

# Propuesta de un programa de mejoramiento de resiliencia para una ciudad tipo en la Península de Yucatán

Domínguez Norberto<sup>1</sup> y Ibrahimbegovic Adnan<sup>2</sup>

*Fecha de recepción: 24 de junio de 2013 - Fecha de aprobación: 27 de noviembre de 2013*

## RESUMEN

¿Qué es *resiliencia*? ¿Qué papel juega la ingeniería estructural en la redefinición de tal término? ¿Por qué es importante emigrar a este nuevo paradigma? ¿Y por qué es de vital importancia incorporar estos conceptos en un *programa de mejoramiento de resiliencia* para las zonas urbanas de la península de Yucatán? El presente artículo tiene por vocación explicar dicho concepto abordando la importancia que tiene para la ingeniería estructural redefinir sus procesos de análisis y diseño, adecuándolos a esta nueva visión integrada de ingeniería-gobierno-comunidad cuyo fin es la recuperación de la vida ordinaria de una región urbana luego de haber sido sometida a un evento extremo. Asimismo, se propone de forma general, la construcción de un Programa de Mejoramiento de la Resiliencia que podría ser adoptado en alguna ciudad de mediana escala ubicada en la Península de Yucatán con altas probabilidades de ser afectada por un huracán o evento extremo similar.

**Palabras clave:** Resiliencia, huracanes, programa regional de mejoramiento, condiciones extremas, análisis no lineal.

## Proposal of a resilience improvement program for a pilot-region in the Yucatan Peninsula

### ABSTRACT

What is *resilience*? What is the role of structural engineering in the resilience's definition? Why is so important to emigrate to this new paradigm? And why is a vital question to proceed by including these concepts into a regional *Resilience Improvement Program* for the Yucatan Peninsula? The aim of this work is to explain the concept of resilience and how it interacts with structural engineering redefining their methods of analysis and design, in order to facilitate the rebound of a region that is affected by an extreme event. Based on the integration of engineering-government-community, the construction of a Resilience Improvement Program for an urban region placed in Yucatan Peninsula is also proposed in this paper.

**Key words:** Resilience, hurricanes, resilience improvement program, extreme conditions, non linear analysis

---

<sup>1</sup> Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), ESIA-UZ Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Bátiz s/n edif. 12, 07738 México D.F., México. Correo electrónico: ndominguez@ipn.mx

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT), ENS-Cachan/UPMC/CNRS/PRES Univer Sud Paris, 61 Avenue du Président Wilson, F-94230 Cachan, Francia. Correo electrónico: ai@lmt.ens-cachan.fr

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2014. Este artículo de divulgación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 3, 2013, ISSN 1665-529-X.

## I. INTRODUCCIÓN

En 2005, múltiples poblaciones de diferentes países ubicadas en torno al Golfo de México, sufrieron el impacto de la más activa temporada de huracanes en el Atlántico de la cual se tenga registro en la historia reciente (NOAA, 2006): en el periodo comprendido entre el 1° de junio y el 30 de noviembre, se produjo el mayor número tanto de tormentas tropicales (28 eventos) como de huracanes (14 eventos), de los cuales cuatro alcanzaron la categoría 5 en la escala Saffir-Simpson, destacando desgraciadamente el huracán Wilma—considerado el más intenso de la historia: 882 hPa de presión— y el huracán Katrina—considerado uno de los más desastrosos en términos económicos. En términos generales, se registró una pérdida récord de más de 100 mil millones de dólares en daños materiales, y por lo menos 2,048 personas perdieron la vida. México fue azotado tres veces por huracanes de intensidad mayor (categoría 3 ó más en la escala Saffir-Simpson), y los estados de Florida y Luisiana de los Estados Unidos de América fueron azotados dos veces cada uno por este tipo de huracanes. Wilma fue particularmente catastrófico para la región del sureste mexicano (Tun *et al.*, 2012) al convertirse en huracán de categoría 5 con vientos máximos de 295 km/h (ver figura 1).

Katrina, por su parte, es considerado uno de los cinco huracanes más mortales en la historia de los Estados Unidos, con al menos 1,836 decesos como consecuencia de las inundaciones provocadas por el colapso del sistema de diques en Luisiana: el 80% de la ciudad de Nueva Orleans se inundó, permaneciendo así durante varias semanas. Asimismo, los peores daños a la infraestructura se produjeron en las zonas costeras, cuando barcos y barcazas desplazándose libremente chocaron contra edificios del casino,

empujando carros y casas hacia el interior, con aguas que llegaron más allá de 10 km de la playa. Los daños a la propiedad total se estimaron en \$ 81 mil millones de dólares (ver figura 2).

Sin embargo, estas catástrofes no son nuevas. En 1988, la depresión tropical Gilberto se intensificó hasta transformarse en un huracán de categoría 3, tocando tierra en Jamaica y cruzando completamente la isla con vientos de hasta 240 km/h, ya como categoría 4.

