

## NUEVA APLICACIÓN

# DISIPADORES BIDIRECCIONALES DE COLUMNA LÍQUIDA SINTONIZADA PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES

- Sismos recientes como el de Los Ángeles el año 1994, Chile 2010 y Japón 2011, demostraron que no solo basta con asegurar la integridad de las estructuras frente a acciones externas de gran intensidad.
- El alto costo del contenido y la necesidad de los usuarios de estar en ambiente seguros y confortables, exigen que el diseñador busque, además de la protección estructural, el resguardo de los elementos en el interior de la construcción, entre otras variables.

LUIS ROZAS

Magister Ingeniería Sísmica Universidad de Chile

RUBÉN BOROSCHEK

Doctor en Ingeniería Civil, Universidad de California, Berkeley

ALDO TAMBURRINO

Doctor en Ingeniería Civil, Universidad de Minnesota

**A** MEDIADOS DEL SIGLO XIX la revolución industrial marcó lo que para muchos fue el inicio de la ingeniería civil moderna. Los avances tecnológicos permitieron por primera vez en la historia aprovechar a gran escala la energía contenida en los combustibles fósiles, tales como el carbón y el petróleo, dando inicio a un crecimiento sin precedentes en la industria de la construcción. Este crecimiento se tradujo no solo en un mayor número de construcciones, sino que al mismo tiempo los edificios se hicieron más grandes y complejos. En este aspecto el hito más significativo de la época ocurrió el año 1889 cuando en París se inauguró la torre Eiffel. La torre, concebida como una estructura enrejada de hierro, dio nacimiento al moderno edificio de altura. Reflejó a su vez lo que se podría denominar la máxima de la arquitectura, plasmada por el pensador de la época John Ruskin: "Requerimos de los edificios, así como de los hombres, dos clases de virtudes. En primer lugar el de cumplir bien su objetivo, y al mismo tiempo hacerlo con gracia y elegancia".



**FIGURA 1.** Representación artística del disipador de columna líquida bidireccional instalado en el nivel superior de un edificio. Se muestra en la figura el agua que se ubica en una de las columnas y ductos adyacentes del dispositivo.

## BASF Construction Chemicals

### Tiene una solución para cada desafío en la industria de la construcción

No obstante el fuerte impulso dado por la industria de la construcción, la ingeniería de la época no podía dimensionar los enormes requerimientos de diseño que los movimientos sísmicos impondrían sobre las estructuras. El terremoto de San Francisco y el de Valparaíso, ambos en el año 1906, fueron los primeros eventos sísmicos en dejar en claro que las formas tradicionales de estructuración debían ser adaptadas a estas nuevas condiciones. Desde entonces un sinnúmero de terremotos han puesto de manifiesto la necesidad de adaptar las estructuras para poder soportar las fuerzas de eventos como los sismos en forma apropiada.

Eventos sísmicos más recientes como el de Los Ángeles el año 1994, Chile 2010 y Japón 2011, demostraron que no solo basta con asegurar la integridad de las estructuras frente a acciones externas de gran intensidad. El alto costo del contenido y la necesidad de los usuarios de estar en ambientes seguros y confortables, exigen que el diseñador busque además de la protección estructural, el resguardo de los elementos en el interior de la construcción y la reducción de vibraciones molestas que pudieran afectar a sus ocupantes.

Ante estas nuevas exigencias se han desarrollado numerosos dispositivos de control de vibraciones que incrementan la seguridad de las estructuras frente a la acción de grandes sismos, así como a los efectos de fuertes vientos. Adicionalmente, estos sistemas mejoran el comportamiento de las construcciones reduciendo las vibraciones molestas, tanto en términos de sus máximas amplitudes, como en la duración de vibraciones perceptibles.

