

Evaluación estructural del puente Mezcala a través de factores de capacidad de carga de AASHTO

Miguel Anaya Díaz Juan Antonio Quintana Rodríguez Francisco Javier Carrión Viramontes Luis Álvaro Martínez Trujano Jorge Alberto Hernández Figueroa José Manuel Machorro López Andrés Hernández Guzmán Héctor Miguel Gasca Zamora Germán Michel Guzmán Acevedo

> Publicación Técnica No. 670 Sanfandila, Qro. 2022

> > ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte por el M. en C. Miguel Anaya Díaz, Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, M. en C. Luis Álvaro Martinez Trujano, Ing. Jorge Alberto Hernandez Figueroa, Dr. José Manuel Machorro López, Ing. Andrés Hernández Guzmán, Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora y M. en C. Germán Michel Guzmán Acevedo.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna "El 10/21: Monitoreo estructural y evaluación mediante factores de capacidad de carga del puente Mezcala".

Se agradece al Ing. Alejandro Moreno Valdez, Ing. Virginia Guadalupe Varela González, Ing. María Mayela Lozornio Compeán e Ing. Julio Leonardo Guerrero López por su participación en la presente investigación.

Contenido

Índice de figuras	v
Índice de tablas	xi
Sinopsis	xiii
Abstract	xv
Resumen Ejecutivo	xvii
Introducción	1
1 Antecedentes	3
2 Factores de capacidad de carga AASHTO	9
3 Metodología	15
4 Resultados	23
Conclusiones	35
Bibliografía	37
Anexos	39

Índice de figuras

Figura 1.1 Puente Mezcala	3
Figura 1.2 Instrumentación del puente Mezcala	4
Figura 1.3 Proceso de análisis modal a través de la técnica EFDD	5
Figura 1.4 Forma modal del modo 1	6
Figura 1.5 Forma modal del modo 2	6
Figura 1.6 Seguimiento al valor de la frecuencia natural del modo 1	7
Figura 2.1 Diagrama de flujo la calificación AASHTO por factores de	carga y
resistencia	13
Figura 3.1 Modelo de elemento finito del puente Mezcala	15
Figura 3.2 Sensibilidad de la frecuencia natural del modo 1	16
Figura 3.3 Comparación de tensiones Semiarpa 1 y 2	17
Figura 3.4 Comparación de tensiones Semiarpa 3 y 4	17
Figura 3.5 Comparación de tensiones Semiarpa 5 y 6	18
Figura 3.6 Posición de los vehículos de carga	19
Figura 3.7 Configuraciones de los vehículos de carga	20
Figura 4.1 Tensiones por carga viva	
Figura 4.2 Momentos positivos por carga viva vehicular	

Figura A.1 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-1	39
Figura A.2 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-2	40
Figura A.3 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-3	40
Figura A.4 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-4	41
Figura A.5 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-5	41
Figura A.6 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-6	42
Figura A.7 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-7	42
Figura A.8 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-8	43
Figura A.9 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-9	43
Figura A.10 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-10	44
Figura A.11 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-11	44
Figura A.12 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-12	45
Figura A.13 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-13	45
Figura A.14 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-14	46
Figura A.15 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-15	46
Figura A.16 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-16	47
Figura A.17 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-17	47
Figura A.18 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-18	48
Figura A.19 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-19	48
Figura A.20 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-20	49
Figura A.21 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-21	49

Figura	A.22	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	A-E	A-22		50
Figura	A.23	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	A-E	A-23		50
Figura	A.24	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	A-E	A-24		51
Figura	A.25	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-1		51
Figura	A.26	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-2		52
Figura	A.27	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-3		52
Figura	A.28	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-4		53
Figura	A.29	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-5		53
Figura	A.30	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-6		54
Figura	A.31	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-7		54
Figura	A.32	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-8		55
Figura	A.33	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-9		55
Figura	A.34	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-10		56
Figura	A.35	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-11		56
Figura	A.36	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-12		57
Figura	A.37	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-13		57
Figura	A.38	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-14		58
Figura	A.39	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-15		58
Figura	A.40	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E	A-16		59
Figura	A.41	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E	A-17		59
Figura	A.42	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E	A-18		60
Figura	A.43	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-19		60
Figura	A.44	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-20		61
Figura	A.45	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E	A-21		61
Figura	A.46	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-22		62
Figura	A.47	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-23		62
Figura	A.48	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-E/	A-24		63
Figura	A.49	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	A-T3	3-EC-1		63
Figura	A.50	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	A-T3	3-EC-2	2	64
Figura	A.51	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-T3	3-EC-1		64
Figura	A.52	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	B-T3	3-EC-2	<u>,</u>	65
Figura	A.53	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	13-E	=C-1		65
Figura	A.54	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	13-E	=C-2		66
Figura	A.55	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	13-E	=C-3		66
Figura	A.56	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	13-E	=C-4		67
Figura	A.57	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	13-E	=C-5		67
Figura	A.58	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a del	sensor	13-E	=C-6		68
Figura	A.59	Segu	imiento	dei	valor	de	referencia	a dei	sensor		1-I-L ₄ ⊥ ┳	•••••	68
Figura	A.60	Segu	imiento	dei	valor	de	referencia	a dei	sensor		1-I-I	•••••	69
Figura	A.61	Segu	imiento	dei	valor	de	referencia	a dei	sensor	A-12	2-I-L	•••••	69 70
Figura	A.62	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a dei	sensor	A-I2	2-1-1		70
Figura	A.63	Segu	imiento	del	valor	de	referencia	a dei	sensor	A-I	3-I-L	•••••	70
Figura	A.04	Segu	imiento	uel	valor	ue de	referencia	a ael	sensor	A-1	I -ו-כ ערוי		71
Figura	C0.A	Segu	imiento	uel	valor	de	referencia	a uei	sensor	A-14	4-I-L 〃 ╷ ┳		71
Figura	A.00	Segu	imiento	uel	valor	ue de	referencia	a ael	sensor	A-14	4-I-I วาบ		12
Figura	A.6/	Segu		ael	valor	ae	referencia	a del	sensor		2-I-L っ ι エ		12
rigura	A.68	Segu	imiento	ael	valor	ae	reterencia	a del	sensor	B-17	2-1-1		13

Figura A.69 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T3-I-L	. 73
Figura A.70 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T3-I-T	. 74
Figura A.71 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T4-I-L	. 74
Figura A.72 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T4-I-T	. 75
Figura A.73 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T7-I-L	. 75
Figura A.74 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T7-I-T	. 76
Figura A.75 Seguimiento a la tensión del tirante SA1-T7	. 77
Figura A.76 Seguimiento a la tensión del tirante SA1-T3	. 77
Figura A.77 Seguimiento a la tensión del tirante SA2-T3	. 78
Figura A.78 Seguimiento a la tensión del tirante SA2-T7	. 78
Figura A.79 Seguimiento a la tensión del tirante SA3-T11	. 79
Figura A.80 Seguimiento a la tensión del tirante SA3-T4	. 79
Figura A.81 Seguimiento a la tensión del tirante SA4-T4	. 80
Figura A.82 Seguimiento a la tensión del tirante SA4-T11	. 80
Figura A.83 Seguimiento a la tensión del tirante SA5-T8	. 81
Figura A.84 Seguimiento a la tensión del tirante SA5-T3	. 81
Figura A.85 Seguimiento a la tensión del tirante SA6-13	. 82
Figura A.86 Seguimiento a la tension del tirante SA6-18	. 82
Figura A.87 Seguimiento a la tension del tirante SA7-18	. 83
Figura A.88 Seguimiento a la tensión del tirante SA7-13	. 83
Figura A.89 Seguimiento a la tensión del tirante SA8-13	. 84
Figura A.90 Seguimiento a la tensión del tirante SA8-18	. 84
Figura A.91 Seguimiento a la tensión del tirante SA-91 11	. 00 85
Figura A 93 Seguimiento a la tensión del tirante SA9-14	. 0J . 86
Figura A 94 Seguimiento a la tensión del tirante SA10-14	86
Figura A 95 Seguimiento a la tensión del tirante SA11-T7	87
Figura A 96 Seguimiento a la tensión del tirante SA11-T3	87
Figura A.97 Seguimiento a la tensión del tirante SA12-T3	. 88
Figura A.98 Seguimiento a la tensión del tirante SA12-T7	. 88
Figura A.99 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-1	. 89
Figura A.100 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-2	. 90
Figura A.101 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-3	. 90
Figura A.102 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-4	. 91
Figura A.103 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-5	. 91
Figura A.104 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-6	. 92
Figura A.105 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-7	. 92
Figura A.106 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-8	. 93
Figura A.107 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-9	. 93
Figura A.108 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-10	. 94
Figura A.109 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-11	. 94
Figura A.110 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-12.	. 95
Figura A.111 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-13.	. 95
Figura A.112 Seguimiento de las deformaciones a tension del sensor A-EA-14.	. 96
Figura A.113 Seguimiento de las deformaciones a tension del sensor A-EA-15.	. 96
Figura A. 114 Seguimiento de las deformaciones a tension del sensor A-EA-16.	. 97
rigura A. 115 Seguimiento de las deformaciones a tension del sensor A-EA-117	. 97