### Definición de Resiliencia

La descripción de los eventos mencionados pareciera no tener una conexión directa con la ingeniería estructural, ya que prevalece la idea de que la gestión de las acciones ante una catástrofe es responsabilidad única y exclusiva de los gobiernos apoyados por las fuerzas armadas, en el marco de un plan de emergencia. Sin embargo, es innegable que en el contexto de globalización actual, las nuevas tecnologías (*e-technologies*) están transformando de manera vertiginosa las relaciones entre los individuos a nivel mundial y creando una sociedad tecnológicamente moderna y sin fronteras, que al tener mayor acceso a la información está volviéndose más exigente respecto a la respuesta de los gobiernos ante estas catástrofes. Un ejemplo de esto son los resultados de las encuestas de opinión aplicadas en Japón, que permiten apreciar que la mayoría considera que después de un evento extremo, el gobierno debería haber recuperado el control en un lapso de entre dos y tres días. Por otra parte, estas mismas encuestas muestran la importancia que el estado de ciertas estructuras (en este caso, los puentes) tienen para la opinión pública (ver figura 3).

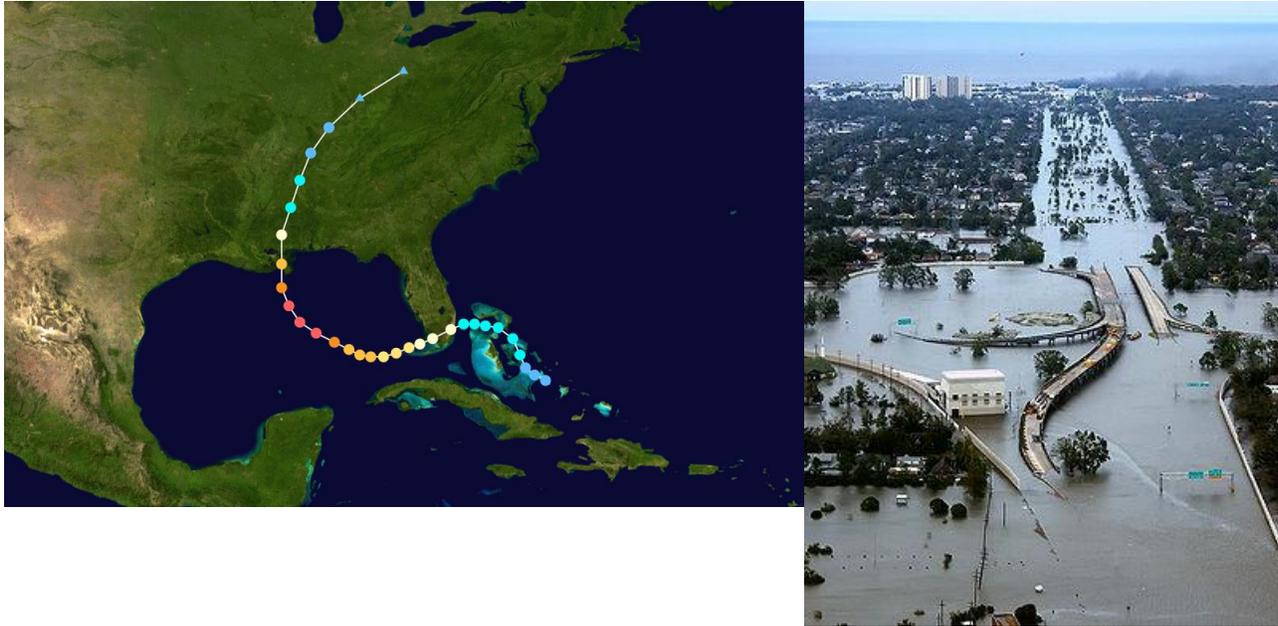


(a) Fotografía satelital



(b) Daños en edificaciones de la región yucateca

**Figura 1.** El huracán Wilma y sus efectos en la península de Yucatán.



(a) Trayectoria seguida por el huracán Katrina

(b) Inundaciones y estancamientos en Luisiana, EEUU

Figura 2. El huracán Katrina y sus efectos en América del Norte

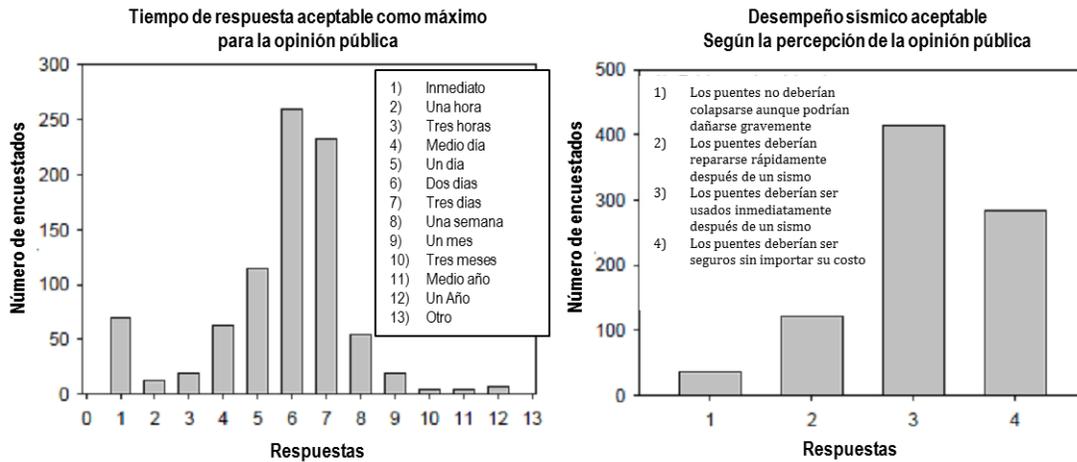


Figura 3. Encuestas de opinión pública en Japón respecto a la respuesta gubernamental después de un evento extremo (Reinhorn y Cimellaro, 2014)

Esto es, sin duda, resultado de la sorprendente facilidad que hoy se tiene para transferir imágenes y datos a través de una amplia variedad de tecnologías en todo el mundo. Por otra parte, esta acelerada transformación de ciudades “aisladas” a complejos sistemas urbanos aumenta drásticamente su fragilidad y vulnerabilidad ante riesgos naturales o amenazas humanas. Un ejemplo relativamente reciente que muestra la magnitud que un desastre puede tener cuando varios eventos extremos se encadenan, es el terremoto de Tohoku en Japón en 2011, el cual reveló

las importantes debilidades de los correspondientes sistemas urbanos y su respectiva infraestructura. Precisamente en este último caso, el cúmulo de situaciones no previstas o que no se consideraron posibles por su baja probabilidad, alcanzaron su punto más alto con el colapso de la Central Nuclear de Fukushima, razón que ha llevado a los grupos internacionales de investigación a revisar no solamente los criterios de análisis y diseño adoptados hasta la fecha, sino que han obligado principalmente a reflexionar sobre las filosofías actuales que imperan