Dentro de estos sistemas de control se destacan los disipadores de columna líquida sintonizada. Especialmente indicados para su uso en estructuras flexibles de bajo amortiguamiento, y que por sus características dinámicas poseen una limitada incursión en el rango no lineal y proveen protección a las estructuras con una mínima intervención en su arquitectura<sup>2</sup>. Consisten básicamente de un estanque de líquido en forma de U, el cual gracias a su forma permite la oscilación de la masa de agua contenida en su interior. Las dimensiones del estanque se determinan de forma tal que la oscilación del agua ocurra

en oposición con la del edificio, contrarrestando el movimiento de la estructura. Destacan por su gran simplicidad, bajo costo de instalación y mínima mantención<sup>3</sup>.

Entre las primeras aplicaciones de los disipadores de columna líquida sintonizada se cuentan la estabilización de embarcaciones y plataformas flotantes<sup>1-2</sup>. Su uso se ha extendido en años recientes al control de vibraciones en estructuras civiles, en donde los edificios altos se han beneficiado en gran medida de su incorporación. En este tipo de estructuras el almacenamiento de agua es a menudo una necesidad, ya sea por razones de seguridad, como es el caso de los estanques de almacenamiento de agua para el combate de incendios, o por motivos de abastecimiento de agua potable en los pisos superiores de la estructura<sup>2</sup>. Como consecuencia de esto último, los disipadores de columna líquida sintonizada resultan ser una alternativa de control de respuesta estructural eficaz y económica para los edificios altos. Como ejemplo de su uso en este tipo de estructuras, se puede mencionar el edificio One Wall Centre en Vancouver, Canadá. Esta estructura, construida en el año 2001, cuenta con dos disipadores de columna líquida sintonizada de 200 ton de agua cada uno ubicados en la cima del edificio. Otro ejemplo más reciente es el del edificio Comcast Center ubicado en Filadelfia, Estados Unidos. La estructura, inaugurada el año 2008, posee un disipador líquido sintonizado de 1.300 ton de agua cuyo objeto es el de reducir la respuesta del edificio frente a la acción del viento.

Recientemente los autores han desarrollado un nuevo tipo de disipador, denominado disipador de columna líquida sintonizada bidireccional (DCLSB), este dispositivo utiliza el concepto de los disipadores de columna líquida (DCLS) convencionales, permitiendo el control vibratorio de estructuras en dos direcciones perpendiculares de manera simultánea. Mediante el uso de elementos simples tales como el agua y la particular configuración geométrica del estanque, es posible lograr dicho control simultáneo en coherencia con el espíritu de la célebre frase de John Ruskin acerca de las estructuras; cumplir bien su objetivo, y al mismo tiempo hacerlo con gracia y elegancia.



#### Adhesivos

**Aditivos para Cemento y Hormigón**

**Aditivos para Construcción Subterránea**

**Grouts**

**Impermeabilizantes \***

**Juntas de Expansión**

**Pisos Industriales \***

**Sellos de Juntas**

**Sistema de Fachada Aislante**

**Sistema de Superficies Vegetales**

**Sistemas de Refuerzo y Reparación**

\* Fichas LEED asociadas

Fono: (56 2) 2799 4300

Fax: (56 2) 2799 4320

www.basf-cc.cl

bcc\_chile@basf.com



**FIGURA 2.** Vista del disipador sujeto a la acción de una aceleración en su base (las columnas del disipador se omiten por claridad). Si el edificio se mueve hacia la derecha, las fuerzas inerciales de la masa de líquido en el interior del disipador empujan a la estructura en el sentido contrario reduciendo de esta forma su deformación.

