

EDIFICIOS EMBLEMÁTICOS DIAGNÓSTICO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL

■ Los parámetros más utilizados para conocer el estado real de una estructura corresponden al período de vibrar, razones de amortiguamiento, y formas modales u operacionales. Estas variables se analizan en tres edificios emblemáticos: Cámara Chilena de la Construcción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y Titanium La Portada.

RUBÉN BOROSCHEK K.
TOMÁS NÚÑEZ A.
RODRIGO CARREÑO V.
ALFONSO LARRAÍN V.
INGENIEROS CIVILES ESTRUCTURALES

EL CONCEPTO de salud se asocia a un estado de bienestar físico, mental y social, según la definición de la OMS. Sin embargo, esta definición también se aplica a las estructuras a través de un concepto denominado "Monitoreo de Salud Estructural (MSE)", que corresponde a un campo reciente dentro de la dinámica estructural-experimental. Entre los objetivos de esta materia destaca la generación de un diagnóstico del estado y característica de la respuesta de una estructura, ante diversas condiciones de acciones ambientales y de uso por medio de sistemas de medición y observación. Así, los profesionales controlan la "salud" de las estructuras por medio de ciertas propiedades, generalmente de tipo dinámica, con las que se conoce el estado actual de la construcción y su correlación con modelos matemáticos, los que se utilizan para rea-

lizar el diseño estructural (Figura 1).

Los parámetros más utilizados por el MSE corresponden al período de vibrar, razones de amortiguamiento y formas modales u operacionales. Estos tres parámetros engloban la dinámica del sistema y entregan un diagnóstico general de su comportamiento, dependiendo de la aplicación. En casos especiales, cuando se requiere la cuantificación y localización de daño, se requiere evaluar variables adicionales. El MSE ya se encuentra implementado en Chile a través de un sistema inteligente que obtiene sus parámetros de forma continua y remota, accediendo a esta información en tiempo real a través de celulares y/o Internet (Figura 2). Estos parámetros representan un indicador relevante a la hora de alertar sobre la condición de infraestructura luego de agentes externos tales como el reciente Terremoto de magnitud 8,8 que afectó a la zona centro-sur de Chile.



FIGURA 1.
DIAGRAMA
MONITOREO DE SALUD
ESTRUCTURAL

PARÁMETROS DINÁMICOS

La determinación de este tipo de parámetros se basa principalmente en la utilización de la información entregada por sensores capaces de medir aceleraciones, velocidades y desplazamientos en un amplio rango, desde aquellas que son imperceptibles al ser humano, pasando por vibraciones debido al uso u operación, hasta terremotos de gran magnitud. Definir los "parámetros dinámicos" corresponde a la primera etapa del MSE. Sin embargo, estudiar su variación resulta igualmente importante al momento de determinar si la estructura ha sufrido modificaciones o daño, tanto en sus líneas resistentes como en elementos no estructurales. Así como existen metodologías para determinar dichos parámetros, hay también métodos para monitorear su variación, y correlacionarlas con el daño potencial. A continuación, se entrega una definición básica de los parámetros dinámicos más importantes del MSE:

Período de vibrar: Corresponde al tiempo en que la estructura demora en oscilar de un lado a otro, para una cierta forma de vibrar. En general las estructuras poseen más de una forma de vibrar, por lo que se mide para cada una de ellas un período asociado. Al valor inverso del período se le denomina frecuencia.

Amortiguamiento: Las estructuras están sujetas a recibir solicitaciones de todo tipo. Estas solicitaciones pueden traducirse en que la estructura está constantemente recibiendo energía. El amortiguamiento corresponde a la capacidad de la estructura para disipar esta energía. Se mide como porcentaje respecto de un parámetro denominado amortiguamiento crítico.

Formas modales: Son las formas en que se mueve una estructura cuando es sometida a vibraciones en uno de sus períodos naturales de vibrar.

FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO PARA SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO-REMOTO



FIGURA 3. EDIFICIO CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. VISTAS Y DISPOSICIÓN DE ACELERÓMETROS



Adicionalmente es posible evaluar en forma directa las amplitudes de vibraciones en términos de velocidad, aceleración, desplazamiento, deformaciones unitarias y otras.

CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN

El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (Figura 3), posee una estructuración en base a muros y marcos de hormigón. Cuenta con 20 pisos y 4 subterráneos, y una altura de 85,5 metros. Desde 1997 tiene una red de 12 sensores que registran aceleraciones en la

estructura. El sistema de obtención de datos permite registrar desde micro-vibraciones ambientales a eventos sísmicos de consideración.

El MSE registró el Terremoto de magnitud 8,8 que afectó recientemente la zona centro sur de Chile (Figura 4) entregando importantes resultados respecto a la variación de las propiedades dinámicas del edificio. La Figura 5 muestra la variación de la frecuencia natural, el amortiguamiento durante el evento. Se observa que hubo una variación del 27% en la frecuencia de vibrar, y un aumento del amortiguamiento que alcanzó valores puntuales por sobre el 9%. Para corroborar el estado post-terremoto del Edificio de la CChC se realizaron análisis de micro-vibraciones en la estructura utilizando la red de monitoreo de salud estructural, y los resultados permitieron comparar sus valores característicos antes y después del terremoto, Tabla 1.

Los resultados arrojaron que la estructura no recuperó los valores de período calculados antes del terremoto, con una diferencia promedio del 22%. Por otra parte, el amortiguamiento en términos prácticos recuperó sus valores originales, teniendo una buena corre-

TABLA 1. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS PRE Y POST TERREMOTO UTILIZANDO MICROVIBRACIONES AMBIENTALES. EDIFICIO CCHC

(A) VARIACIÓN DE FRECUENCIAS				(B) VARIACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO			
MODO	PERÍODO T (s) PRE-TERREMOTO	PERÍODO T (s) POST-TERREMOTO	DIFERENCIA %	MODO	β (%) PRE-TERREMOTO	β (%) POST-TERREMOTO	DIFERENCIA %
1	0,99	1,19	20,24	1	0,6	0,6	0
2	0,97	1,16	19,77	2	0,7	0,6	14,3
3	0,65	0,82	26,23	3	0,6	0,8	33,3
VARIACIÓN PROMEDIO %			22,08	VARIACIÓN PROMEDIO %			15,9

FIGURA 4. REGISTROS TERREMOTO (M=8,8) OBTENIDOS EN CIELO PISO 18. EDIFICIO CCHC

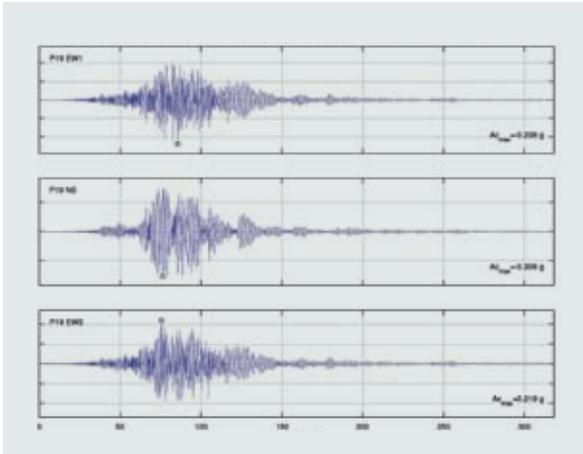
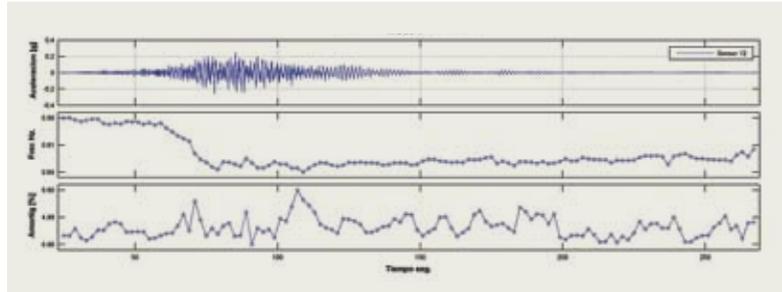


FIGURA 5. VARIACIÓN PARÁMETROS DINÁMICOS. TERREMOTO (M=8,8) DEL 27 DE FEBRERO DE 2010. EDIFICIO CCHC



lación entre la variación del período y amortiguamiento, con el daño observado.

Una inspección visual arroja que el edificio presenta daño leve en sus elementos resistentes y no estructurales, por lo tanto existe una buena correlación entre el porcentaje de variación de los parámetros dinámicos y lo observado. En este sentido, se está investigando el rango en el cual estos parámetros pueden variar, para correlacionarlos con un grado mayor de daño en la estructura. Así, se entregará información temprana y de forma remota sobre el estado de la estructura luego de un terremoto.