en los diseños convencionales de ingeniería.

A partir de las evidencias y del análisis de los fallos ocurridos, se ha observado que cada desastre de este tipo puede producir serias consecuencias tanto económicas como políticas, en los casos en que:

- a) *algunos componentes críticos de la infraestructura de una región afectada estén parcialmente dañados o en completo colapso; y*
- b) *la capacidad social de recuperación no esté lista para activarse de cara a un riesgo natural extremo.*

La capacidad de manejar las consecuencias negativas y la habilidad para recuperarse de la pérdida de funcionalidad son actualmente referidas en un solo término conocido como **resiliencia** (Reinhorn y Cimellaro, 2014). En el contexto de la Mecánica, la resiliencia se refiere a la capacidad que tiene un sistema deformado para recuperar su configuración inicial luego de haber estado sometido a una combinación particular de solicitaciones. Esta recuperación puede ser total si no se rebasó el límite elástico –y si no se activaron procesos de disipación viscosa–, o parcial en caso contrario—es decir, si la estructura incurrió en el intervalo no lineal. En un contexto económico y social, la resiliencia se entiende como la capacidad de organización de una comunidad para prevenir, actuar, y resarcirse de un evento catastrófico y poner nuevamente en marcha los procesos sociales y económicos que estaba llevando a cabo, en el menor tiempo posible. La resiliencia es, en los términos actuales, la clave para cuantificar el desempeño de la ingeniería ante eventos extremos para sistemas complejos, aportando un marco mucho más amplio que el actualmente empleado, enfocado exclusivamente al diseño de los elementos del sistema basándose en su desempeño estructural (*Performance-Based Design*). En otras palabras, la resiliencia concierne no solo a ingenieros sino a todos los actores sociales (políticos, investigadores, administradores, funcionarios, trabajadores, sociedad civil, etc.) antes, durante y después de que cualquier evento de alto riesgo ocurra.

Desde el punto de vista de la ingeniería civil-estructural, la resiliencia se refiere no solamente a la seguridad de estructuras convencionales (edificios, hospitales, etc.) respecto a riesgos naturales tales como los huracanes, sino también a la seguridad de infraestructura convencional y no convencional. En otras palabras, el área urbana completa debe ser tratada como un sistema complejo, en donde su buen funcionamiento depende de garantizar la seguridad y

desempeño de cada uno de los componentes de sistema. Por lo tanto, en un sistema basado en resiliencia, la infraestructura cumple un rol tan importante como vigilar la seguridad de las estructuras.

