

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
1.2. Metodología.....	4
1.2.1. Modelación en ANSYS.....	4
1.2.2. Replica Experimental en ANSYS.....	4
1.2.3. Modelación Dinámica en ANSYS.....	4
1.2.4. Caso de Estudio: Puente Águila Norte	4
1.2.5. Deducción de Ecuación	4
CAPÍTULO 2 LLAVES DE CORTE EN MANUAL DE CARRETERAS.....	5
2.1. Versión 2018.....	7
2.2. Solicitud de Llaves de Corte	9
2.3. Diseño de Llaves Externas	10
2.3.1. Vigas de Borde.....	10
2.4. Diseño de Llaves Internas	12
2.4.1. Transferencia de Corte en la Interfaz – Corte por Fricción.....	12
2.4.2. Ménsulas y Cartelas.....	14
CAPÍTULO 3 ESTUDIOS EN LLAVES DE CORTE.....	15
3.1. Llaves Externas Monolíticas.....	15
3.1.1. Experimento de Megally et al. (2002).....	15
3.1.2. Experimento de Bozorgzadeh et al. (2007)	21
3.1.3. Curvas Fuerza Desplazamiento Analíticas.....	23
3.1.3.1. Curva Fuerza Desplazamiento según Megally et al. (2002).....	23
3.1.3.2. Curva Fuerza Desplazamiento según Han, Zhou, Ou, et al., (2017).....	26
3.2. Llaves Externas Resilientes.....	30

3.2.1.	Experimento de Bozorgzadeh et al. (2007)	30
3.3.	Llaves Internas Monolíticas.....	32
3.3.1.	Experimento de Megally et al. (2002).....	32
3.3.2.	Curvas Fuerza Desplazamiento Analíticas.....	35
3.3.2.1.	Curva Fuerza Desplazamiento según Silva et al. (2003).....	35
CAPÍTULO 4 SOFTWARE ANSYS: ELEMENTOS Y MATERIALES		37
4.1.	Elementos de ANSYS Workbench	37
4.1.1.	Elemento SOLID65	37
4.1.2.	Elemento BEAM188.....	38
4.2.	Elementos de ANSYS LS-DYNA	38
4.2.1.	ELEMENT_SOLID.....	38
4.2.2.	ELEMENT_BEAM.....	39
4.3.	Materiales de ANSYS Workbench	40
4.3.1.	Hormigón.....	40
4.3.1.1.	Material Linear Isotropic Elastic.....	40
4.3.1.2.	Material Drucker Prager	40
4.3.2.	Acero	42
4.3.2.1.	Material Linear Isotropic Elastic.....	42
4.3.2.2.	Material Multilinear Isotropic Hardening.....	42
4.4.	Materiales de ANSYS LS-DYNA	45
4.4.1.	Hormigón.....	45
4.4.1.1.	Material MAT CSCM	45
4.4.2.	Acero	50
4.4.2.1.	Material MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.....	50
4.5.	Factor de Incremento Dinámico.....	51
4.5.1.	Factor de Incremento Dinámico del Hormigón	54
4.5.1.1.	Formulación CEB.....	54
4.5.1.2.	Formulación Viscoplastica.....	55
4.5.2.	Factor de Incremento Dinámico del Acero	58
4.5.3.	Curvas Fuerza – Impulso	59

CAPÍTULO 5 SOFTWARE ANSYS: MODELACIÓN	64
5.1. Modelación Estática en ANSYS Workbench.....	64
5.1.1. Discretización	64
5.1.2. Condiciones de Borde.....	66
5.2. Modelación Dinámica en ANSYS LS-DYNA	69
5.2.1. Workbench to LS-DYNA	69
5.2.2. LS-PrePost	70
5.2.2.1. <i>Boundary</i>	70
5.2.2.2. <i>Constrained</i>	70
5.2.2.3. <i>Contact</i>	71
5.2.2.4. <i>Control</i>	71
5.2.2.5. <i>Database</i>	71
5.2.2.6. <i>ASCII Options</i>	72
5.2.2.7. <i>EXTENT_BINARY</i>	72
5.2.2.8. <i>Deformable</i>	72
5.2.2.9. <i>Define</i>	72
5.2.2.10. <i>Keyword</i>	73
5.2.3. LS-Post.....	73
5.3. Modelos de Elementos Finitos.....	75
5.3.1. Modelos de Elementos Finitos de Llaves Exteriores Monolíticas.....	75
5.3.1.1. Modelo 1A E.M.	75
5.3.1.2. Modelo 1B E.M.	77
5.3.1.3. Modelo 2A E.M.	78
5.3.1.4. Modelo 2B E.M.	79
5.3.1.5. Modelo 4A E.M.	80
5.3.1.6. Modelo 4B E.M.	81
5.3.2. Modelos de Elementos Finitos de Llaves Exteriores Resilientes	82
5.3.2.1. Modelo 5A E.R.....	82
5.3.2.2. Modelo 5B E.R.....	83
5.3.3. Modelos de Elementos Finitos de Llaves Interiores Monolíticas.....	84
5.3.3.1. Modelo 1A I.M.	84
5.3.3.2. Modelo 2A I.M.	85
5.3.3.3. Modelo 2B I.M.	86
5.3.3.4. Modelo 2C I.M.	87
5.3.3.5. Modelo 2D I.M.	88

