

Evaluación e Incidencia de los Efectos de Sitio en la Determinación del Peligro Sísmico Local en la Zona de Emplazamiento del Puente Chacao, Chile

Valdebenito, G.

Universidad Austral de Chile
gvaldebe@uach.cl
Valdivia, Chile

Alvarado, D.

Universidad Austral de Chile
david.alvarado@uach.cl
Valdivia, Chile

Márquez, M.

Ministerio de Obras Públicas
marcelo.marquez@mop.gov.cl
Santiago, Chile

Valenzuela, M.

Ministerio de Obras Públicas
matias.valenzuela@mop.gov.cl
Santiago, Chile

Resumen

El futuro Puente Chacao, en la X región de Chile, constituye sin duda un megaproyecto que resultará un desafío de ingeniería en todo sentido. La zona de emplazamiento de la estructura se enmarca dentro de un contexto de variadas fuentes de amenaza, de entre las cuales la Peligrosidad Sísmica tanto uniforme como local, son sin duda una de las más importantes a considerar.

Una de las variables de amenaza más inciertas es sin duda la incorporación de los efectos de sitio, ya sea debido al efecto topográfico y/o de amplificación dinámica del suelo, los que en conjunto permiten precisar adecuadamente las condiciones de amenaza sísmica local en la zona de emplazamiento de la futura estructura, razón por la cual esta investigación se centra en intentar responder estas inquietudes

El presente trabajo describe los principales resultados de la realización de campañas geofísicas orientadas a evaluar los efectos de sitio locales en la zona del futuro Puente Chacao. Las campañas contemplaron la cuantificación de la rigidez de los suelos mediante técnicas de sísmica de reflexión/refracción superficial, y la evaluación de los efectos de sitio y determinación de los periodos predominantes del suelo a partir de registros de microvibraciones ambientales. Se presentan los resultados para la zona de accesos norte y sur del puente, elementos esenciales en la evaluación de la Demanda Sísmica Local, insumo vital en el diseño sísmico de esta megaestructura.

Palabras Clave: peligrosidad sísmica, efectos de sitio, estudios geofísicos, microvibraciones ambientales, puente Chacao

Abstract

The upcoming Chacao Channel Bridge that will be located at X region in southern Chile, is undoubtedly one of the most important civil engineering projects in Chile and the world. The location of this mega structure is framed and confined by several hazard sources, from which the seismic hazard, uniform and local, is one of the most important to consider.

One of the basic hazard variables is the evaluation of the site-effects, due to dynamic amplification of soil or of topographic kind. Those effects can increase the seismic demand on specific areas, and mainly for long span bridges, in which this aspect is considered as part of the spatial variability effects.

This paper describes the main results related with the evaluation of site-effects in the area of the upcoming Chacao Channel Bridge. The geophysical surveys performed applying refraction/reflection techniques as well as ambient microvibration analysis are explained and detailed. Predominant periods of soils, ground stiffness and dynamic/topographic amplification are exposed.

Results for the north and south access are presented as the basis for the evaluation of the local seismic demand of the structural system.

Keywords: Seismic hazard, site-effects, geophysical surveys, ambient microtremors, Chacao Channel Bridge

Introducción

El proyecto del puente sobre el Canal de Chacao sin duda constituye un desafío para la ingeniería mundial. La estructura principal contempla un puente colgante de 2635 m de longitud total, con tramos de accesos de 339 m en el lado norte y 140 m en el lado sur, y tramos centrales principales de 1100 m en el lado norte y 1055 m en el lado sur. La infraestructura del puente se compone de tres pilas de gran altura, dos fundadas en el mar mediante pilotes como son las pilas central (en forma de "A" sobre Roca Remolinos) y norte, y una fundada en forma directa sobre una meseta baja de la ribera sur. La infraestructura se completa con dos macizos de anclaje de los cables principales situados sobre las riberas, y cepas tradicionales para el tramo de acceso del lado sur. La superestructura del puente está compuesta por un tablero metálico ortótropo que cuelga de dos líneas de cables principales de 580 mm de diámetro. La conexión entre el tablero y los cables corresponde a péndolas metálicas situadas a 20 m de distancia. El tablero presenta un ancho total 21,6 m, que permite dar cabida a dos calzadas de 7 m cada una con una mediana de 2,6 m (Ministerio de Obras Públicas, 2002).