## **II. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL DISEÑO BASADO EN RESILIENCIA**

El **Diseño Basado en Resiliencia (DBR)** introduce un cambio de paradigma en relación a la forma en cómo prevenir, actuar y reaccionar ante desastres naturales, en donde el complejo sistema urbano es considerado en su totalidad al momento de diseñar un componente particular del sistema, intentando garantizar tanto el nivel deseado de seguridad como el grado de operatividad una vez que el desastre ya ha ocurrido. Este cambio de paradigma abarca igualmente la magnificación del riesgo ante una superposición de diferentes casos de carga (huracanes, terremoto, explosiones, incendios, inundaciones, etc.) actuando de manera combinada. De acuerdo a Reinhorn y Cimellaro (2014), el **DBR** es, en cierto sentido, una evolución del método de **Diseño Basado en Desempeño** (*Performance-Based Design*, PBD), en el cual el objetivo es asegurar la permanencia de la estructura con el fin de salvaguardar vidas humanas, lo que se consigue a través de un proceso iterativo de ajustes y reajustes que busca balancear la relación entre solicitaciones y resistencias inherentes al sistema. En el **DBR**, la concepción de las estructuras no se hace de manera aislada, sino como parte de un sistema comunitario en el que ingenieros, gobierno y comunidad están integrados, y cada edificación, instalación o medio de comunicación y transporte tiene asignado un nivel específico de seguridad estructural relacionado con la importancia que su funcionalidad tiene para reducir el tiempo de recuperación de la comunidad afectada por uno o varios eventos extremos. En esta filosofía de diseño, el objetivo primordial es hacer que las comunidades incrementen su nivel de resiliencia desarrollando tecnologías, planes y acciones que permitan que los tres agentes (ingenieros-gobierno-comunidad) estén entrenados para actuar en conjunto antes, durante y después del evento catastrófico en el marco de un plan evolutivo de gestión de desastres, mejor conocido como **Programa de Mejoramiento de la Resiliencia (PMR)**. Los alcances de dicho programa involucran no solamente asegurar el buen desempeño de un conjunto de estructuras interrelacionadas –a diferencia del PBD, que se enfoca únicamente a *la estructura*–, sino además identificar y jerarquizar el nivel de importancia que puede tener cada conjunto de estructuras, y aplicar criterios de diseño diferentes según su orden de importancia. Para clarificar lo anterior, citemos dos

casos recientes. En 2009 el terremoto *L'Aquila* destruyó completamente la pequeña ciudad de *Castelnuovo*, en Italia, quedando solamente en pie una unidad eléctrica que, a pesar de su buen desempeño estructural, no fue de gran ayuda para la reactivación de la ciudad después del terremoto, al estar completamente aislada de otros componentes de infraestructura (máquinas de bombeo). El segundo caso es más cercano a México y ocurrió en Cancún, en donde se cuenta con la principal –y única– central de autobuses de la región, la cual fue diseñada para resistir las elevadas cargas de viento inducidas por un huracán. Efectivamente, 24 horas después del paso del huracán “*Karl*” en 2010, la estructura de la terminal de autobuses fue revisada por los ingenieros sin detectarse daño alguno; sin embargo, ningún autobús pudo circular al corto ni a mediano plazo, debido a que un gran número de puentes así como tramos largos de carreteras de la región se colapsaron, manteniendo a la ciudad de Cancún aislada por más de dos semanas. De lo anterior puede deducirse que, en primera instancia, en el **Diseño Basado en Resiliencia** debe identificarse y asegurarse la estructura de mayor jerarquía (un hospital, por ejemplo) pero de igual modo la infraestructura que asegure su funcionalidad (unidades eléctricas, agua potable, alcantarillado), así como la que permite que preste servicio (vías de comunicación terrestre, puentes) a la comunidad. En segunda instancia, también implica una discriminación/selección en cuanto a la aplicación de los requisitos de diseño estructural: en el **DBR**, en el caso de tener cinco hospitales en una región dada, al menos uno de ellos debe seleccionarse para que cumpla con estándares de seguridad mucho más elevados o que esté diseñado con criterios de seguridad estructural diferentes a los otros, en caso de un colapso simultáneo. La metodología completa para el análisis y diseño estructural de infraestructura de acuerdo al **DBR** se entiende como una extensión del actual *Diseño Basado en Desempeño*, y contempla lo siguiente:

- 1) Identificación, revisión y monitoreo de los componentes críticos del sistema urbano;
- 2) Incorporación de modelos no lineales de comportamiento material y geométrico para estructuras de ingeniería civil;
- 3) Concatenación de metodologías de análisis dinámico, estocásticas y de no linealidad;
- 4) Adopción de estrategias computacionales multi-escalas (MICRO-MACRO-MEGA);
- 5) Interpretación confiable de los mecanismos de daño a las escalas Micro-Macro;
- 6) Análisis multi-riesgos del evento extremo (huracán) en combinación con otras situaciones extremas simultáneas o

posteriores (inundaciones, explosiones, incendios, etc.)

En la siguiente sección se analiza de manera breve el conjunto de los puntos anteriores, con el fin de identificar las mejoras que deben hacerse en lo que concierne a las prácticas de análisis y diseño empleadas actualmente en ingeniería.

