcanza en la estructura, cuanto más grande sea la velocidad, mayor será la presión que se generará dentro del pistón del amortiguado [16]. La ecuación que define la fuerza de resistencia en función de la velocidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_{\text{fuerza de amortiguamiento}} = C_{\text{constante de amortiguamiento}} * \text{Velocidad}^{\alpha}$$

α_{vd} es un coeficiente de velocidad determinado en el rango de $0.2 \leq \alpha_{vd} \leq 1$, para los casos estudios se consideró un $\alpha_{vd} = 0.3$, debido que mientras más pequeño sea α_{vd} mayor será la capacidad de disipación de energía. El dispositivo solo ofrece fuerza de resistencia y no de restauración, ya que la energía es disipada por el fluido dentro del cilindro, transformando la energía cinética en calor [14]. En la Figura 5.23 se muestra la instalación de un amortiguador viscoso.



Figura 5.23: Amortiguador viscoso [16].

Taylor Devices ofrece un amplio catálogo de amortiguadores viscosos, el tipo de amortiguador seleccionado se puede ver en la Figura 5.24, considerando los modelos 17130, 17150 y 17160. Los parámetros utilizados en el diseño del dispositivo se muestran en la Tabla 5.12.

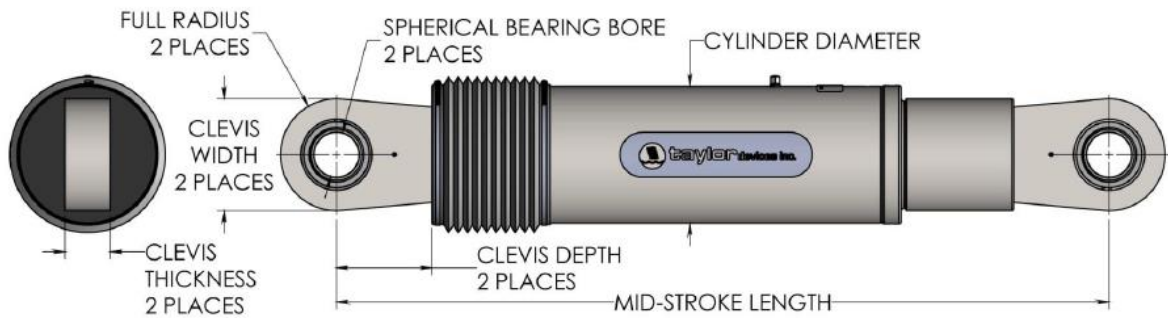


Figura 5.24: Modelo del amortiguador viscoso utilizado.

Tabla 5.12: parámetros utilizados para el diseño de amortiguadores viscosos.

Fuerza [kN]	Modelo	α	C [kN*seg/m]
500	17130	0,3	929
1000	17150	0,3	1857
1500	17160	0,3	2786

5.2.1 Amortiguador viscoso en Paso inferior Chada

Se aplicó al paso inferior Chada cuatro amortiguadores viscosos, uno en cada estribo y dos en la cepa central, en la Figura 5.25 se muestra la ubicación de los dispositivos. Se analizaron las respuestas para porcentajes de rigideces del 25%, 45% y 70%. El paso inferior en sus condiciones originales evidenció grandes desplazamientos transversales bajo la acción del registro sísmico de Concepción, el desplazamiento máximo se registró en los pares de nodos 74 – 77 alcanzando un desplazamiento de 13.5 [cm] sobrepasando el espaciamiento límite ubicado en los topes laterales de 5.6 [cm]. Los amortiguadores viscosos disminuyeron eficazmente los desplazamientos en topes laterales alcanzando valores por debajo de los límites. En la Figura 5.26 muestra la comparación de desplazamiento en el tablero bajo la acción de los registros sísmicos de Concepción y Viña del Mar

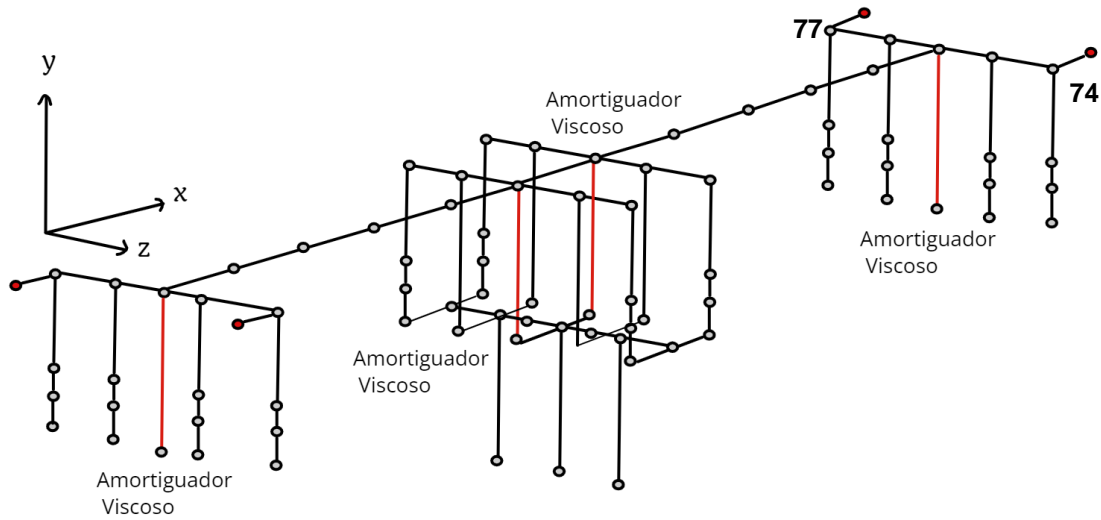


Figura 5.25: Paso inferior Chada con amortiguadores viscosos.