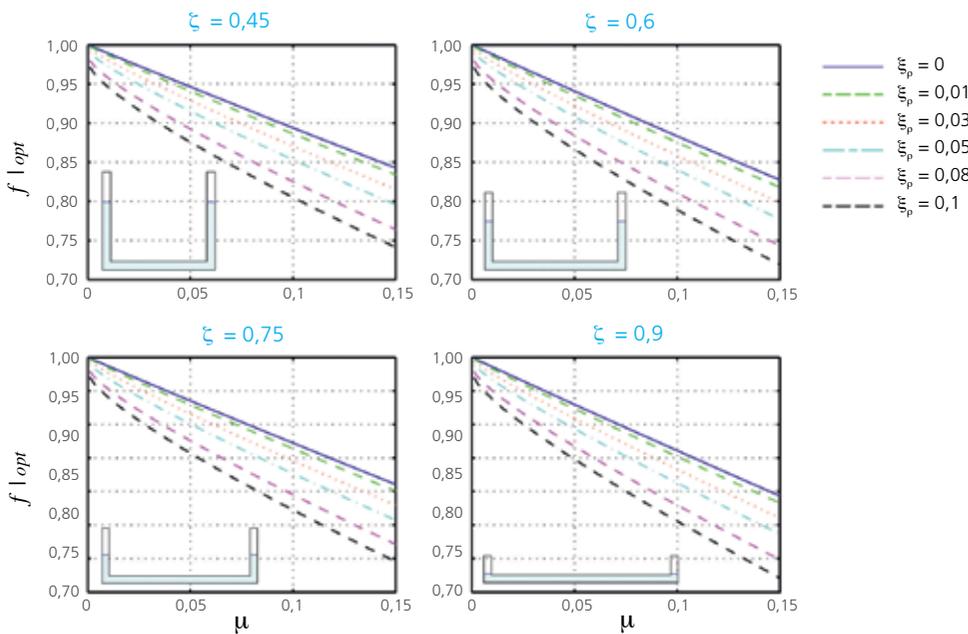
**DESCRIPCIÓN DEL DISIPADOR**

El disipador de columna líquida sintonizada bidireccional se muestra esquemáticamente en la figura 1. El dispositivo puede ser concebido como cuatro DCLS convencionales que comparten sus columnas verticales combinados en una sola unidad. En la figura 2, por otra parte, se muestra conceptualmente el principio de operación del DCLSB. Cuando el dispositivo se somete a una aceleración en su base, como aquellas que pueden ocurrir en un edificio debido a la acción de movimientos sísmicos o viento, la aceleración obliga a

la masa de líquido contenida en los estanques horizontales a desplazarse. Este desplazamiento produce a su vez una elevación del nivel del líquido ubicado en las columnas verticales del disipador. Debido a que el volumen total debe preservarse, esta elevación va acompañada por un descenso de las masas de líquido contenidas en las columnas verticales opuestas. Todo este proceso tiene como consecuencia una súbita perturbación del equilibrio estático del fluido contenido dentro del DCLSB. La fuerza de gravedad se encarga entonces de recuperar la posición de

equilibrio estático o estado de mínima energía potencial, produciéndose de esta manera la oscilación del líquido.

El tamaño del dispositivo, así como la relación entre las áreas de las secciones transversales de los estanques, determinan el período de oscilación del fluido. Por otra parte, la resistencia opuesta al flujo de líquido debida al rozamiento con las paredes internas del disipador, junto con el cambio de dirección de flujo de líquido en las esquinas y fundamentalmente a las restricciones ubicadas en el sector central de los estanques horizontales



**FIGURA 3.** Los parámetros óptimos de diseño se encuentran aplicando criterios de optimización de la respuesta de la estructura. Se muestran en la figura los valores óptimos de diseño para la frecuencia de oscilación normalizada de la masa de líquido dentro del disipador, para distintas configuraciones y características dinámicas del disipador y de la estructura a controlar.

del DCLSB, definen el amortiguamiento de la oscilación del fluido. Cabe destacar que las fuerzas que se oponen al flujo de líquido son de tipo no lineal y dependen en general del régimen de flujo. No obstante, para fines del diseño estas pueden ser representadas de manera lineal equivalente.

