

NUEVAS TENDENCIAS EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS A VIBRACIONES

Ing. José A. Inaudi

Las estructuras, sean éstas los muros de mampostería de una vivienda, los pórticos de un edificio en altura o los tableros y pilas de un puente, son sistemas cuyo objetivo es garantizar la realización de la actividad que se desarrolla en la misma, resistiendo cargas propias y externas como el peso, el empuje del viento o las acciones producidas por terremotos. Nos referimos a éstas últimas como cargas o acciones dinámicas porque éstas varían relativamente rápidamente en el tiempo y como consecuencia, producen movimientos oscilatorios en las estructuras. Estos movimientos comúnmente se denominan vibraciones. Probablemente, el movimiento vertical de un vehículo sobre una calzada rugosa es nuestra experiencia más frecuente de un fenómeno vibratorio.

Las características principales de un sistema vibratorio son su período de vibración, tiempo que tarda el sistema en realizar una oscilación completa cuando el sistema vibra libremente y su coeficiente de amortiguamiento, una medida de la velocidad de reducción de la amplitud del movimiento que se produce en ausencia de cargas externas.

El movimiento o vibración de una estructura de ingeniería civil puede resultar perjudicial e incluso riesgoso para la vida humana y en la mayoría de los casos, algo que atenta contra el confort de los ocupantes.

Tomemos por ejemplo la situación de una estructura sometida a movimiento de su fundación durante un temblor o sismo. El movimiento del suelo producido por la liberación de energía del terremoto impone movimientos en la fundación de un edificio, los que a su vez producen deformaciones en el mismo. Estas pueden producir daños en el sistema estructural, daños en elementos no estructurales como ventanas, muros de cerramiento, instalaciones de agua, gas u otros servicios, pérdida de funcionalidad e incluso el colapso de la misma, con la consiguiente alta probabilidad de pérdida de vidas humanas. El colapso de estructuras viales en dos niveles como los que colapsaron durante el terremoto de Loma Prieta en San Francisco en 1989 son ejemplos de estructuras de hormigón armado que evidencian la fragilidad de este material cuando el confinamiento no es adecuado. El colapso de la estructura en este caso significó la pérdida de varias decenas de vidas humanas.

Los costos indirectos producidos por la interrupción del tránsito en vías críticas como la producida en el puente de la Bahía de San Francisco en el sismo de Loma Prieta en 1989, pueden en muchos casos superar por órdenes de magnitud los costos directos de reparación de la estructura. De carácter similar, los daños en líneas de alta tensión y estaciones de transformación eléctrica durante sismos moderados o fuertes pueden dejar sin el vital suministro a zonas urbanizadas enteras produciendo la paralización de actividades económicas.

Otro ejemplo de alto costo indirecto por pérdida de funcionalidad del servicio brindado en un edificio por un evento sísmico, es el colapso del Hospital Olive View en la zona metropolitana de Los Angeles sucedido durante el sismo de San Fernando en 1971. Resulta natural que los códigos de edificación requieran que un hospital permanezca operativo durante e inmediatamente después de un terremoto debido a que en sismos moderados o de alta intensidad resulta necesario atender a personas heridas durante el siniestro. Los daños en equipamiento médico de alta complejidad, daños en elementos no estructurales o en el sistema estructural imponen no sólo

costos de reparación de los mismos, sino fundamentalmente la imposibilidad de brindar el servicio médico en el momento cuando resulta más necesario.

Otra situación de costos indirectos altos respecto de los costos de reparación estructural se evidencia cuando los cerramientos de mampuestos o vidrio caen de pisos altos de un edificio dañando propiedad de terceros o causando heridas o la muerte de personas que transitan en veredas. Durante el terremoto de San Juan Argentina a mediados del siglo veinte, un número significativo de las muertes se produjeron al colapsar balcones que cayeron sobre personas al salir a la vereda intentando escapar de sus viviendas que se presentaban como una amenaza durante el fuerte sismo. Cerca del diez por ciento de la población de San Juan resultó víctima del sismo en este evento.

Vale la pena destacar que no sólo estructuras de hormigón armado o mampostería muestran un desempeño pobre cuando el diseño no es adecuado. Estructuras metálicas colapsaron en sismos como los de Northridge en Los Angeles en 1994 o el terremoto de Kobe en Japón en 1995.

Resulta evidente la importancia que reviste comprender las características de los movimientos sísmicos y sus probabilidades de ocurrencia, cómo vibran las estructuras, la modelización de su comportamiento dinámico y cómo mejorar las estrategias de diseño de las mismas para que resistan adecuadamente las acciones dinámicas.

En este sentido, durante los últimos años se está produciendo un vuelco hacia estrategias de diseño basadas en el desempeño esperado. Resultan variables relevantes no sólo la protección de la vida humana y la sobrevivencia de la estructura a acciones de sismo o viento, sino también la protección de la funcionalidad, los contenidos albergados en las estructuras y el confort humano. Los costos asociados a un proyecto estructural incluyen los de proyecto y construcción, los de mantenimiento, reparación y potencial interrupción del servicio o actividad prestada en la estructura durante la vida útil de la misma. Estos dependen del desempeño estructural, el que a su vez depende del diseño y construcción de la estructura.