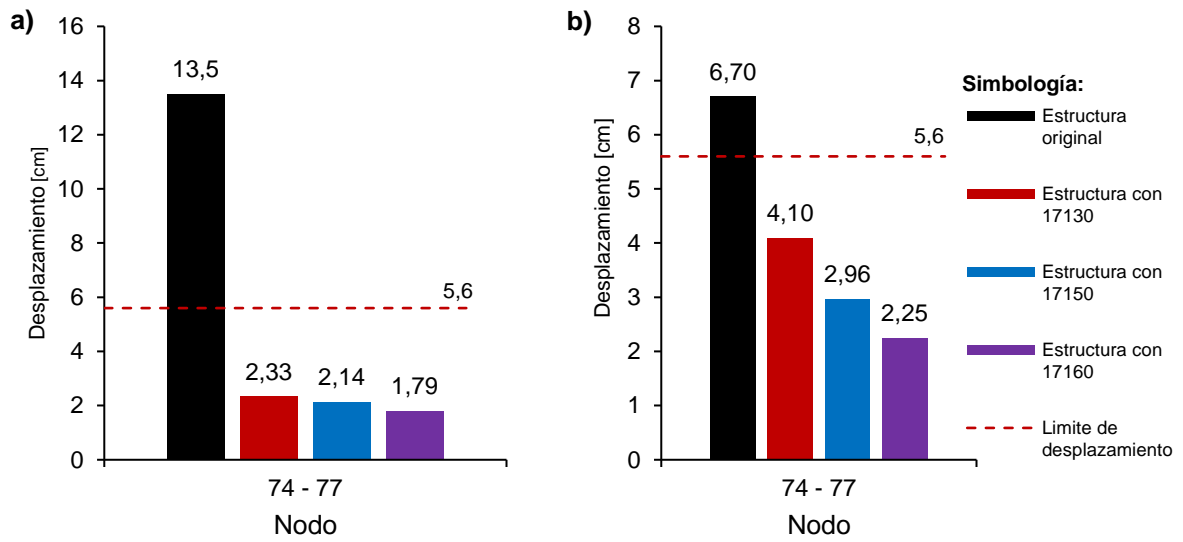


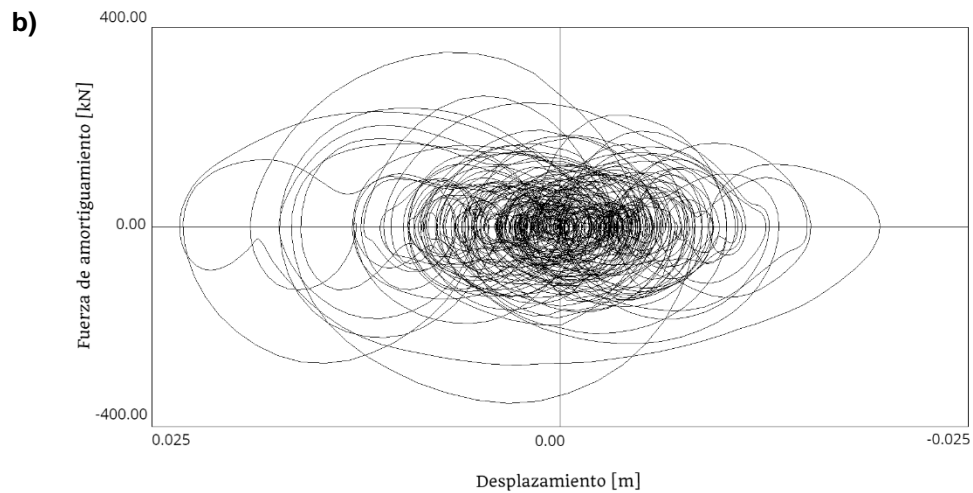
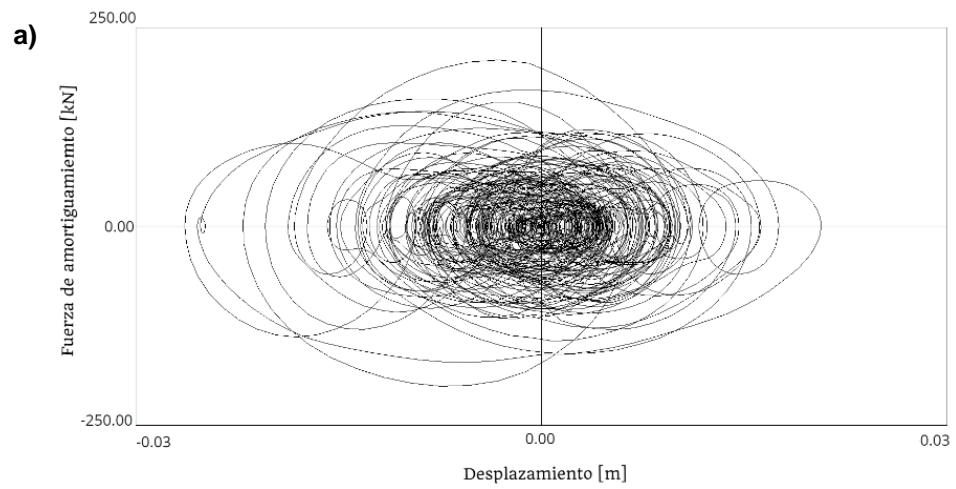
Figura 5.26: Desplazamientos Máximos transversales en el paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

El dispositivo que tuvo un mejor comportamiento en términos de disminución de desplazamientos fue el modelo 17160, disminuyendo en un 86.7% el registro de Concepción y con un 66.1% el registro de Viña del Mar, se pueden observar todas las disminuciones de los modelos en la Tabla 5.13. No obstante, los tres dispositivos cumplieron el objetivo de restringir los desplazamientos sin sobrepasar los límites y así evitando el impacto entre tablero y topes laterales.

Tabla 5.13 : Disminución de desplazamientos en paso inferior Las Chada bajo la acción de amortiguadores viscosos .

Registro sísmico de Concepción			Registro sísmico de Viña del Mar		
Nodo	Amortiguador	% de disminución	Nodo	Amortiguador	% de disminución
74 - 77	17130	82,7	74 - 77	17130	38,3
74 - 77	17150	84,2	74 - 77	17150	55,4
74 - 77	17160	86,7	74 - 77	17160	66,1

La Figura 5.27 muestra la curva histerética de los amortiguadores viscosos 17130, 17150 y 17160 ubicados en los pares de nodos 74 – 77. Las Figuras describen la máxima fuerza que alcanzan los dispositivos, la deformación del dispositivo y la disipación de energía.



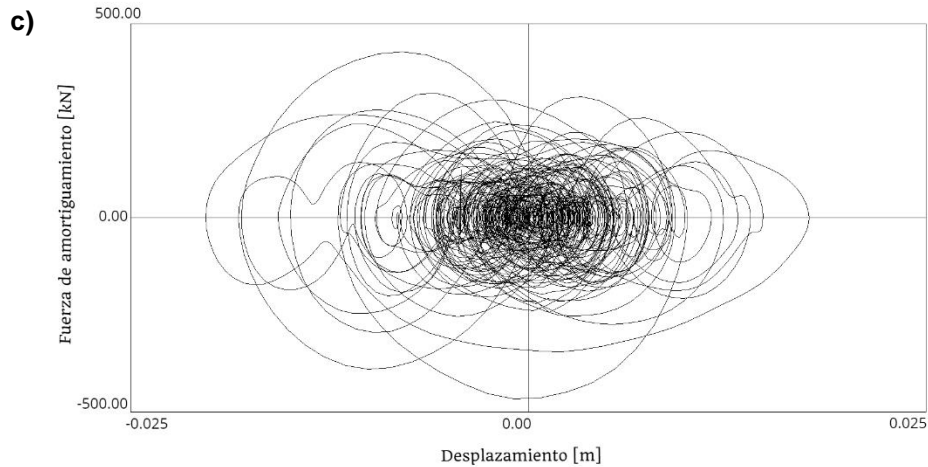


Figura 5.27: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) Amortiguador 17130 ,b) Amortiguador 17150, c) Amortiguador 17160.

El análisis tiempo historia arrojó que los desplazamientos máximos relativos se producen bajo la acción del registro sísmico de Concepción. En la Tabla 5.14 se detallan los desplazamientos nodales en los extremos de la superestructura con el fin de analizar la diferencia que hay entre ellos para estimar la rotación que se experimenta en el tablero.

Tabla 5.14: Desplazamientos nodales en los extremos de la viga bajo la acción del registro Concepción.

Desplazamiento transversal				Desplazamiento Longitudinal			
Amortiguador	Nodo	Dirección	Concepción [cm]	Amortiguador	Nodo	Dirección	Concepción [cm]
17130	1	Z	2,63	17130	1	X	7,46
	77	Z	2,33		77	X	7,45
17150	1	Z	2,33	17150	1	X	8,39
	77	Z	2,14		77	X	8,17
17160	1	Z	2,02	17160	1	X	8,60
	77	Z	1,79		77	X	8,34

- El amortiguador viscoso 17130 su desplazamiento transversal máximo ocurre en el instante de tiempo $t = 29.55$ [s]. La diferencia entre los nodos 1 y 77 es de 0.3 [cm]. Generando mínimas rotación, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 1.82 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 19.81$ [s], la diferencia entre los nodos 1 y 77 es de 0.01 [cm].
- Para el amortiguador viscoso 17150 su desplazamiento máximo transversal ocurre en el instante de tiempo $t = 31.29$ [s] y la diferencia entre los nodos 1 y 77 es de 0.19 [cm] obteniendo también mínimas rotaciones, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 1.56 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 19.80$ [s] y la diferencia es de 0.22 [cm] entre los nodos 1 y 77.
- Finalmente, amortiguador viscoso 17160 su desplazamiento transversal máximo se obtiene en el instante de tiempo $t = 19.8$ [s] con una diferencia 0.23 [cm] entre los nodos 1 y 77,

generando también como los casos anteriores mínimas rotaciones, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 1.31 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 19.8$ [s] y su diferencia también es de 0.26 [cm] entre los nodos 1 y 77.

Se observa que las direcciones longitudinales y transversales experimentan mínimas rotaciones bajo la acción de los tres modelo de disipación viscoso. Con este resultado los amortiguadores viscosos son una buena elección para evitar desplazamientos y rotaciones ya que no cambian las propiedades dinámicas en la estructura. Por último, el amortiguador 17160 fue el que mejor se comportó en la respuesta del puente, alcanzando rotaciones por debajo de los 0.26 [cm] en ambas direcciones.

Por otra parte, las aceleraciones máximas obtenidas se reflejaron en el par de nodos 8 – 11, los cuales se encuentran en los extremos de la superestructura, específicamente en los elastómeros tal y como lo presenta la Figura 5.28.

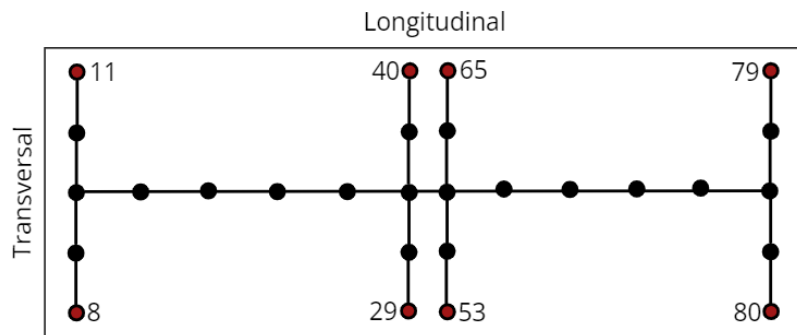


Figura 5.28: Aceleración nodal sobre elastómeros del tablero.