Figura A.116 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-18... 98 Figura A.117 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-19... 98 Figura A.118 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-20... 99 Figura A.119 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-21... 99 Figura A.120 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-22. 100 Figura A.121 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-23. 100 Figura A.122 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-24. 101 Figura A.123 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-1... 101 Figura A.124 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-2... 102 Figura A.125 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-3... 102 Figura A.126 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-4... 103 Figura A.127 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-5... 103 Figura A.128 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-6... 104 Figura A.129 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-7... 104 Figura A.130 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-8... 105 Figura A.131 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-9... 105 Figura A.132 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-10. 106 Figura A.133 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-11. 106 Figura A.134 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-12. 107 Figura A.135 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-13. 107 Figura A.136 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-14. 108 Figura A.137 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-15. 108 Figura A.138 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-16. 109 Figura A.139 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-17. 109 Figura A.140 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-18. 110 Figura A.141 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-19. 110 Figura A.142 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-20.111 Figura A.143 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-21 111 Figura A.144 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-22. 112 Figura A.145 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-23. 112 Figura A.146 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-24. 113 Figura A.147 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-1 113 Figura A.149 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-3 114 Figura A.150 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-4 115 Figura A.151 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-5 115 Figura A.152 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-6 116 Figura A.153 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-7 116 Figura A.154 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-8 117 Figura A.155 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-9 117 Figura A.156 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-10 118 Figura A.157 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-11 118 Figura A.158 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-12...... 119 Figura A.159 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-13 119 Figura A.160 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-14 120 Figura A.161 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-15 120 Figura A.162 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-16 121

Figura A.163 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-17 121 Figura A.164 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-18 122 Figura A.165 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-19...... 122 Figura A.166 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-20 123 Figura A.167 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-21 123 Figura A.168 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-22 124 Figura A.169 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-23 124 Figura A.170 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-24 125 Figura A.171 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-1 125 Figura A.172 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-2...... 126 Figura A.173 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-3...... 126 Figura A.174 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-4 127 Figura A.175 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-5 127 Figura A.176 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-6 128 Figura A.177 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-7 128 Figura A.178 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-8 129 Figura A.179 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-9...... 129 Figura A.180 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-10 130 Figura A.181 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-11 130 Figura A.182 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-12 131 Figura A.183 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-13 131 Figura A.184 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-14 132 Figura A.186 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-16 133 Figura A.187 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-17 133 Figura A.188 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-18 134 Figura A.189 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-19...... 134 Figura A.190 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-20 135 Figura A.191 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-21 135 Figura A.192 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-22 136 Figura A.193 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-23 136 Figura A.194 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-24 137

Índice de tablas

Tabla 1.1 Parámetros modales identificados Tabla 2.1 Factores de carga para estados límite Tabla 2.2 Factores generalizados de carga viva para tráfico comorcial rutinario	5 11
Tabla 2.2 Factores generalizados de carga viva para tranco comercial futilitar	
Tabla 2.5 Factores generalizados de carga viva para veniculos de ac	aneu 10
	12
Tabla 2.4 Factores para cargas permitidas	12
Tabla 3.1 Comparación de las frecuencias naturales (Monitoreo vs modelo)	16
Tabla 3.2 Factores de ocupación múltiple	20
Tabla 3.3 Factores de amplificación dinámica	21
Tabla 3.4 Factores de resistencia	21
Tabla 4.1 RF para los tirantes de las semiarpas 1 y 2	25
Tabla 4.2 RF para los tirantes de las semiarpas 3 v 4	26
Tabla 4.3 RF para los tirantes de las semiarpas 5 y 6	27
Tabla 4.4 RF para los tirantes de las semiarpas 7 y 8	28
Tabla 4.5 RF para los tirantes de las semiarpas 9 v 10	29
Tabla 4.6 RF para los tirantes de las semiarpas 11 y 12	30
Tabla 4.7 RF momento flexionante positivo de las secciones de las	vigas
principales instrumentadas (Aguas abaio)	32
Tabla 4.8 RE momento flexionante positivo de las secciones de las	vidas
principales instrumentadas (Aquas arriba)	
	00

Sinopsis

El monitoreo estructural del puente Mezcala comenzó desde el año 2016, a partir de ese año, se ha podido identificar y monitorear algunos parámetros modales como son las frecuencias naturales, formas modales y factores de amortiguamiento de los primeros modos naturales de vibrar de la estructura y se han desarrollado y calibrado modelos de elemento finito para analizar el comportamiento del puente ante los escenarios de carga que podrían presentarse durante la vida útil.

La importancia de tener los índices de operación de las respuestas estructurales del puente, radica en que permiten identificar si se presentan cambios significativos, los cuales pueden ser atribuibles a daños y degradaciones en la estructura que afectan su seguridad o funcionabilidad.

En este trabajo, se presenta una evaluación de la capacidad de carga de los elementos estructurales monitoreados del puente Mezcala, como lo son las vigas principales y tirantes de sujeción, a través de la metodología de evaluación de puentes del manual de AASHTO (AASHTO, 2013). Con el modelo calibrado de elemento finito del puente se simularon las condiciones de cargas permanentes y cargas vivas vehiculares. A su vez, se presenta el seguimiento realizado al comportamiento de las respuestas estructurales del puente Mezcala.

(**Palabras clave:** *Puente Mezcala, Monitoreo estructural, evaluación de la capacidad de carga*)

Abstract

The structural health monitoring of Mezcala Bridge began in 2016 and, since then, it has been possible identify and monitor several modal parameters such natural frequencies, mode shapes and damping ratios of the main modes of vibration of the bridge. With the information obtained from the structural health monitoring system, it has been possible to develop and calibrate finite element models to analyze the behavior of the bridge under load cases that could occur during the structure lifetime.

The importance of rating the structural behavior of the bridge under normal operational conditions lies in fact that it permits the identification of significant changes that might arise from damages or degradations of the structure, affecting its safety or functionality.

This work presents the evaluation of the load bearing capacity of the monitored elements of the Mezcala Bridge, such as main girders and stay cables, through the AASHTO methodology of bridge evaluation (AASHTO, 2013). For this, the calibrated finite element model serves as reference to simulate the structural effects from live and dead loads. On the other hand, it also presents the data from the monitoring system, which is evaluated to calculate the time trends of dynamic responses and identify changes associated to ambient or structural conditions.

(Key words: Mezcala Bridge, Structural Health Monitoring, Load Rating)

Resumen ejecutivo

En el presente estudio se monitoreó el comportamiento de los parámetros modales y estructurales del puente Mezcala, para evaluar su integridad utilizando los datos provenientes de un sistema de monitoreo estructural diseñado e implementado por el Instituto Mexicano del Transporte. Con la información obtenida se calibró un modelo de elemento finito con el objetivo de simular las condiciones de carga viva vehicular de diseño, y calificar la capacidad de carga de los elementos estructurales del puente mediante la normativa AASHTO (AASHTO, 2013).

En este trabajo, se presenta el proceso de análisis y evaluación de la capacidad de carga de los elementos monitoreados del puente Mezcala a través de la metodología de evaluación de puentes de AASHTO. Para ello, se simularon escenarios de carga viva con los vehículos de carga HL-93, T3-S2-R4, T3-S3 y con un vehículo T3-S2-R4 que transita sobre el carril de baja velocidad en cada uno de los cuerpos del puente de manera independiente. Con los resultados obtenidos de las simulaciones, se calculó la capacidad estructural de los elementos del puente ante los efectos de las cargas de diseño de acuerdo a lo establecido en el código AASHTO.

Introducción

Las estructuras civiles son de vital importancia en el desarrollo económico, social y cultural de un país. Las grandes inversiones que se realizan en la construcción de edificios y puentes ameritan que estas estructuras sean inspeccionadas regularmente para salvaguardar su integridad estructural. Hoy en día, se realizan inspecciones visuales periódicas a través de las cuales se califica la condición estructural de los puentes. El periodo típico para realizar las inspecciones visuales en un puente es de un año y están limitadas a la capacidad de observación de los inspectores, su experiencia y conocimiento. Así también, las inspecciones visuales no pueden detectar daños o deterioros internos en las estructuras, los cuales normalmente aparecen en la superficie cuando son críticos.