El hecho de que el puente esté emplazado en el país más sísmico del mundo, implica que el proyecto debe ajustarse a altas exigencias que aseguren una respuesta sísmica adecuada ante un posible evento de gran magnitud. En este sentido, juega un rol medular la evaluación de la respuesta local de los suelos en los sectores donde se emplazarán los sistemas de fundación de la estructura. Considerando la gran longitud que tendrá el puente, se debe tener especial atención en la respuesta local de las tres zonas principales donde se emplazarán las pilas, atendiendo al hecho de que estas tendrán un distanciamiento tal que podrían presentar respuestas dinámicas diferentes entre sí.

A fin de cuantificar estos efectos, se ha realizado una campaña de evaluación de los efectos locales del terreno a partir de campañas geofísicas de prospección superficial. Las campañas se concentraron en los accesos norte y sur del puente. Se realizó una campaña de microvibraciones ambientales con el fin de evaluar los periodos predominantes del suelo y lograr una evaluación preliminar de los efectos de sitio. Adicionalmente, con el fin de obtener velocidades de ondas de corte del suelo y cuantificar la rigidez

superficial de los mismos, se realizaron perfiles sísmicos mediante la aplicación de técnicas de sismica de refracción activa/pasiva superficial.

Contexto sísmico, geotécnico y geológico

La zona de emplazamiento del futuro puente Chacao corresponde a una zona sísmicamente activa, en donde el terremoto de 1960 originó extensos hundimientos y sollevamientos (Plafker and Savage, 1970). Como en la mayor parte del margen occidental de Sudamérica, la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana condiciona el desarrollo de unidades morfoestructurales de tendencia N-S, las cuales inciden en las características sísmicas de la zona, en donde se identifican las principales fuentes: sismos interplaca, sismos intraplaca tensionales y sismos intraplaca superficiales corticales (Consortio ICUATRO-COWI, 2001).

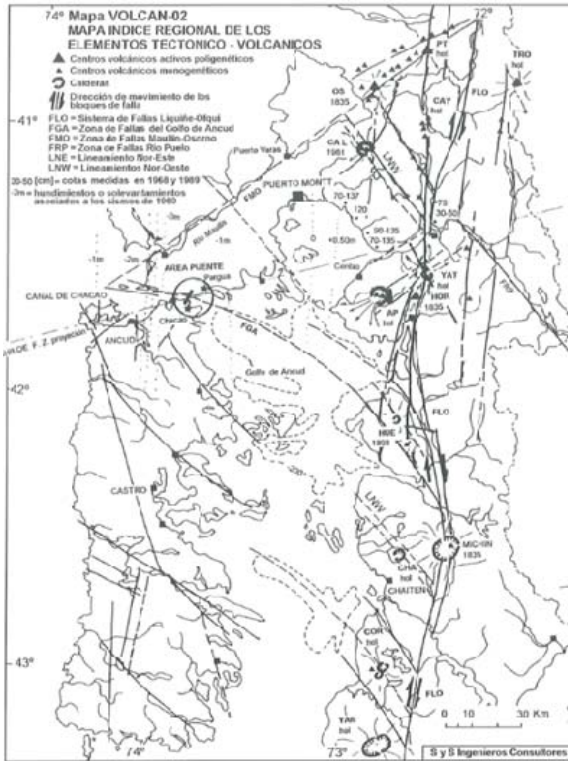
Respecto a las características de los grandes terremotos, una revisión realizada por Lomnitz (1971), establece que los principales terremotos históricos de la región son los siguientes: el terremoto del 16 de diciembre de 1575, de magnitud 8.5, ocurrido fuera de la costa; el terremoto del 24 de diciembre de 1737, de magnitud 7.5-8, en Valdivia-Chiloé; el terremoto del 7 de noviembre de 1837, de magnitud 8, ocurrido fuera de la costa; y el terremoto del 22 de mayo de 1960, de magnitud 8.5-9, en la costa sur de Chile. Además, se registra que todos estos terremotos fueron acompañados por grandes tsunamis.

Con respecto a las estructuras regionales identificadas en el área de estudio, una revisión realizada por Consortio ICUATRO-COWI (2001) identifica las siguientes: falla de Liquiñe-Ofqui, falla Golfo de Ancud-Canal de Chacao, falla en el sector de río Maullín, falla Maullín-Osorno y un sistema de fallas en la Isla Grande de Chiloé consistente en un sistema de 4 fallas paralelas, de rumbo NW con longitudes variables de 40 a 50 km. Es importante destacar que una recopilación de antecedentes complementarios que ayudan a establecer la eventual actividad y capacidad de las fallas Golfo de Ancud-Canal de Chacao y la Falla Maullín-Osorno (Figura 1), da cuenta que se han registrado sismos de carácter superficial ubicados sobre la traza estimada de estas fallas que no permiten clasificarlos como eventos de tipo subductivo, por lo que necesariamente deben ser asociados a fallamientos superficiales. Estos resultados recalcan la evidencia de ejecutar estudios locales de sismicidad para



definir la demanda en la zona tomando en consideración estos efectos.