Como se señaló previamente los amortiguadores viscosos son dispositivos que no aportan rigidez a la estructura, esto mantiene los periodos naturales en sus condiciones originales. En el contexto del paso inferior, las aceleraciones fueron en descenso para el registro de Concepción y el registro de Viña del Mar. Se puede apreciar el comportamientos de las aceleraciones en la Figura 5.29.

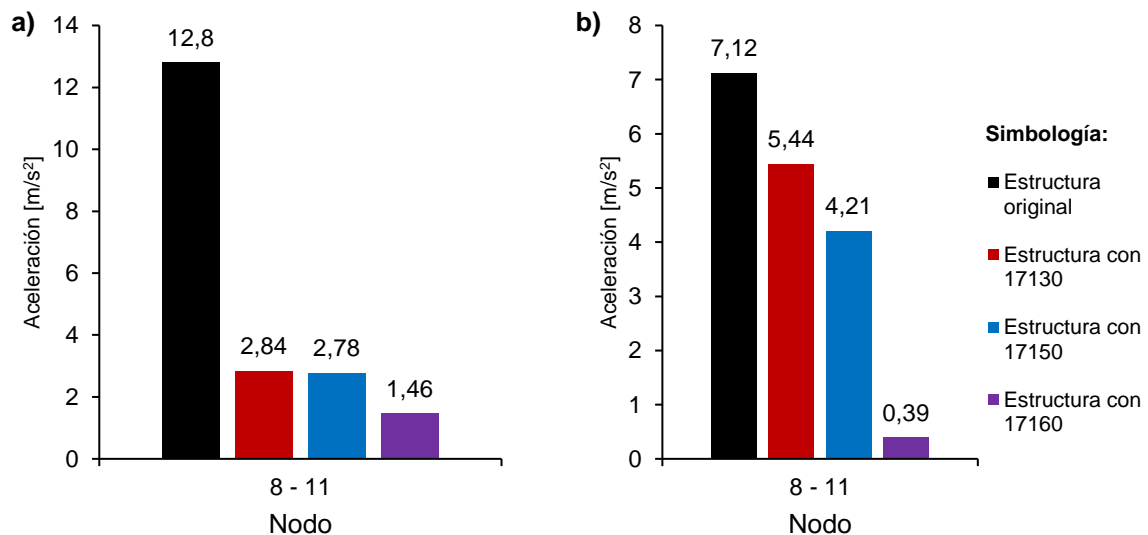


Figura 5.29: Aceleraciones Máximas transversales en paso inferior Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

5.2.2 Amortiguador viscoso en Paso inferior Las Mercedes

En el paso inferior se aplicaron 8 dispositivos en la superestructura, dos en cada estribo y cuatro en la cepa central. En la Figura 5.30 se muestra la ubicación de los dispositivos en color rojo. De forma análoga que el paso inferior Chada, se escogieron tres amortiguadores viscosos.

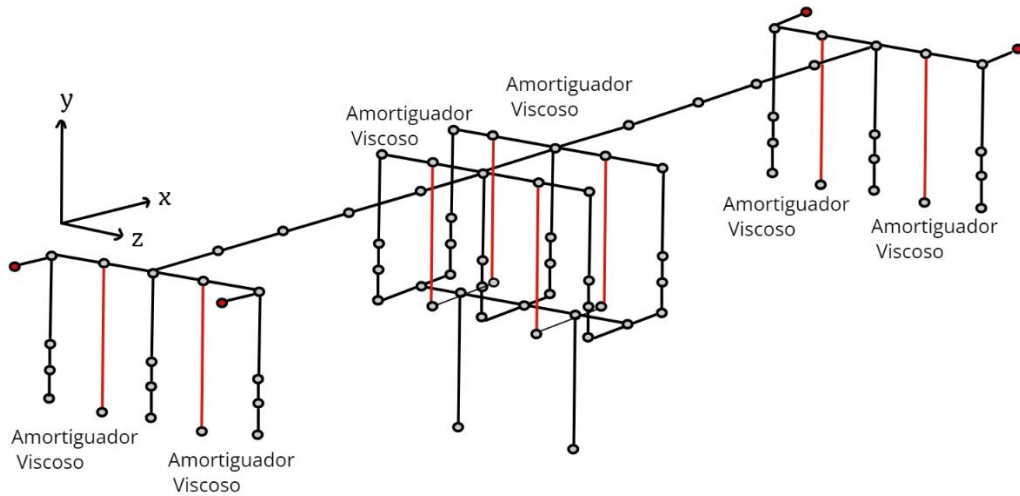


Figura 5.30: Paso inferior las mercedes con amortiguadores viscosos.

El paso inferior Las Mercedes en su modelo original alcanzó grandes desplazamientos transversales de 5.9 [cm] bajo la acción del registro sísmico de Concepción. En este estudio las tapas se encontraban espaciado a 8 [cm], mostrando que el modelo base no sobrepasan las distancias límites en el modelo inicial. Incluyendo los dispositivos pasivo de disipación de energía se logró disminuir la respuesta de la estructura. En la Figura 5.31 se observa los desplazamiento bajo la acción de cada amortiguador viscoso para los registros sísmico de Concepción y Viña del Mar.

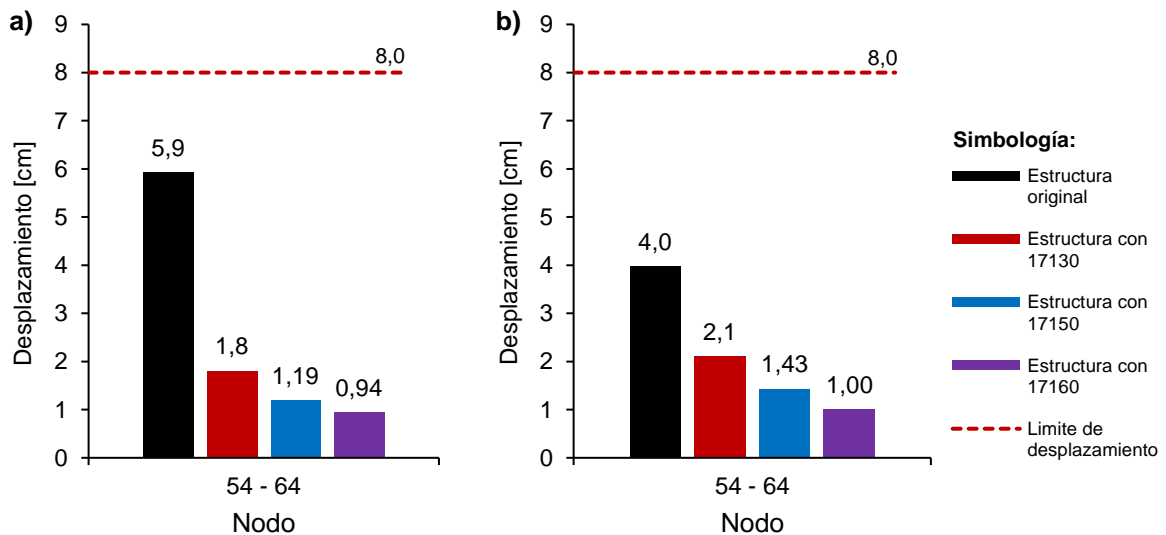


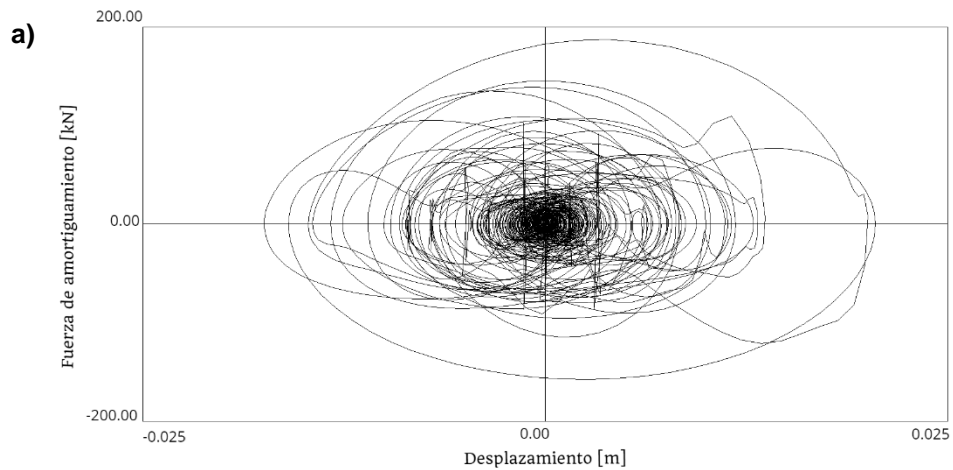
Figura 5.31: Desplazamientos Máximos transversales en el paso inferior Las Mercedes: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

El dispositivo 17160 tuvo el mejor comportamiento en la respuesta de desplazamientos relativos. Los desplazamientos transversales en Concepción fueron capaces de obtener mayores porcentajes de disminuciones obteniendo un 86.7% de disminución de desplazamiento relativo. En cambio, los desplazamientos de Viña del Mar alcanzaron un 66.1 % de disminución. En la Tabla 5.15 se aprecian todas las disminuciones expresados en porcentajes.