El diseño estructural convencional utiliza materiales clásicos y nobles como el acero, la madera, el hormigón y la mampostería; materiales que sometidos a pequeñas deformaciones no disipan energía y en comportamiento plástico sufren daño. Por esta razón, el diseño de estructuras que utilizan sólo este tipo de materiales en sus componentes requiere un delicado balance entre resistencia y capacidad de deformación de la estructura. Estructuras que tienen mayor resistencia, lograda mediante componentes de grandes dimensiones, son capaces de soportar los esfuerzos inducidos por acciones dinámicas comportándose como sistemas elásticos con deformaciones resultantes pequeñas, lo que les permite soportar las acciones dinámicas sin daño permanente en los componentes estructurales. Este tipo de estrategia es utilizada para estructuras sometidas a cargas gravitatorias y cargas dinámicas frecuentes como el viento.

Por otra parte, estructuras que tienen una mayor capacidad de deformación en el rango plástico son diseñadas para sobrevivir las acciones dinámicas de gran intensidad utilizando la disipación de energía que resulta de la plastificación de elementos estructurales diseñados para resistir tal comportamiento. Este comportamiento plástico sin embargo está asociado a daño permanente en este tipo de estructuras en sismos moderados y fuertes. Debido a razones de costo de construcción, esta estrategia es preferida a la anterior en el diseño sismorresistente actual. Los detalles constructivos a tener en cuenta para garantizar un comportamiento adecuado en zonas de plastificación de los componentes estructurales y la

incertidumbre sobre el comportamiento de los materiales en este régimen constituyen los principales inconvenientes de esta estrategia.

El diseño sismorresistente busca satisfacer la ecuación de demanda externa y capacidad de la estructura. La demanda considera las fuerzas y deformaciones generadas en la estructura por el sismo; la capacidad considera la resistencia y deformabilidad que puede ser desarrollada por la estructura sin comprometer su estabilidad. Así, un diseño seguro es el que cumple con capacidad mayor que demanda para cualquier respuesta estudiada. El diseño sismorresistente convencional ha tratado siempre de satisfacer esta desigualdad a través del aumento de la capacidad de los elementos estructurales, entendiéndose por ello un aumento de resistencia o de capacidad de deformación (usualmente denominada ductilidad cuando el elemento trabaja en el rango plástico).

Durante los últimos veinte años, y con mayor fuerza durante la última década, nuevas técnicas de diseño sismorresistente han comenzado a mostrarse en la paleta de los ingenieros estructuralistas. Las nuevas tendencias incorporan otros materiales y dispositivos a la construcción estructural como los soportes deslizantes, amortiguadores friccionales, metálicos y de fluido viscoso, polímeros acrílicos y la goma natural. Esto permite redefinir el rol de los materiales convencionales en el comportamiento estructural. Básicamente, los sistemas convencionales de columnas, vigas, y muros estructurales de acero, hormigón, madera o mampostería aportan rigidez, resistencia y capacidad de deformación en comportamiento elástico, mientras que los nuevos dispositivos permiten cambiar las características dinámicas del sistema aportando comportamientos no obtenibles con los materiales tradicionales como por ejemplo, disipación de energía estable en deformaciones cíclicas de baja magnitud o estabilidad del comportamiento ante deformaciones cíclicas de alta magnitud.

Una clasificación simple de los nuevos sistemas de protección de estructuras sometidas a vibraciones es la siguiente:

- I. Aislamiento sísmico,
- II. Disipadores de energía o amortiguadores,
- III. Sistema activos de reducción de vibraciones

El aislamiento sísmico y los disipadores de energía son métodos de control pasivo en los que se utilizan materiales no convencionales para proveer a la estructura de alta flexibilidad o capacidad de disipación estable. Los sistemas activos y semi-activos utilizan dispositivos controlables en tiempo real mediante una fuente de energía externa, actuadores que controlados con lógicas de retroalimentación producen mejoras en el comportamiento de la estructura sometida a acciones dinámicas.

En países como Japón y Estados Unidos, los métodos de control pasivo son parte de la práctica profesional desde hace algunos años y se cuenta con normas y recomendaciones de diseño para este tipo de estructuras. Si bien los sistemas activos han logrado una treintena de aplicaciones en Japón en el ámbito de la protección de estructuras sometidas a acciones eólicas, éstos están en plena etapa de desarrollo experimental. En particular, los desarrollos más promisorios son los sistemas semi-activos en los que la fuente de potencia requerida para la operación de los actuadores es despreciable respecto de la potencia involucrada en la interacción del actuador y la estructura.

