

EL FUTURO DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE DE LAS EDIFICACIONES DE CONCRETO REFORZADO: UNA VISIÓN BASADA EN LA SUSTENTABILIDAD

Amador Terán Gilmore¹

RESUMEN

Debido a la contribución que la producción de concreto tiene a la inestabilidad global del planeta, la industria del concreto está sujeta a un fuerte escrutinio por parte de la sociedad civil. Lo anterior implica que los profesionistas ligados a esta industria necesitan crear un medio profesional en que la labor diaria del diseñador resuelva adecuadamente los problemas ingenieriles implicados en el diseño de las edificaciones de concreto, y a la vez transmita preocupación por el medio ambiente. Este artículo discute, desde el punto de vista de los diseñadores estructurales, algunas de las medidas que pueden tomarse en México para contribuir a la consolidación de una industria nacional de la construcción capaz de competir exitosamente en un mundo globalizado, y que pueda contribuir de manera importante al desarrollo sustentable del planeta.

Palabras clave: Estructura tolerante a daño, fusible estructural, prefabricados, concretos ecológicos, reciclado estructural, aislamiento térmico.

ABSTRACT

Due to the contribution that the production of concrete has on the global instability of the planet, the concrete industry is subject of a severe scrutiny from civil society. This implies that professionals linked to this industry need to create a professional environment in which the daily work of the designer solves the engineering problems involved in the design of concrete buildings, and at the same time conveys concern for the environment. This article discusses, from a structural designer's point of view, some measures that can be taken in Mexico in order to contribute to the consolidation of a national building industry capable of successfully competing in a globalized world, and that is capable of significantly contributing to the sustainable development of the planet.

Keywords: Damage tolerant structure, structural fuse, precast, green concrete, structural recycling, thermal insulation.

RESUMO

Devido à contribuição que a produção de concreto tem em relação à instabilidade global do planeta, a indústria do concreto estará sujeita a um forte escrutínio por parte da sociedade civil. O anterior implica que os profissionais ligados a esta indústria precisarão criar um meio profissional em que o labor diário do desenhista resolva adequadamente os problemas de engenharia implicados no desenho das edificações de concreto e, ao mesmo tempo transmita preocupação pelo meio ambiente. Este artigo discute desde o ponto de vista dos desenhistas estruturais, algumas das medidas que podem ser tomadas no México a fim de contribuir para a consolidação de uma indústria nacional de construção que seja capaz de competir com êxito num mundo globalizado e possa contribuir de maneira importante ao desenvolvimento sustentável do planeta.

Palavras chaves: Estrutura tolerante a dano, fusível estrutural, pré-fabricados, concretos ecológicos, reciclado estrutural, isolamento térmico.

INTRODUCCIÓN

El diseño de las estructuras de concreto cambiará significativamente en los próximos años. Una de las razones para ello es la percepción dentro de las sociedades civiles de que en cuestiones ambientales, el destino nos ha alcanzado. La Fig. 1, presenta las predicciones hechas por un panel intergubernamental patrocinado por la Organización de las Naciones Unidas

¹ Universidad Autónoma Metropolitana; Departamento de Materiales.

en términos de tres escenarios de progresión del calentamiento global. Así, predicciones como aquella que visualiza un planeta tierra con un océano Ártico totalmente navegable para mediados de la década de los 2020s han concientizado a amplios sectores de la población en cuanto a la urgencia de tomar medidas que contrarresten el calentamiento global.

Aunque recientemente el calentamiento global ha recibido mucha atención, actualmente existen muchos otros retos en términos de sustentabilidad, tal como la conservación de los recursos naturales del planeta; la prevención de una contaminación excesiva del medio ambiente, así como el manejo de una cantidad excesiva de materiales tóxicos y de desecho. No es de sorprender que desde todos los ámbitos del quehacer humano se promuevan acciones para proteger al medio ambiente, que van desde la fabricación de automóviles eléctricos hasta la distribución de bolsas ecológicas de supermercado.

Después del agua, el concreto es el material más usado del planeta. Se estima que cada año se fabrica un metro cúbico de concreto por cada una de los siete billones de personas que lo habitan (en este artículo se usa el concepto estadounidense de un billón; un billón representa mil millones). La industria de construcción debe tener plena conciencia que el cemento es la fuente de gases invernadero que exhibe una mayor tasa de crecimiento; debido a ello, ya es la tercera fuente generadora de dióxido de carbono (más de dos billones de toneladas al año, lo que representa del 5 al 7% del total mundial).

En términos de su contribución al agotamiento de los recursos naturales, es importante resaltar que la industria de la construcción utiliza regionalmente del 25 al 50% de los recursos naturales vírgenes que anualmente consume la humanidad. Además, dicha industria contribuye con porcentajes similares en términos del material de desecho generado anualmente por el ser humano. Lo anterior ha resultado a nivel internacional en el agotamiento y degradación de importantes bancos de materiales, y ha contribuido de manera definitiva en la crisis relacionada con la administración, almacenado y procesado de materiales de desecho (un claro reflejo de ambas situaciones puede encontrarse en el Distrito Federal de México).

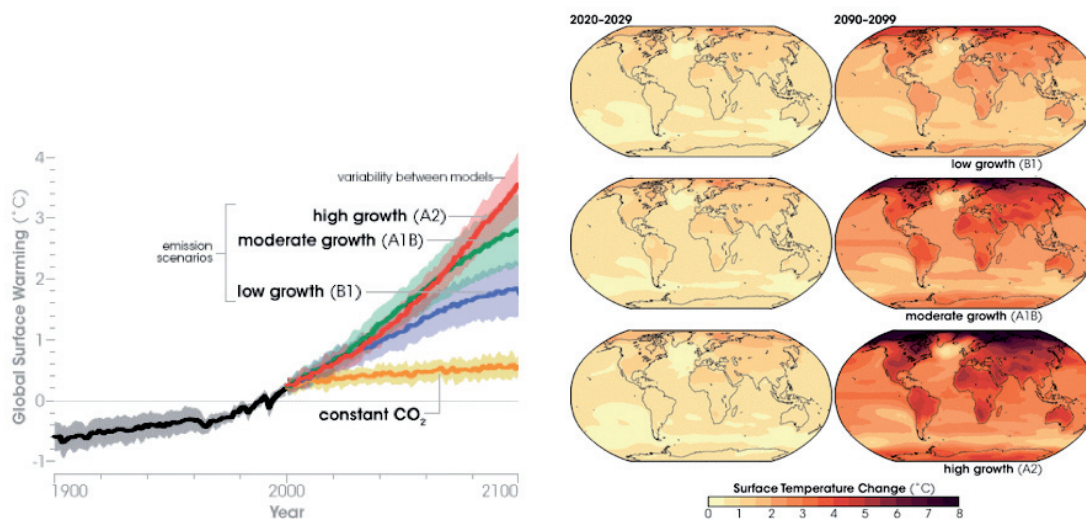


Fig. 1. Escenarios de calentamiento global planteados por un panel intergubernamental patrocinado por la Organización de las Naciones Unidas.

Si se considera que un desarrollo sustentable se define como aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas, las grandes repercusiones ambientales que tiene la industria mundial del concreto obligan a replantear su curso actual. No es sorpresivo que varias de las empresas fabricantes de cemento ubicadas en diferentes partes del mundo hayan invertido durante la última década esfuerzos importantes de investigación y desarrollo que denotan un compromiso creciente hacia la noción de sustentabilidad. Lo anterior no sólo ha sido motivado por un sentido creciente de responsabilidad social, sino además por el hecho de que aquellas innovaciones benéficas para el medio ambiente normalmente ofrecen múltiples ventajas competitivas dentro de un ámbito comercial.