CAPÍTULO 6 CASO DE ESTUDIO: PUENTE ÁGUILA NORTE.....	89
6.1. Cepas.....	90
6.2. Estribos	92
6.3. Superestructura	94
6.4. Conexión Superestructura – Infraestructura	95
6.4.1. Elastómeros.....	95
6.4.2. Barras Sísmicas	96
6.5. Especificaciones Técnicas	97
6.6. Memoria de Cálculo	99
6.7. Observación de Daños.....	99
6.8. Modelos de Elementos Finitos de Puente Águila Norte.....	102
6.8.1. Modelo Estribo Simple E.M.....	103
6.8.2. Modelo Estribo Completo E.M.	104
6.8.3. Modelo Cepa Simple E.M.....	105
6.8.4. Modelo Cepa Completa E.M.....	106
6.8.5. Modelo Estático y Dinámico.....	107
 CAPÍTULO 7 RESULTADOS MODELACIÓN LLAVES EXTERNAS MONOLÍTICAS	
110	
7.1. Modelación de Experimento de Megally et al. (2002).....	110
7.1.1. Tope 1A Externo Monolítico.....	111
7.1.2. Tope 1B Externo Monolítico.....	113
7.1.3. Tope 2A Externo Monolítico.....	115
7.1.4. Tope 2B Externo Monolítico.....	117
7.2. Modelación de Experimento de Bozorgzadeh et al. (2007)	119
7.2.1. Tope 4A Externo Monolítico.....	119
7.2.2. Tope 4B Externo Monolítico.....	121
7.3. Capacidad Máxima de Llaves Externas Monolíticas.....	123

7.4. Análisis de Resultados Llaves Externas Monolíticas.....	124
7.5. Propuesta de Ecuación Llaves Externas Monolíticas.....	125
CAPÍTULO 8 RESULTADOS MODELACIÓN LLAVES EXTERNAS RESILIENTES	
126	
8.1. Modelación de Experimento de Bozorgzadeh et al. (2007)	126
8.1.1. Tope 5A Externo Resiliente.....	126
8.1.2. Tope 5B Externo Resiliente	129
8.2. Capacidad Máxima de Llaves Externas Resilientes	131
8.3. Análisis de Resultados Llaves Externas Resilientes	131
8.4. Propuesta de Ecuación Llaves Externas Resilientes	134
CAPÍTULO 9 RESULTADOS MODELACIÓN LLAVES INTERNAS MONOLÍTICAS	
137	
9.1. Modelación de Experimento de Megally et al. (2002).....	137
9.1.1. Tope 1A Interno Monolítico.....	137
9.1.2. Tope 2A Interno Monolítico.....	140
9.1.3. Tope 2B Interno Monolítico.....	142
9.1.4. Tope 2C Interno Monolítico.....	144
9.1.5. Tope 2D Interno Monolítico.....	146
9.2. Capacidad Máxima de Llaves Internas Monolíticas.....	148
9.3. Análisis de Resultados de Llaves Internas Monolíticas.....	149
9.4. Propuesta de Ecuación Llaves Internas Monolíticas	153
CAPÍTULO 10 RESULTADOS CASO DE ESTUDIO: PUENTE ÁGUILA NORTE....	
154	
10.1. Estribo	154
10.1.1. Estribo Simple	154
10.1.2. Estribo Completo.....	156
10.2. Cepa.....	163

10.2.1.	Cepa Simple.....	163
10.2.2.	Cepa Completa	164
10.3.	Curvas Fuerza – Desplazamiento	167
10.4.	Capacidad Máxima de Llaves en P. Águila Norte	168
10.4.1.	Estribo	168
10.4.2.	Cepa.....	169
10.5.	Curvas Fuerza – Impulso.....	170
10.6.	Análisis de Resultados Puente Águila Norte.....	172
10.6.1.	Estribo	172
10.6.2.	Cepa.....	173
10.6.3.	Efectos de Impactos.....	175
10.7.	Propuesta de Ecuación Llaves Externas Monolíticas	176
CAPÍTULO 11 CONCLUSIONES		178
CAPÍTULO 12 BIBLIOGRAFÍA.....		181
ANEXOS.....		185