

Propuesta de Requerimientos Geotécnicos Mínimos para el Diseño de Fundaciones de Puentes Tradicionales y Singulares: Experiencia Puente Chacao

Matías A. VALENZUELA

Dirección de Vialidad - MOP, Santiago, Chile, matias.valenzuela@mop.gov.cl

Marcelo MÁRQUEZ

Dirección de Vialidad - MOP, Santiago, Chile, marcelo.marquez@mop.gov.cl

Álvaro PEÑA

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, alvaro.pena@ucv.cl

RESUMEN: Para el desarrollo de proyectos de puentes, especialmente de gran luz, usualmente se considera un amplio rango de investigación geotécnica necesaria para el diseño de fundaciones. Estos trabajos son de gran importancia para el adecuado diseño de fundaciones (superficiales, cajón o profunda) así como también para evitar problemas durante las actividades de construcción (tiempo, costo, seguridad, campañas complementarias, entre otros). El presente trabajo propone criterios y mínimos requerimientos geotécnicos para proyectos de puentes tradicionales y de gran luz en Chile, considerando la experiencia nacional e internacional, y aplicando el caso de estudio del Proyecto “Diseño y Construcción Puente Chacao”: puente colgante multivano con dos vanos principales de 1055 y 1155 metros actualmente en desarrollo en el sur de Chile.

PALABRA CLAVE: Estudios Geotécnicos, Puentes, Chacao

1 INTRODUCCIÓN

Para la definición de las fundaciones de los puentes, en especial cuando se trata de puentes de grandes luces o con condiciones especiales, sean estas debidas a la singularidad del terreno o impuestas por la propia estructura, se debe alcanzar un grado de certidumbre y conocimiento geotécnico también especial, de tal modo que permita a los proyectistas acometer con confianza el diseño de las fundaciones, asegurando que los coeficientes de seguridad al hundimiento, vuelco y deslizamiento, sean los adecuados y que las condiciones de estabilidad del conjunto fundación-terreno estén aseguradas para las acciones más desfavorables que puedan presentarse, de acuerdo con las normas que sean de aplicación en cada caso. Para cumplir lo

anterior resulta fundamental, pues, contar con una información geotécnica de plena garantía, reñida muchas veces con las exigencias de plazos disponibles demasiado cortos, apremiados por las fechas programadas para la realización del proyecto. Debido a ello resultan también fundamentales las campañas complementarias durante la fase de construcción, que permitirán aclarar y en su caso completar, los aspectos del terreno que no hubieran quedado debidamente estudiados.

La problemática planteada para proyectos singulares se torna más compleja por la variabilidad de los terrenos, las condiciones de contorno (lechos fluviales o marítimos) y fundamentalmente por la escasa normativa nacional y regional asociada a esta temática.

Con este objetivo, se pretenden analizar en este trabajo los criterios y requerimientos

geotécnicos que se consideran necesarios para desarrollar los proyectos de puentes tradicionales y de grandes luces en Chile, teniendo en cuenta la experiencia internacional y nacional sobre el tema y tomando como referencia el caso práctico del Proyecto de Diseño y Construcción del Puente Chacao (Figura 1).



Figure 1. Puente Chacao.

2 REQUERIMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA PUENTES TRADICIONALES

La mayoría de los puentes proyectados y construidos en Chile corresponde a una tipología isostática con un sistema de vigas y losa colaborante como tablero. Estas vigas son principalmente de hormigón, pretensado o postensado, alcanzando luces cercanas a los 50 m. Desde la década de los 90 se ha implementado además un sistema de puente continuo y sistemas de aislación apoyados sobre cepas/pilas y estribos en sistemas de fundaciones de pilotes (Valenzuela, M. et al. 2015).

De acuerdo a la revisión de la normativa nacional e internacional, los estudios geotécnicos para puentes y en especial para el diseño de sus fundaciones, se debe considerar la geometría (al menos bi-dimensional, pero de preferencia tri-dimensional) del terreno y de los estratos en la propagación de las ondas sísmicas y en la interacción del terreno con la fundación, junto con el estudio del comportamiento no lineal y no elástico del suelo.