### **III. REDEFINICION DE LOS ALCANCES DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA RESILIENCIA**

La ingeniería estructural tiene por cometido primordial procurar sistemas estructurales eficientes que respondan bien ante un conjunto de solicitaciones ordinarias y extraordinarias, apoyándose para ello en el amplio conocimiento de los materiales y sistemas implicados así como de los fenómenos físicos a los que están siendo sujetos dichos sistemas, y en el empleo de herramientas y recursos, experimentales y/o computacionales, para predecir y evaluar posibles comportamientos ante escenarios convencionales o adversos (Wilson, 2007). En cualquier caso, los productos así generados deben cumplir al mismo tiempo con una serie de requisitos asociados a la funcionalidad, la seguridad, la economía, la durabilidad y la estética. Ahora bien, al encarar a un mundo caótico y pleno de incertidumbres, debe reconocerse que todos estos esfuerzos se han llevado a cabo con el único fin de alcanzar un cierto nivel de seguridad, aceptable para la conciencia humana, lo que incluye la capacidad para prevenir accidentes, preparar eventualidades y cuantificar los riesgos asociados a la construcción de nuevos centros de producción y áreas urbanas en donde los riesgos naturales extremos pueden tener efectos devastadores.

A raíz de los acontecimientos ocurridos en Japón en 2011, que dejaron pérdidas por \$319 billones de dólares por daños directos y alrededor de \$619 billones de dólares en costos por recuperación y otras pérdidas indirectas, se inició a nivel internacional una revisión de las metodologías de análisis y diseño empleadas en la actualidad por los ingenieros estructurales de prácticamente todo el mundo (Fischinger y Stojadinovic, 2014), llegándose a la siguiente conclusión: en comparación con los antiguos eventos extremos en los cuales la gravedad del desastre era medido sólo en términos de pérdidas humanas, las pérdidas económicas de las últimas catástrofes indican que los ingenieros civiles deben lidiar no solo con el hecho de preservar la vida humana –lo que inspiró el **Diseño Basado en Desempeño**– sino también desde ahora, con la capacidad de reducir cualquier tiempo muerto después de la ocurrencia de un evento extremo. La evaluación

de las potencialidades que se tienen actualmente en términos de cómputo y tecnología permite aseverar que los actuales métodos de análisis y diseño de estructuras deben enriquecerse a través del desarrollo de modelos numéricos a una escala más fina, con el objeto de aportar la interpretación más confiable de los mecanismos inelásticos de daño colocándolos como origen de la disipación de energía, y así proporcionar mucho mejores estimaciones sobre el daño potencial de una estructura, la infraestructura y otros componentes del sistema. En otras palabras, para evaluar correctamente la respuesta no lineal de un sistema estructural a la escala global es preciso puntualizar que ésta es debida a los efectos del comportamiento no lineal de uno o de un conjunto de componentes de la estructura, *e. g.*, el pandeo local de contravientos, el contacto entre diferentes partes de la estructura, la falla de algunos elementos e incluso el levantamiento/volteo de una cimentación. A pesar de ello, los métodos de diseño recomendados en la gran mayoría de los reglamentos de construcción existentes (Fajfar, 2007) sólo consideran un comportamiento elástico lineal sin proveer ninguna información sobre la resistencia real, la ductilidad y la disipación de energía, los cuales son muy importantes para la evaluación del estado real de cualquier componente de infraestructura y predecir su capacidad de carga restante. En contraste con el aparente “anacronismo” de los reglamentos y de las prácticas vigentes de diseño, existen grupos de investigación en mecánica experimental y computacional que se han enfocado a estudiar el daño inducido por cada tipo de riesgo, que podrían agruparse en las líneas de investigación que abordan:

- Aspectos de comportamiento no lineal, dirigidos al desarrollo de modelos no lineales de comportamiento material para concreto, acero, madera, etc., combinados con diversas técnicas de elementos finitos.
- Aspectos de cálculos computacionales en paralelo, que permiten modelar, analizar y acoplar tanto métodos de resolución para problemas multi-físicos, como la transferencia de efectos multi-escala.
- Aspectos relacionados con el oleaje (Tsunamis en particular), que incluyen diferentes técnicas computacionales para la simulación de la interacción fluido-estructura.
- Aspectos relacionados con incendios y explosiones, que incluyen la degradación de los parámetros materiales y sus efectos en la estabilidad estructural.

El reciente trabajo de Ibrahimbegovic *et al.* (2014) es

una contribución mayor en el campo de la dinámica estructural que muestra la posibilidad de incluir el daño no lineal en tamaño meso-escalar, transfiriendo sus efectos a la macro-escala. Para todos los diferentes casos de riesgo, el común denominador es el daño, el cual es una compleja combinación de diferentes fenómenos no lineales. El gran reto es incluir una descripción realista micro-escalar de los efectos locales en un análisis dinámico macro-escalar, el cual actualmente se realiza considerando un comportamiento elástico en todo el sistema asociado a otras hipótesis simplificadoras. La reducción y un mejor control del daño son otros puntos importantes que deben ser enriquecidos si una predicción más refinada de la respuesta estructural o una rehabilitación específica deben realizarse para un componente estructural en particular. Estos aspectos ingenieriles sobre la operatividad posterior a los eventos extremos están siendo discutidos actualmente, lo que abarca tanto estudiar las ventajas de incorporar sistemas de aislamiento o de flotación en los edificios con el fin de incrementar su resiliencia proveyendo de una rápida y objetiva reparación (Mahin, 2012), como el remplazar las articulaciones de acero en los soportes de los puentes por elastómeros, lo que puede ayudar a reducir o evitar el daño en dichos puentes (Kawashima *et al.*, 2014).

