

Comportamiento Sísmico de Puentes Atirantados: Pasado, Presente y Futuro

Galo E. Valdebenito^{1, 2} y Angel C. Aparicio³

¹Dpto. de Ing. del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, galo.valdebenito@upc.edu

²Instituto de Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, gvaldebe@uach.cl

³Dpto. de Ing. de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, angel.carlos.aparicio@upc.edu

Resumen

Los puentes requieren integridad estructural y accesibilidad después de la ocurrencia de un sismo. Sin embargo, a través de los años se ha demostrado que estos sistemas son muy vulnerables, lo cual ha quedado de manifiesto tras la ocurrencia de los grandes sismos de San Fernando (1971), Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) y Taiwán (1999). En todos ellos quedó claro que estas estructuras, por su importancia estratégica de comunicación inter e intra-urbana, deben garantizar su uso para las comunicaciones de emergencia después de la ocurrencia de un evento severo. De entre las tipologías de puentes existentes, los puentes de tirantes son sin duda una alternativa muy importante, puesto que permiten salvar las mayores luces junto a los puentes suspendidos. Debido a su importancia, es deseable que los puentes con luces superiores a los 200 m, sean diseñados de forma conservadora; como ocurrencia, es común requerir una respuesta estructural elástica o casi elástica para un sismo de diseño de muy baja probabilidad de ocurrencia. Por ello, a fin de mantener una respuesta elástica en los elementos estructurales y a su vez tener una estructura capaz de disipar energía, se puede recurrir al uso de dispositivos disipadores o al aislamiento de base como estrategias pasivas de control sísmico. Nacidos como elementos de uso militar, los dispositivos de disipación de energía y el aislamiento de base rápidamente comenzaron su incursión en el mundo civil, para mejorar el desempeño sísmico de las construcciones, siendo hoy en día muy utilizados sobre todo en puentes, edificios y estructuras especiales. Mas recientemente, el uso de estrategias de control activo (semi-activo, híbrido) tímidamente comienza su incursión en estas estructuras, principalmente para el control de vibraciones en cables y tendones, que como es sabido, son muy vulnerables a la acción del viento y la lluvia.

Palabras clave: aislamiento de base, cables, control activo, puente, puente atirantado, sismo.

INTRODUCCIÓN

Los puentes soportados por cables son los que más interés han despertado debido a que permiten alcanzar actualmente las mayores luces, resolviendo así muchos problemas prácticos en los que es necesario atravesar grandes extensiones sin disponer de ningún tipo de apoyo intermedio. Estos puentes son hoy en día un desafío desde todo punto de vista, debido a las exigencias cada vez mayores de alcanzar claros más grandes, y así como en los grandes rascacielos, constituyen muchas veces más bien un capricho humano o ese deseo competitivo e insaciable de romper récords y vencer los obstáculos a cualquier costo.

Los esquemas soportados por cables que hoy en día más se emplean son sin duda los puentes suspendidos y los puentes de tirantes o atirantados, siendo los primeros aquellos que permiten alcanzar las mayores luces a un menor costo [Podolny y Scalzi, 1986].

Los mayores claros para puentes de tirantes son del

orden de los 900 m, aunque existen estudios recientes que muestran la factibilidad y posibilidad de construir puentes de tirantes con claros superiores a 1000 m, basado en el alto estándar actual de los métodos de cálculo y en el alivianamiento de la superestructura mediante tableros ortótropos [Aschrafi, 1998; Nagai *et al.*, 1998].

A modo de ejemplo, a continuación se presenta un ranking de los mayores puentes actuales del mundo, algunos de los cuales aún no han finalizado su fase constructiva o que se encuentran en etapa de proyecto [Tabla 1].

Los primeros sistemas de atirantamiento usados en puentes emplearon cadenas o barras de acero para los tirantes. El advenimiento de varios tipos de cables estructurales permitió posteriormente reemplazar las cadenas y barras, permitiendo además una mayor capacidad de carga. El concepto de puente parcialmente suspendido por cables inclinados se debe a C.J. Löscher,

PUENTE	TIPO	PAÍS	LUZ PRINCIPAL (m)	AÑO FINALIZACIÓN
1.-Messina	Suspendido	Italia	3300	2011
2.-Kitan Straight	Suspendido	Japón	2500	-
3.-Qiongzhou Haixia	Suspendido	China	2500	-
4.-Akashi Kaikyo	Suspendido	Japón	1991	1998
5.-Suzhou – Nantong	Atirantado	China	1088	2008
6.-Stonecutters	Atirantado	China	1018	2007
7.-Dongfang	Atirantado	China	900	-
8.-Lingding	Atirantado	China	900	-
9.-Tatara	Atirantado	Japón	890	1999
10.-Hu – Pu	Arco	China	550	2003
11.-New River George	Arco	EE.UU.	518	1978
12.-Pont du Québec	Celosía metálica	Canadá	549	1917

Tabla 1. Ranking de los puentes mas largos del mundo [Valdebenito y Aparicio, 2005]

un carpintero de Fribourg, Suiza, quien construyó un puente suspendido de 32 m de luz completamente estructurado en madera, incluidas su torre y tirantes, hacia el año 1784 [Fig. 1].

Los colapsos de dos puentes, la pasarela de 79 m de luz sobre el río Tweed, cerca de Dryburgh-Abbey (Inglaterra, 1818), y el puente de 78 m de luz sobre el río Saale en Nienburg (Alemania, 1824), generaron un obscurecimiento total en el desarrollo de los puentes atirantados, situación a la que se sumó la discusión no favorable del famoso ingeniero francés Navier, condenando por varios años el desarrollo de esta tipología. Ello hizo que los ingenieros de la época tornaran su vista hacia los puentes suspendidos, los cuales emergían como la tipología preferida para grandes claros.

El principio de emplear tirantes para soportar la superestructura de un puente retornó con los trabajos de John Roebling, quien con los clásicos ejemplos de los puentes Niagara Falls (EEUU), [Fig. 2], Old St. Clair

en Pittsburgh (EEUU), o el puente Brooklyn [Fig. 3], permitieron el comienzo de una nueva etapa en el desarrollo de estas estructuras. Es importante notar que los tirantes empleados por Roebling en sus puentes suspendidos fueron aplicados en adición a la suspensión clásica de los puentes colgantes.