TORRE CENTRAL FCFM UNIVERSIDAD DE CHILE

La Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Figura 6) posee una estructuración de muros de hormigón para la resistencia a cargas laterales. Cuenta con 9 pisos y 1 subterráneo con una altura de 30 metros. A diferencia del edificio de la CChC, la red de monitoreo de salud registra continuamente la aceleración (8 sensores), la humedad del suelo (3 sensores) y parámetros ambientales (humedad, lluvia y viento, entre otros). Éstos se publican de forma remota a través de Internet. Además, las señales de aceleración son procesadas y se informa al usuario sobre los parámetros dinámicos de la estructura y parámetros ambientales cada 15 minutos. Actualmente se está investigando una forma de reducir los tiempos de entrega en la información, con el objeto de dar una alerta temprana y precisa en caso de daño severo.

Uno de los objetivos de este tipo de monitoreo es correlacionar variables ambientales con la variación de propiedades dinámicas asocia-

FIGURA 6. EDIFICIO TORRE CENTRAL FCFM UNIVERSIDAD DE CHILE. VISTAS Y DISPOSICIÓN DE ACCELERÓMETROS. (T. YÁÑEZ 2009)

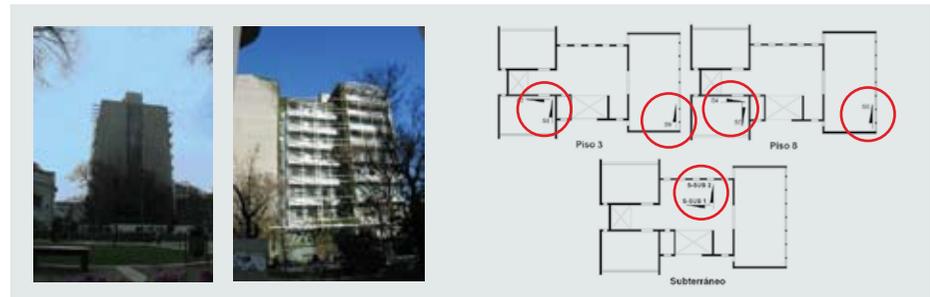


FIGURA 7. (a) VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA (PERÍODO) DE LA ESTRUCTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. (b) VARIACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO DE LA ESTRUCTURA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

ESTAS MUESTRAS FUERON TOMADAS ENTRE EL 03 DE JULIO DE 2009 Y EL 26 DE FEBRERO DE 2010

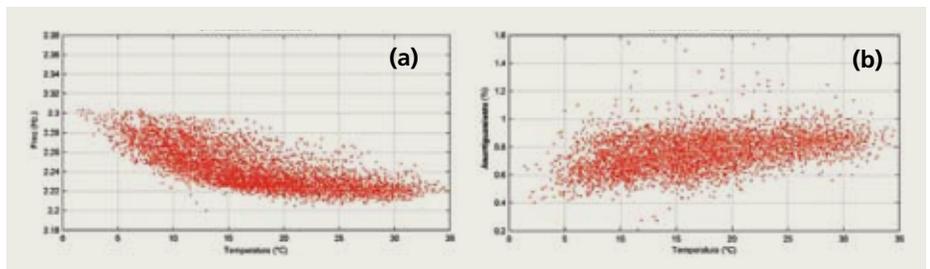
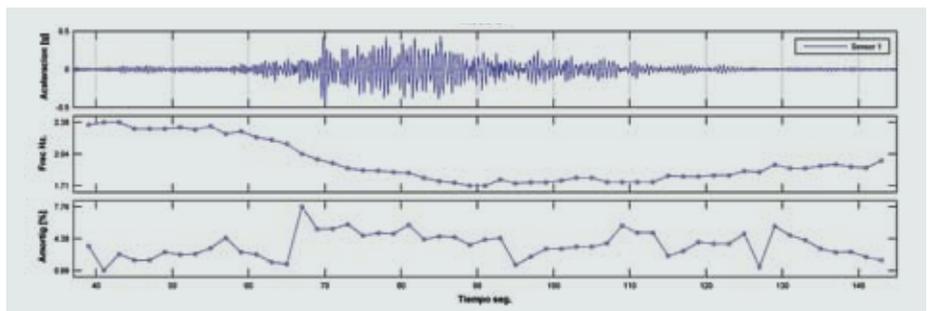