Expertos estiman que la manera más económica de disminuir la tasa de crecimiento del calentamiento global es a través de la construcción de edificios verdes, y la rehabilitación verde de los edificios existentes (Biello 2008). En términos del agotamiento de los recursos naturales y de la crisis de manejo de desechos, otros expertos plantean la urgencia de reducir significativamente la cantidad de recursos naturales que la industria de la construcción toma cada año de la naturaleza, así como de reciclar un porcentaje importante de los materiales de desecho que genera (Oikonomou 2005; Martínez y Mendoza 2006). Un mundo que pide urgentemente por una innovación en las prácticas del diseño y construcción de las estructuras de concreto, es un mundo que establecerá acciones que estimulen las prácticas ecológicas, y que desanimen el desperdicio de recursos naturales. En cuanto a estímulos, pueden mencionarse las hipotecas verdes, que recompensan el uso de tecnologías verdes en la vivienda. En términos de sanciones, deben tenerse en mente los impuestos que algunos países han planteado al uso industrial de energía y a las emisiones de gases invernadero; por ejemplo, el Impuesto al Cambio Climático del Reino Unido. Puede concluirse que el desarrollo sustentable de la industria del concreto no enfrenta la protección del medio ambiente con el éxito comercial de sus empresas, sino que, dentro del contexto en que la sociedad civil seguirá cercanamente a aquellas industrias que usan de manera intensiva los recursos naturales del planeta, dicho desarrollo representa una cuestión de supervivencia, oportunidad y crecimiento.

No deja de ser interesante citar algunos comentarios hechos por expertos durante conferencias magistrales que discutieron, durante diferentes congresos nacionales de ingeniería estructural, las tendencias del diseño y construcción de las estructuras de concreto. En primer lugar, Alcocer (1998) menciona: “La protección del ambiente será, sin duda, una de las cuestiones más apremiantes y difíciles para el futuro de una población que crece continuamente”. En segundo lugar y en apoyo a lo anterior, Helene (2008) comenta: “La historia reciente ha demostrado que aún vale la pena investigar, proyectar, dosificar y construir, buscando siempre obtener más provecho de ese versátil material de construcción, explorando su elevado desempeño y usándolo correctamente desde el punto de vista de la protección ambiental y de sustentabilidad”. Cabe decir que dentro del contexto planteado hasta ahora, surge la inquietud acerca del papel que deberán jugar los profesionales de las diferentes disciplinas allegadas a la industria del concreto. En términos generales, puede decirse que todas las disciplinas deben contribuir a:

A) Crear un medio profesional en que la labor diaria del diseñador de estructuras de concreto reforzado resuelva adecuadamente los problemas ingenieriles que enfrenta, y a la vez transmita a través de acciones concretas, preocupación por el medio ambiente.

B) Preparar una generación de ingenieros capaces de diseñar estructuras de concreto reforzado más económicas y seguras, y que incorporen nuevas tecnologías que permitan ahorro de energía y cuiden el medio ambiente.

Este artículo plantea las bases sobre las cuales puede contribuir el diseñador estructural a un crecimiento sano y sostenido de la industria mexicana del concreto. Para ello, se discute un nuevo enfoque de diseño sismorresistente que, complementado con el conocimiento que actualmente se posee en México en cuanto al diseño y construcción de edificaciones prefabricadas, hace posible el diseño y construcción de edificaciones más ligeras que las actuales y que exhiben mayores niveles de confiabilidad estructural. Mientras que su menor peso haría posible un ahorro inmediato e importante de recursos naturales, sus mayores niveles de seguridad estructural representan la posibilidad de proyectar dichos ahorros hacia el mediano y largo plazo. Además, se discuten algunos desarrollos alrededor de concretos reciclados y de alta tecnología, que al complementar el esquema anterior en términos de durabilidad y ecología, potencian el alcance del concepto planteado inicialmente hasta permitirle plantearse como un enfoque de diseño sismorresistente sustentable.

ENFOQUES INNOVADORES PARA LA SISMORRESISTENCIA

El desempeño sísmico insatisfactorio de algunas estructuras diseñadas conforme a reglamentos modernos ha preocupado al medio de la ingeniería estructural. Esto ha cobrado importancia a partir de las grandes pérdidas materiales y económicas consecuencia de eventos sísmicos recientes (México 1985; Loma Prieta 1989; Northridge 1994; Kobe 1995; Chile 2010). Las pérdidas excesivas han remarcado la necesidad de desarrollar metodologías innovadoras de diseño que permitan un mejor control del daño que sufren las edificaciones que se construyen en las zonas de alta sismicidad. En notable contraste con el pasado, el desempeño de las edificaciones modernas debe trascender la prevención de fallas estructurales catastróficas durante sismos severos. Cada edificio que se construye en la actualidad debe satisfacer múltiples y complejas necesidades socioeconómicas, lo que implica que el daño en sus elementos estructurales y no estructurales, así como en sus contenidos, también deben ser cuidadosamente y explícitamente controlados (Terán 2002). Por cierto, el uso eficiente de recursos naturales no renovables implica que las estructuras que se diseñan hoy en día deben ser capaces de controlar su daño con niveles de eficiencia sin precedente, y exhibir vidas útiles mucho mayores que las actualmente contempladas.

DISEÑO BASADO EN EL CONTROL DEL DESPLAZAMIENTO

Después de analizar las razones por las cuales varios eventos sísmicos recientes han resultado en pérdidas excesivas, la comunidad internacional de ingeniería sísmica ha concluido que el nivel de daño estructural y no estructural, así como en los contenidos, es consecuencia de los niveles excesivos de movimiento que una estructura exhibe durante una excitación sísmica. La innovación en ingeniería sísmica puede entenderse a partir del planteamiento de sistemas estructurales, ya sea tradicionales o innovadores, que puedan controlar el nivel de daño en los diferentes sub-sistemas de las edificaciones a través de controlar adecuadamente su respuesta dinámica durante excitaciones sísmicas de diferente intensidad (Terán 2002). Esto se ilustra por medio de la Fig. 2, para un muro de mampostería estudiado experimentalmente por Flores *et. al.* (1999). Tanto la extensión como el ancho de las grietas en el muro se incrementan de manera importante conforme la deformación lateral del muro aumenta (en la figura, DI indica distorsión de entrepiso, definida como el desplazamiento lateral en el muro normalizada por la altura del mismo). Con base en lo mostrado, puede afirmarse que las propiedades estructurales que deben suministrarse a una estructura, independientemente del material estructural que se use, deben ser tales que controlen su respuesta dinámica dentro de umbrales que sean congruentes con el nivel de daño o desempeño deseado para sus elementos estructurales, elementos no estructurales y contenidos. El valor de la distorsión máxima de entrepiso depende del valor del desplazamiento de azotea en la estructura; esto es, a mayor desplazamiento de azotea, mayor distorsión, de tal manera que limitar la distorsión máxima implica limitar el desplazamiento de azotea.

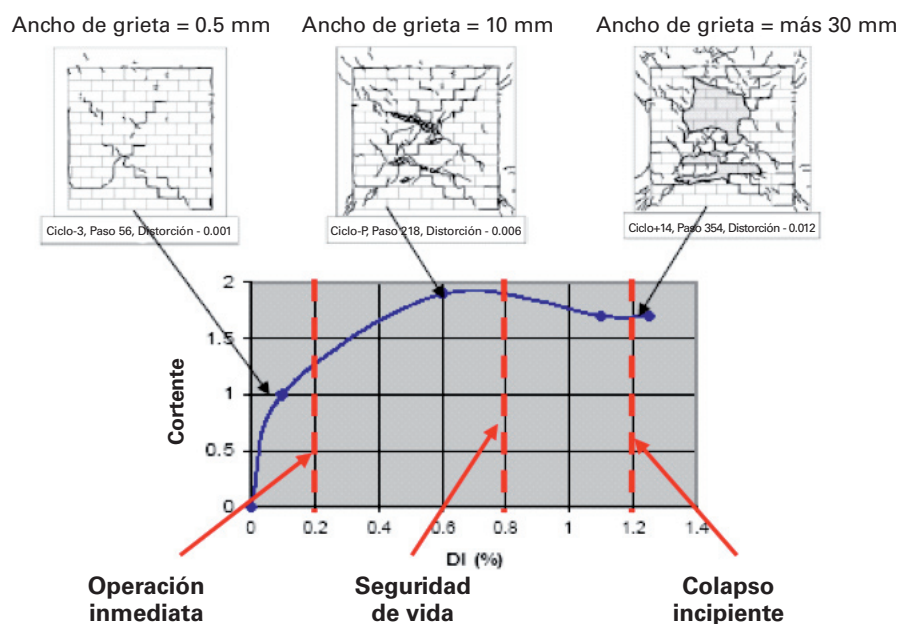


Fig. 2. Evolución del daño estructural en un muro de mampostería en función de su distorsión lateral. (Basado en Torres 2007).