Siendo objetivos, es prácticamente imposible evaluar la completa interrelación de todos los componentes de la infraestructura de un área urbana moderna, aún si ésta es pequeña, debido a la inherente complejidad de cada componente y su respectiva interconectividad; por otra parte, el nivel actual de conocimientos en mecánica no lineal por parte de la comunidad ingenieril es gravemente bajo, y la dificultad aumenta ante la evidente complejidad que implica introducir dichos conceptos en los métodos de análisis actuales.

Sin embargo, esto no significa que no puedan llevarse a cabo ciertas acciones inmediatas para subsanar las desventajas previas: en relación a la interacción urbana, se puede considerar a las áreas urbanas – basándose en algunas ideas de optimización desarrolladas en el campo de la aeronáutica– como sistemas funcionales complejos e identificar y analizar los componentes más críticos que por su importancia en el sistema, garanticen la resiliencia del conjunto (Togashi *et al.*, 2005). Respecto al aprendizaje de la Mecánica no lineal y a su introducción en los procedimientos de análisis, la creación de redes entre instituciones universitarias y de investigación, el intercambio de expertos nacionales e internacionales, la participación en foros de divulgación, y la distribución on-line de ejemplos de análisis no lineal aplicados a problemas

convencionales puede favorecer a mediano plazo la incorporación de estos procedimientos entre la comunidad ingenieril.

#### **IV. DESCRIPCIÓN DE UN PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE RESILIENCIA PARA UNA CIUDAD TIPO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**

Tomando en cuenta las reflexiones presentadas previamente y basándose en un trabajo científico interdisciplinario, cinco acciones inmediatas pueden emprenderse para la construcción y desarrollo de un programa piloto de resiliencia para alguna región urbana (como pueden ser las ciudades de Cancún, Playa del Carmen o Mérida) ubicada en la Península de Yucatán:

1) En primer término, iniciar el desarrollo de un **Programa de Mejoramiento de la Resiliencia o PMR** (“*Resiliency Improvement Program*”) para regiones urbanas potencialmente afectadas por un magno evento meteorológico, así como otras combinaciones de estado de carga última provenientes de otros eventos de alto riesgo derivados o relacionados al mismo.

2) Como segunda acción es necesario profundizar tanto en el conocimiento fundamental del fenómeno meteorológico (entendido como una combinación de viento, oleaje y lluvia), como en la comprensión del comportamiento no lineal real de los componentes de una edificación y los sistemas de infraestructura, y en consecuencia, desarrollar modelos termodinámicos a una escala muy fina.

3) La investigación avanzada en métodos numéricos complejos debe ser promovida para mejorar la capacidad de predecir de manera confiable el estado último real de las estructuras.

4) Proponer y aportar nuevas metodologías refinadas que replacen las metodologías simplificadas de ingeniería tradicionalmente usadas por los diseñadores, constructores, inspectores, etc., las cuales pueden integrar aspectos probabilistas cuantificando el comportamiento de un sistema complejo y las cargas aplicadas.

5) Finalmente, dos puntos cruciales serán, en primera instancia, cómo integrar el punto de vista de la comunidad en el desarrollo del PMR, y en segunda instancia, preparar una estrategia para crear conciencia entre la población invitándolos a participar en el PMR de su localidad, bajo la supervisión de las autoridades gubernamentales.

En términos generales, se propone que el **Programa de Mejoramiento de la Resiliencia** concebido para una región urbana ubicada en la Península de Yucatán esté conformado por cuatro componentes esenciales (ver figura 4):

- I. *Elaboración de un plan urbano para la prevención de desastres.*
- II. *Desarrollo de una metodología de Diseño Basado en Resiliencia.*
- III. *Enriquecimiento del Plan Gubernamental para Desastres DN-III-E.*
- IV. *Implementación de una campaña pública de concientización a nivel regional.*



**Figura 4.** Elementos de un Programa de Mejoramiento de Resiliencia para una región urbana tipo

A continuación se describe con mayor detalle cada uno de los puntos mencionados. Asimismo, para ilustrar de mejor forma la aplicación preliminar del plan, se tomará como sujeto de estudio a la ciudad de Mérida, Yucatán.