Para superar las limitantes de las inspecciones visuales se han implementado técnicas de análisis que permiten conocer y evaluar el estado actual de la estructura, como es el caso del monitoreo estructural. El proceso de monitorear una estructura involucra la observación de su comportamiento en el tiempo, identificando las características que son sensibles al daño y a través de un análisis estadístico determinar su integridad estructural (Farrar y Worden, 2007).

Como lo describe la norma ISO 18649 (2004), los objetivos del monitoreo de puentes son:

- Evaluación de las cargas vivas
- Evaluación del desempeño estructural
- Evaluación de los efectos del viento e hidrológicos
- Evaluación de la seguridad estructural
- Evaluación en condiciones de servicio
- Evaluación de la compatibilidad ambiental

Para lograr estos objetivos no solamente es necesaria la implementación de un sistema de monitoreo, sino también el desarrollo de modelos matemáticos de elemento finito, los cuales son calibrados con la información del sistema de monitoreo (Anaya *et.al*, 2018). Estos modelos permitirán simular las condiciones de carga, que se describan en la normativa de referencia, para evaluar la seguridad estructural.

1. Antecedentes

El puente Mezcala (figura 1.1) es un puente de tipo atirantado que se localiza en el kilómetro 221 de la Autopista del Sol, que comunica a la ciudad de Cuernavaca con Acapulco. El puente tiene una longitud total de 911 m y su estructura está conformada por 6 claros que van desde los 39 m hasta los 311 m. El puente tiene 140 tirantes distribuidos en 12 semi-arpas. Debido a la importancia del puente Mezcala en la actividad económica del País, al costo y tipo de estructura, la longitud total y que se ubica en una zona de alta actividad sísmica, se seleccionó como uno de los puentes para instrumentar y monitorear en tiempo real en el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte.



Figura 1.1 Puente Mezcala

Las actividades que se han llevado a cabo, desde la implementación del sistema de monitoreo, han sido las de dar seguimiento al comportamiento del puente ante cargas vivas vehiculares, ciclos térmicos, excitaciones de viento y sismo, así como de caracterizar el comportamiento dinámico del puente a través de la identificación de sus modos naturales de vibración. Lo anterior permite contar con la información necesaria para calibrar un modelo de elementos finitos del puente, el cual permite simular escenarios de carga críticos con los que puede evaluar su seguridad estructural.

El sistema de monitoreo instalado en el puente Mezcala se compone de tres módulos que son:

- Módulo de sensores y equipos de adquisición y pre procesamiento de datos.
- Módulo de energización.
- Módulo de comunicaciones remotas.

La instrumentación que conforma al módulo de sensores y equipos de adquisición y pre procesamiento de datos consta de 36 acelerómetros, 16 inclinómetros, 10 extensómetros de concreto, 48 extensómetros de acero y 11 sensores de temperatura. Cada uno de estos sensores fue instalado en posiciones estratégicas de acuerdo con las variables o parámetros de interés, por ejemplo, para el caso de los acelerómetros, estos se ubicaron en algunos de los tirantes para determinar las frecuencias naturales de vibración y obtener una medición indirecta de la fuerza de tensión de dicho tirante (Carrion, 2007). En lo que respecta a los extensómetros, éstos se instalaron en la parte inferior de las trabes longitudinales del puente, tanto para el lado aguas arriba (Sensores A1-A24) como para aguas abajo (Sensores B1-B24). La instrumentación anteriormente descrita se muestra en la figura 2.



Figura 1.2 Instrumentación del puente Mezcala

Para adquirir la información de cada uno de los sensores es necesario un sistema de adquisición de datos con una computadora y con un interrogador para controlar la frecuencia de adquisición, el tamaño de los archivos, visualizar la información en tiempo real y adquirir el valor de cada sensor en intervalos iguales de tiempo. Una vez instalado, este equipo tiene capacidad para interrogar 16 canales utilizando un multiplexor. Toda la información medida a través del sistema de monitoreo es enviada por medio de la red de internet satelital a los servidores del CMPEI en donde es organizada y analizada.

1.1 Monitoreo del puente Mezcala

Con la información obtenida del sistema de monitoreo en tiempo real, se estableció como una actividad fundamental, el caracterizar el comportamiento dinámico del puente Mezcala a través de la identificación de la frecuencia, forma modal y razón de amortiguamiento de los principales modos naturales de vibración. Para ello, se han implementado técnicas de análisis modal que permiten identificar los modos naturales del puente utilizando las señales de los extensómetros de las vigas principales bajo excitaciones ambientales. Una de estas técnicas es la *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) (Brincker, 2001) que ha permitido identificar y dar seguimiento a los parámetros modales de los principales modos de vibración del puente Mezcala (Anaya *et.al*, 2020). Un esquema del proceso de análisis modal a través de la técnica EFDD se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3 Proceso de análisis modal a través de la técnica EFDD

En la tabla 1.1 se muestran los valores promedio de la frecuencia natural y razón de amortiguamiento (ζ) de los principales modos naturales de vibración del puente Mezcala.

Modo	Frecuencia (Hz)	ζ (%)	Descripción del Modo
1	0.213	1.46	Flexión del tablero
2	0.414	0.47	Torsión del tablero
3	0.446	0.62	Flexión del tablero
4	0.509	0.44	Flexión del tablero
5	0.635	0.37	Flexión del tablero
6	0.740	0.32	Torsión del tablero
7	0.796	0.45	Flexión del tablero
8	0.860	0.36	Flexión del tablero

Tabla 1.1 Parámetros	modales	identificados
----------------------	---------	---------------

El objetivo fundamental para analizar las señales de los extensómetros de las vigas principales es para caracterizar la forma de vibración de cada uno de los modos, la cual, puede ser de flexión o de torsión del tablero. De esta manera es posible correlacionar los parámetros modales del puente con los de un modelo de elementos finitos (Anaya *et.al*, 2018). En las figuras 1.4 y 1.5 se muestran respectivamente las formas modales de los modos 1 y 2 del puente Mezcala.



Figura 1.4 Forma modal del modo 1



Figura 1.5 Forma modal del modo 2

1.2 Seguimiento del comportamiento de las respuestas estructurales a través del tiempo

Para analizar y evaluar el comportamiento estructural del puente Mezcala a través del tiempo se ha dado seguimiento a los valores promedio de cada una de las variables estructurales como lo son las frecuencias naturales, formas modales, razones de amortiguamiento, deformaciones, inclinaciones, desplazamientos y tensiones en cables. En la figura 1.6 se muestra el seguimiento al valor promedio de la frecuencia natural del modo 1. La línea gris vertical del gráfico representa la fecha en la que se efectuó una obra de re-encarpetado en el puente.



Figura 1.6 Seguimiento al valor de la frecuencia natural del modo 1

Para el caso de los extensómetros, se analizan adicionalmente los valores de deformación (a tensión y a compresión) producto de las cargas vivas vehiculares que transitan sobre el puente. Para ello, se han desarrollado algoritmos que detectan los picos de máxima amplitud en la señal de los sensores de deformación atribuibles al paso de vehículos, para posteriormente analizar la distribución estadística de las amplitudes máximas registradas en cada sensor.

A través del seguimiento del comportamiento de las variables estructurales es posible detectar cambios significativos en los valores que pueden ser atribuidos a daños y degradaciones del material, así como aquellos cambios derivados de obras de mantenimiento o rehabilitación de la estructura.

2. Factores de capacidad de carga AASHTO

Los factores de capacidad de carga (*Rating Factor*, RF) (AASHTO, 2013), proveen una base para determinar la capacidad de carga de un puente, la cual está basada en la filosofía de diseño por factores de carga y resistencia del AASHTO (AASHTO, 2014).

Para evaluar la capacidad de carga de una estructura es necesario contar con un modelo matemático que permita estimar los efectos de las cargas permanentes y de las cargas vivas vehiculares que actúan sobre ella. Las cargas vivas vehiculares se separan en tres rubros, que son: las cargas de diseño, cargas legales y cargas permitidas.

Los procedimientos para evaluar los tipos de cargas vivas vehiculares tienen el objetivo de establecer rangos confiabilidad, o de requerirlo, establecer límites de pesos de los vehículos que transitan sobre el puente o de realizar acciones de reforzamiento.

Los niveles de evaluación establecidos por AASHTO se describen a continuación:

A. Evaluación de la carga de diseño

Es el primer nivel de evaluación de un puente y se basa en el vehículo de diseño HL-93 y en las normativas de diseño del LRFD, usando las dimensiones y propiedades del puente en su condición actual. Bajo esta revisión, el puente es evaluado en un estado límite a un nivel de confiabilidad de diseño (Inventario) del LRFD (*Load and Resistance Factor Design*). Una evaluación en un nivel inferior de confiabilidad (Operación) también es una opción. La evaluación también considera todos los estados límites de servicio del LRFD.

