
Índice

<i>Prólogo</i>	xiii
<i>Abreviaciones y Notaciones</i>	xv
1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Metodología general	2
1.3 ¿Qué es un arco tipo network?	3
2. Historia y desarrollo del arco tipo network	7
2.1 Inicios de la construcción de puentes arco en celosía	7
2.2 Los primeros arcos atirantados	9
2.3 Desarrollo del arco atirantado como viga	11
2.4 Origen de las péndolas verticales en arcos atirantados	14
2.5 Antecesor del arco tipo network – El puente tipo Nielsen	18
2.6 Invento del arco tipo network	19
2.7 Arcos tipo network del estilo japonés	21
2.8 Renacimiento del arco tipo network en el mundo occidental	22
2.8.1 Regreso de Asia	23
2.8.2 Las ponencias de PER TVEIT	23
3. Generalidades	25
3.1 Geometría del arco tipo network	25
3.1.1 El plano del arco	25
3.1.1 El arriostramiento	27
3.2 Puente de ejemplo de esta tesis	29
3.3 Comparación con arcos atirantados convencionales	31
3.3.1 Arco atirantado con péndolas verticales	31
3.3.2 Arco atirantado con péndolas zig-zag	33
4. Ejemplos de puentes en arco tipo network realizados	35
4.1 Puente de Steinkjer	35
4.2 Puente sobre el Bolstadstraumen	40
4.3 Puente de Bechyně	42
4.4. Puente sobre el Río Carbón	45
4.5 Otros ejemplos	48
5. Diseño general de puentes en arco tipo network	49
5.1 Arco	49
5.2 Péndolas	51
5.2.1 La red de péndolas	52
5.2.1.1 Generalidades	52
5.2.1.2 La red rómbica	54
5.2.1.3 Distribuciones mejoradas	55
5.2.1.3.1 <i>La distribución radial de péndolas</i>	56
5.2.1.3.2 <i>Variación constante de la inclinación</i>	57
5.2.1.3.3 <i>Distancias inferiores constantes en la mitad central del tablero</i>	58
5.2.1.4 Péndolas descargadas	58
5.2.2 Las propias péndolas	59

5.3	Tablero	61
5.4	Otros detalles	63
5.4.1	Conexión entre arco y tablero	63
5.4.2	Arriostramiento superior	65
5.4.3	Viga transversal entre los apoyos	66
5.5	Métodos de construcción	66
5.6	La estética de arcos tipo network	69
6.	Clasificación de los mecanismos resistentes del arco tipo network	71
6.1	Mecanismos resistentes principales	72
6.1.1	Esfuerzos	72
6.1.1.1	Esfuerzos axiles en arco y tirante	72
6.1.1.2	Momentos flectores en arco y tirante	75
6.1.1.3	Fuerzas de péndola	78
6.1.2	Deformaciones	81
6.2	Mecanismos resistentes secundarios	84
6.2.1	Esfuerzos	84
6.2.1.1	Esfuerzos axiles en arco y tirante	84
6.2.1.2	Momentos flectores en arco y tirante	85
6.2.2	Deformaciones	87
6.3	Efectos de no linealidad geométrica	89
6.3.1	Esfuerzos	89
6.3.1.1	Esfuerzos axiles en arco y tirante	89
6.3.1.2	Momentos flectores en arco y tirante	90
6.3.1.3	Fuerzas de péndola	91
6.2.3	Deformaciones	92
7.	Estabilidad del arco	93
7.1	Introducción	93
7.2	Procedimiento general	94
7.2.1	Determinación de la carga de pandeo	94
7.2.2	Determinación del modo de pandeo elástico	96
7.3	Pandeo del arco en su plano	96
7.3.1	Estudio paramétrico	96
7.3.1.1	Influencia del tipo de la carga	96
7.3.1.1.1	<i>Peso propio y carga muerta</i>	97
7.3.1.1.2	<i>Peso propio, carga muerta y sobrecarga en todo el puente</i>	97
7.3.1.1.3	<i>Peso propio, carga muerta y sobrecarga en la mitad del puente</i>	98
7.3.1.1.4	<i>Peso propio, carga muerta y carga puntual en el centro del puente</i>	98
7.3.1.2	Influencia del número de péndolas	99
7.3.1.3	Influencia del ángulo péndola-arco	100
7.3.1.4	Influencia del momento de inercia de flexión del arco	101
7.3.1.5	Influencia del momento de inercia de flexión del tirante	102
7.3.1.6	Conclusiones del estudio paramétrico	103
7.3.2	Fórmula de proyecto	104
7.3.2.1	Método analítico derivado por el autor	104
7.3.2.2	Método analítico según TVEIT 1973	105
7.3.2.3	Evaluación del método analítico	106
7.4	Pandeo lateral de arcos tipo network sin arriostramiento superior	107
7.4.1	Ejemplo de introducción	108
7.4.2	Teorías existentes	108
7.4.3	Método aproximado derivado por el autor	110
7.4.3.1	Consideraciones teóricas	110
7.4.3.2	Determinación y calibración del coeficiente de amplificación	110
7.4.3.3	Evaluación del método analítico	111
7.4.3.4	Explotación del método analítico	112
7.4.3.4.1	<i>Empotramiento del arco</i>	112

