

# Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Alcance .....	3
1.3. Objetivo general.....	3
1.4. Objetivos específicos .....	4
Capítulo 2: Niveles de ingeniería y estimación de costos .....	6
2.1. Características del nivel de estimado.....	8
2.2. Lista de datos y entregables por nivel.....	10
Capítulo 3: Bases de diseño por disciplina .....	15
3.1. Procesos .....	16
3.2. Hidráulica .....	20
3.2.1. Hidrología .....	20
3.2.2. Hidráulica fluvial .....	21
3.2.3. Cálculo de socavación .....	22
3.2.3.1. Socavación general .....	23
3.2.3.2. Socavación local en estribos y cepas .....	26
3.2.4. Hidráulica de relave .....	29
3.2.4.1. Velocidad límite.....	31
3.3. Mecánica de suelos .....	32
3.4. Civil .....	35
3.5. Electricidad e instrumentación .....	36
3.6. Mecánica.....	42
3.6.1. Material y protección.....	43
3.6.2. Dimensionamiento .....	44
3.6.2.1. Anchos típicos .....	44
3.6.2.2. Cálculo de revancha y altura total .....	45
3.6.3. Juntas .....	46
3.7. Estructuras .....	47
3.7.1. Aspectos sísmicos.....	47
3.7.2. Estructuras alternativas de estructuración para el puente .....	49
3.7.3. Materiales .....	52
3.7.3.1. Acero estructural.....	52

3.7.3.2. Hormigón.....	60
3.7.3.3. Acero de refuerzo .....	61
3.7.4. Cargas de cálculo.....	62
3.7.5. Combinaciones de carga y control de deformaciones .....	87
3.8. Impacto ambiental .....	89
3.9. Mantenimiento y mantenibilidad.....	91
3.10. Costos .....	94
Capítulo 4: Diseños de puentes tipo para un nivel de ingeniería seleccionado.....	97
4.1. Estados de carga de diseño .....	99
4.1.1. Carga muerta (PP).....	99
4.1.2. Sobrecarga (SC).....	101
4.1.3. Carga sísmica (E).....	101
4.1.4. Carga de viento (V) .....	102
4.1.5. Temperatura (T).....	103
4.2. Combinaciones de carga y control de deformaciones .....	103
4.3. Prediseño y estructuración propuesta .....	104
4.4. Modelo tridimensional.....	116
4.4.1. Cargas .....	116
4.4.2. Esquemas, dimensiones y perfiles .....	119
Capítulo 5: Resultados .....	143
5.1. Parámetros dinámicos.....	143
5.2. Perfiles, esfuerzos y deformaciones .....	144
5.3. Fundaciones .....	148
5.3.1. Estabilidad .....	151
5.3.2. Área comprimida y tensión admisible .....	152
5.3.3. Punzonamiento .....	152
5.4. Resultados fundaciones .....	154
5.5. Estribos .....	156
5.6. Excavaciones .....	158
5.7. Costos .....	160
5.8. Resumen general.....	170
Conclusiones y recomendaciones .....	172
Bibliografía .....	176
Anexos .....	178