Tabla 5.15: Disminución de desplazamientos en paso inferior Las Chada bajo la acción de amortiguadores viscosos .

Registro sísmico de Concepción			Registro sísmico de Viña del Mar		
Nodo	Amortiguador	% de disminución	Nodo	Amortiguador	% de disminución
54 - 64	17130	82,7	54 - 64	17130	38,3
54 - 64	17150	84,2	54 - 64	17150	55,4
54 - 64	17160	86,7	54 - 64	17160	66,1

La Figura 5.32 muestra la curva histerética de los amortiguadores viscosos 17130, 17150 y 17160 ubicados en los pares de nodos 54 – 64. Las Figuras describen la máxima fuerza que alcanzan los dispositivos, la deformación de los amortiguadores y su respectiva disipación de energía.



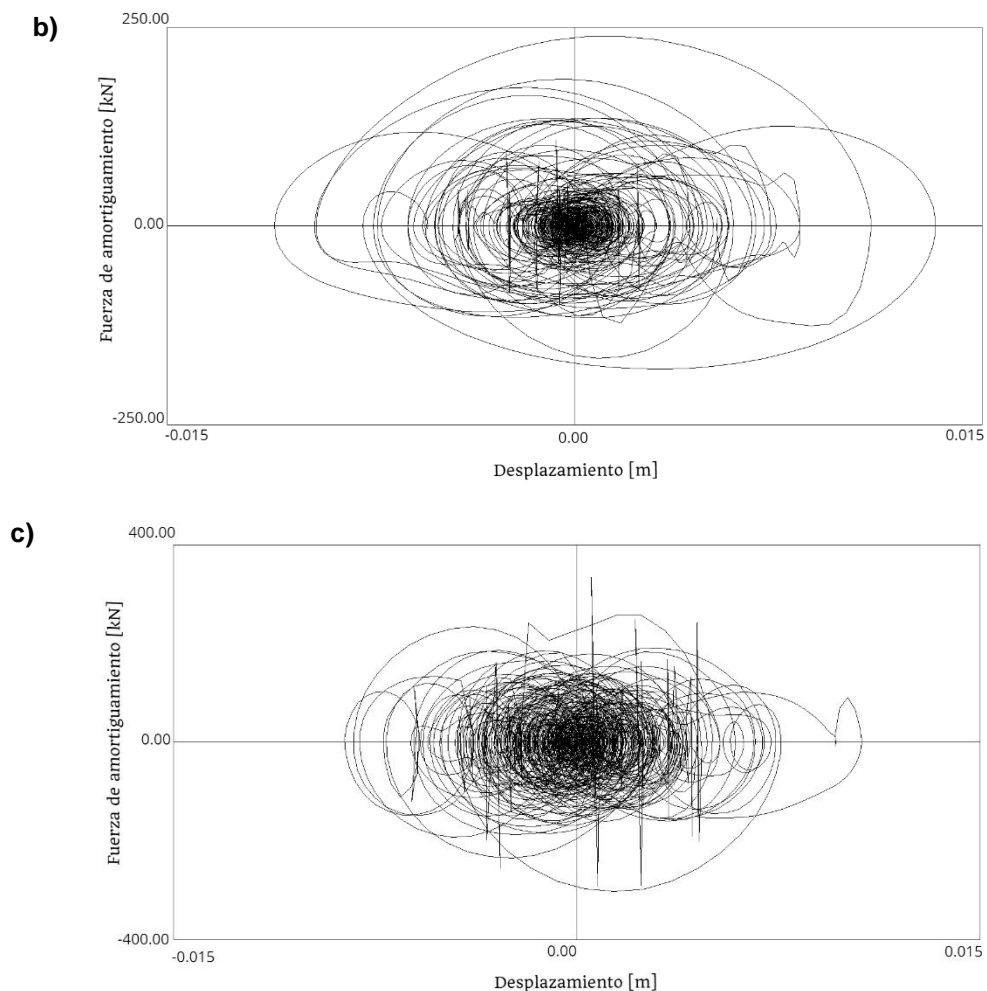


Figura 5.32: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 106 para el registro sísmico Concepción: a) Amortiguador 17130 ,b) Amortiguador 17150, c) Amortiguador 17160.

El análisis tiempo historia arrojó que los desplazamientos máximos relativos se producen bajo la acción del registro sísmico de Concepción. En la Tabla 5.16 se detallan los desplazamientos nodales en los extremos de la superestructura con el fin de analizar la diferencia que hay entre ellos para estimar la rotación que se experimenta en el tablero.

Tabla 5.16: Desplazamientos nodales en los extremos del tablero bajo la acción del registro Concepción.

Desplazamiento transversal				Desplazamiento Longitudinal			
Amortiguador	Nodo	Dirección	Concepción [cm]	Amortiguador	Nodo	Dirección	Concepción [cm]
17130	1	Z	1,77	17130	1	X	7,36
	64	Z	1,75		64	X	7,70
17150	1	Z	1,32	17150	1	X	7,23
	64	Z	1,19		64	X	7,47
17160	1	Z	1,05	17160	1	X	7,35
	64	Z	0,94		64	X	7,64

- El desplazamiento transversal con el uso del amortiguador viscoso 17130 ocurre en el instante de tiempo $t = 30.66$ [s]. La diferencia de desplazamientos entre los nodos 1 y 64 es de 0.02 [cm] provocando mínimas rotaciones en el tablero, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 1.49 [cm]. Siguiendo con la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 31.35$ [s] y su diferencia es de 0.34 [cm].
- El amortiguador viscoso 17150 alcanza un desplazamiento máximo transversal en el instante de tiempo $t = 49.27$ [s], los nodos 1 y 64 alcanzan una diferencia de desplazamiento de 0.13 [cm], provocando mínimas rotaciones en el tablero, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 1.01 [cm]. Por otro lado, la dirección longitudinal alcanza su máximo desplazamiento en el instante de tiempo $t = 37.92$ [s] y sus diferencias de desplazamientos es de 0.24 [cm].
- Finalmente, el amortiguador 17160 su desplazamiento transversal máximo se obtiene en el instante de tiempo $t = 30.81$ [s] con una diferencia de 0.11 [cm] entre los nodos 1 y 64 generando también pequeñas rotaciones en la superestructura, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.79 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 37.91$ [s] y su diferencia también es alcanza el valor de 0.29 [cm] entre los nodos 1 y 64.

El paso inferior experimentó rotaciones despreciables en dirección transversal y longitudinal, todos los desplazamientos relativos entre los nodos 1 y 64 alcanzan valores por debajo de 1 [cm], de esta manera se observa que los amortiguadores viscosos controlan las deformaciones evitando impactos entre el tablero y las tapas.

Las aceleraciones máximas obtenidas se alcanza en el par de nodos 8 – 11 para el registro sísmico de Concepción y el registro sísmico de Viña del Mar. Estos nodos se encuentran ubicados en los extremos de la superestructura, específicamente en los elastómeros tal y como lo presenta la Figura 5.33.

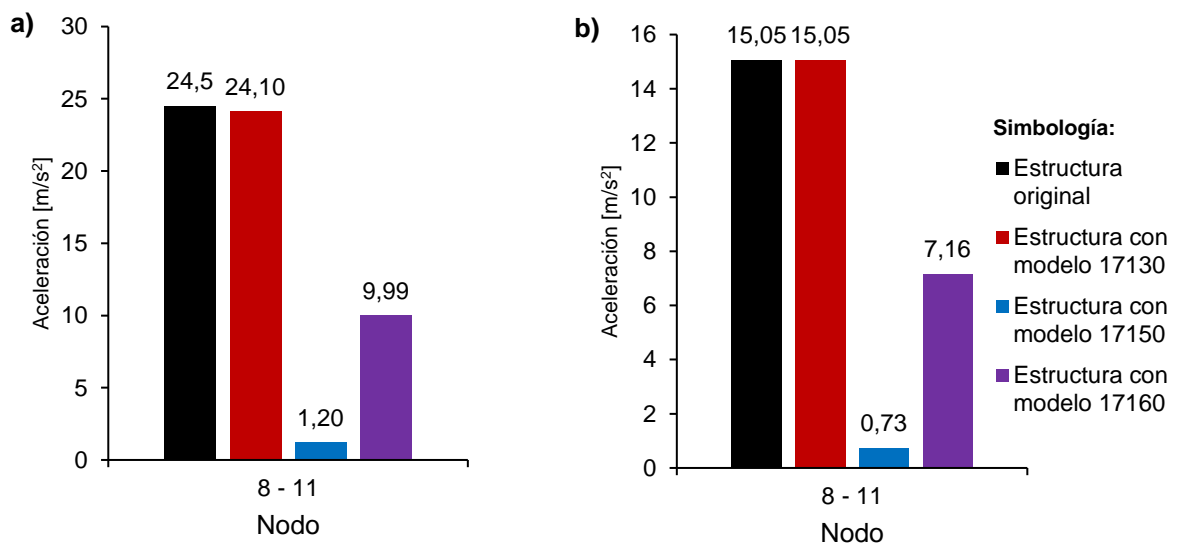


Figura 5.33: : Aceleraciones Máximas transversales en paso inferior Las Mercedes: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

Los amortiguadores viscosos lograron bajar las aceleraciones transversales solo con el uso de los modelo 17150, 17160 en el registro de Concepción y Viña del Mar. Sin embargo, para el modelo 17130 se observó un peak en sus aceleraciones, esto se debe que el amortiguamiento que aporta a la estructura no genera una mayor disminución en los espectro de aceleraciones, en la Tabla 5.17 se observa los periodos naturales del paso inferior y en la Figura 5.34 el espectro de aceleraciones bajo el registro de Concepción con el uso del amortiguador 17130.