Los niveles de confiabilidad de la carga de diseño se describen a continuación:

- Nivel de Inventario: Corresponde al nivel de confiabilidad para puentes nuevos, por lo que los puentes que obtengan valores de RF > 1 en sus elementos estructurales ante la acción del vehículo de diseño pueden soportar dichas cargas por un periodo indefinido de tiempo.
- Nivel de Operación: Corresponde al máximo nivel de carga que puede soportar una estructura con seguridad, los puentes que obtengan valores de RF > 1 en sus elementos estructurales ante la acción del vehículo de diseño, solamente en este nivel, pueden acortar su vida útil si estas cargas se presentan frecuentemente.

B. Evaluación de la carga legal

Este segundo nivel provee una capacidad de carga para los vehículos pesados que transitan por el puente. El factor de carga viva se establece en función de las condiciones de tráfico pesado del puente.

C. Evaluación de la carga permitida

En este nivel se evalúa la seguridad estructural y los estados límites de servicio ante el paso de vehículos superiores a los límites de peso establecidos. Este tercer nivel de evaluación solamente debe ser aplicado a puentes con la capacidad suficiente para los vehículos legales del AASHTO.

2.1 Ecuación general de capacidad de carga

La siguiente ecuación se utiliza para determinar la capacidad de carga de cada componente estructural sujeto ante un solo efecto (fuerza axial, cortante o momento flexionante):

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_{P})(P)}{(\gamma_{LL})(LL + IM)}$$
(2.1)

Para estados de limite último:

 $C = \varphi_c \varphi_s \varphi R_n$

 φ_c, φ_s = Factores de reducción por condición y sistema estructural respectivamente.

Donde el siguiente limite se aplicará:

$$\varphi_c \varphi_s \ge 0.85$$

Los demás factores corresponden a:

C = Capacidad estructural del elemento

 R_n = Resistencia nominal (de acuerdo a la inspección del elemento)

DC = Efecto de la carga debido al peso de los componentes estructurales

- DW = Efecto de la carga debido al peso de la carpeta asfáltica
- P = Otras cargas permanentes aparte de cargas muertas
- IM = Factor de amplificación dinámica
- γ_{DC} = Factor LRFD para componentes estructurales
- γ_{DW} = Factor LRFD para la carpeta asfáltica

 γ_P = Factor LRFD para otras cargas permanentes aparte de cargas muertas = 1.0

 γ_{LL} = Factor de evaluación de carga viva

Los factores γ para los distintos estados límite se muestran en la Tabla 2.1.

Tino de	Fstado	Carga	Carga Muerta	Carga d	e Diseño	Carga	Carga
puente	limite	Muerta		Inventario	Operación	Legai	Permitida
		I DC	F DW	γ_{LL}	γ_{LL}	γ_{LL}	γ_{LL}
	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tab. 2.2 y 2.3	-
Acero	Strength II	1.25	1.50	-	-	-	Tab. 2.4
	Service II	1.00	1.00	1.30	1.00	1.30	1.00
	Fatigue	0.00	0.00	0.75	-	-	-
Concrete	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tab. 2.2 y 2.3	-
Reforzado	Strength II	1.25	1.50	-	-	-	Tab. 2.4
	Service II	1.00	1.00	-	-	-	1.00
	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tab. 2.2 y 2.3	-
Concreto	Strength II	1.25	1.50	-	-	-	Tab. 2.4
Presforzado	Service II	1.00	1.00	0.80	-	1.00	-
	Service I	1.00	1.00	-	-	-	1.00
Madera	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tab. 2.2 y 2.3	-
	Strength II	1.25	1.50	-	-	-	Tab. 2.4

Tabla 2.1 Factores de carga para estados límite

Fuente: AASHTO Manual for Bridge Evaluation, Ed. 2013.

El factor de carga DW en el estado límite de resistencia puede tomarse como 1.25 si el espesor de la carpeta asfáltica es medido en campo.

Tabla 2.2 Factores	s generalizados	de carga	viva para	tráfico	comercial	rutinario
--------------------	-----------------	----------	-----------	---------	-----------	-----------

Volumen de tráfico (En una dirección)	Factor de carga para los vehículos AASHTO Tipo 3, Tipo 3S2, Tipo 3-3 y cargas de carril
Desconocido	1.80
ADTT \geq 5000	1.80
ADTT = 1000	1.65
$ADTT \leq 100$	1.40

Fuente: AASHTO Manual for Bridge Evaluation, Ed. 2013.

ADTT = Tráfico diario promedio de camiones

Tabla 2.3 Factores	generalizados	de carga viva	para vehículos	de acarreo es	pecializados
	g • · · • · • · · · · • • • •				

Volumen de tráfico (En una dirección)	Factor de carga para los vehículos AAHSTO Tipo NLR, SU4, SU5, SU6 y SU7
Desconocido	1.60
ADTT ≥ 5000	1.60
ADTT = 1000	1.40
$ADTT \leq 100$	1.15

Fuente: AASHTO Manual for Bridge Evaluation, Ed. 2013.

Tabla 2.4 Factores	s para	cargas	permitidas
--------------------	--------	--------	------------

Tipo de permiso	Frecuencia	Condición de carga	FD	ADTT (Una dirección)	Factor de carga por peso permitido	
					Hasta 45 Ton	> 68 Ton
Rutinario	Cruces ilimitados	Mezclado con trafico	Rige en uno, dos o más carriles	>5000	1.80	1.30
				=1000	1.60	1.20
				<100	1.40	1.10
					Todos lo	s pesos
Especial o cruces limitados	Un solo viaje	Escoltado sin ningún otro vehículo en el puente	Rige en un carril	1.15 N/A		15
		Mezclado con trafico	Rige en un carril	>5000	1.5	50
	Un solo viaje			=1000	1.4	40
				<100	1.3	35
	Múltiples viajes	Mezclado con trafico	Rige en un carril	>5000	1.8	35
				1000	1.7	75
				<100	1.5	55

FD = Factor de distribución del AASHTO.

Fuente: AASHTO Manual for Bridge Evaluation, Ed. 2013.

Cabe destacar que la presente metodología solamente contempla la evaluación de los efectos de la carga viva vehicular, por lo que los efectos de cargas como el viento y sismos quedan excluidos. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo de la calificación AASHTO por factores de carga y resistencia.



Figura 2.1 Diagrama de flujo la calificación AASHTO por factores de carga y resistencia

En resumen, se puede decir que un puente que califique satisfactoriamente en el nivel de Inventario tendrá la capacidad suficiente para resistir los efectos de los vehículos legales que se mantengan dentro de los pesos y dimensiones del AASHTO, y este podría evaluarse ante las cargas permitidas, aquellas que exceden los límites de peso establecidos.

3. Metodología

Para evaluar la capacidad estructural de los elementos del puente Mezcala a través de la metodología de AASHTO, primero es necesario contar con un modelo matemático de la estructura que permita simular las cargas permanentes y las cargas vivas vehiculares. Para ello, se desarrolló un modelo de elementos finitos de del puente a partir de los planos estructurales del puente y de levantamientos geométricos en campo. El modelo de elementos finitos fue desarrollado en el software StaDyn versión 5.1 (Doyle, 1991) y ha sido calibrado con la información obtenida del sistema de monitoreo (Anaya, 2020).



Figura 3.1 Modelo de elemento finito del puente Mezcala

Para calibrar los valores de las frecuencias naturales del modelo de elemento finito, fue utilizado el método Gauss- Newton o Newton-Raphson mínimos cuadrados, mientras que, para calibrar los valores de las fuerzas de tensión de los tirantes, fue utilizado un método iterativo que consistió en ajustar el valor de las tensiones iniciales de cada tirante.

Para identificar los parámetros (módulos de elasticidad, momentos de inercia, densidad, etc.), que influyen en las frecuencias naturales, fue realizado un análisis de sensibilidad (Anaya *et.al*, 2018). Los valores de sensibilidad de la frecuencia natural del modo 1 del modelo de elemento finito se muestran en la figura 3.2. Donde el eje de las ordenadas representa a los parámetros del modelo y el eje de las abscisas a la sensibilidad normalizada de la frecuencia natural del modo 1. Por ejemplo, si el parámetro No. 2 aumenta su valor en un 100%, el valor de la frecuencia natural del modo 1 disminuye un 30% de su valor original.