I. *Elaboración de un plan urbano para la prevención de desastres:*

Similar a lo que se conoce como un mapa de riesgos de tipo geográfico, este plan deberá identificar espacialmente conjuntos de sistemas estructurales estableciendo su jerarquía crítica, y deberá ser administrado bajo un esquema de manejo de riesgos. En el caso de la ciudad de Mérida, Yucatán, el municipio se organiza en colonias, por lo que el plan urbano puede manejarse a dos escalas diferentes, municipal y de barrio. En el caso municipal, deben identificarse:

- a) Los hospitales, jerarquizando éstos en función de sus capacidades y servicios. Una vez identificado el más importante, deberá identificarse la infraestructura de soporte (principal planta generadora de energía, suministro de agua potable, etc.) y las líneas vitales que conducen al centro hospitalario (puentes, avenidas, etc.), asegurando al menos una ruta directa;
- b) los centros de distribución de alimentos;
- c) las sedes gubernamentales de mayor importancia en un caso de riesgo;
- d) las zonas escolares a nivel universitario

A la escala de barrio o colonia:

- a) cualquier instalación gubernamental, en particular centros policiacos municipales;
- b) los centros escolares de todos los niveles;
- c) las iglesias o centros comunitarios de reunión;
- d) los centros de distribución de alimentos.

El plan de riesgos deberá ser accesible al público en general a través de los SIG (Sistema de Información Geográfica), y deberá ser conocido por las autoridades en sus diferentes niveles.

II. *Desarrollo de una metodología de Diseño Basado en Resiliencia:*

En función de las posibles combinaciones de riesgos específicas de cada región, deberá detallarse una metodología de Diseño de Infraestructura siguiendo las recomendaciones mencionadas previamente. En el caso de la ciudad de Mérida, puede tomarse como ejemplo de aplicación el hospital de mayor importancia: “Dr. Agustín D’Horan”, el cual es un edificio histórico que al mismo tiempo alberga

instalaciones construidas en épocas diversas. La revisión estructural de la estabilidad de un edificio de este tipo podría estar más allá de las normas reglamentarias vigentes, y por lo tanto deberán adoptarse varias recomendaciones adicionales de diseño. Las combinaciones de carga por simular deberán corresponder a posibles escenarios que pudieran presentarse después de un evento extremo (como un huracán) y deben incluir inundaciones e incendios. El análisis numérico debe considerar el comportamiento no lineal de la mampostería, y reproducir el estado real de daño. Los posibles reforzamientos deben ser acordes con la naturaleza histórica del edificio y deben tomar en cuenta las características reales de los materiales empleados, así como el envejecimiento y deterioro. Una vez asegurada la estabilidad del inmueble, deberá identificarse la infraestructura que asegure la funcionalidad del inmueble por al menos una semana, lo cual incluye las instalaciones eléctricas, los sistemas de abastecimiento de agua potable, el sistema de drenaje, etc.

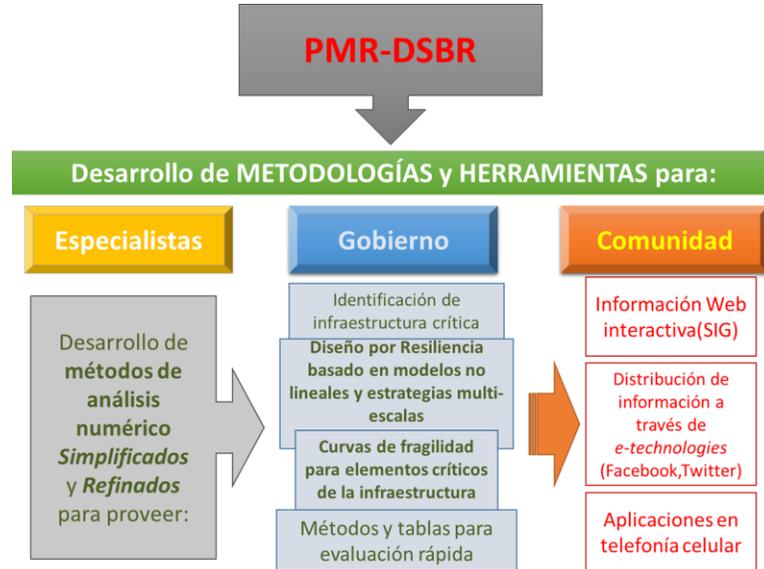
III. *Enriquecimiento del Plan Gubernamental para Desastres DN-III-E:*

Dadas las especificidades de cada Programa de Mejoramiento de Resiliencia, estos deberán incorporarse como soporte para el plan DN-III-E, sirviendo como guía y contacto con la comunidad afectada, organizada en torno a dicho programa.

El plan DN-III-E es un protocolo militar elaborado exclusivamente por el ejército y las fuerzas armadas, y debería incluir una variante de colaboración con la comunidad, que permita rápidamente identificar los centros de reunión comunitarios clave, las acciones emprendidas por las colonias, los canales de comunicación con los barrios, etc.