7.4.3.4.2	<i>Relación entre momentos de inercia de flexión transversal y de torsión</i>	113
7.4.3.4.3	<i>Relación entre momentos de inercia de flexión fuera y en el plano del arco</i>	114
7.5	Pandeo lateral de arcos tipo network con arriostramiento superior	117
7.5.1	Ejemplo de introducción	117
7.5.2	Arriostramiento tipo Vierendeel	118
7.5.2.1	Estudio paramétrico	119
7.5.2.1.1	<i>Una sola viga transversal</i>	119
7.5.2.1.2	<i>Dos vigas transversales</i>	119
7.5.2.1.3	<i>Tres o más vigas transversales</i>	121
7.5.2.2	Método analítico	121
7.5.2.2.1	<i>Carga de pandeo del portal del puente</i>	122
7.5.2.2.1.1	<i>Teoría existente</i>	122
7.5.2.2.1.2	<i>Fórmula derivada por el autor</i>	123
7.5.2.2.2	<i>Carga de pandeo de la zona central</i>	125
7.5.2.2.3	<i>Carga de pandeo del sistema</i>	125
7.5.2.2.4	<i>Evaluación del método analítico</i>	126
7.5.2.3	Consideraciones prácticas de diseño	127
7.5.3	Arriostramientos tipo celosía	128
7.5.3.1	Generalidades	128
7.5.3.2	Fórmula de proyecto	131
7.5.3.2.1	<i>Pandeo lateral de la zona central</i>	131
7.5.3.2.2	<i>Pandeo lateral del portal en arcos con arriostramiento tipo celosía</i>	131
7.5.3.3	Consideraciones prácticas • Aplicación del método analítico derivado por el autor	133
7.6	Imperfecciones geométricas equivalentes	134
7.6.1	Procedimiento general	135
7.6.2	Imperfección para flexión del arco en su plano	137
7.6.3	Imperfección para flexión de arcos libres fuera de su plano	138
7.6.4	Imperfección para flexión transversal de arcos arriostrados	140
7.6.4.1	Pandeo lateral de los portales	141
7.6.4.2	Pandeo lateral de la zona central	142
8.	Comportamiento estructural dinámico	145
8.1	Caracterización dinámica del arco tipo network	145
8.1.1	Vibraciones naturales del puente	146
8.1.1.1	Generalidades	146
8.1.1.2	Vibraciones transversales	146
8.1.1.2.1	<i>Tablero</i>	146
8.1.1.2.2	<i>Arcos</i>	147
8.1.1.2.2.1	<i>Arcos con arriostramiento</i>	148
8.1.1.2.2.2	<i>Arcos sin arriostramiento</i>	150
8.1.1.3	Vibraciones verticales	151
8.1.1.4	Vibración torsional	157
8.1.1.5	Vibración de las péndolas	160
8.1.1.6	Otros efectos	162
8.1.1.7	Resumen y conclusiones	163
8.1.2	Amortiguamiento	163
8.1.3	Ductilidades	165
8.2	Respuesta estructural a cargas móviles - Trenes de alta velocidad	165
8.2.1	Generalidades	165
8.2.1.1	Integración directa en el tiempo	165
8.2.1.2	Exigencias para puentes de ferrocarril	166
8.2.1.2.1	<i>Modelo de cargas</i>	166
8.2.1.2.2	<i>Aceleraciones verticales</i>	166
8.2.2	Velocidades hasta 220 km/h	167
8.2.2.1	Mayoración dinámica – Coeficiente de impacto	168
8.2.2.1.1	<i>Evaluación simplificada del coeficiente de impacto</i>	168
8.2.2.1.2	<i>Cálculo exacto del coeficiente de impacto</i>	170

8.2.2.1.3	<i>Comparación de ambos métodos</i>	172
8.2.2.2	Aceleraciones	173
8.2.2.3	Resonancia	175
8.2.3	Velocidades superiores a 220 km/h	175
8.2.3.1	Diseño modificado del puente de ejemplo	175
8.2.3.2	Coeficiente de impacto	179
8.2.3.2.1	<i>Evaluación simplificada del coeficiente de impacto del tren tipo</i>	180
8.2.3.2.2	<i>Cálculo exacto del coeficiente de impacto de trenes reales</i>	180
8.2.3.2.3	<i>Influencia sobre el dimensionamiento</i>	182
8.2.3.3	Aceleraciones	183
8.2.3.3.1	<i>Diseño original del puente de ejemplo</i>	183
8.2.3.3.2	<i>Diseño modificado del puente de ejemplo</i>	188
8.2.3.3.3	<i>Aceleraciones verticales en el interior del tren</i>	188
8.2.3.4	Resonancia	190
8.3	Resistencia sísmica	195
8.3.1	Procedimiento general	195
8.3.1.1	Espectro de respuesta elástica	196
8.3.1.2	Aceleración de referencia	197
8.3.2	Tablero	198
8.3.3	Arcos	200
8.3.3.1	Arcos con arriostramiento	200
8.3.3.2	Arcos sin arriostramiento	201
9.	Resultados	203
9.1	Resumen	203
9.1.1	Estudios y resultados	203
9.1.2	Fórmulas de proyecto	208
9.2	Conclusiones	216
9.3	Futuras líneas de investigación	218
Bibliografía		219
Referencia de las imágenes		225
Apéndice		A1