Figura 3.2 Sensibilidad de la frecuencia natural del modo 1

Una vez obtenidos los parámetros modales del puente Mezcala, se comparó el valor más reciente de las frecuencias naturales (octubre de 2019) con las del modelo de EF. La Tabla 3.1 resume las frecuencias obtenidas y muestra la diferencia entre ellas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Diferencia = 100 * \left(\frac{frec. mef - frec. monitoreo}{frec. monitoreo}\right)$$

Modo	Frec. Monitoreo (Hz)	Frec. Mef (Hz)	Diferencia
1	0.213	0.213	0.24
2	0.414	0.418	0.92
3	0.446	0.453	1.68
4	0.509	0.514	1.04
5	0.635	0.628	-1.16
6	0.740	0.729	-1.49
7	0.796	0.787	-1.11
8	0.860	0.871	1.24

Tabla 3.1 Comparación de las frecuencias naturales (Monitoreo vs modelo)

Adicionalmente, para calibrar el modelo de elementos finitos, se ajustarón los valores de las tensiones de los tirantes del puente. La calibración de las fuerzas de tensión en los tirantes terminó hasta que se cumplieron los siguientes criterios; una diferencia promedio de tensión de 3 toneladas y una diferencia maxima de 19 toneladas. La comparación de las tensiones de los tirantes aguas abajo del puente se muestran en las figuras 3.3 a 3.5. Las tensiones aguas arriba presentan un comportamiento similar al mostrado para aguas abajo.


Figura 3.3 Comparación de tensiones Semiarpa 1 y 2



Figura 3.4 Comparación de tensiones Semiarpa 3 y 4



Figura 3.5 Comparación de tensiones Semiarpa 5 y 6

3.1 Evaluación de la condición estructural a través de la normativa AASHTO

Con el modelo calibrado de elemento finito es posible simular las condiciones de carga muerta y viva vehicular para calificar el desempeño de la estructura a través de los RF del AASHTO. No obstante, solamente pueden ser evaluadas aquellos elementos o secciones estructurales de los que se cuenta con información de su capacidad resistente (distribución de armados, espesores de patín, espesores de alma, etc.).

En el presente trabajo, fueron evaluados los 140 tirantes de sujeción del puente, así como las secciones de las vigas principales que se encuentran instrumentadas. Los niveles de evaluación para obtener los RF corresponden al Nivel de Inventario ($\gamma_{LL} = 1.75$) y el Nivel de Operación ($\gamma_{LL} = 1.35$) del AASHTO.

Se simularon los distintos escenarios de carga viva vehicular a través de múltiples análisis estáticos, en los cuales los vehículos de carga se desplazaron aproximadamente 10 m en cada iteración, para simular el recorrido de los vehículos de carga sobre el puente, para el desarrollo de este análisis fueron requeridas 90 iteraciones. Finalmente, los efectos máximos de los elementos estructurales fueron obtenidos de los envolventes de los escenarios de carga simulados. Los escenarios de carga analizados consistieron en los siguientes casos:

 Tres vehículos HL-93 de 32.66 toneladas de peso cada uno, actuando simultáneamente, colocados en los carriles centrales de alta velocidad y en un carril de baja velocidad del puente (figura 3.13), más la carga distribuida de 0.968 ton/m aplicada a los carriles mencionados. Para maximizar los efectos debidos a la carga distribuida, esta fue aplicada a cada uno de los 6 claros del puente Mezcala, y mediante superposición, fueron sumados los efectos máximos en cada elemento estructural a evaluarse.

- Tres vehículos T3-S2-R4 de 77.50 toneladas de peso cada uno, actuando simultáneamente, colocados en los carriles centrales de alta velocidad y en un carril de baja velocidad del puente.
- Tres vehículos T3-S3 de 48.50 toneladas de peso cada uno, actuando simultáneamente, colocados en los carriles centrales de alta velocidad y en un carril de baja velocidad del puente.
- **4.** Un vehículo T3-S2-R4de 77.50 toneladas de peso actuando en el carril de baja velocidad de cada cuerpo actuando por separado.

Para definir los cuatro escenarios de carga descritos anteriormente, se analizaron todas las posibles combinaciones de carga con su respectivo factor de ocupación múltiple (Tabla 3.1). Se encontró que los mayores efectos se producen considerando los tres carriles cargados simultáneamente. Esta configuración genera los mayores efectos en el lado más cargado del puente, por lo que se alternó la carga del carril de baja velocidad para evaluar los máximos efectos en los elementos estructurales de ambos lados del puente. El objetivo de analizar los vehículos de carga descritos es para comparar los efectos del vehículo americano HL-93 con los efectos de los vehículos más pesados (figura 3.6) permitidos por la Normativa Mexicana actual (NOM-012-SCT-2-2017). También se consideró evaluar el efecto de un solo vehículo T3-S2-R4 actuando en el carril de baja velocidad, debido a que es una solicitación de carga muy habitual en el puente.



Figura 3.6 Posición de los vehículos de carga



Figura 3.7 Configuraciones de los vehículos de carga

Para considerar la probabilidad de ocurrencia de los vehículos de carga actuando simultáneamente, se tomaron los valores de la tabla 3.2.

Número de carriles cargados	Factor
1	1.20
2	1.00
3	0.85
>3	0.65

Tabla 3.2 Factores de ocupación múltiple

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2014.

Como se mencionó anteriormente, la simulación de los efectos de los vehículos de carga corresponde a un análisis del tipo estático, por lo que, para considerar la respuesta dinámica del puente, así como las fuerzas de impacto de las cargas vivas, se consideró un factor de impacto (*IM*) del 33% de acuerdo con la tabla 3.3.

Componente	IM
Juntas - Todos los estados límite	75%
Todos los demás component	es:
Estado límite de fractura y fatiga	15%
Todos los demás estados limite	33%

Tabla 3.3 Factores de amplificación dinámica

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2014.

3.1.1 Capacidad de los elementos estructurales

La capacidad estructural de un elemento se define como su resistencia nominal afectada por su correspondiente factor de resistencia y por los factores de condición (φ c) y sistema (φ s) del Manual del AASHTO. Los factores de resistencia considerados (Tabla 3.3), se tomaron de acuerdo con el *Manual for Bridge Evaluation* (2013) y al *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2014).

Los efectos que se evaluaron en las vigas principales son los de flexión, cortante y compresión axial considerando la interacción de ellos, mientras que en los tirantes solamente se consideró el efecto de la tensión axial.

Tipo de efecto	Factor de resistencia
Condición (φ_c)	1.00
Sistema (φ_s)	1.00
Flexión (φ_b)	1.00
Compresión axial sección compuesta (φ_{ca})	0.90
Tensión axial a la ruptura (φ_u)	0.80

Tabla 3.4 Factores de resistencia

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2017.

En el caso de las vigas del puente Mezcala, se consideró que trabajan como sección compuesta en conjunto con la losa de concreto, con un ancho efectivo de 9.25 m, el cual se tomó de acuerdo con el *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2014). Debido a la presencia de rigidizadores longitudinales, la sección fue definida como *"Compuesta No-Compacta"*, por lo que los esfuerzos últimos en los patines no deben exceder la resistencia del material Fy (Sección 6.10.7.2), la cual tiene un valor de 35150 ton/m².

Por último, para calcular la resistencia nominal de los tirantes, se multiplicó el esfuerzo último del material, que es de 19,000 kg/cm2, por su respectiva área. El área de cada tirante se obtuvo multiplicando su correspondiente número de torones, el cual varía de 19 hasta los 31 torones, por el área efectiva del torón, la cual es de 1.415 cm2. La resistencia nominal de los tirantes varía entre las 510 y 833 toneladas.

4. Resultados

Con el modelo de EF calibrado, se simularon los 4 escenarios de carga viva vehicular que se describen en la sección 3.4 del presente trabajo. En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran las tensiones de los tirantes y los momentos flexionantes en las vigas respectivamente para la zona de aguas abajo, multiplicados por el factor de amplificación dinámica (*IM*), pero sin considerar el factor de ocupación múltiple.



Figura 4.1 Tensiones por carga viva



Figura 4.2 Momentos positivos por carga viva vehicular

4.1 Factores de capacidad de carga RF

Una vez estimados los efectos de las cargas permanentes y cargas vivas vehiculares que actúan sobre el puente, se procedió a calcular los factores de capacidad de carga (RF) de los elementos estructurales. Primero, se calificaron los tirantes de sujeción del puente, el proceso de análisis del elemento que se encontró más crítico, el cual es el tirante SA5-T11, se muestra a continuación.

RF Tirante SA5-T11 Evaluación de la fuerza axial del escenario de carga 1 (HL-93).



$$C = \varphi_c \varphi_s \varphi_u R_n = (1.0)(1.0)(0.80)(833.435) = 666.75$$
 ton.

$$DC = 288.17$$
 ton.

 $\gamma_{DC} = 1.25$

LL = 118.70 ton (Se considera el factor de amplificación dinámica (33%) y de ocupación múltiple (0.85)).

Calificación Nivel de Inventario

$$\gamma_{LL} = 1.75$$

 $RF = \frac{666.75 - (1.25)(288.17)}{(1.75)(118.70)} = 1.48$

Calificación Nivel de Operación

$$\gamma_{LL} = 1.35$$

 $RF = \frac{(1.48)(1.75)}{1.35} = \frac{666.75 - (1.25)(288.17)}{(1.35)(118.70)} = 1.91$

De esta manera se obtuvieron los RF para todos los tirantes del puente bajo los 4 escenarios de carga propuestos tanto para el nivel de Inventario como el de Operación. En las Tablas 4.1 a 4.6 se muestran los valores obtenidos de RF en el nivel de Inventario de los tirantes.