Figura 1. Mapa índice regional de los elementos tectónico – volcánicos. Décima Región de Los Lagos, Chile (S y S Ingenieros Consultores).



Sobre los antecedentes geotécnicos disponibles en el sector, los sondajes prospectados de hasta 100 metros de profundidad reconocen la secuencia cuaternaria de depósitos fluvio-glaciales, glacialacustres y sedimentario-volcánicos, con variaciones laterales debido al carácter lenticular de algunos niveles. Por otra parte, los estudios geológicos indican que el puente se fundará sobre depósitos fluvio-glaciales, de yacencia subhorizontal de a lo menos 100 m de espesor, considerando que los sondajes diamantinos realizados hasta dicha profundidad no lograron identificar la roca basal de esta secuencia (Consorcio ICUATRO-COWI, 2001).

Respecto a los ensayos previos de refracción sísmica realizados (Consorcio ICUATRO-COWI, 2001), los resultados indican la presencia de tres capas en el costado norte del canal y dos capas en el costado sur. En el sector norte se identifica una capa superficial de 5-10 m de espesor con velocidades sísmicas de onda primaria de 500-800 m/s correspondiente a arenas y gravas sueltas. Luego se observa un estrato intermedio de 20-30 m de espesor ($V_p = 800-1000$ m/s) de gravas arenosas,

pobre a medianamente consolidadas. Finalmente se identifica un sustrato sísmico a 20-40 m de profundidad ($V_p = 1500-2100$ m/s), correlacionado con arenas limosas y gravas arenosas medianamente consolidadas. En el acceso sur se prospectó una capa superficial de 5-15 m de espesor, con velocidades sísmicas de onda primaria de 400-500 m/s, correspondiente a arenas y gravas sueltas. Luego se reconocen gravas arenosas sueltas a medianamente consolidadas ($V_p = 1300-1700$ m/s), a las que infrayacen gravas sueltas. Cabe destacar que los resultados que se obtendrán en el presente estudio quedarán determinados por velocidades de ondas de corte de la onda S (V_s), por lo que para efectos comparativos con los estudios previos en base a ondas primarias (V_p), se harán las conversiones correspondientes según Micromed S.P.A. (2007).

Evaluación de efectos de sitio en la zona de emplazamiento del Puente sobre el Canal de Chacao

Con el fin de complementar los estudios realizados, y apuntando principalmente a cuantificar los efectos de sitio y amplificaciones locales en superficie, se realizaron campañas de microzonificación sísmica y determinación de perfiles de velocidad de onda de corte para los primeros 30 m de profundidad (V_{s30}). Las campañas se concentraron en los accesos norte y sur del puente, centrándose en las zonas donde se instalarán las torres y los macizos de anclaje. Se pretende, por tanto, comprobar la relación que existe entre los factores de amplificación obtenidos a partir de la microzonificación sísmica (efectos de sitio), los antecedentes geológicos y geotécnicos de los suelos, y los parámetros que cuantifican la rigidez de los estratos. A continuación se describirá la campaña de microzonificación sísmica a partir de mediciones de microvibraciones ambientales en superficie. Luego, se describe la campaña de obtención de perfiles de velocidad de ondas de corte en profundidad y sus principales resultados.

Campaña de microvibraciones ambientales. Microzonificación sísmica

- Aspectos metodológicos

La definición de puntos de microvibraciones ambientales se hizo en base a la factibilidad técnica en terreno y considerando la futura ubicación de las estructuras principales del puente. Adicionalmente se concentraron

mediciones en zonas donde se instalaron anteriormente estaciones sismológicas de registro, lo cual en una etapa futura de evaluación permitirá obtener correlaciones entre los registros de microvibraciones y registros de sismos reales. Se prospectaron 21 puntos en el acceso norte y 17 puntos en el acceso sur. La distribución espacial de las mediciones de microvibraciones ambientales y una superposición referencial de las estructuras principales que se emplazarán en eje del puente, puede observarse en las figuras 2 y 3.