ESTRUCTURAS TOLERANTES A DAÑO

Una forma de atender la problemática descrita en este artículo desde la perspectiva del diseñador estructural consiste en modernizar las metodologías de diseño sísmico, y desarrollar sistemas estructurales innovadores que sean más eficientes e impliquen mayores niveles de confiabilidad estructural. Al respecto, un enfoque prometedor es el de estructuras tolerantes a daño (Wada *et. al.* 2003). En ellas, el daño estructural inducido por sismo se concentra en dispositivos estructurales específicos, conocidos como elementos de sacrificio. Su función es actuar como fusibles estructurales que protegen al sistema gravitacional de la edificación, así como a sus elementos no estructurales y contenidos, contra daño excesivo. Debido a lo anterior, la reparación del sistema estructural se reduce a sustituir los fusibles dañados,

lo que resulta en ahorros importantes en términos de tiempo y costo de rehabilitación estructural, y alarga la vida útil de las estructuras.

En la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) se han llevado a cabo varios estudios alrededor de una concepción mexicana de estructuras tolerantes a daño. Terán (2008), propone la concepción de edificaciones cuyas cargas gravitacionales sean resistidas totalmente por medio de marcos momento-resistentes flexibles, y cuya sismorresistencia sea aportada por un sistema de contravientos restringidos contra pandeo, los cuales se constituyen como los elementos de sacrificio o fusibles estructurales de la edificación.

Un contraviento restringido contra pandeo es un elemento estructural que trabaja a compresión sin exhibir problemas de pandeo. Dado que los contravientos suelen trabajar de una manera estable a tensión, lo que se logra es un dispositivo capaz de disipar energía de manera estable en presencia de varias reversiones de carga. La Fig. 3 muestra esquemáticamente el concepto de contraviento restringido contra pandeo, e ilustra sus diferentes componentes:

- A) Un núcleo de acero que disipa energía a través de su extensión o contracción axial.
- B) Material confinante que restringe el pandeo del núcleo.
- C) Camisa de acero que mantiene la integridad del material confinante y aporta mayor restricción contra pandeo.

Bajo la acción de un sismo severo, se espera que sólo fluya el núcleo del contraviento. El núcleo de acero se desadhiere del mortero o concreto confinante; es decir, se minimiza cualquier contacto en la interface entre ambos materiales. Esto con el fin de evitar que la resistencia a compresión del contraviento sea significativamente mayor que su resistencia a tensión.

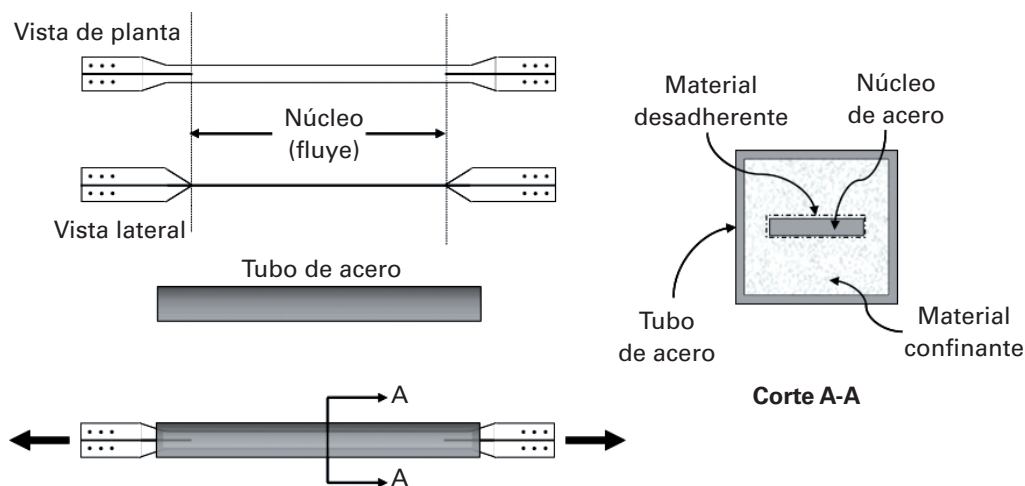


Fig. 3. Configuración esquemática de un contraviento restringido contra pandeo (Basado en Tremblay *et al.* 2006)

Una discusión más detallada del concepto y uso de contravientos restringidos contra pandeo puede encontrarse en Black *et al.* (2002); Uang y Nakashima (2003) y en Tremblay *et al.* (2006). Las pruebas experimentales llevadas a cabo en contravientos restringidos contra pandeo indican un comportamiento altamente estable ante deformaciones plásticas severas, tanto unidireccionales como cíclicas. En Japón se han desarrollado varios tipos de contravientos restringidos contra pandeo, y existen múltiples patentes (Watanabe *et al.* 1988; Uang y Nakashima 2003). De hecho, en ese país existen varias centenas de edificios cuyo sistema sismorresistente principal consiste en sistemas de contravientos restringidos contra pandeo. En Taiwán, Canadá y en los Estados Unidos de Norteamérica (EUA), también ha habido desarrollos experimentales de importancia y se han construido decenas de edificios que utilizan este tipo de dispositivo (Tremblay *et al.* 1999; Clark *et al.* 2000; López *et al.* 2002; Ko *et al.* 2002; Mahin *et al.* 2004; Chen *et al.* 2004).

El planteamiento de la UAM considera que durante la acción de una excitación sísmica leve una edificación debe satisfacer el estado límite de servicio; lo que implica que tanto el sistema gravitacional como el sistema de contravientos no exhiban daño estructural de importancia, y que el sistema no estructural quede totalmente sin daño. En cuanto al

desempeño deseado para una excitación sísmica severa, la estructura debe satisfacer el estado límite de Seguridad y ser fácilmente reparable. Mientras que el sistema destinado a soportar la carga gravitacional debe permanecer prácticamente sin daño de tal manera que haga posible que la estructura opere después del sismo; el sistema de contravientos debe desarrollar un comportamiento plástico de importancia que le permita controlar la respuesta dinámica de la edificación a través de la disipación estable de una elevada cantidad de energía.

La Fig. 4 esquematiza el funcionamiento de una estructura tolerante a daño concebida de acuerdo al planteamiento de la UAM (Terán 2008). Dado que tanto el sistema gravitacional como el sistema de contravientos aportan rigidez lateral a la edificación, es posible modelar esquemáticamente el comportamiento de estos dos sistemas a través de dos resortes en paralelo. Conforme a lo indicado, el sistema gravitacional debe ser flexible, de tal manera que pueda deformarse lateralmente sin elevar de manera sustancial su estado interno de esfuerzos, y por tanto, su nivel de daño estructural.

Por el contrario, el sistema de contravientos debe aportar una elevada rigidez lateral, de tal manera que incremente rápidamente su nivel interno de esfuerzos, y fluya a niveles relativamente bajos de desplazamiento lateral. A través de la disipación de energía que aportan en su rango plástico de comportamiento, los contravientos se constituyen una fuente estable de disipación de energía que hace posible el control de la respuesta dinámica de la edificación y por ende, el control del daño en los sistemas gravitacional y no estructural. Después de una excitación sísmica severa, el daño se traduce en deformaciones residuales debido a la fluencia de los contravientos. Dado que el sistema gravitacional debe permanecer prácticamente elástico, las deformaciones residuales debieran eliminarse una vez que se sustituyen los contravientos que fluyeron durante la excitación sísmica (la rehabilitación estructural de la edificación consiste exclusivamente en sustituir los contravientos dañados).