La capacidad de modelización del comportamiento estructural a través de modelos analíticos y la utilización de la simulación computacional han comenzado a

tener un rol activo en el proceso de diseño y verificación del comportamiento estructural ante eventos dinámicos potenciales. El avance de la mecánica computacional ha permitido al ingeniero simular el comportamiento dinámico de distintas alternativas de diseño en tiempos muy reducidos, lo que hace factible la consideración de sistemas de protección de estructuras y nuevas técnicas de diseño alternativos para la estructura en estudio.

Quizás la evolución del diseño de estructuras civiles sometidas a vibraciones siga los pasos del diseño de sistemas de suspensión de automóviles. La diferencia entre los vehículos de comienzo de siglo, sin elásticos ni amortiguadores contrasta con los actuales vehículos que incorporan elásticos de gran capacidad de deformación, amortiguadores que aportan disipación de energía e incluso sofisticados sistemas de amortiguación semiactivos, en los que la resistencia de los amortiguadores a la deformación se adapta en tiempo real para mejorar el desempeño del vehículo o el confort de sus ocupantes.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento vertical de un vehículo circulando en una calzada rugosa son idénticas a las que gobiernan a una estructura civil sometida a cargas sísmicas. Resulta entonces sorprendente que la industria automotriz haya evolucionado en esta dirección hace tantos años y la industria de la construcción recién esté dando sus primeros pasos en esta dirección.

Existen varias causas para explicar estas diferencias. Quizás la respuesta se relacione con la lentitud del desarrollo de la industria de la construcción, a la falta de innovación en esta disciplina, al aislamiento que se ha producido entre los ingenieros civiles, mecánicos y de otras disciplinas desde la creación de carreras muy especializadas, a los bajos incentivos impositivos relacionados al desarrollo tecnológico en la industria de la construcción (con la excepción de Japón) y a la lenta transmisión de experiencia y conocimientos entre investigadores e ingenieros estructuralistas.

¿Qué faltaba hace diez años para que estas nuevas tendencias de diseño fueran mundialmente aceptadas? Dos décadas de investigaciones teóricas y experimentales sobre estos nuevos dispositivos en Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos no lograron lo que treinta segundos sí: los terremotos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995. El buen desempeño de las pocas estructuras con nuevos sistemas de protección sísmica en estos eventos, especialmente en Kobe, ha revolucionado la ingeniería sísmica. El gran número de empresas que en la actualidad producen y comercializan dispositivos de protección para estructuras sometidas a acciones dinámicas es una muestra clara que esta tecnología ha llegado para quedarse.

¿Qué aportan estas nuevas tecnologías que no aporta el diseño sismorresistente convencional? Estos sistemas buscan modificar el comportamiento estructural para satisfacer la ecuación capacidad mayor que demanda reduciendo la demanda. Esto no se logra alterando la excitación (carga dinámica), lo que sería esencialmente imposible; pero sí mejorando el desempeño de nuestro sistema modificando sus propiedades dinámicas de rigidez y amortiguamiento de modo que las vibraciones inducidas por la excitación sean considerablemente menores y en particular, la demanda que genera daño sobre el sistema estructural reducida a su mínima expresión.

A continuación analizaremos de forma conceptual las distintas técnicas para la reducción de vibraciones que hasta hoy han sido utilizadas en estructuras sometidas a temblores o viento en distintos lugares del mundo.

Aislamiento Sísmico

El aislamiento sísmico es una técnica de diseño sismorresistente que consiste en la introducción de elementos de apoyo de alta flexibilidad lateral o baja resistencia lateral, entre la fundación y la superestructura que desacoplan a la estructura del movimiento horizontal que se propaga por el suelo donde ésta se funda. Esta técnica constituye uno de los procedimientos de diseño sismorresistente más promisorios como ha quedado demostrado por vastas investigaciones en la última década y por el buen desempeño de estructuras aisladas sísmicamente durante terremotos recientes.

Aunque existen antecedentes de este concepto de antigua data, esta técnica se ha constituido en una estrategia sismorresistente viable solo en años recientes en los que se han desarrollado dispositivos confiables de aislación sísmica y se han utilizado en construcción nueva o rehabilitación estructural principalmente en Nueva Zelanda, Italia, Japón y Estados Unidos.