# Índice de tablas

Tabla 2.1: Niveles de estimación de costos.....	6
Tabla 2.2: Estados de entregables según nivel y disciplina.....	11
Tabla 2.3: Variabilidad de costos de estimado según precisión asociada al nivel de ingeniería.....	13
Tabla 3.1: Valores referenciales para parámetros tipos entregados por disciplina de procesos.....	17
Tabla 3.2: Factores que influyen en socavación.....	23
Tabla 3.3: Datos hidráulicos para cálculo de canoa. ....	29
Tabla 3.4: Características transmisor de nivel ultrasónico.....	38
Tabla 3.5: Características del controlador de flujo.....	39
Tabla 3.6: Características del controlador de flujo.....	39
Tabla 3.7: Características del transmisor de flujo. ....	40
Tabla 3.8: Características sistema en línea de manejo de datos. ....	41
Tabla 3.9: Requerimientos mínimos poliuretano. ....	44
Tabla 3.10: Requerimientos mínimos poliuretano. ....	44
Tabla 3.11: Propiedades comunes de aceros.....	53
Tabla 3.12: Aceros estructurales según NCh 203 Of.2006.....	54
Tabla 3.13: Aceros estructurales según ASTM.....	54
Tabla 3.14: Principales usos aceros estructurales según ASTM.....	55
Tabla 3.15: Pesos de recubrimiento de zinc según espesor y largo de pieza. ....	58
Tabla 3.16: Grado de hormigón y su respectiva resistencia a la compresión según NCh170 Of.2016. .....	61
Tabla 3.17: Aceros de refuerzo según NCh204 Of.2006.....	61
Tabla 3.18: Diámetros comerciales y masa lineal de barras de refuerzo. ....	62
Tabla 3.19: Velocidad básica de viento para diferentes estaciones. Fuente: NCh432 Of.2010.....	66
Tabla 3.20: Velocidad básica de viento para distintas zonas del país. Fuente: NCh432 Of.2010. ...	66
Tabla 3.21: Factor de direccionalidad del viento. Fuente: NCh432 Of.2010.....	69
Tabla 3.22: Factor de importancia de la estructura. Fuente: NCh432 Of.2010.....	69
Tabla 3.23: Coeficiente de exposición a la distribución de velocidades. Fuente: NCh432 Of.2010.71	
Tabla 3.24: Factores topográficos. Fuente: NCh432 Of.2010.....	73
Tabla 3.25: Constantes de terreno. Fuente: NCh432 Of.2010. ....	75
Tabla 3.26: Valores de coeficiente de presión externa. Fuente: NCh432 Of.2010.....	76
Tabla 3.27: Aceleración máxima de suelo y efectiva por zona según Manual de Carreteras: Vol. 3. .....	81
Tabla 3.28: Tipos de suelo según Manual de Carreteras: Vol 3.....	82
Tabla 3.29: Constantes espectrales. Fuente: Manual de Carreteras: Vol 3. ....	83
Tabla 3.30: Clasificación de suelos. Fuente: AASHTO LRFD: Bridge Design Specification – Tabla 3.10.3.1-1 – “Site Class Definitions”. ....	84

Tabla 3.31: Coeficiente de sitio $F_{pga}$ . Fuente: AASHTO LRFD: Bridge Design Specification – Tabla 3.10.3.2-1 – “Values of Site Factor, $F_{pga}$ , at Zero-Period on Acceleration Spectrum”.....	86
Tabla 3.32: Coeficiente de sitio $F_a$ . Fuente: AASHTO LRFD: Bridge Design Specification – Tabla 3.10.3.2-2 – “Values of Site Factor, $F_a$ , for Short-Period Range of Acceleration Spectrum”... 86	86
Tabla 3.33: Coeficiente de sitio $F_v$ . Fuente: AASHTO LRFD: Bridge Design Specification – Tabla 3.10.3.2-3 – “Values of Site Factor, $F_v$ , for Long-Period Range of Acceleration Spectrum”... 86	86
Tabla 3.34: Combinaciones de carga según tensiones admisibles. ....	87
Tabla 3.35: Factores de seguridad para evaluar estabilidad en fundaciones. ....	88
Tabla 3.36: Factores humanos que afectan la mantenibilidad.....	91
Tabla 3.37: Factores debido a logística de mantención que afectan la mantenibilidad.....	92
Tabla 3.38: Factores de diseño que afectan la mantenibilidad. ....	92
Tabla 3.39: Factores de seguridad y medio ambiente que afectan la mantenibilidad. ....	93
Tabla 4.1: Datos hidráulicos a una producción de 140 ktpd. ....	100
Tabla 4.2: Datos hidráulicos a una producción de 240 ktpd. ....	100
Tabla 4.3: Parámetros sísmico. ....	101
Tabla 4.4: Combinaciones de carga según tensiones admisibles. ....	103
Tabla 4.5: Factores de seguridad para evaluar estabilidad en fundaciones. ....	104
Tabla 4.6: Características de modelos.....	110
Tabla 4.7: Cargas utilizadas en prediseño.....	111
Tabla 4.8: Perfiles prediseño 1, 2 y 3.....	112
Tabla 4.9: Distancia entre columnas. ....	112
Tabla 4.10: Carga muestra y sobrecarga sobre diseño 1. ....	116
Tabla 4.11: Carga muestra y sobrecarga sobre diseño 2. ....	117
Tabla 4.12: Carga muestra y sobrecarga sobre diseño 3. ....	118
Tabla 4.13: Elementos de modelos de viga enrejada. ....	130
Tabla 4.14: Elementos de modelos de cepa 1 y 4. ....	131
Tabla 4.15: Elementos de modelos de cepa 2 y 3. ....	131
Tabla 5.1: Dimensiones de sección. ....	143
Tabla 5.2: Parámetros dinámicos. ....	143
Tabla 5.3: Pesos por estructuras diseño 1. ....	145
Tabla 5.4: Pesos por estructuras diseño 2. ....	146
Tabla 5.5: Pesos por estructuras diseño 3. ....	147
Tabla 5.6: Factores de seguridad para evaluar estabilidad en fundaciones.....	151
Tabla 5.7: Dimensiones de fundaciones diseño 1 y 2. ....	154
Tabla 5.8: Dimensiones de fundaciones diseño 3. ....	155
Tabla 5.9: Cubicación de estribos según diseño.....	157
Tabla 5.10: Movimiento de tierras diseño 1 y 2.....	158

