

Metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones

Diego Fernando Páez Moreno* y Javier Hugo Hernández Delgadillo**

RESUMEN

Debido al emplazamiento tectónico del territorio colombiano, al asentamiento de estructuras en zonas con amenazas geodinámicas potencialmente altas y al alto grado de informalidad u omisión de los requisitos mínimos expresados en las normas de diseño y construcción de estructuras en los principales centros urbanos del departamento de Boyacá, los grupos de investigación GIMOC y GIISAG, adscritos a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, han tenido la oportunidad de realizar numerosos estudios de vulnerabilidad sísmica de edificaciones en el departamento. El artículo muestra una metodología sistemática para la realización de un estudio de este tipo, cuyos resultados han sido validados y cuyo desarrollo cumple con las disposiciones de la NSR – 98.

Palabras clave: Vulnerabilidad de edificaciones, Patología estructural, Materiales de construcción, Estructuras, Ingeniería sísmica.

ABSTRACT

Due to the tectonic location of the Colombian territory, the establishment of structures in areas with potentially high geodynamic threats and the high informality grade or omission of the minimum requirements expressed in the design and construction norms of structures in the main urban centers of the department of Boyacá, the investigation groups GIMOC and GIISAG attributed to the school of Civil Engineering of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, they have had the opportunity to carry out numerous studies of seismic vulnerability of constructions inside the department of Boyacá. As a result of these studies, a systematic methodology is shown for the realization of a study of this

* Ingeniero Civil. M. Sc. Profesor de la Escuela de Ingeniería de Transportes y Vías, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Director del Grupo de Investigación en Materiales y Obras Civiles (GIMOC). Dirección electrónica: ing_dpaez@yahoo.com

** Estudiante Ingeniería Civil. Miembro del Grupo de Investigación en Materiales y Obras Civiles (GIMOC), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Dirección electrónica: javiher53@latinmail.com

type whose been they have already been validated and whose development completes with the dispositions of the NSR - 98.

Key words: Vulnerability of constructions, Structural pathology, Construction materials, Seismic engineering.

INTRODUCCIÓN

El diseño y la construcción de estructuras en el territorio colombiano, realizados informalmente hasta la ocurrencia del sismo de Popayán, en 1983, han sido objeto de numerosas actualizaciones desde el establecimiento, como ley nacional, del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, de 1984, (CCCRS-84), creado como respuesta al alto nivel de pérdidas humanas y económicas producto del evento citado. En 1997, gracias a los grandes adelantos en el estado del arte en ingeniería sísmica e ingeniería estructural, se da comienzo a la actualización de la norma, y en 1998 entra en vigencia la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, que deroga la normativa anterior.

Esta norma, entre otras mejoras significativas respecto a la versión anterior, establece en el capítulo A-10 la necesidad de realizar un estudio de actualización a las estructuras construidas antes de su vigencia, con el propósito de que una edificación que se remodele siguiendo los requisitos allí presentados debe ser capaz de resistir temblores pequeños sin daño, temblores moderados sin daño estructural –pero con algún daño en elementos no estructurales– y un temblor fuerte sin colapso. En otras palabras, es necesario realizar un estudio para evaluar la capacidad de respuesta de la estructura ante los nuevos requisitos expresados en esta normativa.