Figura 2. Distribución espacial de puntos de microvibraciones ambientales. Acceso Norte.



Para la adquisición de datos de microvibraciones ambientales se emplearon equipos triaxiales que presentan curvas de respuesta plana en velocidad (geófonos). Se utilizaron equipos Micromed Tromino®, realizando mediciones de 16 minutos de duración, con una tasa de muestreo de 128 Hz. Para la toma de datos en terreno, los equipos son adecuadamente orientados según norte magnético, georreferenciados y configurados para la captura de datos usando los transductores de velocidad en alta ganancia, como es característico para mediciones de microvibraciones ambientales.

El procedimiento para el procesamiento de las señales de vibraciones ambientales se basa en el trabajo publicado por Nakamura (1989), el cual propone que la razón espectral entre la componente horizontal y la vertical (H/V) del registro de microvibraciones en superficie, permite determinar el período fundamental de vibración del suelo.

En el procesamiento de los datos se verifica el cumplimiento de nueve criterios de aceptación SESAME (2004) para la obtención de curvas H/V confiables. Con el fin de que las señales procesadas cumplan con estos criterios, estas fueron ajustadas mediante un post-proceso que incluye un filtrado de la señal en el tiempo, la variación del tamaño de las ventanas y el ajuste del suavizado utilizando ventanas de tipo triangular.

Figura 3. Distribución espacial de puntos de microvibraciones ambientales. Acceso Sur.



- Cuantificación de los efectos de sitio

Aunque la principal información buscada al analizar las curvas H/V es la frecuencia predominante de los depósitos de suelo, el valor de máxima amplitud asociada a dicha frecuencia puede ser considerado como un indicativo de los contrastes de impedancia en el lugar de estudio, ya que los valores máximos se asocian a fuertes contrastes de velocidad en la propagación de las ondas en el suelo (SESAME, 2004). Consecuente con esto, otros estudios han demostrado que la presencia de un pico de gran amplitud indica que existe un fuerte contraste entre la capa de sedimento y el basamento rocoso (Bonney-Claudet et al, 2006). A la luz de lo anterior, es posible afirmar las amplitudes altas evaluadas usando la técnica de Nakamura se asocian a mayores amplificaciones del movimiento sísmico. Por otra parte, una curva H/V con respuesta plana en torno a la unidad ($H/V \approx 1$), indica que no existe un contraste de impedancia o función de transferencia suelo-roca, por lo que se puede inferir que se está en la presencia de un suelo rígido en superficie. Estas consideraciones se utilizarán en el presente estudio para estimar las amplificaciones locales del subsuelo, recalcando el hecho

de que el análisis de las máximas amplitudes de registro en las curvas H/V constituye solo una primera aproximación al problema de evaluación de efectos de sitio.

- Resultados

Aplicando los procedimientos anteriormente descritos para los puntos prospectados, los resultados por zona son los siguientes:

- Zona acceso norte: La taxonomía de las curvas H/V evidenciaron una respuesta plana en todos los puntos prospectados ($H/V \approx 1$). Esto indica que no existe un claro contraste entre un depósito de suelo sedimentario y el basamento rocoso, por lo que no se esperan efectos de amplificación local del movimiento sísmico. Considerando esto, se establece que periodo predominante de vibración del suelo tiende al de la roca, es decir, se acerca a cero. Ejemplos de curvas H/V con respuesta plana obtenidas en el sector se muestran en las figuras 4 y 5.

Figura 4. Gráfica razón espectral H/V Punto 4. Acceso Norte.

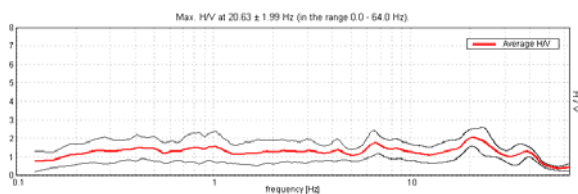
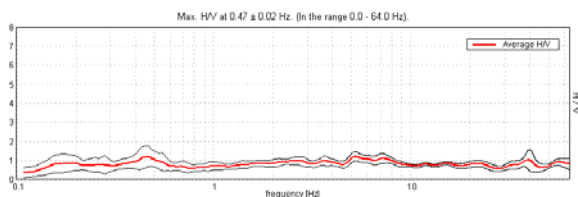


Figura 5. Gráfica razón espectral H/V Punto 6. Acceso Norte.