Hacia fines del siglo XIX, el éxito de estas estructuras híbridas – parte atirantada, parte suspendida – se tradujo en una disminución del uso de estructuras soportadas exclusivamente por cables inclinados. Sin embargo, no fue hasta 1899 cuando el ingeniero francés A. Gislard introdujo un nuevo sistema de atirantamiento, económico y suficientemente rígido, que adicionaba cables que tomaban la componente horizontal de las fuerzas de los tirantes, eliminando así las componentes en el tablero y evitando problemas de inestabilidad de los mismos.

Los primeros puentes atirantados “modernos” fueron construidos por el español E. Torroja en la década de 1920 (Acueducto Tampul, España), y por el francés Albert Caquot en 1952 (Puente Canal Donzère, Francia,

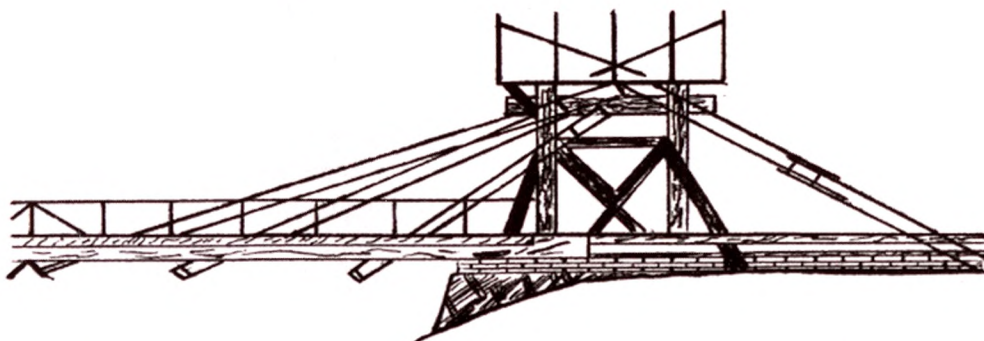


Fig. 1 Puente de madera suspendido de Löscher (Cortesía de British Constructional Steelwork Assoc., Ltd)



Fig. 2 Puente Niagara Falls, EEUU
[Cortesía de la Comisión de Puentes de Niagara Falls]



Fig. 3 Puente Brooklyn, EEUU
[de www.elclubdigital.com]



Fig. 4 Puente sobre el canal Donzère, Francia.
[Foto: J. Kerisel]

Fig. 4).

Sin embargo, el real desarrollo de los puentes de tirantes provino de los trabajos del alemán Dischinger y su famosa serie de puentes sobre el Rin, como el ejemplo de la Fig. 5.

El aumento de popularidad de esta nueva tipología estructural en los ingenieros alemanes lentamente se extendió hacia otros países. Uno de los primeros en tomar partido con esta nueva tipología fue el italiano R. Morandi, quien diseñó varias estructuras en concreto reforzado y pretensado. Su más notable trabajo es el



Fig. 5 Puente Oberkassel, Düsseldorf, Alemania
[Foto: G. Valdebenito]



Fig. 6 Puente Maracaibo, Venezuela [de en.structurae.de]



Fig. 7 Puente Barrios de Luna, España.
[de en.structurae.de]

puente sobre el Lago Maracaibo, en Venezuela, construido en 1962 [Fig. 6].

El desarrollo internacional de los puentes atirantados comenzó en forma masiva en los años '70, sin embargo el gran salto tuvo lugar en la década de 1990, cuando los puentes de tirantes comenzaron a ganar el territorio que clásicamente ocupaban los puentes suspendidos, convirtiéndose gracias a las mejoras en las técnicas constructivas, en una alternativa económica absolutamente viable, y no sólo un mero capricho arquitectónico. Como ejemplos podemos citar el puente Barrios de Luna, del español Fernández Casado [España,

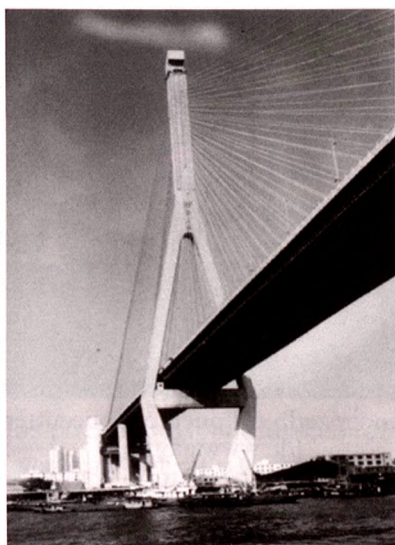


Fig. 8 Puente Yang Pu, China [Foto: M. Virlogeux]



Fig. 9 Puente de Normandía, Francia [de fr.structurae.de]

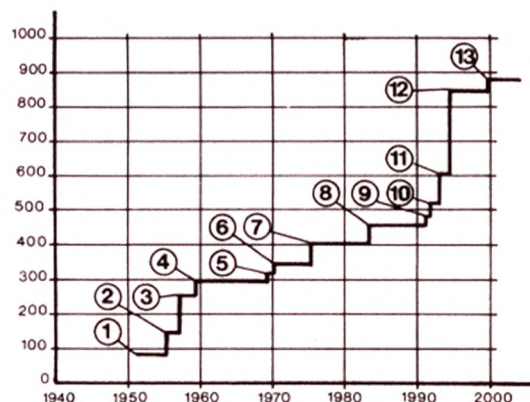
430 m de luz, terminado en 1983, Fig. 7], el puente Yang Pu [Shangai, China, 602 m de luz, terminado en 1993, Fig. 8]; el puente de Normandía [Le Havre, Francia, 856 m de luz, terminado en 1994, Fig. 9], y el puente Tataru (Japón), actualmente la estructura atirantada más grande del mundo, con un claro principal de 890 m [Fig. 10].

Resulta interesante analizar el progreso mundial de los récords de puentes de tirantes, como se aprecia en la Fig. 11.