FIGURA 8. VARIACIÓN PARÁMETROS DINÁMICOS. TERREMOTO (M=8,8) DEL 27 DE FEBRERO DE 2010. TORRE CENTRAL



das a la estructura. Por ejemplo, si existe alguna dependencia entre la variación de frecuencias (o períodos) y los cambios de temperatura, o bien si existe relación entre la variación de amortiguamiento y el nivel de precipitaciones, o bien si la humedad del suelo influye significativamente en variaciones de frecuencia, amortiguamiento o formas modales. Un ejemplo de estas correlaciones se muestra en la Figura 7, donde se correlaciona frecuencia, Figura 7(a), y amortiguamiento, Figura 7(b), con la temperatura ambiente, respectivamente.

El reciente terremoto entregó información adicional, que es parte de lo que engloba una herramienta tan amplia como el MSE. El mismo análisis del edificio CChC se aplicó en la Torre Central, observándose un patrón de variación con similares características. La Figura 8 muestra la variación de frecuencia y amortiguamiento durante el terremoto, mientras que la Tabla 2 muestra la variación antes y después del terremoto para los parámetros dinámicos de la estructura.

Este edificio tuvo un comportamiento similar al de la CChC, observándose una fuerte disminución de la frecuencia durante el sis-

TABLA 2. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS PRE Y POST TERREMOTO UTILIZANDO MICROVIBRACIONES. TORRE CENTRAL FCFM. UNIVERSIDAD DE CHILE

(A) VARIACIÓN DE FRECUENCIAS				(B) VARIACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO			
MODO	PERIODO T (s) PRE- TERREMOTO	PERIODO T (s) POST- TERREMOTO	DIFERENCIA %	MODO	β (%) PRE- TERREMOTO	β (%) POST- TERREMOTO	DIFERENCIA %
1	0,45	0,53	18,62	1	0,7	0,7	0
2	0,38	0,44	13,97	2	0,7	0,7	0
3	0,34	0,37	10,86	3	0,7	0,8	14,3
VARIACIÓN PROMEDIO %			14,48	VARIACIÓN PROMEDIO %			4,8

mo, y un aumento del amortiguamiento, para el modo que se muestra en la Figura 8. Luego del terremoto se observó que la estructura disminuyó sus frecuencias naturales de forma permanente en un 14,5% como promedio. Por otra parte, se observó que el amortiguamiento mantuvo valores similares a los obtenidos antes del evento, correlacionado de manera aceptable con el nivel de daño observado en el edificio.

TITANIUM

El rascacielos más grande de Chile tiene 56 pisos, 2 helipuertos, 7 subterráneos, 196 me-

tros de altura y 129.500 metros cuadrados. Se encuentra estructurado en base a un núcleo central de muros de corte, columnas y vigas perimetrales de hormigón armado, y losetas alveolares de hormigón pretensado prefabricado (Figura 9).

La torre fue monitoreada por 6 meses, entre agosto de 2008 y enero de 2009, durante su proceso constructivo mediante la instalación de una red de acelerómetros. Se obtuvieron vibraciones de tipo ambiental y operacional debido a las faenas constructivas (Figura 10). De forma complementaria se realizaron mediciones de vibración ambiental en

UN EQUIPO HUMANO EN CONSTANTE INNOVACIÓN COMPROMETIDO CON EL SERVICIO A SUS CLIENTES



- SISTEMA ALISPLY DE MOLDAJE PARA MURO RECTO Y CIRCULAR
- SISTEMA DE TREPAS T160 Y T240
- SISTEMAS DE SEGURIDAD EN OBRA - ALSIPERCHA

Alsina
SOLUCIONES EN MOLDAJES

Moldajes Alsina Ltda.
Nueva Taqueral, 369 - Lampa - Fono: 745 2003
E-mail: moldajes@alsina.com - Web: www.alsina.com



los niveles 10, 17, 22, 28 y 56, esta última realizada en enero 2010. Los resultados se utilizaron para la obtención de propiedades dinámicas y sus variaciones permanentes debido al proceso constructivo, además como referente para la actualización de modelos de diseño estructural en diferentes etapas constructivas. Si bien el enfoque de este monitoreo no estaba asociado a la obtención de registros sísmicos, la red detectó al menos 11 movimientos telúricos de mediana magnitud anteriores al terremoto del 27 de febrero de 2010, no reportándose daños a causa de éstos.