OBSERVACIONES

La aplicación del enfoque de la UAM, de estructura tolerante a daño al diseño de edificios de cinco y veinticuatro pisos dio lugar a sistemas estructurales ligeros que exhiben un desempeño sísmico adecuado (Terán 2008). Por un lado, la metodología UAM requiere que se diseñen marcos momento-resistentes con detallado estándar para tomar en exclusiva las cargas gravitacionales de la edificación. Mientras que el sistema gravitacional del edificio de cinco pisos quedó resuelto con marcos de concreto reforzado; el que corresponde al edificio de veinticuatro pisos consistió en marcos de acero. Como es de suponerse, el peso de los marcos gravitacionales es mucho menor que el que tendría una edificación similar diseñada para resistir simultáneamente cargas verticales y sísmicas. Además, los tamaños de vigas y columnas de los marcos gravitacionales, así como su detallado mínimo, es uniforme a través de todo el edificio, lo que implica grandes ahorros en cuanto a costos de materiales y construcción. Por el otro lado, la metodología UAM requiere que con base en una metodología basada en el control del desplazamiento lateral de la edificación, se rigidice el sistema gravitacional por medio de un sistema de contravientos restringidos contra pandeo, que prácticamente no añaden peso a la edificación (Terán 2008).

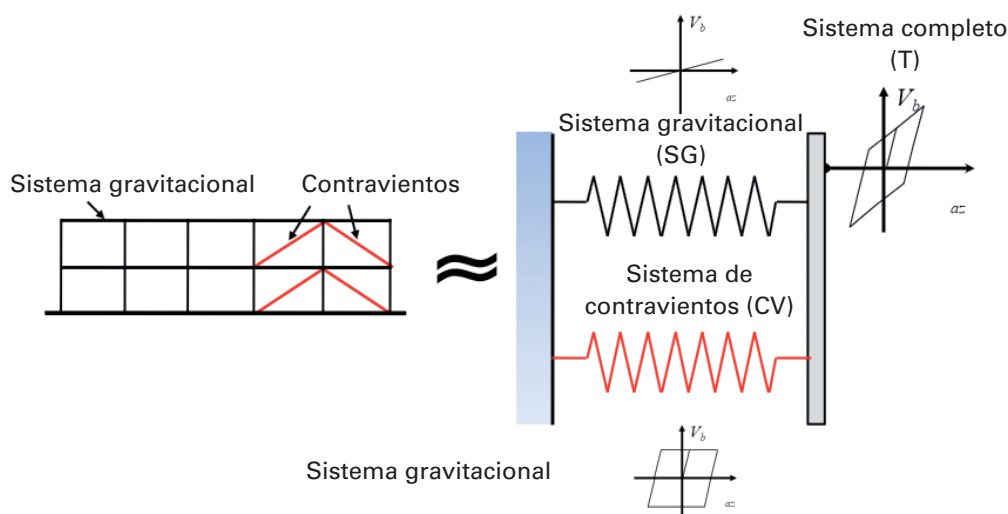


Fig. 4. Comportamiento propuesto para una estructura tolerante a daño.

Es interesante comparar el peso y desempeño sísmico de edificaciones similares diseñadas con la normatividad actual y el enfoque de estructura tolerante a daño. Como referencia, considere que la configuración utilizada por Terán (2008), para el sistema de contravientos restringidos contra pandeo del edificio de veinticuatro pisos (edificio innovador) se basa en aquella utilizada para un edificio real por un prestigiado despacho de cálculo estructural (edificio tradicional). Esto es, el diseño basado en un enfoque de estructura tolerante a daño representa un rediseño de un edificio real, que fue estructurado con base en contravientos tradicionales de acero y marcos momento-resistentes compuestos (concreto y acero), y diseñado conforme al *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. En cuanto al sistema estructural sin consideración del sistema de piso (esqueleto estructural), el esqueleto estructural del edificio tradicional de veinticuatro pisos pesa cerca de 12,500 toneladas (3,900 toneladas de vigas, 8,100 toneladas de columnas y 500 toneladas de contravientos dúctiles). En el caso del sistema innovador, el esqueleto estructural pesa 4,800 toneladas (1,200 toneladas de vigas, 3,000 toneladas de columnas y 600 toneladas de contravientos restringidos contra pandeo). A partir de un formato basado en el uso de factores de demanda y de capacidad que consideró conceptos tales como factores y niveles de confianza, Montiel y Terán (2008) evaluaron y compararon la confiabilidad de las dos versiones del edificio de veinticuatro pisos. Concluyeron que la versión innovadora del edificio exhibe mayores niveles de confiabilidad que su contraparte tradicional para excitaciones sísmicas de diferente intensidad. Esto a pesar de que el esqueleto estructural innovador pesa menos de la mitad que el sistema estructural tradicional. En términos de sustentabilidad, lo anterior implica que es posible concebir hoy en día edificaciones más seguras a través de uso de una cantidad menor de recursos naturales.

CONCRETO PREFABRICADO

El uso de un sistema estructural prefabricado hace posible un avance rápido durante la construcción de una edificación y da por resultado obras más limpias, ahorro en cimbras y un mejor control de calidad. Dado que los elementos prefabricados se elaboran en plantas industriales, es posible emplear concretos de alto desempeño durante su fabricación. En términos de sustentabilidad, lo anterior no sólo suele reflejarse en menores costos directos, sino en una disminución importante del uso de recursos naturales.

Aunque lo anterior ilustra su potencial para contribuir a un desarrollo sustentable, por mucho tiempo el diseño de los sistemas estructurales prefabricados no se consideró explícitamente dentro de la normatividad mexicana. De hecho, en la actualidad existe entre varios ingenieros estructurales mexicanos cierto escepticismo en cuanto a su capacidad sismorresistente debido a la capacidad limitada que exhiben sus conexiones viga-columna para acomodar daño debido a sismo.

En México se han desarrollado investigaciones analíticas y experimentales de relevancia que han permitido entender mejor el comportamiento de las estructuras prefabricadas ante sismo, y con base en esto, plantear requerimientos normativos de diseño y detallado (Carranza *et al.* 1996, Pérez *et al.* 1998; López *et al.* 2001 y 2004; Rodríguez y Blandón 2000 y 2001; Suárez y Rodríguez 2007). Lo anterior ha potenciado al ingeniero práctico mexicano, lo que ha dado lugar a estructuras prefabricadas de gran relevancia y belleza.

En términos de las preocupaciones de académicos e ingenieros prácticos, el detallado de las conexiones viga-columna ha recibido la mayor atención. Lo anterior ha resultado en varias propuestas de detallado que enfatizan los aspectos constructivo y estructural. Aunque las pruebas experimentales indican que una conexión bien detallada es capaz de acomodar deformaciones laterales sustanciales, lo cierto es que los ciclos histeréticos de una conexión viga-columna exhiben una degradación estructural significativa en presencia de carga cíclica. Lo anterior implica que una edificación prefabricada carece de un mecanismo eficiente y confiable de control de su respuesta dinámica.

Debido a las deficiencias que en términos de control exhiben los marcos prefabricados, Rodríguez y Blandón (2001) plantean que la industria de la prefabricación en México debe abandonar la práctica de emplear conexiones que no cumplan con requisitos mínimos de detallado. Como alternativa, estos investigadores sugieren complementar los sistemas de marcos prefabricados con muros prefabricados que sean capaces de reducir de manera eficaz los desplazamientos laterales de las edificaciones durante sismos de alta intensidad.

Dentro de un contexto donde la estructura sismorresistente no se desplaza de forma apreciable, podría plantearse el uso de un detallado estándar para los marcos prefabricados, que ahora juegan en exclusiva el papel de sistema gravitacional. Aunque la concepción de Rodríguez y Blandón representa un avance conceptual importante, lo cierto es que las metodologías de diseño sísmico utilizadas hoy en día no permiten un control explícito del daño en la edificación, ni evitan que el daño se distribuya en los elementos estructurales de concreto reforzado (con sus respectivas implicaciones

en términos de costo y tiempo de rehabilitación). Cabe decir que en términos de sustentabilidad, es posible complementar todas las ventajas que ofrece un sistema gravitacional de marcos prefabricados, con aquellas que ofrece el uso de elementos de sacrificio. Una alternativa a la propuesta de Rodríguez y Blandón sería plantear un sistema dual, en que la sismorresistencia sea aportada por una serie de contravientos restringidos contra pandeo. Por un lado, la fuente estable de disipación de energía provista por los contravientos permite controlar de manera explícita la deformación lateral de la edificación. Por el otro lado, el daño estructural se concentraría exclusivamente en estos fusibles estructurales, lo que implica, conforme a lo discutido con anterioridad, un ahorro importante durante la rehabilitación estructural de la edificación. La combinación de metodologías innovadoras de diseño sísmico con el uso de elementos prefabricados tiene el potencial de dar lugar a edificaciones ligeras y confiables; y que pueden ser construidas de manera eficiente y rápida.