Tirante	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
SA1-T10	2.73	5.07	7.27	8.10
SA1-T9	1.99	3.75	5.39	5.98
SA1-T8	2.06	3.74	5.39	5.97
SA1-T7	2.40	4.12	5.92	6.56
SA1-T6	2.70	4.84	6.95	7.69
SA1-T5	2.92	6.01	8.05	9.21
SA1-T4	2.92	4.10	5.51	6.30
SA1-T3	2.91	3.37	4.61	5.19
SA1-T2	3.68	4.11	5.67	6.33
SA1-T1	6.84	9.13	12.59	14.15
SA2-T1	11.46	11.00	14.17	17.05
SA2-T2	5.50	4.34	5.82	6.69
SA2-T3	3.82	3.44	4.65	5.29
SA2-T4	2.89	2.78	3.83	4.28
SA2-T5	2.69	2.70	3.80	4.16
SA2-T6	3.21	3.37	4.84	5.20
SA2-T7	2.62	3.19	4.51	4.94
SA2-T8	2.34	3.27	4.65	5.09
SA2-T9	2.27	3.37	4.80	5.33
SA2-T10	1.63	2.35	3.35	3.75

Tabla 4.1 RF para los tirantes de las semiarpas 1 y 2

Tirante	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
SA3-T14	2.04	3.33	4.79	5.59
SA3-T13	3.68	6.08	8.75	10.20
SA3-T12	3.00	5.22	7.30	7.73
SA3-T11	2.92	4.06	5.77	6.16
SA3-T10	2.65	3.17	4.54	4.88
SA3-T9	2.51	2.88	4.10	4.48
SA3-T8	2.59	2.98	4.20	4.64
SA3-T7	2.59	2.96	4.12	4.60
SA3-T6	2.30	2.51	3.54	3.89
SA3-T5	3.01	3.04	4.36	4.68
SA3-T4	3.22	3.06	4.32	4.70
SA3-T3	3.59	3.36	4.64	5.14
SA3-T2	4.84	5.24	7.15	7.97
SA3-T1	5.37	9.00	12.87	15.37
SA4-T1	5.78	9.49	13.57	16.25
SA4-T2	4.99	5.49	7.39	8.37
SA4-T3	4.25	3.86	5.25	5.90
SA4-T4	3.18	3.02	4.11	4.63
SA4-T5	2.86	2.84	3.98	4.38
SA4-T6	3.17	3.33	4.79	5.16
SA4-T7	2.69	2.95	4.19	4.59
SA4-T8	2.65	3.01	4.22	4.69
SA4-T9	2.81	3.23	4.51	5.02
SA4-T10	2.72	3.14	4.43	4.84
SA4-T11	2.83	3.68	5.28	5.60
SA4-T12	3.51	5.69	7.98	8.41
SA4-T13	3.90	6.57	9.44	11.04
SA4-T14	2.25	3.67	5.28	6.18

Tabla 4.2 RF para los tirantes de las semiarpas 3 y 4

Tirante	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
SA5-T11	1.48	2.16	3.10	3.47
SA5-T10	1.78	2.69	3.83	4.27
SA5-T9	2.13	3.08	4.43	4.81
SA5-T8	1.80	2.41	3.38	3.73
SA5-T7	1.95	2.33	3.29	3.60
SA5-T6	2.34	2.51	3.59	3.87
SA5-T5	2.35	2.42	3.46	3.73
SA5-T4	1.72	1.69	2.37	2.60
SA5-T3	3.78	3.44	4.76	5.28
SA5-T2	4.16	3.28	4.48	5.05
SA5-T1	13.65	10.42	13.95	16.04
SA6-T1	6.43	8.64	11.69	13.31
SA6-T2	4.22	4.85	6.49	7.46
SA6-T3	3.14	3.89	5.23	5.97
SA6-T4	2.29	3.87	5.37	5.91
SA6-T5	2.66	5.03	7.22	7.98
SA6-T6	2.58	4.58	6.55	7.25
SA6-T7	2.11	3.75	5.35	5.92
SA6-T8	2.46	4.35	6.23	6.89
SA6-T9	2.39	4.21	6.04	6.65
SA6-T10	2.85	5.02	7.22	7.93
SA6-T11	2.86	5.02	7.23	7.92

Tabla 4.3 RF para los tirantes de las semiarpas 5 y 6

Tirante	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
SA8-T11	1.62	2.38	3.41	3.82
SA8-T10	1.51	2.29	3.26	3.63
SA8-T9	1.99	2.89	4.15	4.50
SA8-T8	1.84	2.46	3.46	3.82
SA8-T7	2.11	2.53	3.56	3.90
SA8-T6	2.36	2.53	3.63	3.91
SA8-T5	2.23	2.30	3.28	3.54
SA8-T4	2.08	2.04	2.87	3.15
SA8-T3	3.57	3.24	4.50	4.99
SA8-T2	4.25	3.35	4.58	5.15
SA8-T1	13.10	10.00	13.39	15.39
SA7-T1	6.45	8.67	11.74	13.35
SA7-T2	4.38	5.03	6.73	7.74
SA7-T3	3.11	3.85	5.17	5.91
SA7-T4	2.46	4.16	5.78	6.36
SA7-T5	2.73	5.18	7.42	8.21
SA7-T6	2.10	3.73	5.34	5.91
SA7-T7	2.28	4.04	5.77	6.39
SA7-T8	2.57	4.55	6.51	7.19
SA7-T9	2.73	4.80	6.89	7.59
SA7-T10	2.51	4.42	6.35	6.97
SA7-T11	2.70	4.74	6.82	7.47

Tabla 4.4 RF para los tirantes de las semiarpas 7 y 8

Tirante	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
SA10-T14	2.20	3.59	5.17	6.03
SA10-T13	3.69	6.10	8.77	10.23
SA10-T12	3.19	5.55	7.77	8.22
SA10-T11	2.79	3.87	5.51	5.87
SA10-T10	2.57	3.07	4.41	4.73
SA10-T9	2.42	2.78	3.96	4.32
SA10-T8	2.59	2.99	4.21	4.65
SA10-T7	2.68	3.06	4.26	4.76
SA10-T6	2.48	2.71	3.82	4.20
SA10-T5	3.03	3.06	4.40	4.72
SA10-T4	3.06	2.91	4.10	4.46
SA10-T3	3.36	3.15	4.35	4.82
SA10-T2	5.03	5.45	7.44	8.29
SA10-T1	5.35	8.96	12.81	15.31
SA9-T1	5.76	9.46	13.52	16.19
SA9-T2	5.14	5.66	7.62	8.63
SA9-T3	4.36	3.96	5.39	6.05
SA9-T4	3.21	3.05	4.15	4.68
SA9-T5	2.68	2.66	3.73	4.10
SA9-T6	3.17	3.34	4.80	5.17
SA9-T7	2.68	2.93	4.16	4.56
SA9-T8	2.69	3.06	4.28	4.76
SA9-T9	2.81	3.23	4.52	5.02
SA9-T10	2.41	2.77	3.91	4.28
SA9-T11	3.14	4.09	5.87	6.23
SA9-T12	3.59	5.82	8.16	8.60
SA9-T13	4.06	6.84	9.83	11.49
SA9-T14	2.18	3.56	5.11	5.99

Tabla 4.5 RF para los tirantes de las semiarpas 9 y 10

Tirante	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
SA12-T10	2.54	4.73	6.78	7.56
SA12-T9	2.03	3.82	5.50	6.11
SA12-T8	2.02	3.67	5.28	5.85
SA12-T7	2.34	4.02	5.77	6.39
SA12-T6	2.66	4.77	6.85	7.58
SA12-T5	2.92	6.00	8.04	9.20
SA12-T4	3.06	4.29	5.78	6.60
SA12-T3	2.91	3.37	4.61	5.18
SA12-T2	3.52	3.92	5.42	6.05
SA12-T1	6.56	8.76	12.07	13.57
SA11-T1	11.04	10.60	13.66	16.44
SA11-T2	5.27	4.16	5.58	6.41
SA11-T3	3.71	3.33	4.51	5.14
SA11-T4	3.17	3.05	4.21	4.70
SA11-T5	2.48	2.49	3.51	3.84
SA11-T6	3.20	3.36	4.83	5.19
SA11-T7	2.88	3.51	4.96	5.43
SA11-T8	2.32	3.24	4.60	5.04
SA11-T9	2.14	3.19	4.54	5.04
SA11-T10	1.50	2.16	3.09	3.45

Tabla 4.6 RF para los tirantes de las semiarpas 11 y 12

Para el caso de las vigas principales del puente Mezcala, a continuación, se muestra el proceso de análisis de la sección más crítica ante momento flexionante positivo, la cual corresponde a la localización del sensor B-EA-18.