Durante el monitoreo continuo del edificio en el proceso constructivo, se observaron diversos fenómenos que requirieron de procesamiento para la obtención de parámetros dinámicos. Éstos se asocian a la gran cantidad de faenas constructivas desarrolladas durante el monitoreo. Esto generó diversos efectos transientes debido a impactos, variación continua de masa y rigidez del sistema, vibraciones operacionales debido a maquinarias tales como montacargas, grúas, bombas de hormigón y otras. Los fenómenos no afectaron el proceso de identificación de la variación de frecuencias naturales de la estructura. Sin embargo, la variación de razones de amortiguamiento depende fuertemente de la amplitud y características de la excitación. La Figura 11 muestra la variación de frecuencias durante el período de monitoreo continuo.

Actualmente se está investigando sobre la comparación de valores de parámetros dinámicos antes y después del terremoto del 27 de febrero de 2010, como forma de correlacionar estos resultados con el buen comportamiento que tuvo el edificio frente a esta solicitación extrema. Pequeñas variaciones en los parámetros dinámicos darán una clara señal de que la estructura tuvo un buen comportamiento, principalmente por la calidad de su estructuración, complementada con el uso de dispositivos de disipación de energía. De esta forma será posible validar los criterios supuestos para el edificio, lo que será de vital importancia para comprender mejor el desempeño de la estructura.

CONCLUSIONES

El Monitoreo de Salud Estructural cuenta con múltiples aplicaciones que permiten entender de mejor forma el comportamiento de las estructuras: calibrar modelos de diseño, identificación de daño, alerta por mal funcionamiento de ascensores, monitoreo de procesos constructivos (como el desarrollo de una red de monitoreo de salud estructural para Titanium

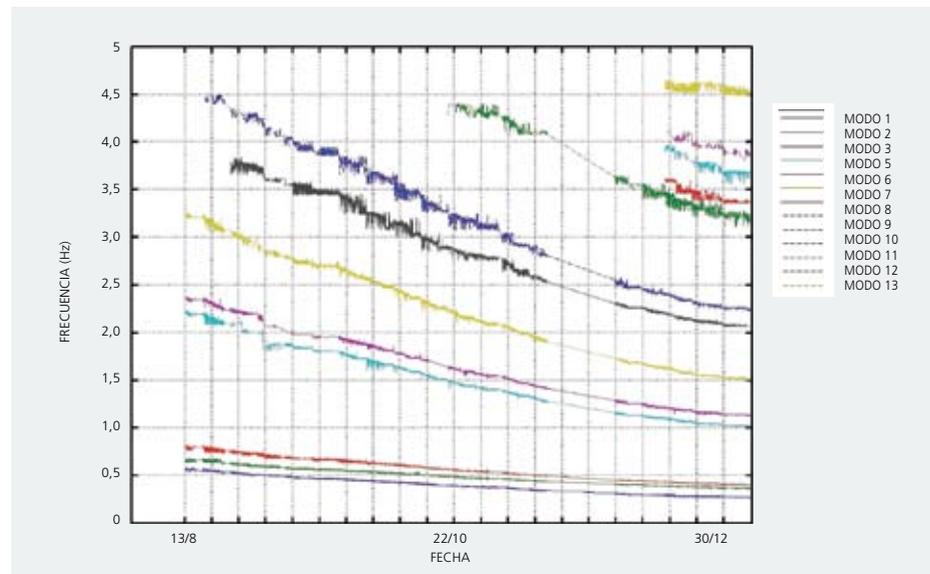
FIGURA 9. TITANIUM LA PORTADA. PROCESO CONSTRUCTIVO. TOMÁS NÚÑEZ A.



FIGURA 10. SECUENCIA CONSTRUCTIVA TITANIUM LA PORTADA. TOMÁS NÚÑEZ A.



FIGURA 11. VARIACIÓN DE FRECUENCIAS (PERÍODO) DURANTE PROCESO CONSTRUCTIVO. TITANIUM LA PORTADA



La Portada, que permitió validar modelos de diseño y a la vez observar la variación de parámetros dinámicos), estudio de respuesta frente a impactos (estadios, aeropuertos, puentes), evaluación de confort en personas (gimnasios, minería), y evaluación de fatiga frente a cargas de operación, entre otras.