Vale la pena mencionar que recientemente se han desarrollado sistemas prefabricados que exhiben capacidad auto-centrante. A diferencia de un sistema convencional que exhibe degradación severa de sus propiedades estructurales ante carga cíclica, un sistema auto-centrante retoma su posición original no deformada después de una excitación sísmica (Suárez y Rodríguez 2007). Una edificación concebida y diseñada en estos términos resulta en una alternativa atractiva para el diseño y construcción de edificaciones de concreto reforzado de baja altura. Sin embargo, debe mencionarse que las características del sistema son tales que no lo hacen susceptible de aplicación en la rehabilitación sísmica de edificaciones existentes.

SISTEMAS DE PISO

En términos de ahorro de recursos naturales, es necesario contemplar la concepción y diseño del sistema de piso, ya que un alto porcentaje de los materiales estructurales de una edificación forman parte de él. Aunque un sistema prefabricado de piso permite ahorros importantes de material y una alta eficiencia durante la construcción, es importante diseñarlo para que pueda comportarse como un diafragma estructural. Esto es, el sistema de piso debe aportar continuidad a todos los elementos del piso, y poseer una rigidez y resistencia adecuadas en su plano para tener la capacidad de distribuir las fuerzas sísmicas entre los diferentes planos sismorresistentes. Una práctica común para conseguir este objetivo es el empleo de un firme de concreto reforzado colado sobre las unidades prefabricadas.

El sistema formado por vigueta y bovedilla se ha constituido en una solución importante para muchas de las viviendas ubicadas en diferentes países latinoamericanos. Recientemente, estos sistemas de piso también han sido utilizados en edificaciones de mayor envergadura, como aquellas que alojan centros comerciales, industriales u oficinas; y es de esperarse que en un futuro cercano se utilicen todavía más debido a la rapidez y versatilidad de su proceso constructivo (López *et. al.* 2004). Esto es posible debido a las recomendaciones de modelado y diseño que se han derivado de los estudios analíticos y experimentales desarrollados por la comunidad mexicana de ingeniería estructural (Gómez *et. al.* 2000; López *et. al.* 2001; Rodríguez y Blandón 2003; Aguilar *et. al.* 2004; León *et. al.* 2008).

Dentro de un contexto de estructuras tolerantes a daño, es necesario complementar la visión ofrecida hasta el momento para un sistema gravitacional prefabricado protegido por medio de fusibles estructurales, con la concepción de un sistema de piso prefabricado que sea capaz de transferir las cargas sísmicas generadas en las losas a los elementos de sacrificio. La combinación de metodologías innovadoras de diseño sísmico con el uso de elementos prefabricados de concreto resultará entonces en edificaciones ligeras y confiables, que pueden ser construidas en campo con una eficiencia sin precedentes.

En términos de sistemas aligerados de piso, una alternativa atractiva la constituyen las losas postensadas coladas en sitio y aligeradas por medio de casetones. La práctica mexicana actual concibe un sistema gravitacional de concreto formado por dichas losas y columnas, que se complementa con un sistema estructural perimetral rígido que aporta sismorresistencia a la edificación. Este concepto se aproxima al de una estructura tolerante a daño, con la excepción de que el daño tiende a distribuirse en todos los elementos del perímetro estructural de concreto reforzado. Podría pensarse entonces que el esquema actual podría modificarse levemente a través de añadir al perímetro de la estructura una serie de fusibles estructurales que proporcionen una fuente estable de disipación de energía, y que concentren el daño por sismo. Actualmente se llevan a cabo en la UAM una serie de estudios analíticos y experimentales que analizan la pertinencia de la práctica actual de diseño de estos sistemas, y que permitirán el diseño de este tipo de edificaciones dentro de un contexto de estructura tolerante a daño (Arellano y González 2010, Coeto *et. al.* 2010).

CONCRETOS RECICLADOS Y DE ALTA TECNOLOGÍA

En términos de innovación, puede decirse que todo lo involucrado en la fabricación y uso de materiales de construcción está sujeto a reinventarse (Fischetti 2009). Esto es particularmente cierto en el caso del cemento, ya que como ya se

comentó, su fabricación resulta en emisiones inaceptablemente altas de gases invernadero. Dichas emisiones provienen en lo esencial de dos fuentes:

- A) La energía de calor requerida para la cocción de la materia prima.
- B) La liberación de dióxido de carbono que resulta de las reacciones químicas que se dan durante dicha cocción.

Dentro de un contexto de sustentabilidad es fundamental pensar en cementos que requieran menores temperaturas de cocción, y liberen menos gases invernadero. En cuanto a la fabricación de concreto, es importante pensar en el reciclado de materiales de desecho, y de mezclas altamente durables que no requieran mantenimiento, y puedan ser utilizadas con propósitos estructurales. Aunque lo anterior pudiera parecer excesivo en términos de planteamiento, lo cierto es que se ha constituido en el paradigma de las grandes compañías fabricantes de cemento a nivel mundial. Como consecuencia, en esta década han surgido concretos de alta tecnología que denotan compromiso hacia la noción de sustentabilidad. Vale la pena mencionar la Iniciativa Sustentable del Cemento (The Cement Sustainability Initiative), cuyos objetivos son incrementar la contribución de la industria del cemento al desarrollo sustentable del planeta, y fomentar el entendimiento público de esta contribución.

Varias investigaciones han dado lugar a cementos que pudieran calificarse de ecológicos o verdes. Estos cementos no sólo no generan cantidades importantes de dióxido de carbono durante su cocción, sino que son capaces de retirarlo en mayores cantidades de la atmosfera durante su fraguado (Gumbel 2008; Jha 2008; Fountain 2009). El uso extensivo de este tipo de cementos implicaría que la industria del cemento pase de ser un emisor importante, a una fuente importante de absorción de gases invernadero.

En términos de durabilidad es importante tener en cuenta que varios foros ecológicos internacionales consideran que las edificaciones construidas en el futuro deben contemplar horizontes de vida mucho más largos que los actuales, y la posibilidad de una modernización periódica de instalaciones y contenidos (incluso se ha llegado a hablar del “reciclado” y “reúso” de las edificaciones). Dentro de un contexto así, las condiciones planteadas para un desarrollo sustentable harán que muy pronto se incremente la expectativa actual de vida útil (50 años) de las estructuras de concreto reforzado, lo que implica eliminar la necesidad de un monitoreo periódico de su agrietamiento, y minimizar las medidas para su mantenimiento.

Paradójicamente, mientras que varias estructuras de concreto no reforzado construidas por los romanos han resistido hasta nuestros días el paso del tiempo en excelentes condiciones, varias estructuras importantes construidas durante el Siglo XX se han deteriorado con una rapidez sin precedentes. En opinión de varios expertos, el factor que más ha contribuido al agrietamiento temprano y excesivo de las estructuras modernas de concreto reforzado ha sido el uso indiscriminado en los sistemas de infraestructura de cementos que alcanzan un alto porcentaje de su resistencia a edades tempranas y que exhiben un alto contenido de sulfatos (Mehta y Burrows 2001). Aunque es importante que el ingeniero estructural contemple requerimientos de diseño por durabilidad durante la concepción estructural de las estructuras que diseña (tales como los que se incluyen en las “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, del *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*), es importante entender que si bien el deterioro del concreto y la corrosión del acero de refuerzo están íntimamente ligadas con la porosidad y agrietamiento del concreto, no es conveniente ignorar la interacción química que existe entre el concreto y el medio ambiente (Levy y Helene 2004; Gomes y Brito 2009).