Las primeras patentes sobre conceptos incipientes en aislación sísmica datan de 1906 cuando Jacob Bechtold de Alemania solicitó una patente en Estados Unidos para un sistema de protección sísmica para edificaciones que constaba de una losa rígida de base soportada a nivel de fundación por cuerpos esféricos de material suficientemente resistente para sostener verticalmente al edificio pero manteniéndolo libre en la dirección horizontal. Otra patente de carácter similar fue presentada por Robert Wladislas de Montalk en Wellington, Nueva Zelanda en 1929. Los ingenieros estructurales Martel (1929) y Green (1935) propusieron el concepto de piso flexible como una estrategia de diseño estructural: la rigidez lateral del primer nivel del edificio mucho menor que la de los niveles superiores produce una concentración de la deformación en el primer nivel protegiendo de esta manera la estructura superior. El concepto no condujo a diseños satisfactorios debido a que las grandes deformaciones del nivel inferior del edificio requeridas para reducir significativamente las deformaciones en la parte superior del mismo producían efectos negativos en las columnas del nivel inferior que sometidas a cargas axiales de carácter gravitatorio se dañaban. Fintel and Kahn en 1969 intentaron una mejora al concepto de piso flexible mediante la utilización del comportamiento plástico de las columnas del primer nivel para controlar el nivel de deformaciones del piso flexible. Sin embargo, dado que las deformaciones cíclicas dañan las secciones de la columna que sufren comportamiento plástico, la estabilidad estructural se ve comprometida. Estos conceptos semilla no fueron exitosos fundamentalmente porque pretendieron utilizar materiales de alta resistencia mecánica estática pero de baja resistencia a deformaciones cíclicas en el rango plástico como son el hormigón y el acero.

Uno de los primeros edificios en el que se utiliza exitosamente el concepto de primer piso flexible es una escuela primaria en la ciudad de Skopje en Yugoslavia construida en 1969. Bloques de goma natural sin reforzar fueron utilizados en esta estructura bajo cada columna del pórtico de hormigón armado del edificio para producir el efecto de aislación. Otro buen ejemplo de diseño maduro del concepto patentado por Jacob Bechtold es una escuela construida en la ciudad de México en 1974. En este caso, aisladores que constan de dos platos de acero planos separados por una centena de esferas de acero de aproximadamente un centímetro de diámetro se interpusieron entre la fundación arriostrada y la parte inferior de las columnas del primer nivel de la estructura e hormigón reforzado, constituyendo una interfase de baja resistencia que permite desacoplar a la estructura del suelo.

Los antecedentes mencionados constituyen los antecesores de los dispositivos más comunmente utilizados en la actualidad para aislación sísmica: los aisladores elastoméricos y los soportes friccionales.

Cualquiera sea el tipo de aislador utilizado, los principios de funcionamiento de la aislación sísmica son los mismos. Primero, la flexibilización del sistema estructural, alargamiento del período de vibración a un rango entre 1,5 y 3 segundos donde la acción sísmica sobre estructuras fundadas en suelos de dureza media y alta presentan baja agresividad. Y segundo, el aumento del amortiguamiento para lograr una reducción de deformaciones debidas a la sollicitación sísmica. Estos principios generales están subyacentes en todo sistema de aislación sísmica.

La flexibilización o alargamiento del período fundamental de la estructura se logra a través de la introducción de un piso blando entre el suelo de fundación y la superestructura. Intuitivamente podemos entender que si la rigidez lateral de este piso blando es mucho menor que la rigidez lateral de la superestructura, el sistema tenderá a deformarse sólo en la interfase de aislación, transmitiendo bajos esfuerzos cortantes a la superestructura, la que sufre un movimiento de baja frecuencia con deformación ni daño durante la respuesta sísmica.

Entonces, para una estructura con aislación sísmica la notable reducción de esfuerzos y demanda de deformaciones en la superestructura como resultado de la reducción de aceleraciones va acompañada de una demanda significativa de deformaciones sobre el sistema de aislación. La clave del éxito que ha tenido la aislación sísmica está en que esta demanda en la interfase de aislación puede ser resistida en forma estable por los aisladores sísmicos sin daño bajo deformaciones cíclicas laterales que alcanzan típicamente entre 10 y 40 cm.

Desde 1970, la investigación y desarrollo de aisladores de goma natural reforzada iniciada comenzó a dar frutos en Nueva Zelandia para luego trasladarse a Japón, Estados Unidos y Europa. Durante la década de 1980 se construyeron varias decenas de estructuras con distintos tipos de aisladores. Entre éstos podemos citar: aisladores de goma natural reforzada, aisladores con núcleo de plomo, aisladores de goma de alto amortiguamiento, pilas flexibles, sistemas con resortes helicoidales, sistemas friccionales, etc. Sistemas de aislación sísmica han sido utilizado en la construcción de edificios en altura, viviendas, centrales nucleares, estructuras viales, tanques, hospitales y en la rehabilitación de construcciones de interés histórico.

El Hospital de la Universidad del Sur de California construido en la zona metropolitana de Los Angeles como un hospital escuela en 1991 es una estructura de interés especial que analizaremos a continuación por cuanto habiendo sido instrumentada en 1991 con acelerómetros por la división California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP) del Departamento de Geología y Minas del Estado de California, fue sometido al sismo de Northridge en 1994. Los registros de aceleraciones registrados durante el evento constituyen material de enorme valor en la interpretación del comportamiento de este tipo de estructuras en eventos reales.