- Zona acceso sur: En contraste con lo evidenciado en el acceso norte, la mayor parte de las taxonomías de las curvas H/V evidencian aumentos de amplitud en frecuencias altas, asociados a la respuesta de estratos rígidos superficiales. Es destacable que la amplitud de estos picos en alta frecuencia aumenta en sectores cercanos a los bordes de ladera, lo que muy posiblemente se atribuye a efectos de amplificación topográfica. En general los periodos predominantes de vibración del suelo oscilan en el rango 0.04 - 0.17 seg.

Teniendo presente este rango de valores, y considerando los resultados geotécnicos disponibles, se confirma que en la zona alta del acceso sur el suelo presenta respuestas con amplificaciones dinámicas asociadas a estratos superficiales, los cuales deben ser considerados en el diseño sísmico de las estructuras en este sector. En las figuras 6 y 7 se muestran ejemplos de curvas H/V con aumentos de amplitud en frecuencias altas, en donde destacan los aumentos en los niveles de amplitud para los puntos prospectados en los bordes de ladera (Figura 7, Punto 11).

Figura 6. Gráfica razón espectral H/V Punto 8. Acceso Sur.

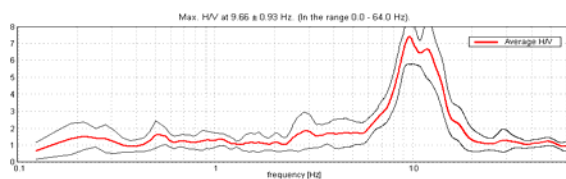
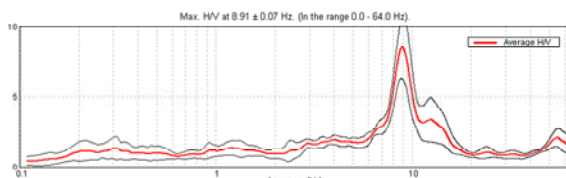
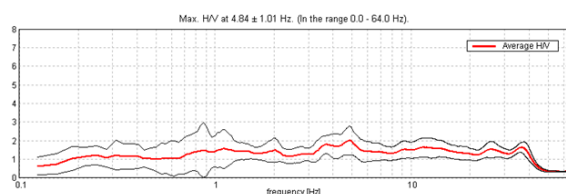


Figura 7. Gráfica razón espectral H/V Punto 11. Acceso Sur.



En contraste con lo anterior, es necesario destacar lo observado en la respuesta que presentó un único punto registrado en la zona baja del acceso sur (Figura 8, Punto 17). En este, se aprecia que la taxonomía de la curva H/V evidencia una respuesta plana asociada a suelo rocoso, similar a lo observado en la zona del acceso norte, por lo que en principio no se esperarían efectos locales de amplificación sísmica en este sector. Dado que este punto constituyó una excepción al patrón observado en el acceso sur, y considerando que la factibilidad técnica de terreno impidió la adquisición de otros puntos de medición, se debe confirmar la unidimensionalidad de este patrón a partir de nuevos registros de microvibraciones ambientales distribuidos en la zona baja del acceso sur.

Figura 8. Gráfica razón espectral H/V Punto 17. Acceso Sur.



Campaña geofísica para la obtención de perfiles de velocidad de ondas de corte del suelo

La campaña de perfiles sísmicos se realizó sobre la base de técnicas de sismica de refracción superficial activa y/o pasiva en función de las necesidades y factibilidad técnica y de terreno. Para la determinación de los perfiles de velocidad de onda de corte (V_s), actualmente existen una serie de métodos de prospección geofísica que permiten medir in situ las propiedades de rigidez de los suelos. Entre estas se destacan las técnicas de refracción sísmica superficial activa Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) (Park, 1997) y los métodos pasivos Refraction Microtremor (ReMi) y la técnica Constrained H/V propuesta por Castellaro y Mulargia (2009). Todas estas técnicas se basan en la medición de la velocidad de ondas Rayleigh.

Es importante señalar que las técnicas MASW y ReMi, en general presentan una mayor resolución para exploraciones superficiales del subsuelo, las que dependen directamente de la longitud de onda a la frecuencia más baja permitida. Las técnicas pasivas, como la Constrained H/V, tienen la ventaja de no necesitar una fuente de ruido artificial específica, empleando para ello múltiples fuentes de "ruido cultural", cuya propagación de ondas es esencialmente de tipo Rayleigh, permitiendo exploraciones que pueden llegar fácilmente al centenar de metros so pena de una menor precisión en altas frecuencias (medidas muy superficiales). Resulta claro entonces que, de ser factible, una combinación híbrida de estas dos estrategias es la óptima (Foti, 2000).