El recientemente inaugurado Viaducto de Millau, en el Valle del Río Tarn, sur de Francia (2004), es una de las más famosas estructuras multi-vano atirantadas de la actualidad. Con sus 342 m de claro principal y 343 m de altura de la torre más alta, ha sido con justa razón



Fig. 10 Puente Tataru, Japón [de www.answers.com]



1. Donzère Canal Bridge (France) 1952-81m.
2. Stromsund Bridge (Sweden) 1955-150m.
3. Düsseldorf North Bridge (Germany) 1957-260m.
4. Köln Severin Bridge (Germany) 1959-302m.
5. Düsseldorf Kniebrücke (Germany) 1969-320m.
6. Duisburg Bridge (Germany) 1970-350m.
7. Saint-Nazaire Bridge (France) 1975-404m.
8. Anacis Bridge (Canada) 1983-465m.
9. Ikuchi Bridge (Japan) 1991-490m.
10. Skarnsund Bridge (Norway) 1991-530m.
11. Yang Pu Bridge (China) 1993-602m.
12. Normandie Bridge (France) 1994-856m.
13. Tataru Bridge (Japan) 1999-890m.

Fig. 11 Evolución de los récords de Puentes de Tirantes [Virlogeux, 1999]

apodado “el puente sobre las nubes”, convirtiéndose en uno de los actuales íconos de la ingeniería francesa. [Fig. 12].

Hoy en día continúa con más fuerza que nunca la ejecución de proyectos que contemplan el uso de sistemas atirantados en su concepción. Por su impacto estético y armonía de su forma, se ha convertido en la tipología preferida por los diseñadores y arquitectos que con asimétricos y osados diseños buscan ganar originalidad.

En este sentido, el nuevo proyecto del puente Stonecutters en Hong Kong, China, aparece como el nuevo gran récord, que con sus 1018 m de luz principal se convertirá en la mayor estructura de su tipo en el mundo. Se espera la finalización de las obras a fines del 2008 [Fig. 13].



Fig. 12 Viaducto de Millau, Francia [Foto: G. Valdebenito]



Fig. 13 Renderizado del puente Stonecutters, China
[de www.aaj.no]

COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Los puentes atirantados de gran luz, producto de sus grandes dimensiones y flexibilidad, usualmente tienen períodos fundamentales muy largos, aspecto que los distingue de otras estructuras, y que por supuesto, afecta enormemente su comportamiento dinámico. Sin embargo, la flexibilidad y características dinámicas de este tipo de puentes dependen de varios parámetros tales como el tamaño del claro o claros, el sistema de atirantamiento usado y su layout, las condiciones de soporte y muchos otros aspectos se discuten en las páginas siguientes. En general, esta tipología estructural es compleja, consistiendo en varios componentes estructurales con diferentes propiedades individuales de rigidez y amortiguamiento. Son estructuras más flexibles que los puentes normales de vigas, por lo que precisan de un adecuado análisis dinámico para su diseño sísmico.

Por ello, en los puentes de tirantes es muy importante determinar en forma precisa sus períodos, formas modales y características de amortiguamiento. Así, las pruebas de carga dinámica que se realizan en ellos resultan clave para validar las hipótesis iniciales y los esquemas y modelos usados en la concepción de los mismos.

El comportamiento sísmico de los puentes de tirantes ha sido en términos generales muy satisfactorio, no reportándose casos de colapsos o daños muy severos en

los últimos años. La mayor causa de daño han sido los movimientos diferenciales en los apoyos, sobre todo cuando el sismo actúa en la dirección longitudinal o transversal, en lo que hoy forma parte de los llamados problemas de variabilidad espacial.

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA GENERAL

En términos generales, los puentes atirantados no presentan mucha sensibilidad frente a las excitaciones sísmicas. Sin embargo, es claro que los problemas principales provienen del tablero en presencia de movimiento horizontal. La componente vertical tiene una gran importancia en el análisis y el diseño de las torres y cables, pero no así para el diseño del tablero, puesto que en los puentes modernos éste se encuentra soportado por los cables que constituyen un conjunto continuo de apoyos elásticos.

Los resultados del análisis modal en puentes atirantados han sido objeto de muchos estudios, con especial énfasis en el comportamiento sísmico. Los primeros modos de vibración muestran un período muy largo, del orden de varios segundos, y son fundamentalmente modos asociados al tablero. Ellos son seguidos por modos asociados a los cables o las torres, acoplados o no a los del tablero dependiendo de las condiciones de apoyo.

Los modos de vibración de las torres son generalmente modos superiores, que se pueden acoplar con los del tablero dependiendo de las condiciones de apoyo y la masa del tablero. En términos generales, para niveles elevados del tablero, el movimiento longitudinal es el que gobierna, en tanto que para los tableros de nivel más bajo, con mayor espaciamiento de los tirantes, el

movimiento vertical del tablero controla, debido a la mayor influencia de las cargas gravitatorias [Valdebenito y Aparicio, 2007]. Los modos obtenidos se clasifican según su dirección de acción: dirección longitudinal, transversal y torsional, considerando que uno de ellos es predominante. Indudablemente, los modos de vibrar en estos puentes son muy difíciles de separar, ya que por lo general el acoplamiento modal es elevado [Morgenthal, 1999].

Esta última característica permite una clara diferencia respecto de los puentes suspendidos en los cuales existe movimiento vertical, lateral y torsional puro, muy fácil de reconocer.

Respecto del amortiguamiento modal, este resulta ser bastante bajo, muy por debajo del clásico valor del 5% del amortiguamiento crítico empleado usualmente. Este amortiguamiento es fuertemente dependiente del modo considerado, resultando ser mayor para los modos asociados a la flexión transversal del tablero (del orden del 2%), en tanto que es menor para los modos asociados a la torsión y flexión vertical, no siendo mayores al 1%. Se observa además que para los modos asociados a la flexión transversal y torsional en los puentes más elevados (más flexibles), los amortiguamientos resultan ser ligeramente menores [Valdebenito y Aparicio, 2007].

En síntesis, un análisis preciso de las frecuencias naturales y formas modales en puentes atirantados es muy importante, no solamente para el estudio de la respuesta sísmica, sino también para la adecuada evaluación de las cargas de tráfico o viento.

En este sentido los cables son idealizados tradicionalmente como elementos barra articulados en sus extremos, con la consideración de los efectos de no linealidad geométrica a través del uso del *módulo de Ernst*. Este método es simple pero inadecuado para un análisis dinámico más exacto, ya que no considera la vibración transversal de los mismos. Los resultados numéricos y experimentales demuestran que la modelación de los cables tiene un efecto significativo en la predicción de las características dinámicas de puentes atirantados.