El edificio del Hospital de la USC tiene 35.000 m² cubiertos en 8 plantas de geometría irregular. La estructura resistente por encima del nivel de aislamiento es un pórtico de acero con arriostramientos diagonales. La base por encima del nivel de los aisladores es una losa continua de hormigón armado de 25 cm de espesor. El sistema de aislación consiste en aisladores de goma natural colocados bajo las columnas interiores del pórtico y en aisladores con núcleo de plomo bajo las columnas de los pórticos exteriores. La estructura pesa aproximadamente unas 23.400 toneladas. El período natural de vibración de la estructura con base fija sería de 0,7 segundos mientras que para la deformación de diseño del sistema de aislación (26 cm) el período efectivo es aproximadamente 2,3 segundos. Los 149 aisladores que constituyen el sistema de aislación tienen una rigidez lateral total de 186 ton/cm, mostrando los aisladores rigideces cercanas a 1 ton/cm. La fuerza lateral de

plastificación de los núcleos de plomo de los aisladores alcanza un 3,2% del peso total de la estructura.

Durante el terremoto de Northridge, las aceleraciones registradas alcanzaron 0,5 g (g =aceleración de la gravedad) en el suelo de fundación y 0,21 g en el nivel superior de la estructura. Las deformaciones máximas de los aisladores en las esquinas de la estructura alcanzaron aproximadamente los 4 cm. El excelente desempeño del edificio y relativamente pequeñas deformaciones del sistema de aislamiento para el nivel de aceleración máxima registrado se debe al contenido de altas frecuencias en las aceleraciones de la fundación producidas por el sismo.

los registros obtenidos por CSMIP constituyen excelente material para probar el nivel de ajuste de modelos comúnmente utilizados para simular computacionalmente la respuesta dinámica de este tipo de estructuras bajo acciones sísmicas. Por este motivo, con el apoyo financiero de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, el autor y el Dr. Ing. Juan Carlos de la Llera de la Pontificia Universidad Católica de Chile realizamos un modelo de la estructura para evaluar el nivel de calidad que las actuales herramientas computacionales y los modelos utilizados para representar el comportamiento dinámico de aisladores. Los resultados obtenidos en 1995 y los obtenidos posteriormente han confirmado la excelente calidad de la predicción obtenible utilizando modelos lineales simples para el comportamiento de la estructura no sólo en la estimación de deformaciones del sistema de aislamiento sino también en la estimación de las aceleraciones en los distintos niveles de la estructura. El modelo permitió además ilustrar la significativa mejora en desempeño de la estructura con aislación sísmica tiene respecto de una estructura tradicional sin sistema de aislación.

Disipadores de energía

La disipación de energía o amortiguamiento cumple un rol fundamental en la respuesta dinámica de estructuras reduciendo la memoria del sistema, evitando de esta manera el crecimiento de la amplitud de la respuesta en el caso de solicitaciones periódicas o de solicitaciones de banda ancha de duraciones significativamente mayores que el período natural de vibración de la estructura. El rol de un sistema de disipación de energía en una estructura de ingeniería civil sometida a viento o sismo, es básicamente idéntico al de un amortiguador en un sistema de suspensión de un automóvil.

El efecto de los amortiguadores es la reducción de deformaciones de la estructura con el objeto de proteger el sistema estructural intentando mantenerlo en el rango elástico donde no sufre daños significativos.

El proceso de disipación de energía se produce bajo deformación cíclica y consecuentemente su efecto en la reducción de amplitud de vibración es significativo en procesos de posible acumulación energética durante varios ciclos de vibración, siendo poco significativo en el caso de una solicitación impulsiva de duración mucho menor que el período de vibración de la estructura.

La disipación de energía es el resultado del trabajo de fuerzas no conservativas desarrolladas durante el proceso de deformación de los elementos de la estructura. Existen muchos ejemplos de la ocurrencia de estas fuerzas en estructuras convencionales: las fuerzas de fricción desarrolladas en uniones, el daño ocurrido en vigas durante un sismo, los deslizamientos de fundaciones, el impacto entre edificios, etc. Sin embargo, estos procesos generalmente están acompañados de un proceso de daño del sistema estructural.

Los sistemas de disipación de energía en cambio son elementos agregados al sistema estructural principal que no participan del esquema resistente a cargas gravitatorias y que son diseñados con materiales especiales, capaces de soportar deformaciones cíclicas disipando energía en pequeñas deformaciones. Los disipadores extraen energía de la estructura vibrante mediante la deformación en rango plástico de metales dúctiles, la extrusión de plomo, la deformación cortante de polímeros viscoelásticos, las pérdidas de energía en fluidos viscosos circulando a través de orificios, la fricción seca entre superficies en contacto bajo presión, etc. En todos estos casos, las fuerzas actuantes en los disipadores realizan trabajo reduciendo la energía vibrante de la estructura.