Por otro lado, un aspecto que cada vez reviste mayor importancia, sobre todo en puentes con fundaciones profundas, es el estudio de la

interacción de los pilotes para evaluar el potencial efecto que una acumulación de ciclos de carga y descarga produce sobre el comportamiento del suelo y su estudio como pilote individual y el efecto grupo.

Para el caso de Puentes con fundaciones profundas en suelos blandos, zonas con variación de nivel freático o presencia de grandes sobrecargas sobre el terreno, el estudio de los efectos parásitos (rozamiento negativo e incremento de fuerzas horizontales), requiere estudios especiales, donde la caracterización del terreno de fundación debe estar orientada a esta problemática (Peña-Fritz, A et al. 2013).

Para zonas con riesgo sísmico, se deberán hacer estudios de terreno y laboratorio específicos, que vayan en la dirección de obtener las propiedades dinámicas de los suelos, tales como: degradación bajo carga cíclica (cambios de resistencia, volumen o presión de poros), densidad volumétrica, amortiguamiento, rigidez, velocidades de ondas de corte y resistencia.

En la Tabla 1 se presentan los requerimientos mínimos exigidos de ensayos - estudios en mecánica de suelos según Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas y experiencia práctica en puentes tradicionales chilenos (Arriagada, F. & Contreras M., 2015).

3 REQUERIMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA EL PUENTE CHACAO

El proyecto del Puente Chacao contempla un puente multivano colgado, con tres pilas de hormigón armado, dos macizos de anclaje, dos estribos y un viaducto de aproximación de tres vanos apoyadas sobre cepa/pilas. Las fundaciones de las pilas principales ubicadas en el lecho marino (canal de Chacao) corresponden a un sistema de pilotes preexcavados y encepado, en cambio la pila sur ubicada en la isla de Chiloé se funda directamente sobre el terreno. A su vez, tanto los macizos, estribos y cepas/pilas del viaducto se fundan de manera directa al terreno (Valenzuela, M. & Marquez, M. 2014).

Tomando como caso práctico el Proyecto de Diseño y Construcción del Puente Chacao, los presentes requerimientos geotécnicos, tienen como objetivo obtener los antecedentes geotécnicos mínimos necesarios para el proyecto definitivo y construcción de los sistemas de fundación del Puente (MOP, 2013), los cuales complementan campañas geotécnicas realizadas entre los años 2001 y 2006.

Para el desarrollo del diseño de estas fundaciones se consideran los siguientes ensayos y trabajos en terreno definidos para las tres pilas principales.

3.1 Ensayos y Trabajos Geotécnicos de Terreno

3.1.1 Sondajes

Para la pila norte se realizan 5 sondajes (3 Geobor S, 2 para SPT y 1 para ensayo presiométrico). La profundidad de los sondajes es al menos aquella en la que el incremento de carga vertical es un 10% de la presión neta de contacto y no existan estratos que puedan sufrir asentamientos inadmisibles al estar sometidos a dicho incremento de carga. Además los sondajes consideran una profundidad de reconocimiento de 100 m, utilizando para ello equipos de perforación, muestreo y ensayos de suelos.

Para la pila central ubicada sobre la Roca Remolino (promontorio geológico casi aflorando) se consideran 3 sondajes (1 SPT, 1 Geobor S + geofísico y 1 Presiómetro).

Adicionalmente se consideran sondajes para la pila sur (4), macizo de anclaje sur (4), macizo de anclaje norte (5), viaducto de aproximación (3, uno en cada cepa/pila) y estribo norte (2).

Los sondajes se deben disponer en extremos opuestos de una de las diagonales de la fundación y al centro de ella.

Para la perforación en roca se utiliza tubo toma muestras de barril triple, de diámetro igual o mayor al correspondiente al sistema HQ3.

Con relación al Ensayo de Penetración Estándar SPT (ASTM D-1586-11), en todos los sondajes se ejecuta, como mínimo, ensayos de

penetración estándar en intervalos de 1 metro, hasta encontrar rechazo.

Para los sondajes realizados en el pila norte y pila central se utiliza con elemento de apoyo una plataforma del tipo Jack Up.