Tabla 5.11: Movimiento de tierras diseño 3.....	159
Tabla 5.12: Presupuesto diseño 1 (con acartelamiento).....	161
Tabla 5.13: Presupuesto diseño 1 (sin acartelamiento).....	162
Tabla 5.14: Presupuesto diseño 2 (con acartelamiento).....	163
Tabla 5.15: Presupuesto diseño 2 (sin acartelamiento).....	164
Tabla 5.16: Presupuesto diseño 2 (con acartelamiento y aumento de sección).....	165
Tabla 5.17: Presupuesto diseño 3.....	166
Tabla 5.18: Resumen diseños.....	169
Tabla 5.19: Porcentajes de peso en costo de diseños 1, 2 y 3 respecto a estructuras asociadas a actividades de una planta de procesos de 60-80 ktpd.....	169
Tabla 5.20: Resumen diseños.....	170
Tabla 5.21: Cargas distribuidas según diseño. ....	170
Tabla 5.22: Factores de utilización promedio según diseño. ....	170
Tabla 5.23: Distribución de pesos por elemento. ....	171
Tabla 5.24: Resumen de costos. ....	171
Tabla 5.25: Distribución de costos.....	171
Tabla B.1: Perfiles diseño 1 SIN acartelamiento (viga enrejada). ....	188
Tabla B.2: Perfiles diseño 1 SIN acartelamiento (Torres enrejadas). ....	189
Tabla B.3: Perfiles diseño 1 CON acartelamiento (viga enrejada). ....	191
Tabla B.4: Perfiles diseño 1 CON acartelamiento (Torres enrejadas). ....	192
Tabla B.5: Perfiles diseño 2 SIN acartelamiento (viga enrejada). ....	194
Tabla B.6: Perfiles diseño 2 SIN acartelamiento (Torres enrejadas). ....	195
Tabla B.7: Perfiles diseño 2 CON acartelamiento (viga enrejada). ....	197
Tabla B.8: Perfiles diseño 2 CON acartelamiento (Torres enrejadas). ....	198
Tabla B.9: Disminución de carga de elementos de viga. ....	200
Tabla B.10: Nuevos perfiles en viga enrejada.....	200
Tabla B.11: Perfiles diseño 3 (viga enrejada). ....	201
Tabla B.12: Perfiles diseño 2 CON acartelamiento (Torres enrejadas). ....	202
Tabla C.13: Solicitaciones y factores para verificar estabilidad diseño 1 y 2 (CP1). ....	205
Tabla C.14: Área comprimida y tensión en suelo diseño 1 y 2 (CP1, sentido transversal).....	205
Tabla C.15: Área comprimida y tensión en suelo diseño 1 y 2 (CP1, sentido longitudinal).....	206
Tabla C.16: Solicitaciones y factores para verificar estabilidad diseño 1 y 2 (CP2a).....	207
Tabla C.17: Área comprimida y tensión en suelo diseño 1 y 2 (CP2a, sentido transversal).....	207
Tabla C.18: Área comprimida y tensión en suelo diseño 1 y 2 (CP2a, sentido longitudinal).....	208
Tabla C.19: Solicitaciones y factores para verificar estabilidad diseño 1 y 2 (CP2b). ....	209
Tabla C.20: Área comprimida y tensión en suelo diseño 1 y 2 (CP2b, sentido transversal).....	209
Tabla C.21: Área comprimida y tensión en suelo diseño 1 y 2 (CP2b, sentido longitudinal).....	210