Una propuesta promisoriosa para alargar la vida útil del concreto reforzado es la adición a la mezcla del concreto de fibras discontinuas de diferentes materiales y con configuraciones geométricas diferentes (Alcocer 1998). Las fibras suelen incrementar la durabilidad del concreto por medio de controlar de manera importante el ancho de grietas a través de mejorar su distribución en el elemento estructural. Lo anterior no sólo alarga la vida útil de los elementos de concreto sino que permite reducir sustancialmente sus deflexiones. Puede decirse que el uso adecuado de fibras hace posible la fabricación de elementos estructurales más esbeltos con una mayor vida útil, lo que se refleja en ahorros a corto y largo plazo de recursos naturales. El uso de este tipo de concretos se incrementa de manera importante en Europa debido al esfuerzo que se ha invertido en ese continente por desarrollar recomendaciones de diseño y cuerpos normativos (Di Prisco et. al. 2009; Walraven 2009).

Otro aspecto que un desarrollo sustentable demanda es el reciclado de materiales durante la fabricación del concreto. En estos términos, varios investigadores ven en la industria del concreto a un consumidor importante de materiales de desecho. Por ejemplo, considere que en los Estados Unidos de América se descartan cada año más de 250 millones de llantas de hule. Varios estudios sugieren que la adición de partículas de llanta al concreto puede incrementar su vida útil a través de una disminución importante en la cantidad y tamaño de sus grietas. Aunque la sustitución de un porcentaje de los agregados naturales del concreto por partículas de llanta se refleja en reducciones importantes del revenimiento de la

mezcla y de la resistencia y rigidez del hulecreto; el uso correcto de aditivos y cementos especiales complementado con el tratamiento de las partículas de hule han resultado en hulecretos con potencial para ser usados en aplicaciones estructurales, y que exhiben incrementos sustanciales en su capacidad de deformación plástica, y una resistencia notable contra ambientes corrosivos y el intemperismo extremo (Siddique y Naik 2004; Turki et. al. 2009).

Quizá más realista sea pensar que a corto plazo es posible reciclar concreto existente o de desecho como insumo en la fabricación de concreto nuevo (Martínez y Escobedo 2006; Rolón et. al. 2007). Este proceso implica triturar un concreto existente para que cumpla con determinados criterios de graduación con el fin de ser utilizado como agregado grueso de un concreto fresco (en ocasiones también se considera la sustitución del agregado fino). El desperdicio de concreto representa una pérdida de materias primas, principalmente de agregado natural, que son recursos naturales no renovables; y la creación de materiales de desecho que crean enormes problemas en cuanto a su manejo y disposición final. Lo anterior ha resultado en que el uso del concreto reciclado sea una prioridad para la industria de la construcción de varios países. Por ejemplo, considere que mientras en Inglaterra el 10% de los agregados usados para fabricar concreto son reciclados; Alemania ha establecido metas para reutilizar a corto plazo el 40 por ciento de sus materiales de desecho de demolición. Tanto Holanda como Dinamarca usan de manera importante y cotidiana agregados reciclados durante la fabricación de concreto (Oikonomou 2005; Corinaldesi y Moriconi 2006).

Aunque pueden llegar a existir algunos problemas en términos de garantizar la calidad de los agregados reciclados (sobre todo aquellos obtenidos de la demolición de estructuras existentes), en Europa se han creado una serie de regulaciones que permiten clasificar y establecer las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los agregados reciclados (Oikonomou 2005; Etxeberria et. al. 2007). Además, varios estudios sugieren que la sustitución de hasta un 25% de los agregados gruesos naturales por agregados reciclados tiene un impacto negativo mínimo en las propiedades físicas y mecánicas del concreto (Levy y Helene 2006; Gomes y Brito 2009). Pruebas experimentales de elementos de concreto reforzado reciclado sugieren que mientras no se rebasa este porcentaje de sustitución, es posible utilizar los requerimientos actuales de diseño para el diseño de elementos de concreto reciclado, aún de aquellos sujetos a la acción de sismos severos (Corinaldesi y Moriconi 2006; Etxeberria et. al. 2007). La sustitución de agregados naturales por reciclados en porcentajes mayores a un 25 por ciento pueden resultar en disminuciones importantes en la rigidez y resistencia del elemento de concreto (Levy y Helene 2006; Etxeberria et. al. 2007). No sólo eso, sino que suelen observarse agrietamientos a edades más tempranas y a menores niveles de carga.

Con los cuidados pertinentes, que incluyen una consideración cuidadosa del porcentaje de agregados reciclados a utilizar en la mezcla, así como un estudio cuidadoso de su composición química, varios investigadores han obtenido concretos reciclados adecuados en términos de durabilidad (Levy y Helene 2004; Gomes Brito 2009). Actualmente Europa trabaja de manera importante en la elaboración de estándares que permitan un uso extenso del concreto reciclado como material estructural.

Los resultados experimentales obtenidos en México por Martínez y Escobedo (2006) han mostrado que los agregados producto del reciclaje de concreto premezclado, producen concretos reciclados que pueden utilizarse como concretos clase dos, de acuerdo con el *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Aunque bajo ciertas circunstancias, el menor módulo de elasticidad que exhibe un concreto tipo dos limitaría su uso estructural; dentro del contexto de estructuras tolerantes a daño, un menor módulo de elasticidad aporta ventajas (como se comentó antes, los marcos del sistema gravitacional deben ser flexibles, de tal manera que puedan deformarse lateralmente sin desarrollar niveles relevantes de daño estructural).

En términos estructurales, es importante preguntarse cuáles serán las aplicaciones reales de los cementos reciclados y de alta tecnología: ¿Terminarán varios de ellos en aplicaciones decorativas o podrán ser utilizados con fines estructurales? Independientemente del estado actual del arte, es un hecho que los cementos ecológicos encontrarán en un futuro aplicaciones estructurales de importancia. Como en el caso de cualquier producto nuevo, los cementos de alta tecnología deberán cumplir con estándares que garanticen su desempeño estructural, y su producción deberá alcanzar niveles de eficiencia que hagan posible su difusión en un mercado mundial altamente competitivo.

Finalmente, es importante discutir el papel que los concretos de alta tecnología tendrán en la labor del diseñador de estructuras de concreto reforzado. Quizá la mejor manera de hacerlo es a través de las palabras de Alcocer (1998): “En términos de la labor del diseñador de edificaciones de concreto, es importante entender que el proceso de diseño del concreto estructural debe involucrar la selección adecuada y cuidadosa de los materiales, así como el detallado y dimensionamiento de los elementos de modo de asegurar una durabilidad acorde con los objetivos de desempeño”.

AISLAMIENTO TÉRMICO

El medio construido suele proveer un contraste importante entre el ambiente exterior y su ambiente interior. El contraste, que se da en términos de luz, aire, sonido, polvo, temperatura, etc., adquiere gran relevancia si se considera que en promedio los seres humanos invierten más del 90 por ciento de su tiempo en habitar el medio construido. Dentro de este contexto, la sustentabilidad requiere que el contraste de temperaturas se provea con niveles de eficiencia sin precedentes. Por ejemplo, considere que mientras el 40% de la energía que se consume en el planeta se invierte con este fin, el 50% del dióxido de carbono responsable del efecto invernadero proviene de esta actividad. En estos términos, la mayor aportación que puede hacer la industria de la construcción a la reducción del calentamiento global consiste en reducir de manera significativa el consumo de combustibles fósiles que actualmente se invierte para sostener ambientes internos adecuados. Lo anterior implica un diseño adecuado de las envolventes del medio construido (fachadas, muros exteriores, techos, pisos, ventanas, puertas, etc.) en términos de resistir con la apariencia deseada los esfuerzos a las que estén sujetas, y aislar con niveles de eficiencia sin precedente el espacio interior de las temperaturas exteriores.

Una manera promisorio de atender la problemática descrita en el párrafo anterior consiste en un diseño adecuado de las propiedades aislantes de la envolvente y, en ocasiones, de la masa térmica de la construcción (la masa térmica puede interpretarse como una inercia térmica que permite a un material conservar su estado de temperatura en un medio con temperatura variable). La combinación en el medio construido de altos niveles de aislamiento con masas térmicas adecuadas puede jugar un papel importante en la creación de medios interiores agradables a costos de operación mínimos que reflejen reducciones sustanciales en el uso de combustibles fósiles (John *et. al.* 2005).