3.1.2 Ensayos Presiométricos

Se realizan ensayos presiométricos con un equipo Menard capaz de alcanzar las profundidades finales de exploración y presión máxima de 10 MPa (para suelos duros y rocas blandas).

Los ensayos presiométricos se ejecutan en al menos 1 sondaje por elemento, los que son perforados en diámetros compatibles con el diámetro de la sonda presiométrica.

Los ensayos se ejecutan a intervalos de 2,5 m hasta la profundidad de 50 m y cada 5 m entre las profundidades de 50 m y la de término del sondaje.

3.1.3 Ensayos Permeabilidad

Se considera la ejecución de ensayos de permeabilidad, del tipo Lefranc o Lugeon modificado, según corresponda al tipo de terreno. Los equipos permiten la ejecución de ensayos, con doble packer y hasta la profundidad final de los sondajes.

Los ensayos se ejecutan a intervalos de 10 m.

3.1.4 Geofísica

En cada nuevo emplazamiento de las fundaciones (pilas o macizos de anclaje) se realizan los siguientes ensayos geofísicos:

- Medición de la velocidad de onda de corte hasta los 100 m de profundidad.
- Medición de la resistividad de la roca.

En todos los sondajes se determina el perfil de velocidades P y S (Compresión y Corte). Las mediciones son ejecutadas cada 1 metro de profundidad.

Se utiliza un equipo Logger Suspension OYO, para ejecutar las mediciones de

velocidad, dentro del mismo sondaje y medidas de densidad y porosidad de los suelos. Para estos efectos se utilizan sondas Gamma-Gamma y Neutrón-Neutrón.

Se llevan a cabo reconocimientos geofísicos que sean capaces de localizar el nivel del lecho marino, la profundidad de los depósitos cuaternarios, cabezas de rocas y fallas activas en dichas cabezas de roca.

3.1.5 Dinámica de Suelos

Se establecen las propiedades geodinámicas de los suelos, tales como: degradación bajo carga cíclica (cambios de resistencia, volumen o presión de poros), densidad volumétrica, amortiguamiento, rigidez y resistencia.

El módulo de corte correspondiente a pequeñas deformaciones unitarias es determinado directamente de las medidas de velocidad de ondas de corte, en tanto el módulo de corte degradado con respecto a las deformaciones cíclicas unitarias de corte, es determinada mediante columna resonante y ensayos triaxiales. La variación del amortiguamiento con la deformación unitaria de corte es determinada también a partir de estos ensayos.

Para el análisis sísmico de las fundaciones del puente, especialmente en relación a la propagación de las ondas, se considera la naturaleza tridimensional del suelo, incluyendo información geodinámica acerca de la velocidad de propagación de onda en los diferentes estratos identificados, para ser empleado en la modelación dinámica del suelo de fundación

3.2 Ensayos de Laboratorio

Para el proyecto del Puente Chacao, las pruebas de laboratorio se llevan a cabo de acuerdo con lo establecido en las normas ASTM correspondientes. Las pruebas realizadas son las indicadas en la Tabla 2.

En particular, el estudio en el eje de emplazamiento de la estructura contiene como mínimo la siguiente información:

- Estratigrafía detallada del terreno en cada emplazamiento de las fundaciones del puente. Esta incluye la localización de capas o estratos de suelo poco competentes, fallas y capas alteradas en la roca.

- Velocidad de propagación de ondas de corte de los diferentes estratos.

- Propiedades índices de cada capa (contenido de humedad, límites de Atterberg, peso unitario, peso específico de las partículas sólidas, angulosidad de partículas y granulometría, resistencia al ataque químico (sulfato, pH, Cl), tipo de mineral).

- Parámetros de resistencia y rigidez para todos los estratos en la zona de influencia de las fundaciones del puente:

- Cohesión y ángulo de fricción.
- Módulos de deformación para el rango de tensiones de confinamiento en terreno.
- Relación tensión deformación en condición activa y pasiva para el rango de tensiones de confinamiento en terreno.
- Módulo de Poisson.
- Deformaciones por fluencia lenta (creep) y por la acción de cargas cíclicas, incluyendo las deformaciones permanentes.