Tabla 5.17: Periodos naturales del paso inferior Las Mercedes bajo la acción de los amortiguadores.

Modo	Período
1	0,615
2	0,613
3	0,521
4	0,224
5	0,224
6	0,172

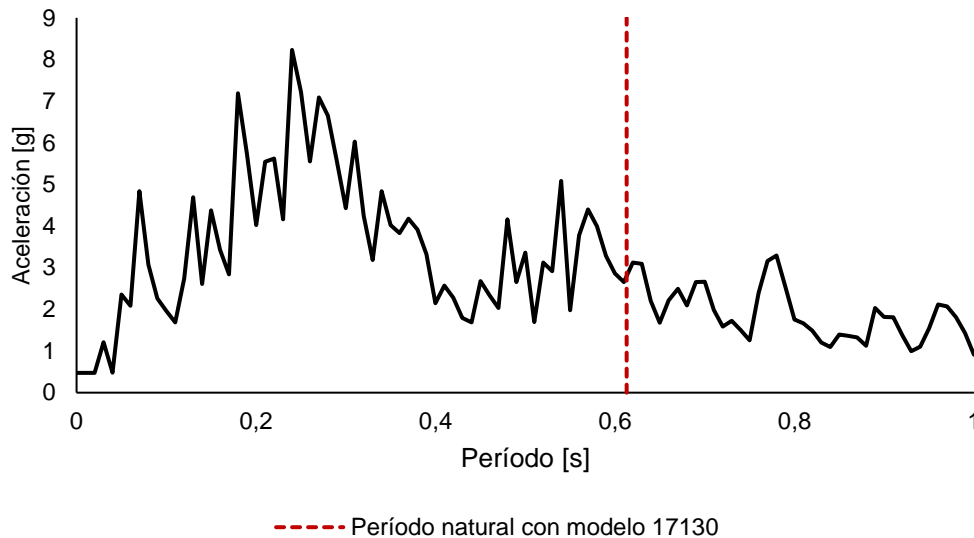


Figura 5.34: Espectro de aceleraciones con amortiguamiento, modelo 17130.

5.2.3 Amortiguador viscoso en Pasarela Chada

La pasarela cuenta con un total de veintiocho amortiguadores viscosos, dos en los extremos de cada viga, cada amortiguador se activa por demandas velocidad. Los amortiguadores viscosos fueron ubicados de tal manera para que se activaran al momento que la estructura se mueva en dirección transversal y longitudinal. En la Figura 5.15 se muestra la ubicación de los disipadores pasivos marcados en rojo.

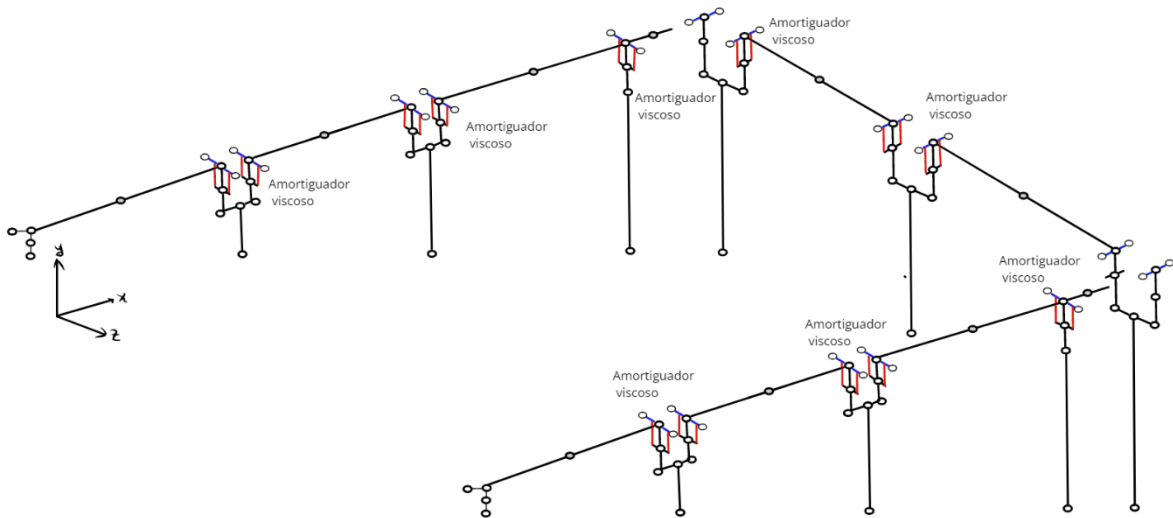


Figura 5.35: Amortiguadores viscosos en pasarela Chada.

La pasarela en su modelo original alcanzó grandes desplazamientos transversales de 6.4 [cm] bajo la acción del registro sísmico de Viña del Mar. Las tapas se encuentran espaciadas a 3 [cm] con respecto a las vigas, por lo tanto, se sobrepasan las distancias límites en el modelo inicial. Incluyendo los dispositivos pasivo de disipación de energía se logró disminuir la respuesta de la estructura, se pueden apreciar los nodos 28 – 29 en la Figura 5.35 y en la Figura 5.36 se observa los desplazamiento bajo la acción de cada amortiguador viscoso.

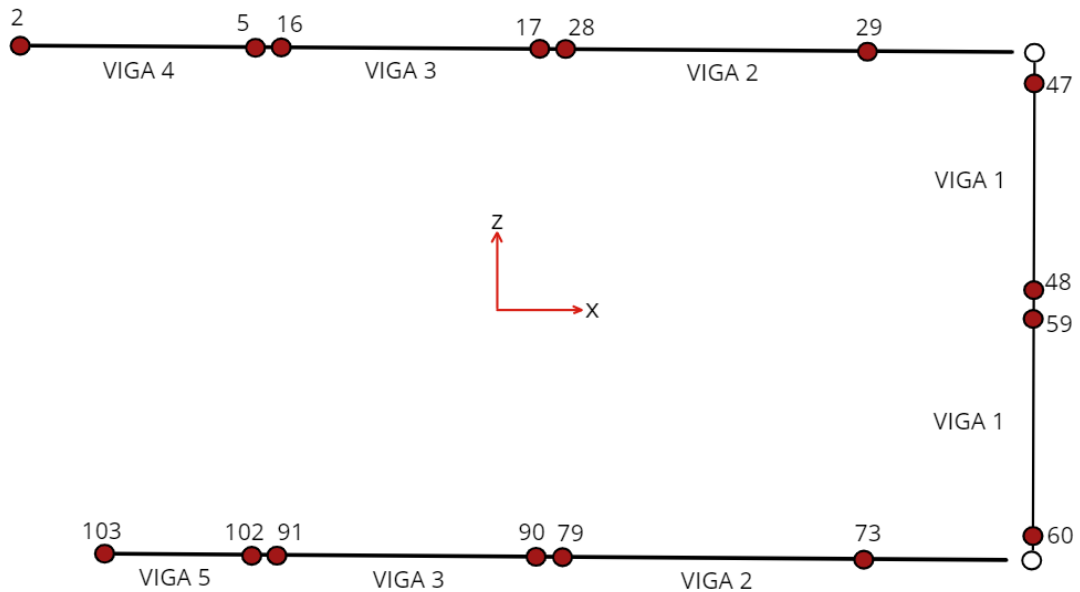


Figura 5.35: Nodos en pasarela Chada, vista en planta.