COMPORTAMIENTO NO LINEAL

Debido a su naturaleza, los puentes atirantados presentan

un comportamiento no lineal predominante. El análisis no lineal estático bajo cargas muertas es esencial como punto de partida para el análisis sísmico no lineal, a partir del estado deformado para carga muerta en el puente a analizar [Abdel Ghaffar, 1991]. Para luces principales de más de 600 m, los análisis no lineales geométricos y de material son muy necesarios cuando las estructuras se someten a movimientos fuertes. Las no linealidades del material dependen de la estructura específica, pero las no linealidades geométricas están presentes en casi todos los puentes atirantados, especialmente la debida a los cables, a la interacción flexión – compresión (efecto p-delta en las torres y tablero), y al cambio completo en la geometría del puente producto de su flexibilidad.

Los programas actuales por elementos finitos permiten considerar casi todos estos efectos no lineales, tarea que hasta hace unos pocos años era impensable. Así, hoy es posible considerar el comportamiento no lineal de los cables usando la *fórmula de Ernst* o aplicando formulaciones multi-cable. En este sentido los cables son idealizados tradicionalmente como elementos barra articulados en sus extremos, con la consideración de los efectos de no linealidad geométrica a través del uso del *módulo de Ernst*.

Este método es simple pero inadecuado para un análisis dinámico más exacto, ya que no considera la vibración transversal de los mismos. Los resultados numéricos y experimentales demuestran que la modelación de los cables tiene un efecto significativo en la predicción de las características dinámicas de puentes atirantados. Del mismo modo, el comportamiento no lineal de torres y vigas debido a la interacción flexión-compresión también puede ser considerada a través de procedimientos iterativos incrementales. El cambio completo en la geometría del puente, como tercera fuente de no linealidad, se puede considerar a través de un proceso incremental, en el cual la rigidez de la estructura es calculada a partir de las coordenadas nodales anteriores.

Las no linealidades del material, muy importantes en un análisis *pushover*, se pueden considerar hoy en día a partir del conocimiento de las leyes constitutivas de los materiales, y del comportamiento histerético en las zonas de disipación de energía. En este sentido, resultados de investigaciones recientes [Ren y Obata, 1999] muestran que el efecto elasto-plástico tiende a reducir la respuesta sísmica de puentes atirantados de gran luz, aunque dicho

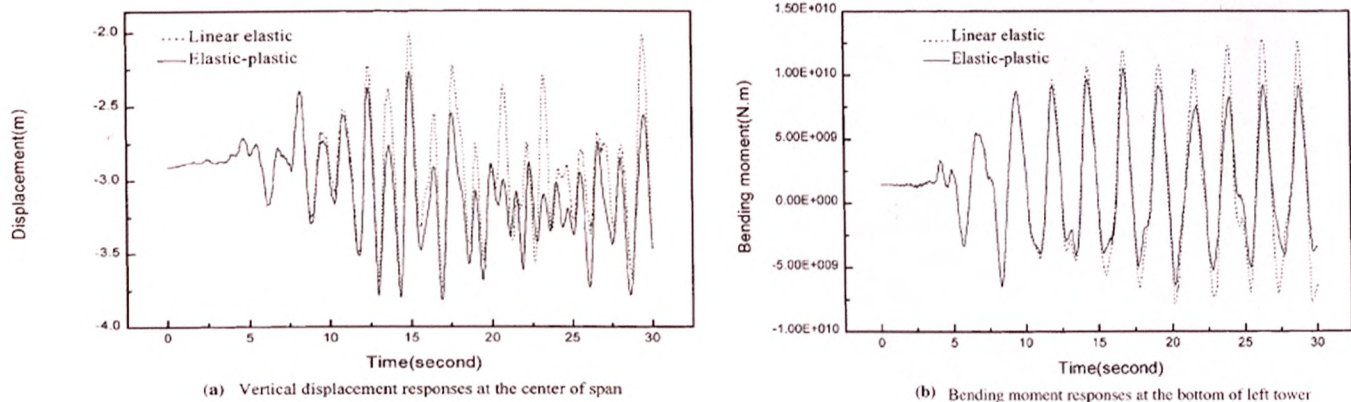


Fig. 14 Comparación de la respuesta sísmica elástica y elasto-plástica para el sismo de Higashi – Kobe

comportamiento depende notablemente del terremoto de entrada empleado. La Fig. 14 muestra una comparación de la respuesta bajo el terremoto de Higashi - Kobe.

VARIABILIDAD ESPECIAL

La variabilidad espacial del movimiento del suelo es un fenómeno bien conocido. Este mecanismo tiene una especial importancia para las estructuras extensas, tales como tuberías, puentes y túneles; y consiste básicamente en una condición asíncrona del movimiento del suelo, la que usualmente no es tomada en cuenta en los análisis. En un análisis tradicional, empleando registros temporales o espectros idénticos en todos los soportes, la situación no es importante para estructuras cortas, situación que no es tal en puentes atirantados largos. Los efectos de la variabilidad espacial implican varios mecanismos que han sido identificados: efecto del paso de onda, efecto de la incoherencia, efecto de la respuesta de sitio, efecto de la atenuación de las amplitudes de onda con la distancia al foco y efecto sísmico de la extensión de la fuente. De todos ellos, son los tres primeros los más importantes, puesto que se sabe que el efecto de la atenuación debida a la expansión geométrica de ondas y el efecto de la extensión de la fuente sísmica tienen una incidencia baja en la variabilidad espacial de los puentes de gran luz [Ettouney *et al.*, 2001]. En el caso de puentes de tirantes, el problema de la variabilidad espacial comienza cuando el puente es largo con respecto a las longitudes de onda del movimiento de entrada en la gama de frecuencias de importancia para la estructura, por lo que diversas partes del puente pueden verse afectadas por excitaciones perceptiblemente distintas, un problema usualmente sin

importancia en edificios. Este fenómeno puede ser razonablemente tratado considerando sólo el efecto del paso de onda, a través de la excitación en múltiples soportes [Abdel - Ghaffar, 1991]. Soyuk y Dumanoglu (2004) estudiaron los efectos de la variabilidad del movimiento del suelo en puentes atirantados usando análisis estocástico. El movimiento del suelo fue descrito por la función de densidad espectral (PSD), y la variabilidad espacial fue considerada teniendo en cuenta el efecto del paso de onda, la respuesta de sitio y la incoherencia. Los resultados de la investigación confirmaron que los efectos de la variabilidad espacial tienen efectos importantes en el comportamiento dinámico de puentes atirantados.