Gracias a su particular configuración, el DCLSB, además de permitir el control de vibraciones en dos direcciones ortogonales, requiere de una menor cantidad de líquido en su interior en comparación con otras posibles configuraciones. Por ejemplo, si consideramos la alternativa de utilizar dos DCLSB perpendiculares en vez de un único DCLSB, llegamos a la conclusión de que para la componente de la acción sísmica que ocurre paralela a uno de los DCLSB, toda la masa de líquido dentro del DCLSB perpendicular a dicha dirección es masa que no participa oponiéndose al movimiento de la estructura. Esta ventaja se traduce no solo en un ahorro de espacio, sino que al mismo tiempo reduce la cantidad de refuerzos necesarios para soportar el peso del dissipador en la estructura a controlar, aminorando los

costos de construcción.

Una de las características más determinantes en la efectividad del DCLSB es la frecuencia de oscilación del líquido en su interior. Los dissipadores sintonizados, dentro de los cuales se cuenta el DCLSB, disipan energía al entrar en resonancia vibrando en oposición con el movimiento de la estructura en la cual se ubican. Es por ello que un adecuado ajuste de la frecuencia de vibración del dissipador resulta crucial para obtener los máximos beneficios del dispositivo.

### CONDICIONES ÓPTIMAS DE DISEÑO DEL DISIPADOR

En términos generales la efectividad del DCLSB es mayor a medida que la relación de masas se incrementa y también a medida que su razón de aspecto se hace mayor. Esto último significa que de ser posible deben preferirse aquellas configuraciones de diseño en las cuales el dissipador posee la mayor masa y al mismo tiempo las mayores dimensiones en planta posibles. Claramente no siempre será posible concretar estas condiciones, sino que

más bien estas representan situaciones deseables desde el punto de vista del diseño del DCLSB. Por ejemplo, limitaciones arquitectónicas y de espacio podrían eventualmente acotar las dimensiones en planta del dissipador forzando a utilizar razones de aspecto menores. A su vez, la carga que puede ser adicionada en la estructura también impone restricciones a la masa del dispositivo.

Utilizando análisis de optimización matemática es posible determinar expresiones para los valores óptimos del DCLSB que minimizan la respuesta de la estructura a controlar. Se considera para este fin que la estructura está sujeta a aceleraciones en su base que pueden ser caracterizadas como un proceso estocástico cuya función de densidad espectral es un ruido blanco filtrado. En la figura 3 se muestran los valores óptimos de los parámetros  $f$  y  $\xi$ , que corresponden a la frecuencia normalizada de oscilación del líquido y su amortiguamiento, para distintos valores de la relación de masas  $\mu$ , amortiguamiento de la estructura a controlar  $\xi$  y factores de forma del dispositivo  $\zeta$ . Se aprecia que a medida que la