Considerando todo lo anterior, y en base a la factibilidad técnica en el lugar de emplazamiento, sumado al conocimiento geotécnico que se tiene a partir de exploraciones directas, así como de chequear in situ las características dinámicas del suelo, en este estudio se utilizaron las técnicas ReMi y Constrained H/V, las que se basan en los métodos de la sismica de refracción. Cabe destacar que en la ejecución del método ReMi, en cada uno de los perfiles prospectados se obtienen 4 registros de microvibraciones de 4 minutos de duración cada uno, esto con el fin de obtener una cantidad de ventanas suficientes para la correcta interpretación de resultados a partir la generación de las curvas de dispersión de velocidad de fase. Por otra parte, en 2 de los 4 registros generados para cada perfil, se energiza el suelo con

golpes de martillo de masa conocida, con el propósito de obtener una mejor resolución en las curvas de dispersión de velocidad de fase, logrando además en ciertos casos excitar las frecuencias altas del subsuelo.

En la campaña de perfiles sísmicos se contempló la ejecución de 10 perfiles en el acceso norte, y 6 perfiles en el acceso sur. En cada perfil se procedió al estacado para ubicación de los sensores (geófonos) cada 5 m, en arreglos de longitudes variables entre 75 y 120 m, ejecutados de forma lineal o en forma de "L", en función de la factibilidad técnica del terreno. Para las mediciones, se utilizó la estación multicanal SoilSpy Rosina®, de procedencia italiana. La estación se compone de un cable de transmisión de datos al cual están unidos una serie de módulos de amplificación/digitalización. A su vez, a cada módulo se conecta un sensor sensible en velocidad (geófono) de 4.5 Hz de frecuencia propia. La información es almacenada directamente en un computador portátil de terreno, el que actúa como equipo registrador y que provee de energía al arreglo. La distribución espacial de los perfiles y los principales resultados se muestran en el apartado siguiente.

Resultados

Los resultados muestran una buena correlación en los reflectores stratigráficos tanto en el acceso norte, como en el acceso sur. Se obtuvieron buenos ajustes de la curva sintética a las curvas de dispersión de velocidad de fase mediante la aplicación de la técnica Constrained H/V. Considerando que los suelos presentan una matriz más bien rígida, las profundidades de prospección varían en general entre los 30 y 40 metros, lo cual resulta suficiente para caracterizar los cambios de rigidez superficiales y el parámetro V_{s30} .

Respecto a los valores del parámetro V_{s30} , estos resultaron ser levemente mayores en el acceso norte, con un valor promedio de 409 m/s. En el acceso sur, el valor promedio de V_{s30} es 372 m/s (ver Tabla 1). En términos generales, en ambos sectores se observan reflectores stratigráficos similares, identificándose un primer reflector con profundidades variables entre 2 y 7 m, lo que según las prospecciones geotécnicas corresponde a arenas y gravas sueltas. Luego se observan estratos intermedios con velocidades de ondas de corte que oscilan en promedio en torno a 450 m/s, lo que se asigna a gravas arenosas. Finalmente, a profundidades inferiores a 30 m aproximadamente, las

velocidades de ondas de corte superan los 800 m/s, lo que se correlaciona con una serie de estratos alternados cuyos reflectores no pueden ser identificados detalladamente a partir de estos métodos.

Es importante destacar de los resultados, que en todos los casos, los perfiles de Vs son monótonamente crecientes en profundidad, sin evidencia de inversiones en el perfil. Por otra parte, los valores de Vs30 obtenidos resultaron ser muy consistentes con las exploraciones geotécnicas realizadas y los estudios geofísicos previos efectuados en la zona (Consortio ICUATRO-COWI, 2001). La distribución espacial de los perfiles sísmicos y el valor de Vs30 asociado a cada perfil se muestra en la figuras 9 y 10. A modo de visualización general se exponen algunas curvas de dispersión de velocidad de fase y ajuste sintético en las figuras 11 y 12.