También se pudo concluir que la velocidad de propagación de ondas influencia notablemente la respuesta sísmica, aumentando conforme disminuye la velocidad, tal como se aprecia en las Figs. 15 y 16.

CONTROL DE VIBRACIONES

La aplicación del Control de Vibraciones en puentes de tirantes comenzó hace algo más de 20 años, con la incorporación de los primeros dispositivos pasivos de aislación sísmica. Desde ese entonces, el desarrollo no se ha detenido, y pese a ser una tecnología que se ha desarrollado bastante, su incorporación en puentes atirantados ha sido lenta. Muchos de los dispositivos de control han sido probados en forma analítica y experimental, pero desde el punto de vista sísmico, no son muchos los puentes que cuentan con sistemas de protección más avanzados, tal vez por las buenas lecciones que han dejado los sismos fuertes más recientes o por la falta de normativas específicas que regulen los procesos

de diseño en todas sus etapas.

Los principales usos de estos sistemas en puentes atirantados han estado más bien enfocados a la mitigación de vibraciones en los cables debido a la acción del viento, que en disipar energía sísmica. Así, las nuevas tecnologías de protección pasiva, a través de dispositivos de aislación y disipación de energía, comienzan a utilizarse recientemente en puentes con fines antisísmicos, como en el puente Cape Girardeau (EEUU) y Rion – Antirión (Grecia).

Así mismo, la constante investigación y experimentación en Control de Vibraciones, ha permitido el desarrollo de nuevos y mejores dispositivos, cuyas características de comportamiento son mejor conocidas, y con mayores capacidades para poder ser empleadas en estructuras más grandes, de acuerdo al desarrollo actual y las nuevas tendencias. Por otra parte, la aplicación de las nuevas tecnologías de protección semi-activa e híbrida en puentes ha comenzado hace muy poco, y tímidamente se comienza a experimentar y probar en puentes de tirantes, sobre todo para la mitigación de las vibraciones en los cables debido a la acción del viento y la lluvia.

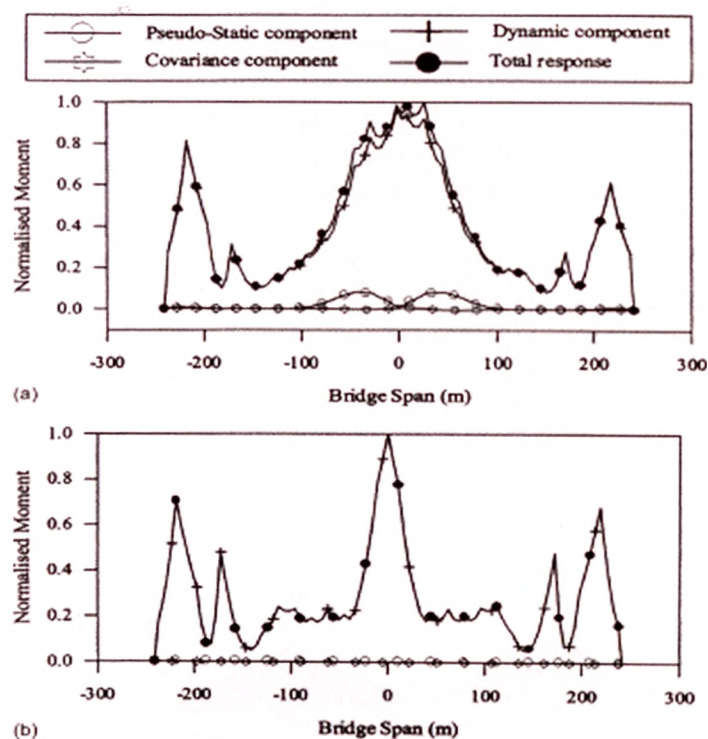


Fig. 15 Variaciones del momento normalizado del tablero: (a) excitación general; (b) movimiento uniforme

PROTECCIÓN PASIVA

Los primeros estudios sobre control pasivo en puentes atirantados comenzaron con Ali y Abdel-Ghaffar (1991). En estas primeras incursiones, emplearon apoyos elastoméricos con núcleo de plomo (dispositivos *LRB*), como sistemas de control pasivo. Los resultados de estas investigaciones demostraron la conveniencia de usar estos dispositivos de control; sin embargo, el aumento de la flexibilidad estructural a veces resulta excesiva. La conclusión general fue que la presencia de aislamiento basal para el tablero reduce significativamente las fuerzas inducidas por un terremoto, a costo de un incremento en el período fundamental de la estructura, pero con un mejor desempeño que los aparatos de apoyo convencionales. También concluyeron que los dispositivos se vuelven más eficaces en puentes cortos.

A partir de estos primeros intentos, el desarrollo de nuevos y más eficaces dispositivos no se ha detenido, sobre todo en cuanto a la aplicación de sistemas de aislamiento basal y disipación de energía. Sin embargo, la aplicación de estrategias pasivas para la protección sísmica de puentes atirantados empleando dispositivos de disipación de energía ha sido lento, limitándose básicamente al control de la vibración de los cables, como ya fue explicado, y no con propósitos sísmicos.