Materiales de alta densidad como el concreto no son eficientes en términos de aislamiento térmico, pero son capaces de absorber y almacenar una cantidad importante de calor. Lo anterior implica que el uso de elementos masivos de concreto complementados con barreras aislantes adecuadamente diseñadas tiene el potencial de regular la temperatura interna de una edificación con consumos mínimos de energía externa (John *et. al.* 2005).

Una alternativa interesante en términos de aislamiento térmico lo presentan los concretos ligeros (Alcocer 1998). En particular, el concreto celular es un producto de baja densidad que exhibe una excelente capacidad de aislamiento térmico y acústico, y excepcional resistencia al fuego. Esto lo hace muy atractivo como un medio para minimizar los consumos de energía en edificaciones de concreto reforzado ubicadas en zonas de climas extremos.

Un diseño estructural sustentable requiere de la interacción del ingeniero estructural en términos de aislamiento térmico con expertos de otras disciplinas (arquitectos, ingenieros ambientales, etc.). La creación de medios internos adecuados en términos de temperatura requiere de la integración de los aspectos estructural y térmico del diseño desde la concepción arquitectónica de las edificaciones de concreto reforzado. En este sentido, el diseño de la estructura debe sustentarse en un enfoque integral que considere las diferentes interacciones que se dan entre la apariencia, forma y consistencia de la edificación, durante las diferentes etapas de su vida útil.

ACERO

En términos de sustentabilidad, es importante mencionar las contribuciones de la industria del acero a la degradación del medio ambiente. En particular, la producción global de acero se ha incrementado de manera sostenida en las últimas cinco décadas, de tal manera que en 2006 la producción anual de este material alcanzó la cifra de 1.25 billones de toneladas. De acuerdo a cifras recientes, la industria del acero contribuye entre 3 y 4 por ciento a la producción mundial de gases invernadero.

Los avances tecnológicos desarrollados en el ámbito de la producción de acero en los últimos 25 años han permitido una reducción sustancial de sus emisiones de dióxido de carbono. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos invertidos por la industria internacional del acero para mejorar aun más la eficiencia involucrada en la fabricación y reciclado de acero, se espera que sea hasta el año 2020 que llegue la siguiente generación de avances tecnológicos que permitan una diferencia notable en términos de reducir su impacto al medio ambiente (World Steel Association 2007). En la actualidad pueden identificarse en lo fundamental dos maneras para reducir el impacto que tiene la fabricación de acero en el medio ambiente. Primero, puede mencionarse la transferencia de tecnología de punta desde los países desarrollados a los países subdesarrollados para modernizar su infraestructura acerera. La segunda, que involucra a los ingenieros estructurales, consiste en el uso más eficiente de este material en las construcciones que diseña. Es dentro de este contexto que el uso de metodologías innovadoras de diseño sismorresistente pueden contribuir por medio de hacer posible un uso eficiente de este material en las edificaciones de concreto reforzado. Por un lado, es posible reducir sustancialmente la cantidad de acero de refuerzo longitudinal en los elementos estructurales en el sistema primario, ya que este se diseña exclusivamente para tomar cargas

gravitacionales. Por otro lado, sería posible reducir sustancialmente la cantidad de refuerzo transversal a través de utilizar elementos estructurales con detallado estándar y uniforme en un sistema primario que no requiere acomodar deformaciones plásticas de importancia.

DISEÑO SISMORRESISTENTE SUSTENTABLE Y SUS PERSPECTIVAS

La Fig. 5 ilustra de manera esquemática una edificación de concreto reforzado concebida y diseñada conforme a la visión desarrollada en este artículo. En resumen, el sistema gravitacional de la edificación está estructurado con base en:

A) Marcos prefabricados elaborados con concretos de alta tecnología.

B) Marcos colados in situ con concretos que aprovechen materiales de desecho. El sistema de piso de la edificación estaría constituido por sistemas aligerados de piso, diseñados de tal manera que puedan jugar el papel de diafragma estructural.

La sismorresistencia de la edificación está aportada por un sistema de fusibles estructurales que a través de proporcionar una fuente estable para disipar energía, hacen posible controlar los niveles de daño en los sistemas gravitacional y no estructural, así como en los contenidos. La rehabilitación de la edificación después de un sismo intenso consistiría en sustituir los fusibles dañados. El diseño sismorresistente sustentable de estructuras como la que se muestra en la figura ayudaría a sentar las bases sobre las cuales pueda crearse un medio profesional en que la labor diaria del diseñador de estructuras de concreto reforzado resuelva adecuadamente los problemas ingenieriles que enfrenta, y a la vez transmita, a través de acciones concretas, preocupación por el medio ambiente.



Fig. 5 Sistema estructural sismorresistente de concreto reforzado para una edificación verde.

Es de interés discutir los horizontes de tiempo en que la visión desarrollada en este artículo pudiera aterrizar. En primer lugar, el planteamiento conceptual y teórico del uso de elementos de sacrificio dentro de un contexto de estructuras tolerantes a daño exhibe un avance muy importante en México. Además, se han iniciado una serie de estudios experimentales de contravientos restringidos contra pandeo (Gama *et. al.* 2008). Bajo la consideración del desarrollo faltante, es posible pensar que su aplicación será posible en México en un horizonte de cinco años. En segundo lugar, es posible decir que, debido a su experiencia práctica y la madurez de su desarrollo académico, la comunidad mexicana de prefabricados está en condiciones de contribuir de manera inmediata con la porción que le corresponde dentro de los planteamientos desarrollados en este artículo.

Los estudios desarrollados en México alrededor del uso de concretos reciclados claramente indican la posibilidad de utilizar a la brevedad, concretos reciclados que pudieran caracterizarse como concretos estructurales tipo dos. Quizá la mayor limitación en cuanto al reciclado de concreto sea la reserva con que el medio profesional reciba esta posibilidad. En estos términos quizá se requiera del planteamiento de nuevos estudios, que hagan posible, en un horizonte de cinco años, la aplicación de concretos reciclados con fines estructurales.

En términos de concretos de alta tecnología, hoy en día hay plena disponibilidad en México de concretos de alto desempeño, que exhiben altos niveles de resistencia y durabilidad. Aunque a nivel mundial el uso de concretos con fibras ha encontrado aplicaciones importantes, es todavía necesario iniciar su desarrollo en México. Quizás el horizonte más lejano en términos de la visión planteada aquí es el relacionado con los concretos verdes (ecológicos). Aunque a nivel mundial se considera que podrán estar comercialmente disponibles en diez años, el grado de desarrollo en nuestro país es mínimo.

Aunque desde el punto de vista de materiales podrían encontrarse algunas limitaciones, puede decirse que cinco o diez años separan a la comunidad de ingenieros civiles mexicanos de la posibilidad de incorporarse exitosamente a una visión de desarrollo sustentable de nuestro planeta. Sin embargo, hay todavía mucho por hacer en términos de desarrollo e innovación. Quizá el mayor obstáculo que enfrente el ingeniero mexicano sea la falta de confianza plena en sus capacidades.

REFERENCIAS

Aguilar D. M.; Chao J. C.; Serrano S.; López Bádiz O., “Estudio experimental sobre el comportamiento de losas con alma de poliestireno expandido y malla sujetas a cargas verticales”, en *Memorias del Catorceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2004.

Alcocer S. (1998), “Algunas tendencias del concreto estructural”, en *Memorias del Onceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, I, pp. 3-32.

Arellano Méndez E.; González Cuevas O.M., “Diseño sísmico de la conexión losa-columna en losas planas postensadas aligeradas”, en *Memorias del Diecisieteavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2010.

Biello D. (2008), “Green buildings may be cheapest way to slow global warming”, en *Scientific American*, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=green-buildings-may-be-cheapest-way-to-slow-global-warming>.

Black C.; Makris N.; Aiken I. “Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained unbounded braces”, en *Reporte PEER 2002/08*, Universidad de California, Berkeley, 2002.

Carranza Aubry R.; Martínez Hernández R.; Reinoso Angulo E. “Conexión trabe-columna de elementos prefabricados sin pernos ni soldadura”, en *Memorias del Décimo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, I, pp. 86-95, 1996.