Es requisito para un dispositivo de disipación de energía que esta disipación ocurra en forma estable (sin degradación) a lo largo de los numerosos ciclos a que debe verse sometido el dispositivo durante su vida útil. La potencial degradación del material como consecuencia del comportamiento cíclico afecta la estabilidad del dispositivo y reduce su capacidad de disipación. Ejemplos de este fenómeno son la fatiga de metales sometidos a ciclos de altos niveles de deformación específica, el desgaste de superficies friccionales y el aumento de temperatura en polímeros que produce un ablandamiento del material y una reducción en la capacidad de disipación de energía.

Para realizar su función adecuadamente, los disipadores requieren ser sometidos a deformación. Por esta razón se instalan en las estructuras mediante soportes de alta rigidez conectados a puntos de la estructura que tienen movimiento relativo durante el proceso de vibración. Por ejemplo, entre niveles consecutivos de un edificio, entre el primer nivel y la fundación, entre estructuras contiguas o entre la pila de un puente atirantado y el tablero del puente.

Los amortiguadores no están limitados a configuraciones estructurales con marcos arriostrados, y es posible concebir un gran número de otras disposiciones para otros esquemas y disposiciones estructurales como muros de corte, dinteles, uniones viga-columna, entre otros. El efecto logrado es la reducción de deformaciones de la estructura con el objeto de proteger el sistema estructural manteniéndolo en el rango elástico donde no sufre daños significativos.

Distintos tipos de disipadores han sido propuestos, probados experimentalmente e instalados en estructuras civiles. Dentro de este amplio conjunto se destacan:

(1) Disipadores metálicos de acero dulce como los sistemas ADAS, TADAS, Honeycomb. Estos disipadores pueden ser configurados para trabajar unidireccionalmente o bidireccionalmente.

(2) Amortiguadores friccionales como el sistema Pall, el amortiguador friccional de la corporación Simutomo, el disipador EDR de Fluor Daniel.

(3) Disipadores Viscoelásticos que utilizan polímeros acrílicos en deformación de corte como los producidos por la Corporación 3M.

(4) Disipadores de Fluidos Viscosos que utilizan siliconas y otros fluidos viscosos sometidos a flujos laminares o turbulentos. Empresas como Taylor Devices, Gerb, Enidine, FIP son algunas de las que producen disipadores viscosos.

(5) Amortiguadores de masa sintonizada (AMS). Estos dispositivos consisten básicamente en un elemento inercial (masa) conectado a la estructura principal mediante un dispositivo elástico y un amortiguador. La sintonización adecuada de los parámetros del amortiguador de masa produce una amplificación dinámica significativa del movimiento de la masa respecto del movimiento del punto de soporte del

amortiguador inercial a la estructura, produciendo un efecto de absorción de energía muy efectivo en estructuras sometidas a acciones eólicas.

Los amortiguadores han sido utilizados en construcción nueva y rehabilitación estructural. La aplicación más común de los disipadores friccionales es en estructuras sometidas a sismos, mientras que las aplicaciones más comunes de disipadores viscoelásticos y los AMS son en estructuras sometidas a acciones de viento.

Disipadores Viscoelásticos

Los dispositivos viscoelásticos han demostrado ser capaces de reducir las vibraciones inducidas por viento en aplicaciones desarrolladas hace ya treinta años. Por ejemplo, amortiguadores viscoelásticos fueron diseñados como parte del proyecto original de la torres gemelas (Twin Towers) del World Trade Center en Manhattan, Nueva York. Los amortiguadores viscoelásticos fueron añadidos para ayudar al marco tubular de acero principal limitar las oscilaciones debidas al viento a valores imperceptibles por los usuarios de las torres. Cada torre tiene instalados 10.000 amortiguadores distribuidos entre los pisos 10 y 110, ubicados en la intersección del cordón inferior de los reticulados horizontales y las columnas de los muros exteriores. El proyecto data de 1969, y los amortiguadores han sido monitoreados estructuralmente en forma continua.

Los amortiguadores viscoelásticos pueden ser también utilizados en forma efectiva en la reducción de las vibraciones inducidas por sismos en estructuras. Un ejemplo interesante es el edificio del condado de Santa Clara en San José California que, habiendo sufrido un proceso vibratorio intenso pero sin daño durante el terremoto de Loma Prieta en 1989, fue reforzado incorporando disipadores de polímero acrílico en 1993 para aumentar su amortiguamiento. Construido en 1976, este edificio tiene una estructura de pórtico de acero de 13 pisos con una altura total 64 metros y con una planta aproximadamente cuadrada de 51 m de lado. En dos de sus caras posee un muro cortina exterior y en las otras dos una fachada metálica que no contribuyen a la rigidez lateral de la estructura. Previo a la refuerzo estructural, el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente en su modo fundamental era menor que un 1% y sus períodos propios fundamentales se ubicaban entre los 2 y los 2,4 segundos.