RF Viga Principal B-EA-18, Evaluación del momento positivo del escenario de carga 1 (HL-93)



 $S_{b(LT)} = 0.1016 \text{ m}^3$ (Módulo de sección inferior para cargas de larga duración) $S_{b(ST)} = 0.1080 \text{ m}^3$ (Módulo de sección inferior para cargas de corta duración) Momentos flexionantes actuantes:

$$M_{DL} = +806.74$$
 ton-m

$$M_P = -368.53$$
 ton-m

 $M_{LL} = +1713.21$ ton-m

Esfuerzos de flexión en el patin inferior:

$$fb_{DL} = \frac{+806.74}{0.1016} = +7,950.19 \ ton/m^2$$

$$fb_P = \frac{-368.53}{0.1016} = -3,627.26 \ ton/m^2$$

$$fb_{LL} = \frac{+1713.21}{0.1080} = +15,863.05 \ ton/m^2$$

Calificación Nivel de Inventario

$$\gamma_{LL} = 1.75$$

$$RF = \frac{35150 - (1.25)(7,950.19) - (1.0)(-3,627.26)}{(1.75)(15,863.05)} = 1.04$$

Calificación Nivel de Operación

$$\gamma_{LL} = 1.35$$

 $RF_M = \frac{(1.04)(1.75)}{1.35} = 1.34$

Los RF de las secciones instrumentadas de las vigas principales del puente Mezcala se muestran en las tablas 4.7 y 4.8. Como se puede apreciar en las tablas, las secciones de las vigas del puente cuentan con la capacidad estructural adecuada para resistir los efectos de las cargas vivas vehiculares en un nivel de confiabilidad de Inventario de acuerdo al manual de AASHTO.

Tabla 4.7 RF momento flexionante positivo de las secciones de las vigas principales
instrumentadas (Aguas abajo)

Sección	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
A-EA-1	2.33	1.90	2.55	2.95
A-EA-2	1.46	1.38	1.82	2.14
A-EA-3	2.90	2.82	3.37	4.38
A-EA-4	3.46	2.99	3.77	4.63
A-EA-5	4.89	3.27	3.58	5.05
A-EA-6	4.04	3.62	4.19	5.60
A-EA-7	2.65	2.55	3.41	3.94
A-EA-8	2.53	1.94	2.47	3.00
A-EA-9	1.18	1.18	1.55	1.88
A-EA-10	1.61	1.38	1.97	2.20
A-EA-11	3.29	2.00	2.62	3.13
A-EA-12	5.96	2.79	3.64	4.31
A-EA-13	5.17	3.33	4.28	5.11
A-EA-14	4.59	3.50	3.85	5.39
A-EA-15	6.14	3.47	4.12	5.38
A-EA-16	3.68	2.30	2.89	3.59
A-EA-17	1.70	1.48	1.98	2.36
A-EA-18	1.08	1.12	1.44	1.79
A-EA-19	2.11	1.54	2.16	2.37
A-EA-20	2.35	2.14	2.98	3.30
A-EA-21	3.18	2.51	3.27	3.87
A-EA-22	6.34	3.38	4.25	5.22
A-EA-23	5.17	4.01	5.51	6.22
A-EA-24	3.23	3.14	3.76	4.87

Sección	HL-93	T3-S2-R4	T3-S3	1 T3-S2-R4
B-EA-1	2.31	1.89	2.54	2.94
B-EA-2	1.50	1.41	1.86	2.19
B-EA-3	2.87	2.79	3.33	4.34
B-EA-4	3.50	3.01	3.81	4.68
B-EA-5	5.00	3.35	3.67	5.17
B-EA-6	3.99	3.58	4.14	5.54
B-EA-7	2.58	2.49	3.33	3.85
B-EA-8	2.60	1.99	2.54	3.08
B-EA-9	1.18	1.18	1.54	1.88
B-EA-10	1.65	1.41	2.01	2.25
B-EA-11	3.24	1.97	2.58	3.08
B-EA-12	5.88	2.75	3.59	4.25
B-EA-13	5.31	3.42	4.40	5.25
B-EA-14	4.52	3.45	3.79	5.31
B-EA-15	6.34	3.59	4.26	5.56
B-EA-16	3.71	2.31	2.91	3.62
B-EA-17	1.67	1.46	1.94	2.32
B-EA-18	1.04	1.06	1.36	1.70
B-EA-19	2.17	1.58	2.22	2.43
B-EA-20	2.36	2.15	3.00	3.32
B-EA-21	3.12	2.46	3.21	3.80
B-EA-22	6.39	3.41	4.29	5.27
B-EA-23	5.06	3.93	5.39	6.09
B-EA-24	3.16	3.07	3.68	4.76

Tabla 4.8 RF momento flexionante positivo de las secciones de las vigas principales instrumentadas (Aguas arriba)

Conclusiones

En la presente investigación se realizó un análisis de la capacidad de carga de los elementos estructurales monitoreados del puente Mezcala, los cuales corresponden a las secciones de las vigas principales y los tirantes de sujeción, a través de la metodología de evaluación de puentes de AASHTO. Para ello se utilizó la información obtenida del sistema de monitoreo como son las frecuencias naturales, formas modales y fuerzas de tensión de tirantes para calibrar un modelo de elementos finitos, el cual se utilizó para simular las condiciones de cargas permanentes y cargas vivas vehiculares.

De los escenarios de carga viva vehicular simulados con el modelo, se encontró que, para el caso de las fuerzas de tensión en los tirantes, el vehículo HL-93 es el que produce los mayores efectos. En cuanto a los momentos positivos en las vigas, se observó que el vehículo T3-S2-R4 produce efectos muy similares al vehículo HL-93 y que los efectos del vehículo T3-S3 se encuentran por debajo a los obtenidos por los vehículos tipo HL-93 y T3-S2-R4.

En la evaluación de la capacidad de carga de los tirantes y vigas principales, se obtuvieron RF que satisfacen en los niveles de Inventario y Operación, por lo que se puede concluir que el puente tiene la capacidad suficiente para resistir los efectos de carga permanente actual y los efectos de la carga viva vehicular con un nivel de confiabilidad de diseño. Para el escenario de un solo vehículo T3-S2-R4 transitando sobre el puente, se obtuvo un RF mínimo de control de 1.70.

Del seguimiento realizado a las respuestas estructurales del puente Mezcala durante el año 2021, se puede concluir que estas presentan valores dentro de los rangos normales de operación. Las gráficas de las respuestas estructurales de los sensores del sistema de monitoreo se presentan en el Anexo 1.

Bibliografía

Anaya, M., Quintana, J., Carrión, F., Martínez Trujano, L., Hernández Figueroa, J., Gasca, H., Valenzuela, J., Montes, M., Hernández Guzmán, A. (2018). *Calibración y ajuste de los parámetros estructurales del modelo matemático del puente Mezcala para evaluación estructural.* Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica núm. 530.

Anaya, M., Quintana, J., Carrión, F., Martínez Trujano, L., Hernández Figueroa, J., Gasca, H., Guzmán, G., Hernández Guzmán, A. (2020). *Monitoreo y evaluación de los parámetros estructurales del puente Mezcala*. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica núm. 597.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington. D.C., 2014.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2013). 2013 Interim Revision to The Manual For Bridge Evaluation. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington. D.C., 2013.

Brincker, R., Ventura, C., Andersen, P. (2001). *Damping estimation by frequency domain decomposition*". Conference: IMAC2001: A Conference on Structural Dynamics.

Brincker, R., Ventura, C. (2015). *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons, Ltd.

Carrión, F., López, J., Quintana, J., Guzmán, A. (2007). *Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge*. Experimental Mechanics, vol. 48, pp. 153-161.

Diario Oficial de la Federación. (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.

Doyle, J. (1991). *Static and Dynamic Analysis of Structures*. Kluwer Academic Publishers.

Farrar, C., Worden, K. (2007). *An introduction to structural health monitoring*. Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 303–315.

International Organization for Standardization. (2004). *ISO 18649:2004 Mechanical vibration* — *Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges.*

Anexo 1. Seguimiento de las respuestas estructurales del puente Mezcala

Se presenta el seguimiento realizado en el tiempo a los valores de las respuestas estructurales del puente Mezcala como lo son las deformaciones, inclinaciones y tensiones en tirantes.

En las figuras A1 a A74 se muestran los valores de referencia (valor de la media de la señale) de cada sensor. El seguimiento a estos valores provee de un indicativo del estado de esfuerzos permanente del puente, desafortunadamente, debido a problemas de comunicación y energización del sistema de monitoreo no fue posible obtener datos del monitoreo en un considerable periodo de tiempo.