Clark P.; Kasai K.; Aiken I.; Kimura I., “Evaluation of design methodologies for structures incorporating steel unbonded braces for energy dissipation”, en *Memorias del 12th World Conference on Earthquake Engineering*, en CD, artículo 2240, 2000.

Coeto Galaz G.A.; Arellano Méndez E.; Alonso García J.A.; Terán Gilmore A., “Diseño de edificio para estacionamiento con losa plana postensada como sistema gravitacional y contravientos restringidos contra pandeo como sistema sismorresistente”, en *Memorias del Diecisieteavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2010.

Corinaldesi V.; Moriconi G., “Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading”, en *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(5), pp. 650-658, 2006.

Chen C. H.; Hsiao P. C.; Lai J. W.; Lin M. L.; Weng Y. T.; Tsai K. C., “Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame: Part 2—Construction and testing”, en *Memorias del 13th World Conference on Earthquake Engineering*, en CD, artículo 2175, 2004.

Di Prisco M.; Plizzari G.; Vandewalle L., “Fibre reinforced concrete: new design perspectives”, en *Materials and Structures*, 42, pp. 1261-1281, 2009.

Etcheberria M.; Marí A.R.; Vázquez E., “Recycled aggregate concrete as structural material”, en *Materials and Structures*, 40, pp. 529-541, 2007.

Fischetti M., “Better Materials Could Build a Green Construction Industry”, *Scientific American*, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=better-materials-green-construction-industry>, 2009.

Flores L.; Marcelino J.; Lalalde G.; Alcocer S., “Evaluación experimental del desempeño de marcos con bloque hueco de concreto reforzados con malla electrosoldada y recubrimiento de concreto”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 1999.

Fountain H., "Concrete is remixed with environment in mind", en *The New York Times*, http://www.nytimes.com/2009/03/31/science/earth/31conc.html?_r=1, 2009.

Gama Estrada E.; Santos Téllez R. U.; Arroyo Espinoza D.; Terán Gilmore A. "Estudio experimental en contravientos desadheridos", *Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2008.

Gómez González B.; Guerrero Correa J.J.; Iglesias Jiménez J., "Estudio de la rigidez y resistencia en su plano de sistemas de piso", en *Memorias del Doceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2000.

Gomes M.; De Brito J., "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance", en *Materials and Structures*, 42, pp. 663-675, 2009.

Gumbel P., "Building materials: cementing the future", en *Time*, <http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,1864315,00.html>, 2008.

Helene P., "El arte de proyectar estructuras", en *Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2008.

Jha A., "Revealed: the cement that eats carbon dioxide", <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/dec/31/cement-carbon-emissions>, 2008.

John G.; Clements-Croome D.; Jeronimidis G., "Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world", en *Building and environment*, 40, pp. 319-328, 2005.

Ko E.; Mole A.; Aiken I.; Tajirian F.; Rubel Z.; Kimura I., "Application of the unbonded brace in medical facilities", en *Memorias del 7th National Conference on Earthquake Engineering* en CD, artículo 514, 2002.

Levy S.M.; Helene P., "Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development", en *Cement and concrete research*, 34, pp. 1975-1980, 2004.

León Flores G. A.; López Bátiz O.; Padilla Romero D. A., "Estudios experimentales del comportamiento sísmico de losas prefabricadas", en *Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2008.

López Bátiz O.; Cazamayor Cázares A. H.; Ortiz Vázquez E.; Silva Olivera H., "Estudio experimental sobre el comportamiento de estructuras con sistema de piso de vigueta y bovedilla sujetas a cargas laterales", en *Memorias del Treceavo Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, en CD, 2001.

Lopez W.; Gwie D.; Saunders M.; Lauck T., "Lessons learned from large-scale tests of unbonded braced frame subassemblage", en *Memorias del SEAOC 71st Annual Convention*, en CD, 2002.

López Bátiz O.; Hernández Díaz J.L.; Peña Pedroza J.I., "Desempeño de estructuras de concreto reforzado precoladas y presforzadas ante cargas laterales", en *Memorias del Catorceavo Congreso de Ingeniería Estructural*, en CD, 2004.

Mahin S.; Uriz P.; Aiken I.; Field C.; Ko E., "Seismic performance of buckling restrained braced frame systems", en *Memorias del 13th World Conference on Earthquake Engineering*, en CD, artículo 1681, 2004.

Martínez-Soto I. E.; Mendoza-Escobedo C. J., "Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados", en *Investigación y Tecnología*, 3, pp. 151-164, 2006.

Mehta P. K.; Burrows R.W.; "Building durable structures in the 21st century", en *Concrete International*, 23 (3), pp. 57-63, 2001.

Montiel Ortega M. A.; Terán Gilmore A., "Evaluación y comparación de la confiabilidad de edificios de 24 niveles estructurados con contravientos tradicionales y con contravientos restringidos contra pandeo", *Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2008.

Oikonomou N. D., "Recycled concrete aggregates", en *Cement and concrete composites*, 27, pp. 315-318, 2005.

Pérez Navarrete D.; Carranza Aubry R.; Martínez Hernández R.; Alcocer Martínez de Castro S., "Comportamiento sísmico de un tipo de conexión viga-columna de elementos prefabricados de concreto", en *Memorias del Onceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, I, pp. 504-510, 1998.

Rodríguez M. E.; Blandón J. J., "Evaluación del comportamiento sísmico de una conexión trabe-columna tipo ventana en una estructura prefabricada de concreto de dos niveles ensayada ante cargas cíclicas reversibles", *Memorias del Doceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2000.

Rodríguez M.; Blandón J.J., "Diseño y comportamiento sísmico de edificios a base de muro-marco de concreto reforzado. Aplicación a la prefabricación", en *Memorias del Treceavo Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, en CD, 2001.

Rodríguez M.; Blandón J., "Sistemas de piso en edificaciones para resistir fuerzas sísmicas en su plano", en *Memorias del Catorceavo Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, en CD, 2003.

Rolón Aguilar J.C.; Nieves Mendoza D.; Huete Fuertes R.; Blandón González B.; Terán Gilmore A.; Pichardo Ramírez R., "Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de

hormigón”, en *Materiales de Construcción*, 57 (288), pp. 5-15, 2007.

Siddique R.; Naik T. R., “Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview”, en *Waste Management*, 24, pp. 563-569, 2004.

Suárez González M.; Rodríguez M. E., “Estado del arte y estudio de viabilidad de las estructuras con elementos prefabricados y uniones postensadas. Sistema mixto”, en *Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, en CD, 2007.

Terán-Gilmore A., “Diseño por desempeño: antecedentes, conceptos generales, perspectivas”, en *Memorias del Séptimo Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, en CD, 2002.

Terán-Gilmore A., “El papel de la innovación dentro del contexto de la ingeniería estructural mexicana: El caso de los contravientos restringidos contra pandeo”, en *Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, en CD, 2008.

Torres M., “Patrones de daño por sismo en muros estructurales de mampostería”, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, 2007.

Tremblay R., Degrange G. y Blouin J. (1999), “Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system”, *Memorias del 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering* (CD).

Tremblay R.; Bolduc P.; Neville R.; DeVall R., “Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems”, en *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, pp. 183-198, 2006.

Turki M.; Naceur I. B.; Makni M.; Rouis J.; Saï K., “Mechanical and damage behavior of mortar-rubber aggregates mixtures: experiments and simulations”, en *Materials and Structures*, 42, pp. 1313-1324, 2009.

Uang C. M.; Nakashima M., “Steel buckling-restrained braced frames”, en *Earthquake engineering: Recent advances and applications*, capítulo 16, CRC Press, 2003.

Wada A.; Huang Y.; Bertero V. V., “Innovative strategies in earthquake engineering”, en *Earthquake engineering: Recent advances and applications*, capítulo 10, CRC Press, 2003.

Walraven J. C., “High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes”, en *Materials and Structures*, 42, pp. 1247-1260, 2009.

Watanabe A.; Hitomi Y.; Saeki E.; Wada A.; Fujimoto M., “Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube”, en *Memorias del 9th World Conference on Earthquake Engineering*, IV, pp. 719-724, 1988.

World Steel Association, “A global sector approach to CO₂ emissions reduction for the steel industry”, <http://www.worldsteel.org/?action=storypages&id=226>, 2007.