Tabla C.22: Solicitaciones y factores para verificar estabilidad diseño 3 (CP1). .....	211
Tabla C.23: Área comprimida y tensión en suelo diseño 3 (CP1, sentido transversal).....	211
Tabla C.24: Área comprimida y tensión en suelo diseño 3 (CP1, sentido longitudinal).....	212
Tabla C.25: Solicitaciones y factores para verificar estabilidad diseño 3 (CP2a).....	213
Tabla C.26: Área comprimida y tensión en suelo diseño 3 (CP2a, sentido transversal).....	213
Tabla C.27: Área comprimida y tensión en suelo diseño 3 (CP2a, sentido longitudinal).....	214
Tabla C.28: Solicitaciones y factores para verificar estabilidad diseño 3 (CP2b). .....	215
Tabla C.29: Área comprimida y tensión en suelo diseño 3 (CP2b, sentido transversal).....	215
Tabla C.30: Área comprimida y tensión en suelo diseño 3 (CP2b, sentido longitudinal).....	216

# Índice de figuras

Figura 2.1: Rangos de precisión según nivel y madurez de proyecto. ....	7
Figura 3.2: Variabilidad de costos de estimado según precisión asociada al nivel de ingeniería. ....	14
Figura 3.1: Secuencia de embancamiento. ....	18
Figura 3.2: Diagrama de un sistema de transporte de relave. ....	19
Figura 3.3: Cauce principal definido. ....	23
Figura 3.4: Cauce principal no definido, múltiples subsecciones. ....	23
Figura 3.5: Definición de volúmenes de corte y relleno para perfil transversal de trazado de canoa. .....	35
Figura 3.6: Sección transversal tipo para trazado de sistema de transporte de relave. ....	35
Figura 3.7: Esquema de solución al monitoreo de canaleta. ....	37
Figura 3.8: Transmisor de nivel ultrasónico. ....	38
Figura 3.9: Controlador de flujo. ....	38
Figura 3.10: Controlador universal multiparamétrico. ....	39
Figura 3.11: Transmisor de flujo de canal abierto. ....	40
Figura 3.12: Esquema sistema CLAROS. ....	41
Figura 3.13: Sección típica de canaleta de relave de acero. ....	42
Figura 3.14: Elevación lateral de tramo de canaleta. ....	42
Figura 3.15: Atiesador de sección de canaleta. ....	43
Figura 3.16: Tipos de sismos en Chile. Fuente: Centro Sismológico Nacional (CSN). ....	48
Figura 3.17: Puente tipo viga isostática (discontinuo). ....	50
Figura 3.18: Puente tipo viga continua. ....	50
Figura 3.19: Puente tipo viga continuo con cepas diagonales. ....	51
Figura 3.20: Puente tipo voladizo. ....	51
Figura 3.21: Condición de embancamiento. ....	63
Figura 3.22: Zonificación por velocidades de viento zona centro-norte. Fuente: NCh432 Of.2010. ....	67
Figura 3.23: Zonificación por velocidades de viento zona centro-sur. Fuente: NCh432 Of.2010. ....	68
Figura 3.24: Sectores de definición de rugosidad y exposición. ....	70
Figura 3.25: Efectos topográficos sobre la velocidad del viento. Fuente: NCh432 Of.2010. ....	72
Figura 3.26: Zonificación sísmica de las Regiones I, II y III. Fuente: Manual de Carreteras: Vol. 3. .....	79
Figura 3.27: Zonificación sísmica de las Regiones IV, V, VI, VII, VIII, IX, X y Región Metropolitana. Fuente: Manual de Carreteras: Vol. 3. ....	80
Figura 3.28: Zonificación sísmica de las Regiones XI y XII. Fuente: Manual de Carreteras: Vol. 3. .....	81