Figura A.1 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-1



Figura A.2 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-2



Figura A.3 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-3



Figura A.4 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-4



Figura A.5 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-5



Figura A.6 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-6



Figura A.7 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-7



Figura A.8 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-8



Figura A.9 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-9



Figura A.10 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-10



Figura A.11 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-11



Figura A.12 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-12



Figura A.13 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-13



Figura A.14 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-14



Figura A.15 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-15



Figura A.16 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-16



Figura A.17 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-17



Figura A.18 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-18



Figura A.19 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-19



Figura A.20 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-20



Figura A.21 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-21



Figura A.22 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-22



Figura A.23 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-23



Figura A.24 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-EA-24



Figura A.25 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-1



Figura A.26 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-2



Figura A.27 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-3


Figura A.28 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-4



Figura A.29 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-5



Figura A.30 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-6



Figura A.31 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-7



Figura A.32 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-8



Figura A.33 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-9



Figura A.34 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-10



Figura A.35 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-11



Figura A.36 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-12



Figura A.37 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-13



Figura A.38 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-14



Figura A.39 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-15



Figura A.40 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-16



Figura A.41 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-17



Figura A.42 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-18



Figura A.43 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-19



Figura A.44 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-20



Figura A.45 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-21



Figura A.46 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-22



Figura A.47 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-23



Figura A.48 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-EA-24

A continuación, se muestran el seguimiento a los valores de referencia de los extensómetros instalados en los pilones del puente Mezcala.







Figura A.50 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T3-EC-2



Figura A.51 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T3-EC-1



Figura A.52 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T3-EC-2



Figura A.53 Seguimiento del valor de referencia del sensor T3-EC-1



Figura A.54 Seguimiento del valor de referencia del sensor T3-EC-2



Figura A.55 Seguimiento del valor de referencia del sensor T3-EC-3



Figura A.56 Seguimiento del valor de referencia del sensor T3-EC-4



Figura A.57 Seguimiento del valor de referencia del sensor T3-EC-5



Figura A.58 Seguimiento del valor de referencia del sensor T3-EC-6

El seguimiento a los valores de referencia de los inclinómetros instalados en el puente Mezcala se muestran en las figuras







Figura A.60 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T1-I-T



Figura A.61 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T2-I-L



Figura A.62 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T2-I-T



Figura A.63 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T3-I-L



Figura A.64 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T3-I-T



Figura A.65 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T4-I-L



Figura A.66 Seguimiento del valor de referencia del sensor A-T4-I-T



Figura A.67 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T2-I-L



Figura A.68 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T2-I-T



Figura A.69 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T3-I-L



Figura A.70 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T3-I-T



Figura A.71 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T4-I-L



Figura A.72 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T4-I-T



Figura A.73 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T7-I-L



Figura A.74 Seguimiento del valor de referencia del sensor B-T7-I-T

En las figuras A. 75 a A. 98, se muestran las gráficas de los valores de la media estadística de las tensiones calculadas en periodos de 15 días, con mediciones de 3 minutos cada una. Cabe aclarar que, para cada tirante, el análisis se hace según el tipo de distribución que mejor ajusta en cada caso; por lo tanto, las distribuciones estadísticas pueden ser distintas para cada tirante, pero el valor reportado corresponde a la media de esas distribuciones.

Las tensiones de los tirantes son obtenidas mediante el método lineal indirecto, al monitorear las frecuencias naturales del tirante y conociendo sus parámetros constantes como longitud y masa total es posible monitorear su tensión en tiempo real.



Figura A.75 Seguimiento a la tensión del tirante SA1-T7



Figura A.76 Seguimiento a la tensión del tirante SA1-T3



Figura A.77 Seguimiento a la tensión del tirante SA2-T3



Figura A.78 Seguimiento a la tensión del tirante SA2-T7



Figura A.79 Seguimiento a la tensión del tirante SA3-T11



Figura A.80 Seguimiento a la tensión del tirante SA3-T4



Figura A.81 Seguimiento a la tensión del tirante SA4-T4



Figura A.82 Seguimiento a la tensión del tirante SA4-T11



Figura A.83 Seguimiento a la tensión del tirante SA5-T8



Figura A.84 Seguimiento a la tensión del tirante SA5-T3



Figura A.85 Seguimiento a la tensión del tirante SA6-T3



Figura A.86 Seguimiento a la tensión del tirante SA6-T8



Figura A.87 Seguimiento a la tensión del tirante SA7-T8



Figura A.88 Seguimiento a la tensión del tirante SA7-T3



Figura A.89 Seguimiento a la tensión del tirante SA8-T3



Figura A.90 Seguimiento a la tensión del tirante SA8-T8



Figura A.91 Seguimiento a la tensión del tirante SA-9T11



Figura A.92 Seguimiento a la tensión del tirante SA9-T4



Figura A.93 Seguimiento a la tensión del tirante SA10-T4



Figura A.94 Seguimiento a la tensión del tirante SA10-T11



Figura A.95 Seguimiento a la tensión del tirante SA11-T7



Figura A.96 Seguimiento a la tensión del tirante SA11-T3



Figura A.97 Seguimiento a la tensión del tirante SA12-T3



Figura A.98 Seguimiento a la tensión del tirante SA12-T7
Otra de las variables a considerar durante el monitoreo estructural del puente Mezcala, es el valor de la media estadística de deformación unitaria provocada por las cargas vivas vehiculares, el cual es un parámetro bastante sensible a los mantenimientos realizados y a los cierres parciales de cuerpos o carriles. Siempre que un vehículo circula sobre el puente se genera un esfuerzo sobre las vigas principales a tensión y después a compresión, el valor absoluto de estos registros, a tensión y compresión, es utilizado para construir una distribución estadística para cada sensor.

Las gráficas de las figuras A. 99 a A. 194 muestran el valor de la media de cada sensor a tensión y compresión desde el año de 2016.



Figura A.99 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-1



Figura A.100 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-2



Figura A.101 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-3



Figura A.102 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-4



Figura A.103 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-5



Figura A.104 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-6



Figura A.105 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-7



Figura A.106 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-8



Figura A.107 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-9



Figura A.108 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-10



Figura A.109 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-11



Figura A.110 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-12



Figura A.111 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-13



Figura A.112 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-14



Figura A.113 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-15



Figura A.114 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-16



Figura A.115 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-117



Figura A.116 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-18



Figura A.117 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-19



Figura A.118 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-20



Figura A.119 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-21



Figura A.120 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-22



Figura A.121 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-23



Figura A.122 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor A-EA-24



Figura A.123 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-1



Figura A.124 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-2



Figura A.125 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-3



Figura A.126 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-4



Figura A.127 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-5



Figura A.128 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-6



Figura A.129 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-7



Figura A.130 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-8



Figura A.131 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-9



Figura A.132 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-10



Figura A.133 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-11



Figura A.134 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-12



Figura A.135 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-13



Figura A.136 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-14



Figura A.137 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-15



Figura A.138 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-16



Figura A.139 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-17



Figura A.140 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-18



Figura A.141 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-19



Figura A.142 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-20



Figura A.143 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-21



Figura A.144 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-22



Figura A.145 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-23



Figura A.146 Seguimiento de las deformaciones a tensión del sensor B-EA-24



Figura A.147 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-1



Figura A.148 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-2



Figura A.149 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-3



Figura A.150 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-4



Figura A.151 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-5



Figura A.152 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-6



Figura A.153 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-7



Figura A.154 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-8



Figura A.155 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-9



Figura A.156 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-10



Figura A.157 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-11



Figura A.158 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-12



Figura A.159 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-13



Figura A.160 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-14



Figura A.161 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-15



Figura A.162 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-16



Figura A.163 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-17



Figura A.164 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-18



Figura A.165 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-19



Figura A.166 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-20



Figura A.167 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-21



Figura A.168 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-22



Figura A.169 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-23


Figura A.170 Seguimiento de las def. a compresión del sensor A-EA-24



Figura A.171 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-1



Figura A.172 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-2



Figura A.173 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-3



Figura A.174 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-4



Figura A.175 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-5



Figura A.176 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-6



Figura A.177 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-7



Figura A.178 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-8



Figura A.179 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-9



Figura A.180 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-10



Figura A.181 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-11



Figura A.182 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-12



Figura A.183 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-13



Figura A.184 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-14



Figura A.185 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-15



Figura A.186 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-16



Figura A.187 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-17



Figura A.188 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-18



Figura A.189 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-19



Figura A.190 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-20



Figura A.191 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-21



Figura A.192 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-22



Figura A.193 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-23



Figura A.194 Seguimiento de las def. a compresión del sensor B-EA-24



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo" Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México. C.P. 76703 Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610 Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/