IV. *Implementación de una campaña pública de concientización a nivel regional:*

Siguiendo con la filosofía de integración planteada, esta campaña deberá tener una visión organizativa más que informativa, replanteando el papel de la comunidad en la construcción y gestión de su propio programa de resiliencia. En el caso de la ciudad en estudio, puede plantearse una serie de reglas que se pondrían a consideración de cada colonia mediante reuniones mensuales. Deberían prepararse carteles permanentes adosados a los centros de reunión en caso de emergencia, visibles para la comunidad en caso de siniestro (e.g. elegir anualmente a un responsable de manzana, cuya casa sea lugar de reunión en caso de siniestro, siempre y cuando cumpla con ciertos requisitos mínimos de seguridad). De acuerdo al grado de desarrollo de la comunidad



**Figura 5.** Herramientas por desarrollar para soporte del Diseño Basado en Resiliencia

(en el caso de Mérida, existe internet en prácticamente toda la ciudad), emplear los canales necesarios que periódicamente informen sobre la existencia de un plan de resiliencia, y cómo informarse al respecto (enviando mensajes SMS, sitio web, SIG's, etc.).

Los puntos presentados previamente requieren el desarrollo de un conjunto de metodologías y herramientas que podrían ser empleadas por los diferentes actores del **Programa de Mejoramiento de la Resiliencia**. La figura 5 muestra de forma sucinta las herramientas que serían necesarias para los especialistas, las autoridades gubernamentales y la comunidad en general.

**CONCLUSIONES**

En este trabajo se definió a la **Resiliencia** como la

capacidad social de recuperación que puede desarrollar una comunidad ante un conjunto de eventos extremos, mediante la integración de tres agentes: ingenieros-gobierno-comunidad. Asimismo, se analizó la importancia de desarrollar un nuevo método de **Diseño Estructural Basado en Resiliencia** (DBR), que permitiría evaluar con las técnicas más avanzadas de análisis numérico la respuesta no lineal de estructuras interrelacionadas entre sí, que simultáneamente pueden estar sujetas a eventos meteorológicos de gran escala. Con base en dicha filosofía, se puede establecer un **Programa de Mejoramiento de la Resiliencia** para una localidad en específico, en el cual los miembros de la comunidad pueden participar en colaboración con autoridades y especialistas para asegurar la pronta recuperación económica, social y política de la región afectada.

**REFERENCIAS**

Fajfar P. (2007). "Seismic assessment of structures by a practice-oriented method", en 'Extreme Man-Made and Natural Hazards in Dynamics of Structures', A. Ibrahimbegovic, I. Kozar (eds.), Springer, Berlin, 257-284.

Fischinger M. y Stojadinovic B. (2014). "Performance-Based Seismic Engineering – Vision for an Earthquake Resiliency Society", Springer, Berlin, in press.

Ibrahimbegovic A., Davenne L., Markovic D., Dominguez N. (2014). "Performance Based Earthquake-Resistant Design: Migrating Towards Nonlinear Models and Probabilistic Framework", en 'Performance-Based Seismic Engineering – Vision for an Earthquake Resiliency Society', M. Fischinger, B. Stojadinovic (eds.), Springer, Berlin, in press.

Kawashima K., Zafra R.G., Sasaki T., Kajiwara K. y Nakayama M. (2014). "Seismic performance of a bridge column based on E-defense shake-table excitations", en 'Performance-Based Seismic Engineering – Vision for an

Earthquake Resiliency Society', M. Fischinger, B. Stojadinovic (eds.), Springer, Berlin, in press.

Mahin S. (2012). "*Lessons from recent earthquakes: the need for more resilient cities*", Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan.

National Oceanic and Atmospheric Administration –NOAA (2006). "*NOAA Reviews Record-Setting 2005 Atlantic Hurricane Season*", ed. National Oceanic and Atmospheric Administration. Consultado el 23-06-2013: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/s2540.htm> .

Reinhorn A.M., y Cimellaro G.P. (2014). "*Considerations about resilience of communities in structural design*", en 'Performance-Based Seismic Engineering – Vision for an Earthquake Resiliency Society', M. Fischinger, B. Stojadinovic (eds.), Springer, Berlin, in press.

Togashi F., Löhner R., Baum J.D., Luo H. y Jeong S. (2005), "*Comparison of search algorithms for assessing airblast effects*", 17<sup>th</sup> AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, paper AIAA-2005-4985.

Tun J., Perdigón T., Chale G. y Gil C. (2012). "*Impacto socioeconómico del huracán Wilma en la localidad de Playa del Carmen*", Observatorio Urbano de la Riviera Maya.

Wilson E.L. (2007). "*The history of earthquake engineering at the University of California at Berkeley and recent developments of numerical methods and computer programs at CSI Berkeley*", en 'Extreme Man-Made and Natural Hazards in Dynamics of Structures', A. Ibrahimbegovic, I. Kozar (eds.), Springer, Berlin, 353-379.

---

Este documento debe citarse como: Domínguez N. y Ibrahimbegovic A, (2013). **Propuesta de un programa de mejoramiento de resiliencia para una ciudad tipo en la Península de Yucatán**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 17-3, pp 223-232, ISSN 1665-529-X.