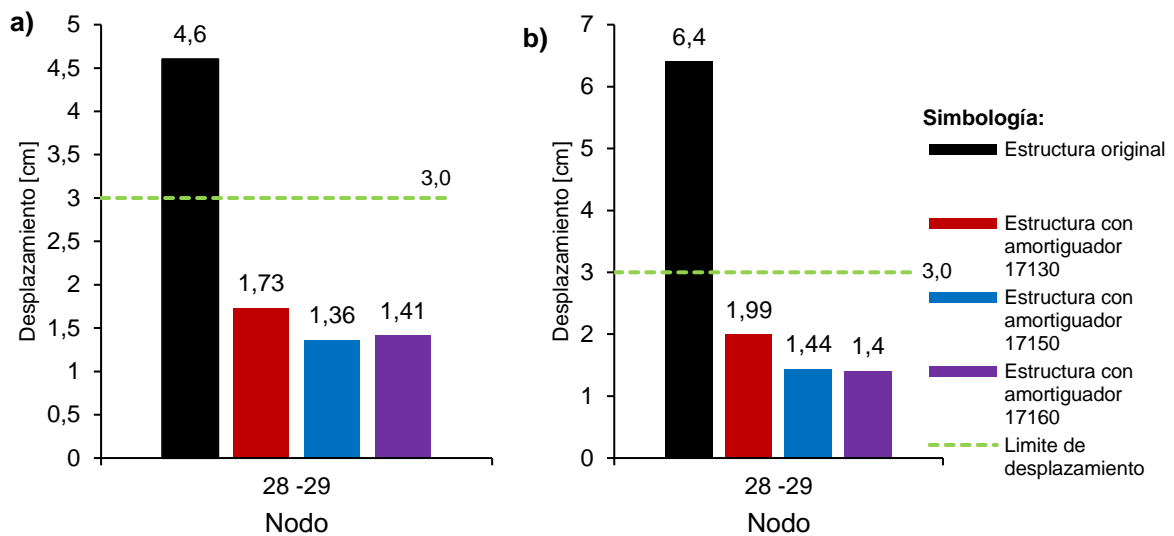


Figura 5.36: Desplazamientos Máximos transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

Se aprecia que los amortiguadores viscosos tuvieron un buen comportamiento ya que ninguno sobrepasó los límites de las tapas laterales. En el modelo 17160 los desplazamientos transversales en Viña del Mar fueron capaces de obtener mayores porcentajes de disminuciones obteniendo un 78.2% de disminución de desplazamiento relativo. En cambio, los desplazamientos de Concepción alcanzaron un 69.3 % de disminución en el modelo 17160. En la Tabla 5.17 se aprecian todas las disminuciones expresados en porcentajes.

Tabla 5.17: Disminución de desplazamientos en pasarela Chada bajo la acción de amortiguadores viscosos.

Registro sísmico de Concepción			Registro sísmico de Viña del Mar		
Nodo	Amortiguador	% de disminución	Nodo	Amortiguador	% de disminución
28 - 29	17130	62,3	28 - 29	17130	69,0
28 - 29	17150	70,4	28 - 29	17150	77,5
28 - 29	17160	69,3	28 - 29	17160	78,2

Sin embargo, los elementos de impactos superaron los distanciamientos máximos longitudinales entre sus vigas contiguas de 2 [cm]. Ningún dispositivo pudo disminuir las distancias máximas entre las juntas de dilatación, pero la desconexión de la viga con respecto a la cepa fue causada por desplazamientos transversales y sus respectivas rotaciones.

La Figura 5.37 muestra las curvas de histéresis ubicados en los nodos 28 – 29. Los amortiguadores no superan los 30 [kN] en fuerza de resistencia y las deformaciones alcanzadas por los amortiguadores son del orden 0.15 [cm], mostrando que la disipación de energía es pequeña respecto a los pasos inferiores.

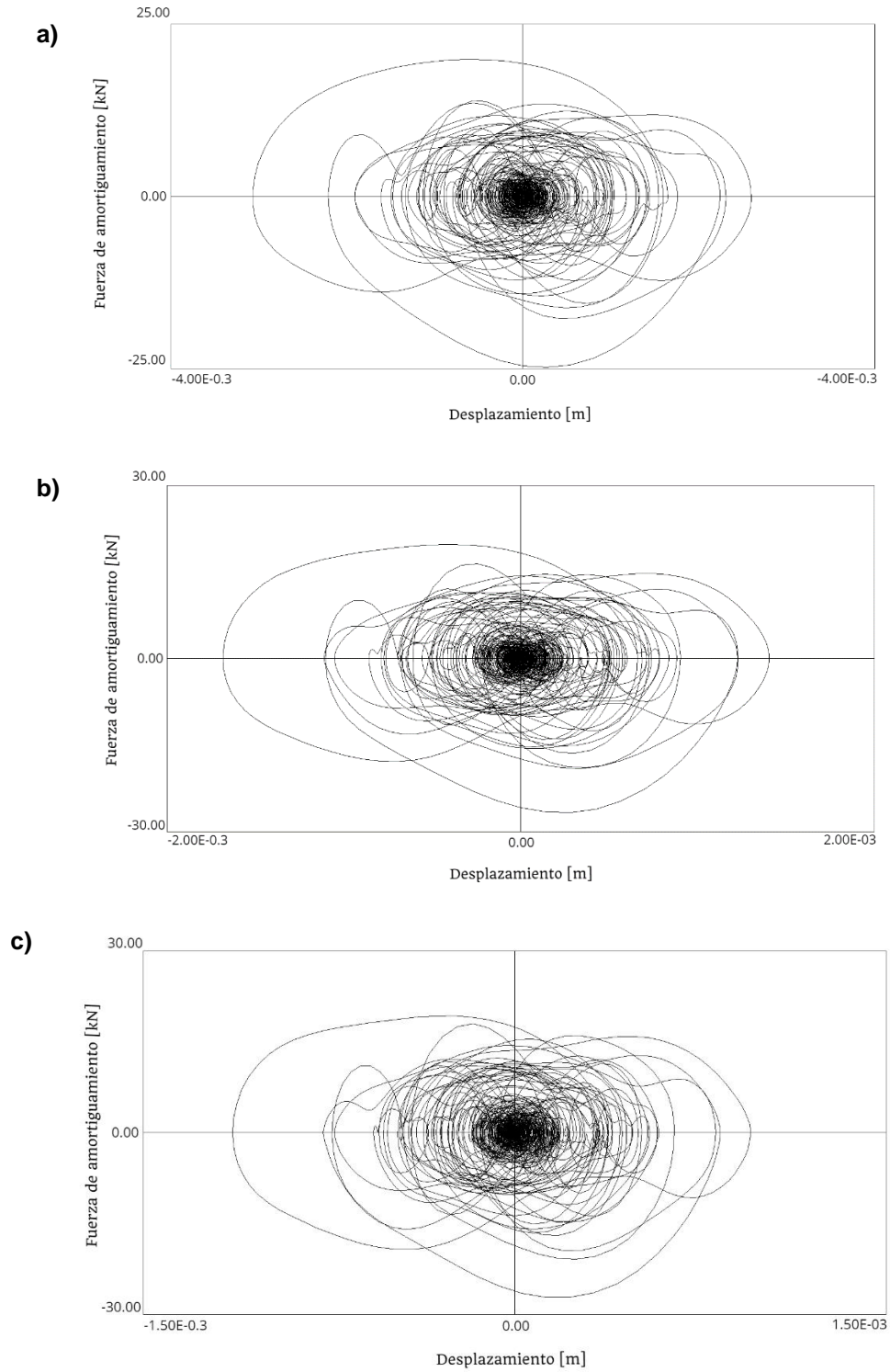


Figura 5.37: Curvas de histéresis fuerza – desplazamiento en el elemento 136 para el registro sísmico Viña del Mar: a) Amortiguador 17130 ,b) Amortiguador 17150, c) Amortiguador 17160.

El análisis tiempo historia muestra que el registro de Viña del Mar sigue teniendo máximas desplazamientos transversales en la pasarela. La Tabla 5.18 señala los desplazamientos nodales en los extremos con el propósito de analizar la diferencia que existe entre ellos y así estimar la rotación que se experimenta en la viga 2 en la rampa izquierda.

Tabla 5.18: Desplazamientos nodales en los extremos de la viga bajo la acción del registro de Viña del Mar.