Tabla 1. Resumen de resultados

	Valores de Vs30 (m/s)			Desviación estándar
	Máximo	Mínimo	Promedio	
Acceso Norte	423	402	409	6.9
Acceso Sur	405	352	372	22.6

Si se hace referencia al Decreto número 61, publicado en el Diario Oficial de la República de Chile el 13 de Diciembre de 2011 (D.S. N°61 MINVU, 2011), se tiene que todos los valores de Vs30 obtenidos se encuentran en un intervalo definido entre 350 y 500 m/s. Considerando esto, el suelo de fundación, tanto en el acceso norte como en el acceso sur clasificaría preliminarmente como suelo Tipo C.

Figura 9. Distribución espacial de perfiles sísmicos y valores de Vs30. Acceso Norte.

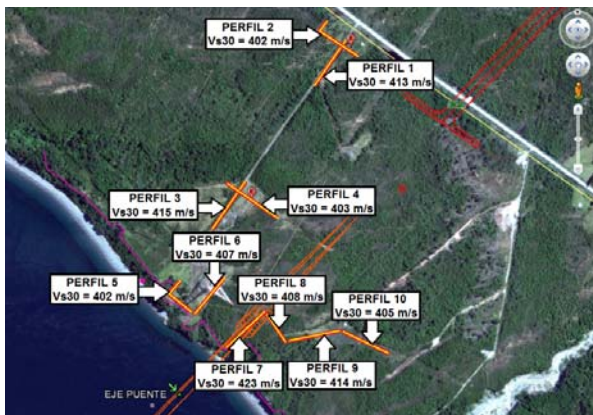


Figura 10. Distribución espacial de perfiles sísmicos y valores de Vs30. Acceso Sur.



Figura 11. Curvas de dispersión de velocidad de fase y ajuste sintético. Perfiles 1 y 8, Acceso Norte.

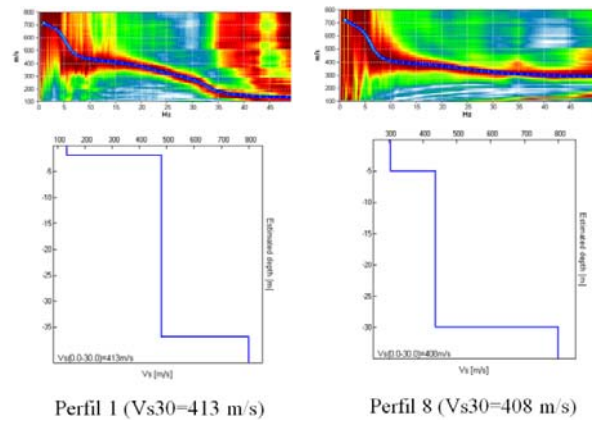
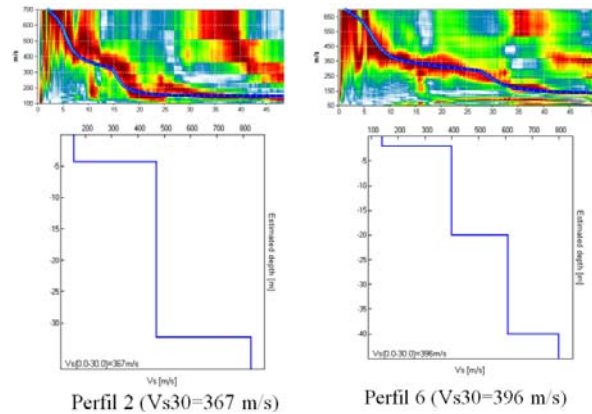


Figura 12. Curvas de dispersión de velocidad de fase y ajuste sintético. Perfiles 2 y 6, Acceso Sur.





Conclusiones

La evaluación de la respuesta dinámica del suelo y la cuantificación de la rigidez de los mismos permiten establecer condiciones particulares de diseño para las estructuras que se emplazarán en los accesos norte y sur del puente.

En general en términos del parámetro que cuantifica la rigidez superficial de los suelos (V_{s30}), se observaron similitudes en la zona norte y sur, sin evidencia de grandes diferencias ni inversiones en profundidad de los perfiles estratigráficos. Los valores de V_{s30} oscilan en el rango que la normativa actual define para suelo Tipo C, es decir, entre 350 y 500 m/s, catalogado como suelo denso o firme. Estos resultados son absolutamente consistentes con las exploraciones geotécnicas y estudios sísmicos previos realizados.