Figura 3.29: Espectro de respuesta de diseño. Fuente: AASHTO LRFD: Bridge Design Specification – Figura 3.10.3.1-1 – “Design Response Spectrum”.....	85
Figura 4.1: Dimensiones quebrada tipo.....	97
Figura 4.2: Espectro de diseño. ....	102
Figura 4.3: Sección tipo de puente de acero para transporte de relave. ....	105
Figura 4.4: Estructuración global inicial. ....	106
Figura 4.5: Modelo simplificado de cepa.....	111
Figura 4.6: Puntos de aplicación de cargas diseño 1 y 2.....	116
Figura 4.7: Puntos de aplicación de cargas diseño 3.....	117
Figura 4.8: Vista 3D modelo puente diseño 1 y 2 sin acartelamiento.....	119
Figura 4.9: Vista 2D modelo puente diseño 1 y 2 sin acartelamiento (elevación lateral). ....	119
Figura 4.10: Planta cordones principales diseño 1 y 2. ....	119
Figura 4.11: Vista 3D modelo puente diseño 1 y 2 con acartelamiento.....	120
Figura 4.12: Vista 2D modelo puente diseño 1 y 2 con acartelamiento (elevación). ....	120
Figura 4.13: Detalle 2D y 3D de acartelamiento (Det. 4). ....	120
Figura 4.14: Sección diseño 1 y 2. ....	121
Figura 4.15: Detalle planta cordón superior (Det. 1). ....	121
Figura 4.16: Detalle planta cordón inferior (Det. 2).....	121
Figura 4.17: Elevación viga enrejada (Det. 3).....	122
Figura 4.18: Cepa 1 y 4 tridimensional (CP1-CP4). ....	123
Figura 4.19: Cepa 1 y 4 sección transversal.....	124
Figura 4.20: Cepa 1 y 4 sección longitudinal.....	125
Figura 4.21: Cepa 2 y 3 tridimensional (CP2-CP3). ....	126
Figura 4.22: Cepa 2 y 3 sección transversal.....	127
Figura 4.23: Cepa 2 y 3 sección longitudinal (externa). ....	128
Figura 4.24: Cepa 2 y 3 sección longitudinal (interna). ....	129
Figura 4.25: Detalle de base (CP2-CP3). ....	130
Figura 4.26: Vista 3D modelo puente diseño 3. ....	132
Figura 4.27: Vista 2D modelo puente diseño 3 (elevación lateral). ....	132
Figura 4.28: Sección diseño 3. ....	133
Figura 4.29: Detalle planta cordón superior (mitad tramo 1).....	133
Figura 4.30: Detalle planta cordón inferior (mitad tramo 1).....	134
Figura 4.31: Elevación viga enrejada (mitad tramo 1).....	134
Figura 4.32: Cepa 1 y 4 tridimensional (CP1-CP4). ....	135
Figura 4.33: Cepa 1 y 4 sección transversal.....	136
Figura 4.34: Cepa 1 y 4 sección longitudinal.....	137
Figura 4.35: Cepa 2 y 3 tridimensional (CP2-CP3). ....	138



Figura 4.36: Cepa 2 y 3 sección transversal.....	139
Figura 4.37: Cepa 2 y 3 sección longitudinal (externa). .....	141
Figura 4.38: Cepa 2 y 3 sección longitudinal (interna). .....	141
Figura 4.39: Detalle de base (CP2-CP3). .....	142
Figura 5.1: Porcentaje en peso de cada estructura del puente sin acartelamiento (diseño 1). .....	145
Figura 5.2: Porcentaje en peso de cada estructura del puente con acartelamiento (diseño 1).....	145
Figura 5.3: Porcentaje en peso de cada estructura del puente sin acartelamiento (diseño 2). .....	146
Figura 5.4: Porcentaje en peso de cada estructura del puente con acartelamiento (diseño 2).....	146
Figura 5.5: Porcentaje en peso de cada estructura del puente con acartelamiento y aumento sección (diseño 2).....	147
Figura 5.6: Porcentaje en peso de cada estructura del puente (diseño 3). .....	147
Figura 5.7: Planta tipo fundaciones y ejes locales.....	149
Figura 5.8: Elevación tipo fundaciones (eje transversal, no escalado).....	150
Figura 5.9: Elevación tipo fundaciones (eje longitudinal, no escalado).....	150
Figura 5.10: Cono de punzonamiento. ....	153
Figura 5.11: Vista en planta de perímetro crítico de punzonamiento.....	153
Figura 5.12: Planta de muros de estribos. ....	156
Figura 5.13: Elevación estribos.....	157
Figura 5.14: Esquema de cálculo de excavaciones. ....	158