De entre los puentes atirantados de gran luz que incorporan dispositivos adicionales de protección sísmica pasiva, se encuentra el recientemente inaugurado Puente Rion–Antirión, en el Golfo de Corinto, Grecia. El puente localizado en una zona de alta sismicidad, generada por

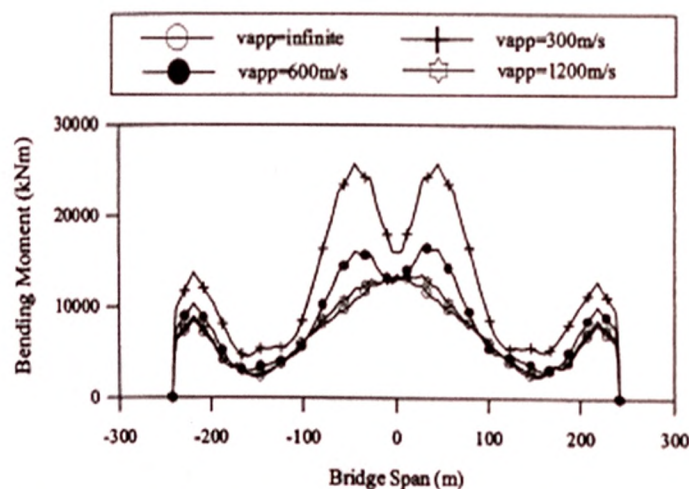


Fig. 16 Valores medios de momentos flectores máximos en el tablero para diferentes velocidades de propagación de onda

fallas locales activas, consiste en un sistema atirantado de varios claros, con tablero continuo y totalmente suspendido, como se aprecia en las Fig. 17 y 18. La longitud total del puente es de 2252 m, dividido en tres claros de 560 m y dos de aproximación de 286 m cada uno.



Fig. 17 Puente Rion-Antirión, Grecia
[Foto: Cortesía de FIP Industriale, Italia]

El puente fue diseñado para soportar eventos sísmicos con una aceleración efectiva máxima del suelo de 0.48g, y movimientos tectónicos entre dos pilas consecutivas de hasta 2 m en cualquier dirección. Esto fue posible gracias al empleo de un sistema de disipación de energía que conecta el tablero con cada pila y limita su movimiento durante la ocurrencia de un sismo intenso, mientras que disipa energía [Álvarez, 2004]. Los aspectos básicos del diseño sísmico del puente incluyen un espectro de respuesta para un período de retorno de 2000 años y una aceleración espectral máxima de 1.20g. Para el análisis dinámico, se utilizó un modelo de elementos finitos 3D de toda la estructura, tomándose en cuenta una serie de aspectos muy importantes, de entre los que se destacan: comportamiento histerético no lineal del suelo reforzado, posibles deslizamientos de la base de la pila en el lecho de grava, comportamiento no lineal de las pilas, comportamiento no lineal de los tirantes, comportamiento no lineal del tablero compuesto y efectos de segundo orden.

El sistema amortiguante está formado por fusibles y amortiguadores viscosos actuando en paralelo, conectando el tablero con las pilas en dirección transversal. Los fusibles se encuentran diseñados para trabajar como conexiones rígidas para soportar sismos moderados y las altas cargas de viento. Ante la ocurrencia del sismo de diseño, los fusibles están calculados para fallar, dejando libres a los amortiguadores viscosos para disipar la energía inducida. La Fig. 19 muestra la disposición del sistema de aislación y disipación en el puente.

En cada pila se instalaron 4 amortiguadores viscosos, con una capacidad de 3500 kN de reacción cada uno y una constante de amortiguamiento $C=3.000$ kN/m/s. Los fusibles son de una capacidad de 10.500 kN. Para las pilas de transición se emplearon los mismos amortiguadores anteriores pero fusibles estructurales de 3.400 kN de capacidad.

El comportamiento y los requerimientos del sistema de disipación fueron evaluados mediante un análisis temporal no lineal de un modelo 3D de la estructura. Sin embargo, las hipótesis de diseño y el comportamiento real de los dispositivos debían ser verificados en prototipos a escala natural. Los amortiguadores fueron ensayados en el Laboratorio de la Universidad de California en San Diego (EEUU) y los fusibles en FIP Industriale Testing Laboratory, Italia [Infanti *et al.*, 2004]. La Fig. 20 muestra el prototipo de los amortiguadores montado en el marco de pruebas.

Otra novedad que incluye el puente Rion-Antirión es la adición de desviadores antisísmicos que actúan como verdaderos amortiguadores para la mitigación de vibraciones en los cables. Aunque en general también se emplean amortiguadores hidráulicos en puentes de tirantes y colgantes para disminuir el efecto del viento y mejorar así las condiciones aerodinámicas, lo cierto es que paralelamente tienen un propósito anti-sísmico,

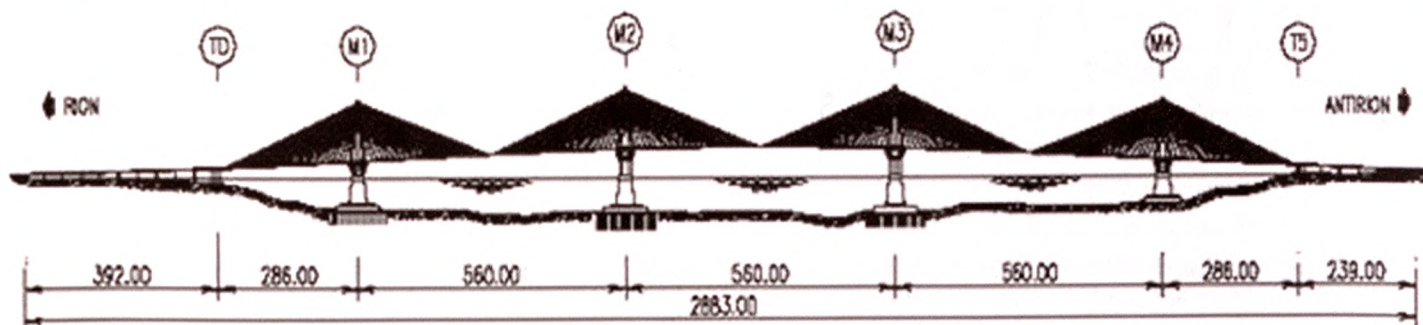


Fig. 18 Vista longitudinal del puente Rion-Antirión



Fig. 19 Disposición del sistema de aislamiento elastomérico y disipación de energía longitudinal y transversal
[Foto: Cortesía de FIP Industriale, Italia]



Fig. 20 Prototipo del amortiguador viscoso montado en marco de pruebas [Foto: Cortesía de FIP Industriale, Italia]

ya que bajo ciertas circunstancias las vibraciones de los cables pueden modificar la respuesta sísmica global del puente e introducir paquetes de energía no despreciable en modos de vibración superiores (interacción cable - tablero). En este sentido, Lecinq *et al.* (2003) entregan una descripción de las medidas que existen hoy en día para aumentar el amortiguamiento de los cables y describen los desviadores antisísmicos empleados en el puente Rion-Antirion. La Fig. 21 muestra una vista de un amortiguador hidráulico interno empleado para mitigación de vibraciones en los tirantes.