**MICROPILOTES AUTOPERFORANTES**  
EDIFICIO COSTANERA CONCEPCIÓN



**ANCLAJES POSTENSADOS TEMPORALES**  
EDIFICIO PLAZA CORDOVA - LAS CONDES



**MICROPILOTES PERMANENTES FUNDACIÓN**  
TOLVA CALCINA - FUNDICIÓN CHUQUICAMATA

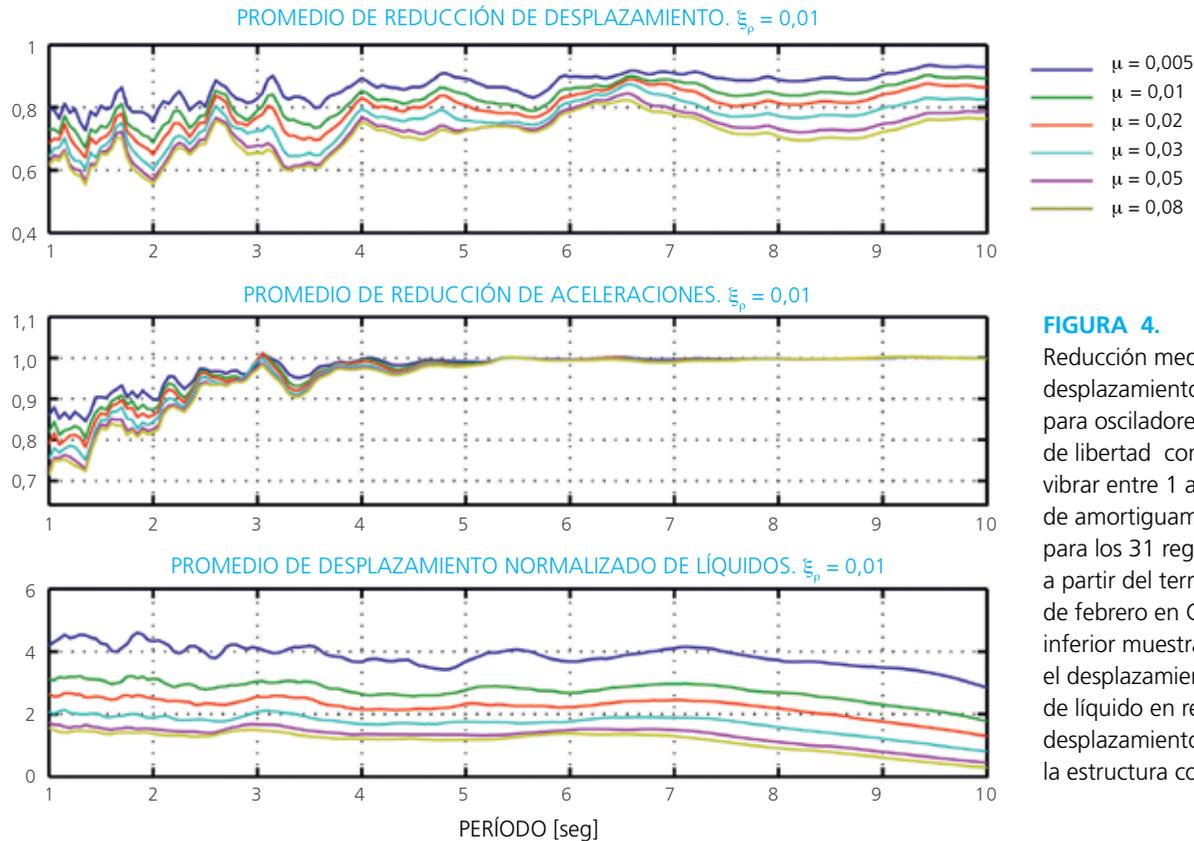


FIGURA 4.

Reducción media de desplazamiento y aceleraciones para osciladores de un grado de libertad con períodos de vibrar entre 1 a 10 [seg] y 1% de amortiguamiento crítico, para los 31 registros tomados a partir del terremoto del 27 de febrero en Chile. El gráfico inferior muestra en tanto el desplazamiento medio de líquido en relación al desplazamiento medio de la estructura controlada.



El alto costo del contenido y la necesidad de los usuarios de estar en ambientes seguros y confortables, exigen que el diseñador busque además de la protección estructural, el resguardo de los elementos en el interior de la construcción y la reducción de vibraciones molestas que pudieran afectar a sus ocupantes.

relación de masas se hace menor, la razón de frecuencias tiende a la unidad, indicando en este caso que el disipador debe tener una frecuencia de oscilación igual a la frecuencia de la estructura a controlar. De manera semejante, para valores bajos de la relación de masas el valor óptimo del amortiguamiento del dispositivo tiende a cero. Si bien es cierto, no es posible físicamente materializar esta última condición, análisis de sensibilidad permiten demostrar que el amortiguamiento de la oscilación de líquido tiene una influencia menor en el desempeño del disipador. No obstante, juega un rol fundamental en el control de los desplazamientos de las masas de líquido en su interior. Esta última propiedad permite al diseñador utilizar valores altos de  $\xi$  sin sacrificar sensiblemente el comportamiento del disipador y, al mismo tiempo, controlar los máximos desplazamientos verticales del líquido, lo que en última instancia ayuda a reducir las dimensiones globales del dispositivo.