El desarrollo de estas tecnologías permitirá en un futuro próximo tener estructuras más inteligentes al servicio no sólo de los usuarios, sino que también de ingenieros estructurales, arquitectos y constructores, los que

tendrán una idea del comportamiento real de todo tipo de infraestructura de forma precisa, continua y en tiempo real, siguiendo las necesidades de información actual. ■

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por Fondecyt N 1070319, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y Rubén Boroschek y Asociados Ltda. Se agradece el apoyo del Ing. Pedro Soto de la Universidad de Chile, la Cámara Chilena de la Construcción, Arq. Abraham Senerman, Ing. Víctor García y al Ing. René Lagos por el apoyo a este tipo de estudios y por su positiva visión de la innovación.

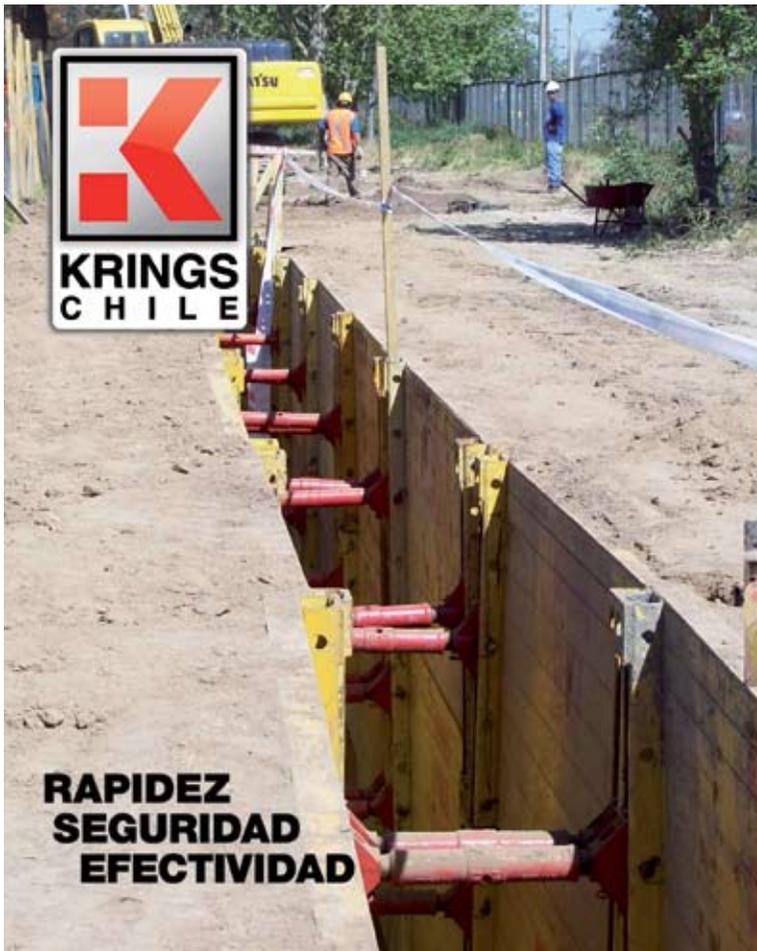


SERVICIO DESDE 100 PRE

Desde hace **100 años** en todo el mundo, y 68 años en Chile, hemos ayudado a **construir** la historia. Esa es nuestra mejor garantía de **calidad y compromiso**.

www.sika.cl

Innovation & Consistency | since 1910



Solución Integral en Entibaciones Metálicas

- Sistemas de cajones KS-100
- Sistemas con guías deslizantes:
 - Sistema corredera (4-6 Metros)
 - Sistema paralelo (5-8 Metros)
- Sistema esquinero para pozos, cámaras y plantas elevadoras



Casa Matriz

Av. Americo Vespucio Sur 80 Of. 32 - Las Condes
Fono: (56-2) 241 3000

Guillermo Schrebler
gschrebler@krings.cl

WWW.KRINGS.CL



Paneles reforzados Hebel para revestimiento industrial.