PROTECCIÓN SEMI-ACTIVA E HÍBRIDA

Aunque el control activo en puentes de tirantes fue propuesto por primera vez a fines de los años 70, los estudios y aplicaciones no comenzaron sino hasta hace algo más de una década, enfocándose principalmente en el empleo de estrategias para mitigar el efecto de las vibraciones en los cables, ya sea por efectos aerodinámicos, por sismos o inducidos por las cargas de tráfico. En este sentido, algunas soluciones especiales como el *Control de Tendones Activos* han sido desarrolladas desde comienzo de los años 90. En esta estrategia se instalan sensores en los cables muy cerca de la zona de anclaje al tablero para detectar los movimientos de éste. Los movimientos detectados son procesados a través de un algoritmo de control que envía la orden a los actuadores servo hidráulicos o de otro tipo, fijos en los extremos de los cables, para así realizar las correcciones correspondientes. Estos actuadores cambian la tensión de los cables en tiempo real, lo cual puede ser muy ventajoso. Aunque esta estrategia es muy efectiva, los costos en general son muy elevados, la manutención debe realizarse con cuidado y por personal

especializado, y la dependencia del suministro eléctrico puede ser crítica durante un evento sísmico de magnitud.

Los primeros estudios analíticos y experimentales sobre la aplicación de sistemas activos en puentes de tirantes, con claros propósitos antisísmico, fueron desarrollados por Schemmann y Smith (1996, 1998). El primer trabajo consistió en la realización de un modelo analítico experimental de un puente atirantado controlado activamente, y desarrollado como parte de un proyecto de investigación interdisciplinario e inter-institucional para analizar los efectos del control de vibraciones activo en puentes atirantados sujetos a acciones sísmicas.

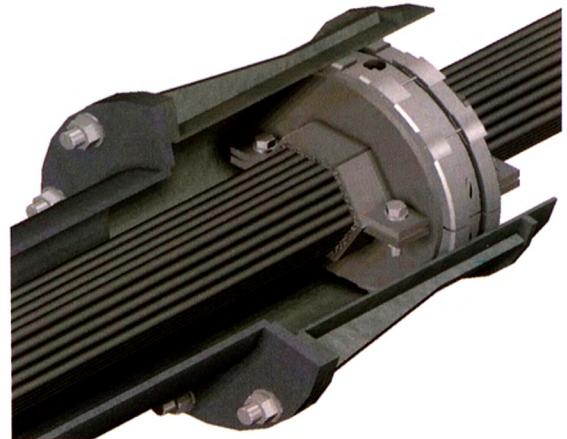


Fig. 21 Amortiguador hidráulico interno
[Lecinq *et al.*, 2003]

El objetivo de esta investigación era mejorar la comprensión de cómo las complejidades asociadas a la modelación de puentes atirantados, tales como el comportamiento no lineal y la participación de modos superiores acoplados en la respuesta sísmica, afectan la efectividad de los esquemas de control activo. Los resultados del trabajo mostraron significativas reducciones en los esfuerzos internos máximos, y de

probar varias configuraciones posibles de los actuadores, se concluyó que la disposición más efectiva es aquella en la cual los actuadores se localizan cerca del centro del claro principal del puente.

Así mismo, el estudio mostró que sólo necesitan ser controlados los modos de primer orden para reducir la respuesta en desplazamiento; sin embargo, el control de modos superiores es esencial para reducir las fuerzas. Por otro lado, el control de modos acoplados puede aumentar la respuesta de la estructura en términos de fuerzas [Fig. 22]

Varios de los trabajos más recientes sobre protección sísmica activa/semi-activa en puentes atirantados, se refieren al estudio de los algoritmos de control y su aplicación en sistemas activos. Las estrategias de control activo son inútiles si el algoritmo de control no es lo adecuadamente fiable, robusto y eficiente. Algunos trabajos recientes en este sentido, comienzan a desplazar a los clásicos algoritmos de control cerrado, lineal, Lyapunov o Bang-Bang, por mencionar algunos. Actualmente se analiza y experimenta con estrategias basadas en Conjuntos Difusos, Rigidez Pseudo-negativa o en base a Redes Neuronales.

Una de las estrategias de control semi-activo en puentes de tirantes que empieza a imponerse es sin duda el empleo de los fluidos controlables. Entre ellos, el uso de los *amortiguadores magnetoreológicos* es aquel que mejor futuro tiene por sus múltiples bondades, entre las que se destacan la poca energía que requieren para operar y su buen desempeño. En este sentido, el trabajo

presentado por Chen *et al* (2003) muestra uno de los pocos casos de aplicación práctica conocida de estos dispositivos en puentes atirantados que actualmente se tiene. La aplicación de los dispositivos fue hecha al puente Dongting Lake, que cruza el lago Dongting en su encuentro con el río Yangtze, en el sur de China. Después de que el puente fue completado en 1999, se apreció que los cables sufrían los efectos de vibración debidos a la lluvia y viento. Para investigar la factibilidad de emplear dispositivos magnetoreológicos como solución al problema, se desarrolló un proyecto de investigación conjunto entre la Universidad de China Sur Central y la Universidad Politécnica de Hong Kong. La instalación finalizó en junio del 2002, constituyendo la primera aplicación en el mundo de estos dispositivos en puentes de tirantes.

Muy recientemente, la reparación integral del Puente del Alamillo en Sevilla, España, incorporó la aplicación de amortiguadores magnetoreológicos con la finalidad de mitigar el efecto del viento sobre algunos de los cables, constituyendo una de las primeras aplicaciones de fluidos controlables como sistema semiactivo en puentes europeos (Fig. 23). Aunque el puente lleva en operación más de 16 años, el bajo amortiguamiento de los cables hizo necesaria esta intervención.

REFERENCIAS

Abdel -Ghaffar, A.M. (1991), Cable-Stayed Bridges under Seismic Action. *Proceedings of the Seminar Cable – Stayed Bridges: Recent Development and their Future*, Yokohama, Japan.