**DESEMPEÑO DEL DISIPADOR. ESTUDIOS NUMÉRICOS PARA REGISTROS SÍSMICOS DEL 27F**

Con objeto de verificar la eficacia del DCLSB se han realizado análisis numéricos en donde

se han sometido estructuras con y sin disipador a la acción de 31 registros sísmicos obtenidos en distintas estaciones a lo largo del país durante el terremoto del 27 de febrero del año 2010. Las estructuras controladas poseen períodos naturales de vibrar que varían desde 1 a 10 [seg], con razones de amortiguamiento crítico variables entre 0,5 a 5 por ciento. Al mismo tiempo, las relaciones de masa consideradas van desde 0,5 a 10% y los factores de forma varían entre 0,6 y 0,9. Los rangos de variación de los parámetros considerados en el estudio han sido escogidos con objeto de proveer información útil respecto de la eficacia del disipador para un amplio rango de posibles configuraciones estructura-DCLSB. En la figura 4 se muestran las reducciones de desplazamientos y aceleraciones promedios para los 31 registros sísmicos.

## RESULTADOS

Los resultados de los estudios numéricos muestran que el disipador resulta efectivo para reducir los máximos desplazamientos de la estructura a controlar. Tal y como se aprecia en la figura 4, las reducciones de los máximos desplazamientos varían aproximadamente entre un 30 a 45% para las mayores relaciones de masa y entre un 10% y 30% para las relaciones de masa menores. Las máximas aceleraciones en cambio, muestran reducciones significativas solo para es-

tructuras con períodos menores a 3 [seg] aproximadamente. Esto último es consecuencia de la reducción en la demanda de aceleraciones en estructuras de períodos largos ubicadas en la región sensitiva a desplazamientos del espectro. La reducción de aceleraciones en esta clase de estructuras por tanto resulta ser solo marginal toda vez que en estos casos las demandas de aceleraciones son reducidas. Por otra parte, se puede apreciar que los desplazamientos verticales de la superficie libre de líquido se reducen a medida que la relación de masas aumenta.

## CONCLUSIONES

Buscando adaptarse a los nuevos requisitos de diseño cuyo objeto va más allá de la protección estructural, diversos dispositivos de protección sísmica se han propuesto para mejorar el comportamiento de las estructuras. En este artículo se presenta un nuevo dispositivo cuyo objetivo es el control de la respuesta de edificios cuyo movimiento ocurre fundamentalmente en dos direcciones perpendiculares como es el caso de numerosos edificios altos. El dispositivo utiliza como principio de funcionamiento la acción de las fuerzas inerciales provenientes de la aceleración de masas de agua. La configuración geométrica del disipador le confiere a su vez la capacidad de controlar movimientos en dos direcciones perpendiculares simultáneamente. Esta última característica se traduce en ahorros de costo y espacio en comparación con el uso de dispositivos independientes u otras configuraciones. Se presentan los resultados de análisis numéricos en donde se han sometido un amplio rango de estructuras de diversas características dinámicas a la acción de 31 registros obtenidos del terremoto del 27 de febrero. Los resultados muestran que el disipador propuesto se comporta bien, destacándose particularmente la reducción de desplazamientos en la estructura, las que dependiendo de la relación de masas pueden llegar al 45 por ciento. ■

## REFERENCIAS

- [1] Kareem, A., (1993), "Liquid Tuned Mass Dampers: Past, Present and Future", Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Wind Engineering, Vol. 1, Los Angeles.
- [2] Kareem, A., Kijewsky T., Tamura Y., (1991), "Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications", Wind and Structures, Vol. 2 No. 3, pp. 201-251.
- [3] T.T. Soong, B.F. Spencer Jr., (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", Engineering Structures 24, pp. 243-259.