Desplazamiento transversal				Desplazamiento Longitudinal			
Amortiguador	Nodo	Dirección	Viña del Mar [cm]	Amortiguador	Nodo	Dirección	Viña del Mar [cm]
17130	28	Z	0,31	17130	28	X	8,10
	29	Z	1,73		29	X	8,10
17150	28	Z	0,19	17150	28	X	8,13
	29	Z	1,36		29	X	8,14
17160	28	Z	0,13	17160	28	X	8,13
	29	Z	1,41		29	X	8,14

- El desplazamiento transversal para el amortiguador 17130 ocurre en el instante de tiempo $t = 30.63$ [s]. La diferencia de desplazamientos entre los nodos 28 y 29 es de 1.42 [cm] provocando rotaciones pequeñas en la viga II, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.317 [cm]. Siguiendo con la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 30.68$ [s] y su diferencia es de 0.0 [cm].
- El amortiguador 17150 alcanza un desplazamiento máximo transversal en el instante de tiempo $t = 12.37$ [s], los nodos 28 y 29 alcanzan una diferencia de desplazamiento de 1.7 [cm], provocando una rotación en el viga II, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.176 [cm]. Por otro lado, la dirección longitudinal alcanza su máximo desplazamiento en el instante de tiempo $t = 30.68$ [s] y sus diferencias de desplazamientos es de 0.01 [cm].
- Finalmente, el amortiguador 17160 su desplazamiento transversal máximo se obtiene en el instante de tiempo $t = 12.36$ [s] con una diferencia de 1.28 [cm] entre los nodos 28 y 29 generando también rotaciones en la viga II, su elastómero por otra parte alcanza un valor de formación de 0.131 [cm]. En la dirección longitudinal el máximo desplazamiento ocurre en el instante de tiempo $t = 30.68$ [s] y su diferencia también alcanza el valor de 0.01 [cm] entre los nodos 28 y 29.

La pasarela Chada experimentó rotaciones en dirección transversal, todos los amortiguadores alcanzan desplazamientos relativos por debajo de 3 [cm], de esta manera se observa que estos dispositivos pasivo de energía controlan las deformaciones evitando impactos entre la viga y las tapas.

Siguiendo con las aceleraciones, se analizó el par de nodos 28 – 29 para el registro sísmico de Concepción y el registro sísmico de Viña del Mar. Estos nodos se encuentran ubicados en los extremos de la viga 2 tal como lo presenta la Figura 5.38.

La pasarela en sus condiciones originales alcanzó en los nodos 28 – 29 una aceleración de 7.12 [m/s²] bajo la acción del registro de Concepción, en la Figura 5.39a se observa las aceleraciones descendiendo con el uso de los dispositivos pasivos. El registro de Viña del Mar presentó en sus condiciones iniciales una aceleración de 7.15 [m/s²], también presentando descensos en sus aceleraciones, se puede apreciar en la Figura 5.39b.

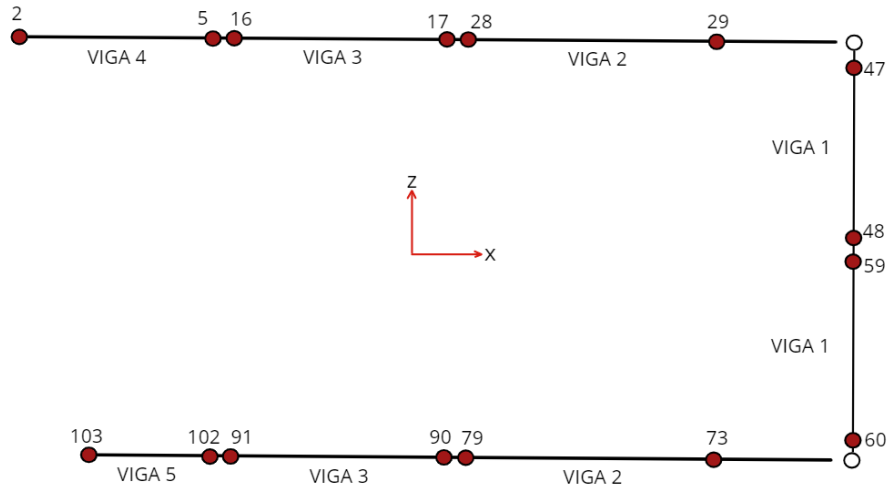


Figura 5.38: Aceleraciones en nodos elastoméricos pasarela Chada.

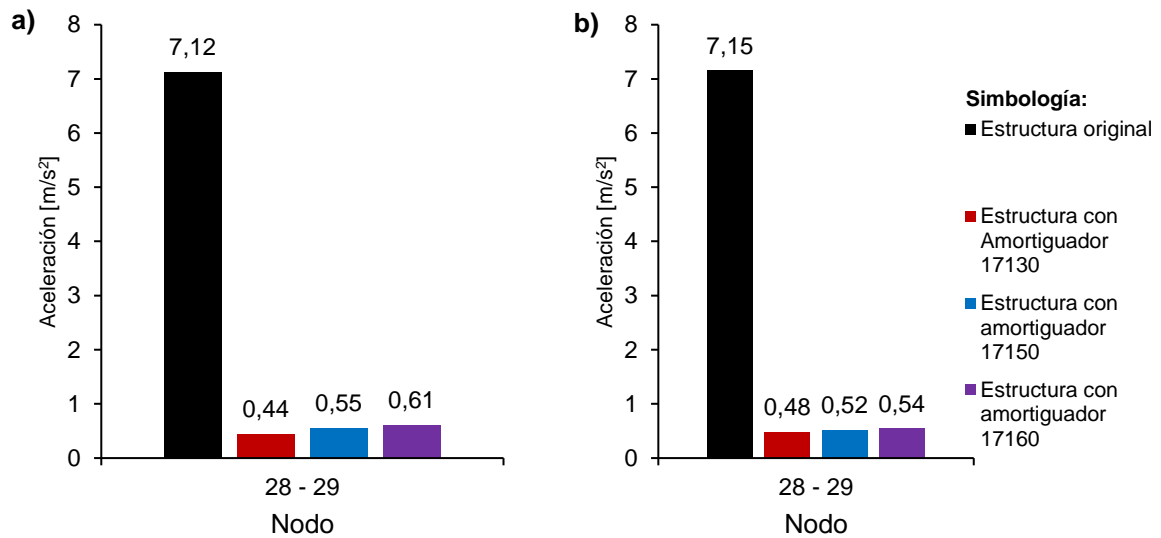


Figura 5.39: Aceleraciones Máximas transversales en pasarela Chada: a) registro sísmico Concepción, b) registro sísmico Viña del Mar.

Los amortiguadores viscosos lograron bajar las aceleraciones transversales en los nodos 28 – 29, sin embargo, para los otros nodos (forma análoga como en los dispositivos ADAS) se observó un exceso de aceleraciones que no tienen explicación física y puede deber a la calibración del modelo, se puede observar esta anomalía en la Figura 5.22.

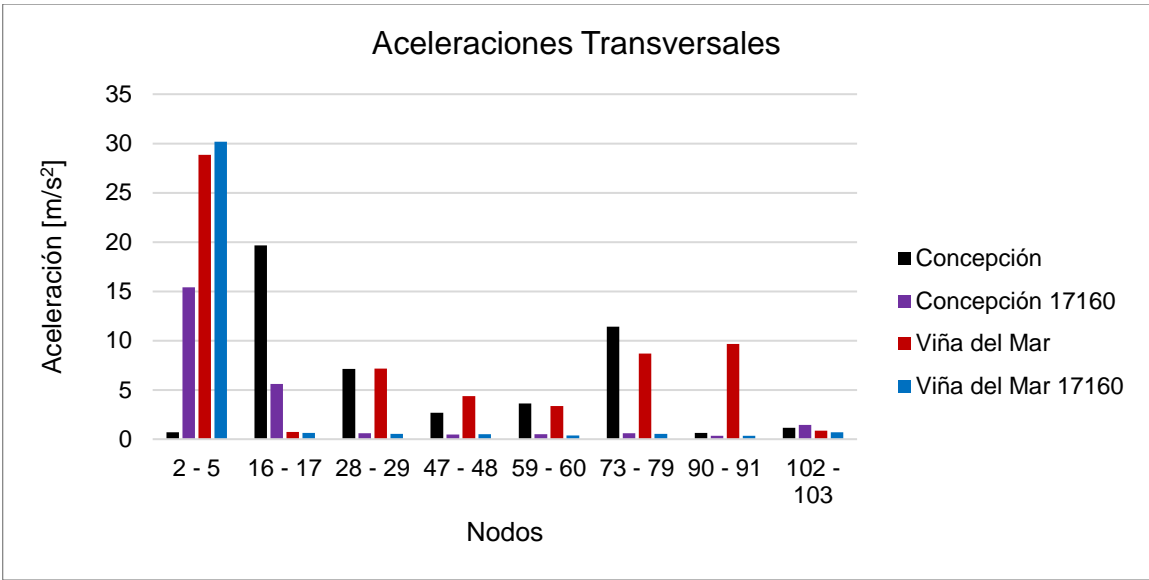


Figura 5.40: Comparación de Aceleraciones en dirección z, modelo original versus modelo 17160 en registro de Concepción y Viña del Mar.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se identificaron los daños del paso inferior Chada, Las Mercedes y la pasarela Chada. Como objetivo principal se determinó los excesos de desplazamientos en la superestructura y desconexiones de sus elementos estructurales. Por esta razón se modelaron las tres estructuras en sus condiciones originales, se analizó la respuesta sísmica y se comprendieron las causas más a fondo de sus fallas. Por medio del análisis tiempo historia bajo la acción de los registros sísmicos de Concepción y Viña del Mar, se implementaron disipadores de energía tipo ADAS y amortiguadores viscosos con el propósito de comparar la respuesta sísmica con los casos estudios.