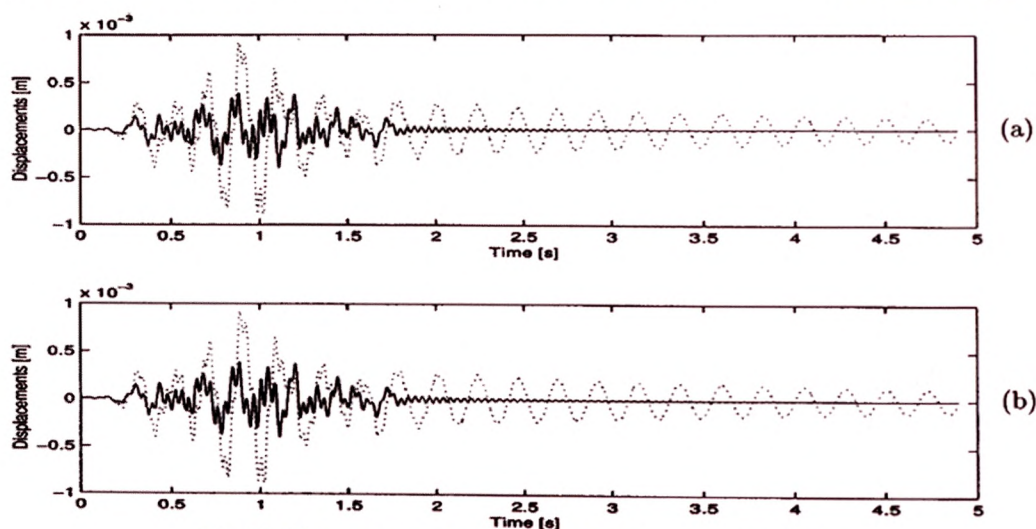


Fig. 22 Historias temporales de desplazamientos controlados (línea continua) y no controlados (línea segmentada): (a) modo 1 controlado; (b) modos 1, 9, 26 y 35 controlados



Fig. 23 Amortiguadores MR en Puente Alamillo, Sevilla, España. Foto: G. Valdebenito

- Ali, H-E and Abdel -Ghaffar, A.M. (1991). Seismic Energy Dissipation for Cable-Stayed Bridges using Passive Devices", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp 877 – 893
- Álvarez, J. (2004). Respuesta Sísmica de Puentes Arco Empleando Amortiguamiento Viscoso Suplementario. *Tesis Doctoral*, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, ETSECCPB, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España
- Aschrafi, M. (1998). Comparative Investigations of Suspension Bridges and Cable-Stayed Bridges for Spans Exceeding 1000 m. *Proceedings of the IABSE Symposium Japan 1998 Long – Span and High Rise Structures*, Kobe, Japan, pp 447 – 452
- Chen, Z.Q., Wang, X.Y., Ko, J.M. and Ni, Y.Q., Spencer, B.F., Yang, G. (2003), "MR Damping System on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge", *Proceedings of the Conference: Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Non-destructive Evaluation for Civil Infrastructures*, San Diego, USA
- Ettouney, M., Hapij, A. and Gajer, R. (2001), "Frequency – Domain Analysis of Long – Span Bridges Subjected to Non-uniform Seismic Motions", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, No. 6, pp 577 – 586
- Infanti, S., Papanikolas, P., Benzoni, G. and Castellano, M.G. (2004), "Rion – Antirion Bridge: Design and Full – Scale Testing of the Seismic Protection Devices", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 2174.
- Lecinq, B., Messein, J.P. and Boutillon, L. (2003), "The Rion-Antirion Bridge Stay Cables: A Seismic Approach", *Proceedings of the FIB Symposium: Concrete Structures in Seismic Regions*, Athens, Greece.
- Morgenthal, G. (1999), "Cable-Stayed Bridges – Earthquake Response and Passive Control", *Msc Dissertation*, Civil Engineering Department, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK.
- Nagai, M., Xie, X., Yamaguchi, H. and Fujino, Y. (1998), "Economical Comparison Between Cable-Stayed and Suspension Systems with a Span Exceeding 1000 meters", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 46, Nos. 1 – 3, pp 59
- Podolny, W. and Scalzi, J.B. (1986), "Construction and Design of Cable – Stayed Bridges", 2^a edition, John Wiley & Sons, Inc, New York
- Ren, W.X. and Obata, M. (1999), "Elastic-Plastic Seismic Behaviour of Long-Span Cable-Stayed Bridges", *Journal of Bridge Engineering*, Vol.4, No.3, pp 194 – 203
- Schemmann, A.G. and Smith, H.A. (1996), "Vibration Control of Cable-Stayed Bridges: Analytical Development", *Proceedings of the 11th Conference on Engineering Mechanics*, Fort Laudardale, USA, pp 898 – 901
- Schemmann, A.G. and Smith, H.A. (1998), "Vibration Control of Cable-Stayed Bridges - Part 1 and 2", *Earthquake Eng. and Str. Dynamics*, Vol. 27, pp 811 – 843
- Soyluk, K. and Dumanoglu, A.A. (2004), "Spatial Variability Effects of Ground Motions on Cable – Stayed Bridges", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp 241 – 250
- Valdebenito, G. y Aparicio, A. (2005), "Comportamiento Sísmico de Puentes Atirantados y Disipación de Energía Adicional: Un Estado del Conocimiento", Monografía CIMNE IS – 54, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España
- Valdebenito, G., Aparicio, A. (2007), "Dynamic Characterization of Cable-Stayed Bridges: A Comparative Analysis", *Proceedings of the 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran
- Virlogeux, M. (1999), "Recent Evolution of Cable-Stayed Bridges", *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 8, pp 737 – 755.

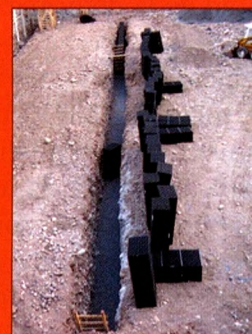
ESTANQUES HIDROLOGICOS PREFABRICADOS



- ZANJAS DE INFILTRACION
- POZOS ABSORBENTES
- ESTANQUES DE ACUMULACION



90% POROSIDAD
38 ton/m³ DE RESISTENCIA
300 m³ POR CAMION



www.sistemasgeotecnico.cl - geoemin@emin.cl - FONO (56-2) 299 8001 (56-2) 299 8000 - FAX (56-2) 206 6468

PROYECTOS SERVIMOP

PROYECTOS INMOBILIARIOS