## EN SÍNTESIS

→ Los disipadores de columna líquida sintonizada consisten en un estanque de líquido con forma de U, la que permite la oscilación de la masa de agua contenida en su interior.

→ **Las dimensiones del estanque se determinan de forma tal que la oscilación del agua ocurra en oposición con la del edificio, contrarrestando el movimiento de la estructura.**

→ Recientemente los autores han desarrollado un nuevo tipo de disipador de columna líquida sintonizada bidireccional (DCLSB) que utiliza el concepto de los DCLS convencionales para permitir el control vibratorio de estructuras en dos direcciones perpendiculares de manera simultánea.



**Valor Experto es un servicio de información on-line para controlar y mejorar la rentabilidad de proyectos de inversión y contratos.**

Información confiable y de calidad bajo el standard mundial EVM (Earned Value Management)

Alertas tempranas para la toma oportuna de decisiones

Mejore la gestión y control de riesgos del portafolio de proyectos

Acceso permanente a información para controlar múltiples portafolios a través de internet

Implementación rápida y fácil, sin procesos largos y costosos

No requiere invertir en software, hardware o mantenimiento de sistemas

No requiere ingresar datos no realizar trabajo adicional.

Contáctenos a los teléfonos:

56 2 29816450 / 56 9 96990732  
o escriba a info@valorexperito.com  
Av. Providencia, 309. Of. 34.  
Providencia-Santiago.

**www.valorexperito.com**

Cuatro opciones de revestimiento a favor de su proyecto

Teja térmica **TermoRoof 4** PURT

Resistencia, refuerzo estructural y aislamiento térmico para su cubierta

1m de ancho útil

5% Inclínación mínima del tejado

Permite ahorrar el uso de terminación interior

Puede ser utilizada en industrias, comercios e residencias

Opciones de revestimiento  
Acero/Acero | Acero/Film  
Acero/PVC | PVC/PVC

**Danica**®  
La solución en sistemas termoaislantes.

Para cotizar su proyecto o visitar nuestra planta, favor contactarnos a:  
**ventas@danica.cl | 56 2 2784 6400 | www.danica.cl**

**SOLETANCHE BACHY**  
www.soletanche-bachy.cl

▶ **CASA COSTANERA, VITACURA.**  
EXCAVACIÓN LLAVE EN MANO A 23M DE PROFUNDIDAD CON MUROS "SBC" DEFINITIVOS.

**LA MÁS AMPLIA OFERTA GEOTÉCNICA PARA EL BENEFICIO DE SUS PROYECTOS**

- ▶ **TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS**
  - EXCAVACIÓN CON MÉTODO TRADICIONAL
  - EXCAVACIÓN MECANIZADA (TBM Y MTBM)
- ▶ **PERFORACIONES Y SONDAJES DE EXPLORACIÓN**
  - DIAMANTINA
  - AIRE REVERSO
  - SUBTERRÁNEO Y SUPERFICIE
- ▶ **FUNDACIONES ESPECIALES Y TRABAJOS GEOTÉCNICOS**
- ▶ **MEJORAMIENTO DE SUELOS E IMPERMEABILIZACIÓN DE SUELOS**
- ▶ **ASESORÍA E INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

Get more  
daylight  
Get more  
comfort  
Use less  
energy

# Una nueva generación

## Es más fresco si estás a la sombra



### Ventilación y control de calor

La nueva generación de ventanas de techo VELUX establece un nuevo estándar para el control de la ventilación y la sombra.

Utilice la barra para ventilar cuando la ventana está cerrada y con las persianas internas y externas VELUX disfrute de esos lugares de sombra en su hogar.

Es la nueva generación. Y estará disponible en VELUX a partir de Agosto 2014.

[www.velux.cl](http://www.velux.cl)



*Brindando luz a su vida*

**VELUX®**