El puente Chada y Las Mercedes en sus condiciones originales presentaron rotaciones en sus tableros. De este modo la superestructura impactó los topes laterales en sus estribos, generando graves daños en sus elementos e interrumpiendo el funcionamiento posterior al Terremoto del Maule. Los elastómeros alcanzaron deformaciones de fluencia bajo la acción de los dispositivos ADAS. El uso de amortiguadores viscosos arrojó información, disminuyendo las deformaciones de fluencia en el elastómero por debajo de los límites. Por lo tanto, los elastómeros se mantienen en sus posiciones sin presentar deslizamientos con respecto a la viga cabezal en la superestructura.

Las mínimas rotaciones se alcanzaron por medio del dispositivo ADAS con un 70% de rigidez total de los elastómeros de la superestructura y además se disminuyó los desplazamientos transversales en comparación con el modelo original en un 85.2% en el paso inferior Chada y en un 64.5% en el paso inferior Las Mercedes. De manera análoga el amortiguador viscoso 17160 experimentó mínimos desplazamientos transversales, ambos puentes alcanzaron una disminución de desplazamiento en comparación al modelo original de un 86.7%. Todos los dispositivos ADAS y viscosos controlaron los excesos de desplazamientos transversales, no superando la máxima longitud de entre estribo y tablero. Sin embargo, los amortiguadores viscosos controlaron de mejor forma los desplazamientos relativos de la superestructura tanto en la fluencia del elastómero, disminución de porcentajes de desplazamientos y rotaciones.

En términos de aceleraciones, los dispositivos ADAS logra disminuir los peak de aceleración en el del estribo, ya que fueron intervenidas sus propiedades dinámicas, aumentando la rigidez estructural y coincidiendo el nuevo período en el espectro con menores demandas sísmicas. El amortiguador viscoso por otro lado no aportó rigidez estructural, reduciendo los peak de aceleración por medio de la implementación de amortiguación. Por lo tanto, se concluye que ambos dispositivos son beneficiosos pero el amortiguador viscoso se comporta de mejor manera en términos de desplazamientos y aceleraciones.

La pasarela Chada en sus condiciones originales presentó una falla en la viga 2 ubicada en la rampa izquierda (está viga sufrió una desconexión con respecto a la cepa 6), este daño dejó inhabilitada la pasarela posterior al Terremoto del Maule. Los elastómeros alcanzaron deformaciones de fluencia en el modelo original. La implementación del disipador pasivo ADAS no disminuye los desplazamientos de fluencia en los elastómeros. El uso de amortiguadores viscosos arroja información, los elastómeros se mantienen en sus posiciones sin presentar deslizamientos con respecto a la cepa 6 en la superestructura.

Las mínimas rotaciones se alcanzan por medio del dispositivo ADAS con un 70% de la rigidez total de los elastómeros y además se redujeron los desplazamientos transversales en comparación con el modelo original en un 85%. De manera análoga el amortiguador viscoso 17160 experimentó mínimos desplazamientos transversales, alcanzando una disminución de desplazamiento en comparación al modelo original de un 78.2%. Los amortiguadores viscosos controlaron de mejor manera los desplazamientos relativos de la superestructura tanto en la fluencia del elastómero, disminución de desplazamientos y rotaciones. En términos de disipación de energía, los ADAS no

se activaron ya que solo se encontraban en el rango lineal, solo añade rigidez sin disipar energía, de manera análoga los amortiguadores viscosos solo aporta una mínima fuerza de resistencia teniendo una mínima disipación de energía.

En términos de aceleraciones, los dispositivos ADAS, sus nuevos períodos naturales coincidieron en el espectro de aceleración donde las demandas sísmicas son menores. El amortiguador viscoso conversa los períodos naturales del modelo original reduciendo el espectro de aceleración por medio de la implementación de amortiguación. Finalmente, algunas aceleraciones tuvieron un incremento que no tiene explicación física, concluyendo que a los modelos les falta una calibración más extensiva. Para futuros trabajos de título se dejará de tarea realizar un análisis riguroso de los modelos.

Se concluye que ambos disipadores de energía se comportaron de forma similar en la respuesta de la estructura. Una recomendación es no implementar dispositivos de disipación en las pasarelas e instalar capiteles en la conexión entre viga y cepa, así rigidizando las conexiones y evitando generar excesivos desplazamientos, rotaciones y desconexiones.

Bibliografía

- [1] R. Madariaga, Sismicidad de Chile, Paris: Departement de Sismologie, Université Denis Diderot de Paris 7, France., 1998.
- [2] T. C. M. H. Hernán Santa María., «Variables críticas que condicionaron el daño en puentes y pasarelas durante el terremoto del maule de 2010,» Future Challenges: Desing, construction and maintenance, Santiago - Chile, 2014.
- [3] H. M. C. G. Y. W. A. j. Buckle I., «Structural performance of bridges in the offshore Maule earthquake of february 27,2010,» Earthquake Spectra 2012, 2012.
- [4] AASHTO, Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Desing, Washintong DC, 2011.
- [5] M. Manual de Carreteras, Manual de carreteras, Volumen N°3, Instrucciones y Criterios de Diseño, Capítulo 3.1000., Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile., 2002.
- [6] F. Toro, F. Rubilar, M. A. Hube, H. Santa-Maria y T. Cabrera, Statistical Analysis of Underpasses Damaged During 2010, Oakland. California: Seventh National Conference on Bridges & Highways, 2013.
- [7] M. Ministerio de Obras Públicas, «Cuenta Pública 2010, cuenta sectorial,» https://www.mop.cl/acercadelmop/BalancesdeGestionIntegral/Documents/2010/BGI_2010_DV.pdf, 2010.
- [8] Instituto Nacional de Normalización, NCh 433.of1996, Santiago, Chile, 2009.
- [9] A. B. M. Grosser, Efecto de las Barras Sísmicas en el Comportamiento Sísmico Transversal de Puentes de Hormigón Armado, Santiago de Chile, 2015.
- [10] N. A. Gallardo Diaz, Uso de Amortiguadores Viscosos e Histereticos en Puente Chilenos, Valparaíso: Universidad de Valparaíso, 2020.
- [11] G. B. K. O. H. Y. K. S. J. S. a. D. J. Elnashai A.S., «The Maule (Chile) Earthquake of february 27, 2010,» Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol. 42, pp. 229-245, 2012.
- [12] E. Choi, J. Park, S. Yoon, D. Choi y C. Park, Comparision of Seismic Performance of three restrainers for Multipl-span briges using fragility analysis, Korea: International Journal of Steel Structures, 2009.
- [13] C. Cruz Lorenzen, M. E. Barrientos y S. Babbar, Toll Road Concessions the Chilean Experience, World Bank PFG Discussion Paper Series, 124, 1-36, 2004.
- [14] C.Christopoulus y A. Filiatrault, Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation, Pavia, Italy: IUSS PRESS, 2006.
- [15] Roberto Aguiar, Edgar David Mora, Michael Rodriguez., Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS, Barcelona, España.: A.H Barbat, 2016.
- [16] T. D. i. Fluid Viscous Dampers, New York, Estados unidos: Taylor Devices, 2020.
- [17] F. T. Farfán, Análisis del daño observado a pasarela peatonales durante el terremoto del Maule 27/02/2010, Santiago de Chile: Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2014.

- [18] L. G. P. Nuñez, Evaluación de La Rotación Sísmica del Tablero en Puentes Rectos e Influencia del Travesano, Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2018.
- [19] Federal Highway Administration, Postearthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure Impact of the February 27,2010, Offshore Maule Earthquake in Chile, Washington DC: U.S.Department of Transportation, Oct 2011.
- [20] A. J. Carr, Ruaumoko 3D User Manual for 3D program, Christchurch, New Zealand: Carr Research LTD, 2017.
- [21] Kelly, J.M y Konstantinidis, Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation, Chichester, Inglaterra: Jhon wiley & Sons Ltd, 2011.
- [22] Steelman, J.S., Fahnestock, L. A., Filipov, E.T., LaFave, J.M., J.M, Hajjar, J.F., & Foutch, D. A, «Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearing subject to seismic demands,» *Journal of bridge Engineering* , pp. 612-623, 2013.
- [23] C. d. D. T. -. C. C. d. I. C. Construcción, Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, Santiago, Chile: Cámara Chilena de la Construcción.
- [24] S. Megally, P. Silva, and F. Seible, Sismic Response of Sacrificial shear key in bridge abutments, California Univ, San diego : Report, Dep of structural engineering, 2002.