Por otra parte, en lo que respecta a la evaluación de los efectos de sitio a partir de registros de microvibraciones ambientales, fue posible evidenciar diferencias en la dinámica de respuesta de los suelos en las zonas norte y sur. En lo que respecta al sector norte, se obtuvieron curvas H/V con respuesta plana ($H/V \approx 1$), lo que indica que no existe un contraste de impedancia o función de transferencia suelo-roca marcadamente definido, por lo que no se esperan amplificaciones (dinámicas y/o topográficas) del movimiento sísmico respecto a la roca base. En contraste con lo anterior, en la zona alta del sector sur se obtuvieron en las curvas H/V aumentos de amplitud en altas frecuencias, lo que indica que existe una función de transferencia en la interfaz suelo-roca. Por consiguiente, es posible esperar amplificaciones por efecto dinámico y/o topográfico en esta zona, atendiendo además a que la topografía del terreno presenta cambios bruscos de pendiente y posibles discontinuidades laterales. En general, los periodos predominantes de vibración del suelo oscilaron en el rango 0.04 - 0.17 seg, característico de suelos rígidos en superficie. Por otra parte, en lo que respecta a la exploración en la zona baja del acceso sur, la factibilidad técnica de terreno permitió identificar un único punto que presentó respuesta plana en la taxonomía H/V, lo que indica que posiblemente esta zona no esté afectada a problemas de amplificación del movimiento sísmico, presentando eventualmente un comportamiento similar a lo evidenciado en el acceso norte. Considerando que este punto constituye una excepción al patrón evidenciado en el acceso sur, será necesario efectuar

nuevas campañas que confirmen la unidimensionalidad de la respuesta dinámica de esta zona.

Respecto a la amplificación local detectada en la zona alta del acceso sur, en principio esta condición no afectaría directamente al comportamiento sísmico de la superestructura, sin embargo, debe tenerse muy presente en el diseño sísmico de las estructuras rígidas, como es el caso de los macizos de anclaje y las estructuras de acceso al puente. Dado que eventualmente los periodos fundamentales de estas estructuras rígidas pudieran coincidir con la respuesta predominante del suelo, estas podrían verse afectadas a problemas de amplificación dinámica debido a posibles efectos de resonancia en la interacción suelo-estructura.

Agradecimientos

- A la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile
- Al Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile, a través del Convenio Específico de Colaboración Dirección de Vialidad MOP - Universidad Austral de Chile: Estudios Sísmicos Puente Sobre el Canal de Chacao.

Referencias

- BONNEFOY-CLAUDET S.; CORNOU C.; BARD P.Y.; COTTON F.; MOCZO P.; KRISTEK J.; FÄH D. (2006). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations, *Geophysical Journal International*, Volume 167, pp 827-837.
- CASTELLARO, S., MULARGIA, F. (2009). VS30 Estimates Using Constrained H/V Measures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 2A, pp. 761 - 773.
- CONSORCIO ICUATRO-COWI (2001). Informe Fase 7, Pre-Informe Final. Volumen 5D: Ingeniería Básica del Emplazamiento del Puente. Estudios Sísmicos.
- D.S. N° 61, MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. (2011). Aprueba Reglamento que Fija el Diseño Sísmico de Edificios y Deroga D.S. N°117. *Diario Oficial de la República de Chile*, Martes 13 de Diciembre de 2011, Santiago, Chile. Edición N° 40.133.
- FOTI, S. (2000). Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD Dissertation, Politecnico di Torino, Italy.
- LOMNITZ, C. (1971). Terremotos y Tsunamis de Chile. *Revista Geofísica Panamericana*, Vol 1, N°1, Nov. 1971, pp. 151-178.
- MICROMED S.P.A. (2007). Introduction to the H/V Modeling Routine for Stratigraphic Purposes in *Grilla*. Treviso, Italy.
- MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, CHILE (2002). Bases de Licitación Concesión Internacional Puente Bicentenario de Chiloé.
- NAKAMURA, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly report of railway technical research institute*, Volume 30(1), pp 25-33.

Valdebenito et al.: Incidencia de los Efectos de Sitio en la Determinación del Peligro Sísmico Local en la Zona de Emplazamiento del Puente Chacao, Chile

PARK, CH., MILLER, R., XIA, J. (1997). Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW): A Summary Report of Technical Aspects, Experimental Results and Perspective. Open-file Report #97-10, Kansas Geological Survey.

PLAFKER, G. and J.C. SAVAGE (1970). Mechanism of the Chilean Earthquakes of May 21 and 22, 1960. Geological Society of America Bulletin, V. 81, p. 1001-1030

SESAME EUROPEAN RESEACH PROJECT (2004). Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Measurements, Processing and Interpretation, European Commission – Research General Directorate.