- Comportamiento cíclico de los suelos donde se emplacen las fundaciones para los niveles de tensión propios del diseño del puente.

4 CONCLUSIONES

De acuerdo a la revisión realizada de la normativa internacional y nacional vistas en el Manual de Carreteras, Eurocódigo, Guía de Cimentaciones y AASHTO (MOP 2013, AASHTO 2012, MF 2009, Eurocode 2000), y el caso de estudio Proyecto Puente Chacao (MOP, 2014), en las Tablas 3, 4 y 5 se presentan los diferentes tipos de estudios geotécnicos que se pueden realizar en puentes tradicionales y singulares, tomando en cuenta las prospecciones, ensayos in-situ y ensayos de laboratorio.

Tabla 1. Requerimientos mínimos exigidos de ensayos-estudios de mecánica de suelos según Manual de Carreteras y experiencia práctica en puentes tradicionales chilenos.

Prospecciones	-	Sondajes Calicatas
Ensayes In-Situ	Suelo Suelo	Permeabilidad SPT
Ensayes de Laboratorio	Suelo	Granulometría
	Suelo	Límites de Consistencia
	Suelo	Peso Unitario
	Suelo	Densidad Natural
	Suelo	Contenido de Humedad
	Suelo	Proctor o DR
	Suelo	Triaxial
	Suelo	Permeabilidad
	Suelo	Potencial de licuefacción
	Suelo	Gravedad específica
	Roca	Resistencia compresion simple
	Roca	Corte Directo
	Químicos	Contenido de sulfatos
	Químicos	Contenido de cloruros

Tabla 2. Ensayos de Laboratorio Proyecto Puente Chacao.

Material	Ensayo	ASTM
Suelo	Clasificación	
	Análisis de tamaño de partículas (tamizado y sedimentación)	LNv 105
	Límites de consistencia (Atterberg)	NCh 1517/I y II
	Clasificación USCS	D2487
	Peso específico (Densidad húmedad)	NCh 1532
	Contenido de humedad	NCh 151
	Gravedad específica	D584
	Compresión uniaxial	D2166
	Compresión triaxial CIU	D4767/D2850
	Corte Directo (suelos)	D3080
	Ensayo endométrico	D2435
	Ensayos geoquímicos	
	Alcalinidad (pH)	D4972
	Contenido de sulfatos	C1580
	Contenido de cloruros	D1411
	Contenido de materia orgánica	D2974
	Contenido de carbonatos	D4373
	Ensayo triaxial cíclico parámetro sísmico	D5113
	Ensayo triaxial cíclico fatiga a largo plazo	D5113
	Columna resonante en suelos	D4015
Roca	Compresión uniaxial en rocas (con medida de módulo de Young)	D7012
	Densidad húmeda, gravedad específica, porosidad	D7263
	Carga puntual en roca	D5731
	Ensayo brasileño	n/a
	Compresión triaxial CIU	D4767
	Análisis mineralógico	C1721
Agua	Alcalinidad (pH)	D4972
	Contenido de sulfuros	C1580
	Contenido de cloruros	D1411

Tabla 3. Simbología de Tabla 4 y 5

CONSIDERACIONES.	
✓	Siempre se Realiza Ensayo
x	No se Realiza Ensayo
✓*	Depende Tipo de Terreno
	Ensayes complementarios de las normas
	Ensayes complementarios del Puente Chacao

Tabla 4. Propuesta de Estudios Geotécnicos para puentes tradicionales y singulares.