El edificio se encontraba instrumentado con acelerómetros durante el sismo de Loma Prieta y mostró un comportamiento dinámico con un bajo nivel de disipación de energía evidenciado por su vibración perceptible hasta tres minutos después de terminado el terremoto de sólo 15 segundos de duración. Mientras que la máxima aceleración registrada en la fundación de la estructura durante el sismo de Loma Prieta fue de 0,11g, los registros obtenidos por los instrumentos ubicados en el ala este del edificio alcanzaron 0,36 g. Esto determinó daños en algunos elementos no estructurales y contenidos del edificio como así también un impacto psicológico en los ocupantes del edificio que tuvieron que soportar casi tres minutos de vibración en la estructura con altos niveles de aceleración.

El mejoramiento estructural del edificio durante 1993 consideró la posibilidad de incorporar disipadores metálicos, friccionales, o viscoelásticos. Se eligieron los disipadores viscoelásticos debido a que ellos proveen un amortiguamiento significativo para movimientos de baja amplitud frecuentes en la zona. El diseño final consistió en la instalación de dos amortiguadores por piso en cada cara del edificio lo que resultó en un aumento del amortiguamiento equivalente del primer modo cercano a un 15% del crítico. Los disipadores fueron materializados en arriostramientos concéntricos compuestos de perfiles tubulares de sección cuadrada y cuatro perfiles perimetrales tipo canal a los cuales se soldaron bloques de polímero acrílico.

El comportamiento mecánico de los materiales viscoelásticos es dependiente de la frecuencia de excitación, la temperatura de operación, y el nivel de deformación del

Sistema semi-activos de reducción de vibraciones

La teoría de sistemas de control ha sido aplicada en el desarrollo de tecnología en áreas como la electricidad, la electrónica y la mecánica desde comienzos del siglo XX. Los primeros conceptos de la utilización de la teoría de control en el ámbito de la ingeniería estructural data de la década de 1960, cuando Fresinet y Zetlin propusieron la utilización de tendones o cables activos para controlar las vibraciones de edificios en altura.

En Japón, Kobori y Minai concibieron la idea de estructuras inteligentes, capaces de adaptarse en tiempo real mediante actuadores durante excitaciones dinámicas severas. Desde la década de 1970, la actividad de investigación teórica en esta disciplina cautivó a un número significativo de investigadores. Recién durante la última década la investigación teórica y experimental en esta tecnología ha dado sus primeros frutos: treinta estructuras construidas con sistemas activos de control de vibraciones para reducción de vibraciones debidas al viento en Japón. Estos sistemas son fundamentalmente amortiguadores inerciales que utilizan actuadores hidráulicos o electromecánicos que controlados en tiempo real mediante retroalimentación de variables de estado del sistema vibrante, mejoran el desempeño de la estructura.

La primera estructura construida con un amortiguadores de masa activo es el edificio Kyobashi Seiwa en Tokio, un edificio de 13 plantas en cuyo nivel superior se instalaron dos amortiguadores inerciales activos controlados mediante un sistema computarizado que utilizando información registrada en tiempo real por acelerómetros ubicados en la estructura, define las fuerzas de interacción óptimas a ser aplicadas por los actuadores hidráulicos que conectan la estructura a las masas auxiliares de cada dispositivo. El sistema ha demostrado un desempeño satisfactorio en la reducción de vibraciones debidas a viento desde su construcción en 1989.

Las técnicas de control semi-activo tienen como precursores a Karnopp quien en 1974 propuso la utilización de disipadores viscosos con orificios variables como actuadores y a Kobori quien en 1988 propuso la utilización de sistemas de bloqueo de arriostramientos diagonales en estructuras para hacer variar en tiempo real la rigidez de estructuras sometidas a vibraciones.

Entre las aplicaciones de control activo para estructuras sometidas a acciones dinámicas de alta intensidad como los sismos, los disipadores viscosos con orificios de sección variable y los disipadores de fluido magnetoreológico son los dispositivos que presentan características más promisorias por cuanto requieren una fuente externa de potencia prácticamente despreciable (del orden de una decenas de vatios para su funcionamiento) y brindan la posibilidad de controlar fuerzas disipativas del orden de decenas de toneladas mediante técnicas de control automático. Recientemente se han construido en Japón dos estructuras que incorporan este tipo de dispositivos. La investigación sobre estrategias de control de este tipo de dispositivos se plantea como un área muy promisoría para los próximos años. Los conceptos de modulación en amplitud y frecuencia de la capacidad de disipación de energía en sistemas semi-activos son ejemplos de las posibilidades que los actuadores de fluido magnetoreológico brindan.

Comentarios finales

Durante las últimas dos décadas, la ingeniería civil ha logrado despegar en la utilización de nuevos materiales y nuevas técnicas de diseño de estructuras sometidas a acciones dinámicas. El aislamiento sísmico, los disipadores de energía y los

sistemas semi-activos de reducción de vibraciones son tecnologías que se incorporarán a la práctica profesional en todo el mundo en la próxima década. En este sentido, Argentina tiene un desafío por delante.