HORMIGÓN CELULAR DE CALIDAD PROBADA

Un excelente comportamiento ante movimientos sísmicos demostró tener el hormigón celular Hebel, calidad que fue probada tras el terremoto por las distintas obras construidas con este material que no sufrieron daños. Pero esta marca no conforme con ello continúa innovando y lanzó tres nuevos productos al mercado, los que fueron presentados en Edifica 2010.



Stand Hebel en Edifica 2010.

EL TERREMOTO del pasado 27 de febrero puso a prueba los sistemas constructivos en Chile, y el hormigón celular Hebel demostró haber pasado con éxito este duro examen al sumar a su diversos atributos, como durabilidad, gran aislación térmica y acústica, resistencia al fuego y a la humedad, un excelente comportamiento ante movimientos sísmicos.

La resistencia sísmica del sistema constructivo Hebel, utilizado a lo largo de todo el país en un sin número de obras, fue reconocida por diversos profesionales del mundo de la construcción, dentro del marco de una inspección realizada recientemente para corroborar el buen resultado del hormigón celular Hebel. Importantes obras consultadas en las zonas más afectadas en el sur y centro de nuestro país, concluyeron que el hormigón celular tuvo muy buen comportamiento post terremoto, argumentando que la correcta aplicación del producto es fundamental para el óptimo resultado del sistema constructivo.

Obras con uso de hormigón celular en

muros estructurales como "Lomas de Mirasur", conjunto residencial construido por Socovesa en Temuco, Conjunto residencial Santa Delia construido por Moller y Pérez Cotapos en La Comuna de La Florida, Conjuntos habitacionales de la Constructora Salman de Chillán. Edificios residenciales de Eurocorp, Edificio Las Tranqueras de la Constructora ISA, con tabiquería en hormigón celular. Obras institucionales como el Campus Bellavista de la Universidad San Sebastián construido por la Constructora Cypco, El Centro Cívico Las Condes construido por Besalco, Hospitales Higuera I y II de Talcahuano construido por Salfa Corp, Clínica Indisa, Hospital Gran Benavente de Concepción, entre otros. Edificaciones con tabiquería de gran altura y soluciones acústicas, como el caso de la emblemática obra Centro Cultural Gabriela Mistral, construido por Claro Vicuña, no sufrieron daños con el terremoto, siendo una prueba evidente de la excelencia del hormigón celular Hebel.

NUEVOS PRODUCTOS

Con el respaldo de estos buenos resultados Hebel sigue innovando y lanzó tres nuevos productos al mercado. Se trata de los Paneles Reforzados para revestimiento industrial, que se presentan como un revestimiento macizo de hormigón celular reforzado, de gran rapidez de instalación y gran versatilidad. A ello se suman los Paneles Prefabricados

para viviendas industrializadas, sistema basado en paneles reforzados con estructuras prefabricadas en acero y hormigón que permite levantar en pocos días viviendas definitivas, por dos o tres personas y sin necesidad de maquinaria especializada, el producto ofrece gran libertad arquitectónica y construcciones macizas. También se lanzaron los Bloques RH para zonas de lluvia extrema, especialmente diseñados para construir en la zona sur de nuestro país o lugares de mucha lluvia. Estos tres productos otorgan aislación térmica y resistencia al fuego.

Los nuevos productos Hebel fueron presentados en Edifica 2010 con gran éxito. El stand de la marca, al igual que en años anteriores, recibió un gran número de visitas interesadas en conocer más de los atributos y aplicaciones del hormigón celular.

INVERSIONISTAS NACIONALES

A partir de este año 2010, en nuestro país, el hormigón celular Hebel, es producido por la empresa HCA Chile S.A., luego de que la empresa Xella Chile S.A. le traspasara su unidad productiva. La empresa HCA está orgullosa de esta adquisición al poder representar y producir en Chile el hormigón celular con la mundialmente reconocida marca Hebel, contando con el apoyo técnico de Alemania, como ha sido siempre, asegurando el estándar de calidad internacional y de soporte de la marca que es traspasada directamente a sus clientes.

1ª CASA DE LA RECONSTRUCCIÓN



TECNO PANEL

STRUCTURAL INSULATED PANEL

VIVIENDA CONSTRUIDA CON SISTEMA
CONSTRUCTIVO TECNO PANEL SIP



CONTÁCTENOS AL
745 5940
www.tecnopanel.cl

CONSTRUCTORA



DISEÑO



GESTIÓN



CALIDAD CERTIFICADA POR