ESTUDIOS GEOTÉCNICOS			PUENTES	
			Tradicionales	Singulares
Prospecciones	-----	Sondajes	✓	✓
		Calicatas	✓	✓
		GeoFísica	✓ *	✓
Ensayes In-situ	Suelo	Placa de Carga	X	X
		Permeabilidad	✓	✓
		SPT	✓	✓
		Presiómetro	X	✓
		Penetrometro Estático	✓ *	✓
		CPT	X	✓ *
		Cono dinámico	X	✓
		Piezono sísmico	X	✓
		Molinete	X	✓
		Velocidad de propagación de las ondas sísmicas	X	✓
		Done Hole	X	✓
		SEV (Sondeo Eléctrico vertical)	X	✓
		Cross Hole	X	✓
	Roca	Dilatómetro	X	✓
		Cizalladura Paleta	X	✓
Ensayes de Laboratorio	Suelo	Granulometría	✓	✓
		Límites de Consistencia	✓	✓
		Peso Unitario	✓	✓
		Densidad Natural	✓	✓
		Contenido de Humedad	✓	✓
		Proctor o DR	✓	✓
		Consolidación	✓ *	✓ *
		Resistencia comprensión Simple	✓	✓
		Corte Directo	✓	✓
		Triaxial monotónico	✓	✓
		Expansividad	X	✓
		Permeabilidad	✓	✓
		Potencial de licuefacción	✓	✓
		Gravedad específica	✓	✓

Tabla 5. Propuesta de Estudios Geotécnicos para puentes tradicionales y singulares.

ESTUDIOS GEOTÉCNICOS			PUENTES	
			Tradicionales	Singulares
Ensayes de Laboratorio	Suelo	Triaxial Cíclico	X	✓
		Velocidad de ondas de corte	X	✓
		Penetrómetro de Laboratorio	X	✓
		Corte Anular	X	X
		Columna de resonancia	X	✓
		Corte simple cíclico	X	✓
		Hinchamiento	X	✓
		Colpaso	X	✓
		Célula ROWE (expansividad)	X	✓
		Dispersividad o Dispersabilidad de arcilla	X	✓
		Triaxial Post Cíclico	X	✓
		CNC	X	X
	Roca	Resistencia comprensión Simple	✓	✓
		Corte Directo	✓	✓
		Módulos elasticos para Roca	✓	✓
		Petrográfico de lámina delgada	X	✓
		Resistencia a compresión Uniaxial	X	✓
		Franklin	X	✓
		Ensaye Brasileño (hendimiento)	X	✓
		Durabilidad	X	✓
		Desgaste de los Angeles	X	✓
		Desgaste deval y microdeval	X	✓
		Resistencia a la inmersión en agua	X	✓
		Resistencia a ciclos de humedad sequedad, hielo deshielo	X	✓
		Pundit	X	✓
	Químicos	Contenido Organico	X	✓
		Pruebas de Clasificación electroquímica	X	✓
		Contenido de yeso	X	✓
		Resistencia a agentes químicos, sulfato sódico y magnesio	X	✓
		Contenido de Carbonatos	X	✓
		Contenido de sulfatos	✓	✓
		Contenido de sales solubles	X	✓
		Contenidos de cloruros	✓	✓
		Contenido de PH	X	✓

REFERENCIAS

- AASHTO LRFD (2012) Bridge Design Specifications 6th Ed (US), section 10. Foundations.
- Arriagada, F. & Contreras M., (2015) “*Caracterización y requerimientos geotécnicos para el diseño de fundaciones de puentes tradicionales y singulares. Caso de estudio Puente Chacao*”, Tesis Ingeniero Constructor, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- Eurocode 7. (2000) Geotechnical design.
- MF (2009) Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera España.
- MOP, Manual de Carreteras Volumen 2 y 3. (2014) Dirección de Vialidad.
- MOP (2013) “*Bases Técnicas para la Licitación Pública de la Obra “Diseño y Construcción del Puente Chacao, Región De Los Lagos*”, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- Peña-Fritz, A., Marquez-Marambio, M., y Llorens-Alcón, M. (2013). “*Analysis of the Influence of parasitic effects on piles in soft soils*”. Revista de la Construcción”, Código ISI WOS:000327827700001 11 (1): 4-15.
- Valenzuela, M. & Marquez, M. (2014) “*Chacao Suspension Bridge: Special Structural Singularities*”, ACCT Chile – MOP, First International Conference of Bridges – Chile 2014, Future Challenges: Design, Construction and Maintenance. September 24 to 26, 2014, Santiago, Chile.
- Valenzuela M, Márquez M & Vallejo I, (2015) “*Multi-span Bridges: The First Chilean Experience and Future Challenges*”, Multi-Span Bridge Conference, Julio 2015 Porto, Portugal.