La utilización de nuevos materiales, nuevas configuraciones estructurales y nuevos dispositivos de reducción de vibraciones requerirá de un cambio significativo en la visión del problema dinámico de las estructuras. La concepción sistémica de la estructura, sus componentes y materiales cumplirá un rol fundamental en el proceso de diseño estructural y sus sistemas de protección, no como agregados al sistema principal sino como parte integral del mismo, un diseño conjunto del sistema estructural principal y de los elementos de protección con funcionalidades y desempeños asignados a cada componente. Las herramientas que hoy dispone la mecánica computacional permiten predecir el comportamiento dinámico de estructuras con sistemas de protección ante una diversidad de escenarios. Esto a su vez hace resaltar la necesidad de un trabajo detallado en la caracterización de las acciones dinámicas, ya que sin estos modelos de la excitación, la predictibilidad del comportamiento y el diseño basado en desempeño esperado pierden valor.

La aplicación de técnicas de protección de estructuras requerirá en Argentina la consideración de las mismas en el plano de las normativas que regulan la construcción de edificaciones en zonas sísmicas, la disponibilidad de centros de experimentación para pruebas dinámicas de verificación de componentes y la difusión y capacitación de los ingenieros estructurales en aspectos relacionados con el comportamiento dinámico de estructuras que incorporan sistemas de reducción de vibraciones.

Los avances logrados a la fecha en modelización, control de vibraciones y métodos de diseño serán sometidos a las pruebas que significarán los próximos eventos sísmicos en el mundo que pondrán en evidencia las ventajas y falencias de las nuevas técnicas de diseño y construcción. Nuestra tarea será seguir evaluando y mejorando los sistemas estructurales para brindar al mundo estructuras más seguras y confortables.

Referencias

- Aiken, I. y Clark, P., "Energy dissipation systems enhance seismic performance", Structural Engineering Forum, Octubre 1994.
- De la Llera, J.C. e Inaudi, J.A., "Evaluating the earthquake performance of base isolated buildings using recorded motions", International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Santiago, Chile, Agosto 21-23, 1995.
- Esteva, L., Algunos Retos de la Ingeniería Sísmica Moderna, Academia Nacional de Ingeniería, Buenos Aires, Argentina, 1998.
- Fujino, Y., et al., "Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures", Journal Engineering Mechanics, Vol 118, N° 10, 1992.
- Higashino, M. Y Aizawa, S., "The application of active mass damper system in actual buildings", International Workshop on Structural Control, Hawaii, 82-93, 1993.
- Inaudi, J.A., Zambrano, A. y Kelly, J.M., "On the analysis of structures with viscoelastic dampers", Report No. UCB/EERC-93/06, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Agosto 1993.
- Inaudi, J.A., Nims, D.K., y Kelly, J.M., "On the analysis of structures with energy dissipating restraints", Report No. UCB-EERC-93/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Diciembre 1993.
- Inaudi, J.A., "Modulated homogeneous friction: a semi-active damping strategy", , Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 361-376, 1997.

- Inaudi, J.A., "Performance of Variable-Damping Systems: Theoretical Analysis and Simulation", Proc. Third International Workshop on Structural Control, Intern. Association for Structural Control, Paris, Julio 2000.
- Kareem, A. et al., "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications", Wind & Structures, Vol. 2, No 2, 1999.
- Kelly, J.M., Earthquake Resistant Design with Rubber, Springer Verlag, 1992.
- Kobori et al., Device and method for protecting a building against earthquake tremors, U.S. Patent 4,922,667, 1990.
- Dyke S. J., and Spencer, B.F., Proc. Intelligent Information Systems, pp. 580-584, H. Adeli, editor, IEEE Computer Society, Los Alamitos, California, 1997.
- N. Kurata et al, Earthq. Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, 629-645, 2000.
- Yang, G., Ramallo, J.C., Spencer, B.F., Proc. 14th ASCE Conf. Eng. Mechanics, Austin, TX, 2000.
- Hayen J.C. y Iwan, W.D., Proc. First World Conference on Structural Control, Vol. 1, pp. WA2-23-WA2-32, 1994.
- Inaudi, J.A., y Hayen, J.C., Proc. Post Smirt Seminar on Seismic isolation, Passive Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Santiago, Chile, 1995.
- Kurino H., y Kobori, T., Proc. 2 Worl Conf. Str. Control, Vol. 1, pp. 407-416, 1999.
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., McVerry, G. H., An introduction to seismic isolation, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., and New York, 1993.
- Soong, T. T., Masri, S. F., Housner, G. W., An overview of active structural control under seismic loads, Earthquake Spectra, vol. 7, No 3, Agosto 1991.
- Taylor, D.P. y Constantinou, M.C., Fluid dampers for applications of seismic energy dissipation and seismic isolation", Publication of Taylor Devices, Inc., 1996.
- Zayas, V. A., Low, S. S., y Mahin, S. A., A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, Earthquake Spectra, vol. 6, No 2, Mayo 1990.