# Índice de ecuaciones

Ecuación 3.1: Caudal según intensidad.....	21
Ecuación 3.2: Altura de escurrimiento franja j para sedimento no cohesivo. ....	24
Ecuación 3.3: Altura de escurrimiento franja j para sedimento cohesivo. ....	24
Ecuación 3.4: Altura de escurrimiento franja j.....	24
Ecuación 3.5: Velocidad crítica franja j para sedimento finos (arenosos). ....	25
Ecuación 3.6: Velocidad crítica franja j para sedimentos gruesos. ....	25
Ecuación 3.7: Altura crítica para sedimentos finos. ....	25
Ecuación 3.8: Altura crítica para sedimentos gruesos.....	26
Ecuación 3.9: Caudal por unidad de ancho de cada franja.....	26
Ecuación 3.10: Socavación local en pilas (BNSh).....	26
Ecuación 3.11: Socavación local en pilas (diversos autores).....	27
Ecuación 3.12: Socavación local en pilas (Richardson).....	27
Ecuación 3.13: Numero de Froude no perturbado. ....	27
Ecuación 3.14: Socavación local considerando correcciones. ....	27
Ecuación 3.15: Socavación local en estribos (Melville). ....	28
Ecuación 3.16: Peso específico relave. ....	30
Ecuación 3.17: Caudal relave.....	30
Ecuación 3.18: Peso relave.....	30
Ecuación 3.19: Ecuación de Manning para cálculo de caudal. ....	30
Ecuación 3.20: Radio hidráulico. ....	30
Ecuación 3.21: Velocidad media del flujo. ....	30
Ecuación 3.22: Numero de Froude.....	31
Ecuación 3.23: Formula de Durand modificada.....	31
Ecuación 3.24: Formula Voccaddlo y Sagoo. ....	31
Ecuación 3.25: Velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 metros.....	35
Ecuación 3.26: Expresión de Douma. ....	45
Ecuación 3.27: Expresión de Ippen.....	45
Ecuación 3.28: Bureau of Reclamation.....	46
Ecuación 3.29: Altura total canoa. ....	46
Ecuación 3.30: Modulo de elasticidad. ....	60
Ecuación 3.31: Peso lineal de relave. ....	63
Ecuación 3.32: Peso lineal de material dentro de canoa embancada. ....	64
Ecuación 3.33: Coeficiente de exposición de la distribución de velocidades. ....	71
Ecuación 3.34: Factor topográfico. ....	73

Ecuación 3.35: Factor efecto de ráfaga. ....	74
Ecuación 3.36: Factor de respuesta de fondo. ....	74
Ecuación 3.37: Factor de respuesta resonante. ....	75
Ecuación 3.38: Distribución de velocidades ..... 76	76
Ecuación 3.39: Presión de viento para superficie lateral de puente. ....	77
Ecuación 3.40: Espectro elástico de diseño según Manual de Carreteras: Vol. 3 .....	78
Ecuación 3.41: Corte basal mínimo. ....	83
Ecuación 3.42: Coeficiente sísmico horizontal según Manual de Carreteras: Vol. 3 .....	83
Ecuación 5.1: Factor de seguridad al volcamiento. ....	151
Ecuación 5.2: Factor de seguridad al deslizamiento. ....	151
Ecuación 5.3: Fuerza deslizante solicitante en sello de fundación. ....	151
Ecuación 5.4: Fuerza deslizante solicitante en sello de fundación. ....	151
Ecuación 5.5: Tensión en suelo para fundaciones en compresión. ....	152
Ecuación 5.6: Tensión en suelo para fundaciones con tracciones. ....	152
Ecuación 5.7: Condición de área mínima en compresión. ....	152
Ecuación 5.8: Perímetro zona crítica. ....	153
Ecuación 5.9: Capacidad de corte al punzonamiento 1. ....	153
Ecuación 5.10: Capacidad de corte al punzonamiento 2. ....	154
Ecuación 5.11: Capacidad de corte al punzonamiento 3. ....	154
Ecuación 5.12: Volumen pirámide truncada. ....	158