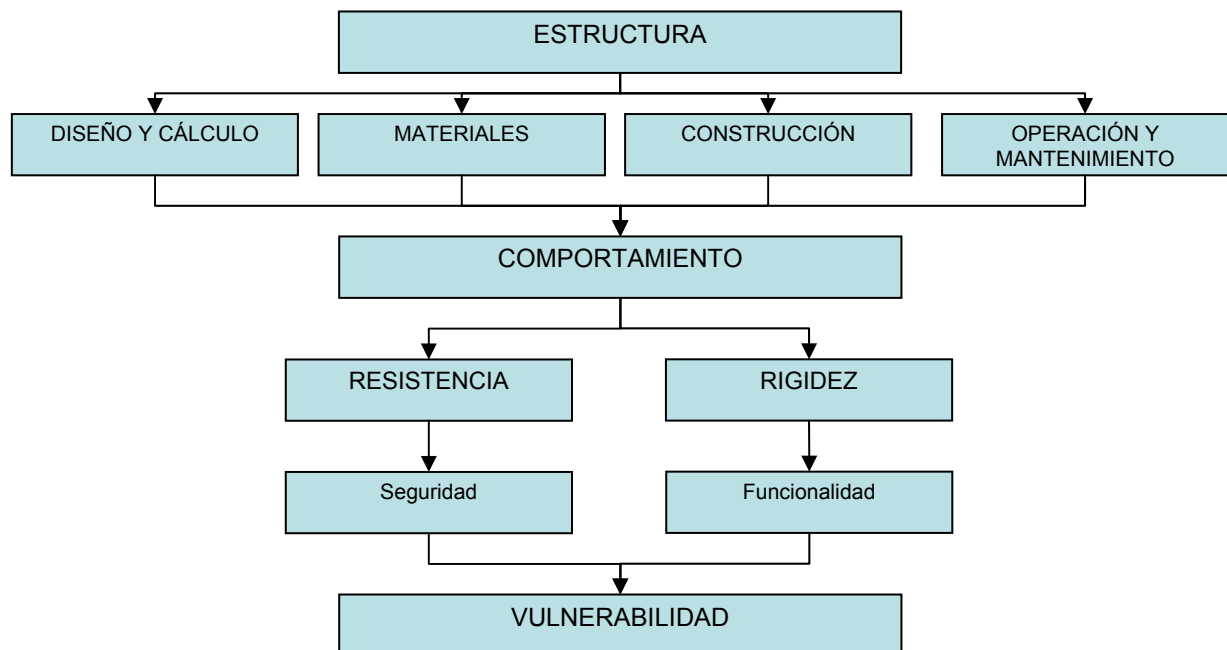
Los Grupos de Investigación en Materiales y Obras Civiles (GIMOC) e Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG), por medio de líneas de investigación desarrolladas a partir de las necesidades del departamento de Boyacá, especialmente en cuanto al desconocimiento del nivel de vulnerabilidad sísmica de las estructuras más importantes ubicadas en sus principales centros urbanos, fueron llamados para la realización de estos estudios por medio de trabajos de grado. Estos estudios han permitido valorar las diferentes propuestas para determinar el comportamiento y estado estructural de las edificaciones, y encontrar algunos aspectos destacables de estas. Cada uno de los trabajos de grado ha tenido un sinnúmero de particularidades, como el tipo, uso y nivel de importancia de la estructura, la edad de operación, el estado de deterioro, etc. Los trabajos desarrollados se resumen en la bibliografía anexa.

A partir del análisis y discusión desde el grupo de investigación de estos trabajos de grado, y las experiencias registradas a partir de la participación en proyectos de consultoría en obras de importancia municipal y departamental, se ha logrado desarrollar una metodología de trabajo que puede ser aplicada a cualquier estructura que requiera un estudio de vulnerabilidad.

Dentro de los trabajos referidos se pueden encontrar, entre otros, centros de salud, estructuras del patrimonio histórico y colonial que superan los 100 años de construcción, estructuras destinadas a actividades académicas, como colegios y universidades, y estructuras indispensables. Dentro de esta amplia gama de estructuras se han encontrado multiplicidad de materiales y de sistemas constructivos, que muestran fielmente la evolución histórica de los procesos constructivos de la región y que enriquecen enormemente el nivel de conocimiento social y técnico de las estructuras del departamento.

REFERENTES CONCEPTUALES

Los parámetros que definen la vulnerabilidad de una estructura se pueden esquematizar en la gráfica 1. El comportamiento estructural ante una sollicitación de tipo natural o antrópica cualquiera está sujeto a las condiciones bajo las cuales fue idealizada y concebida la estructura (diseño y cálculo), cuyo nivel de significancia dentro del proyecto integral dependerá en fuerte medida de la eficacia y cumplimiento de las especificaciones de los materiales propuestos, del sistema de calidad y del nivel de seguimiento en los procesos constructivos, de la respectiva correspondencia en el nivel y tipo de ocupación y de la forma de mantenimiento y conservación de la estructura. Este comportamiento, expresado principalmente en términos de resistencia y rigidez, determina el grado de seguridad estructural y el grado de funcionalidad que tendrá la obra en estudio ante la demanda prevista. Estos parámetros, finalmente, determinarán la vulnerabilidad de la estructura estudiada.

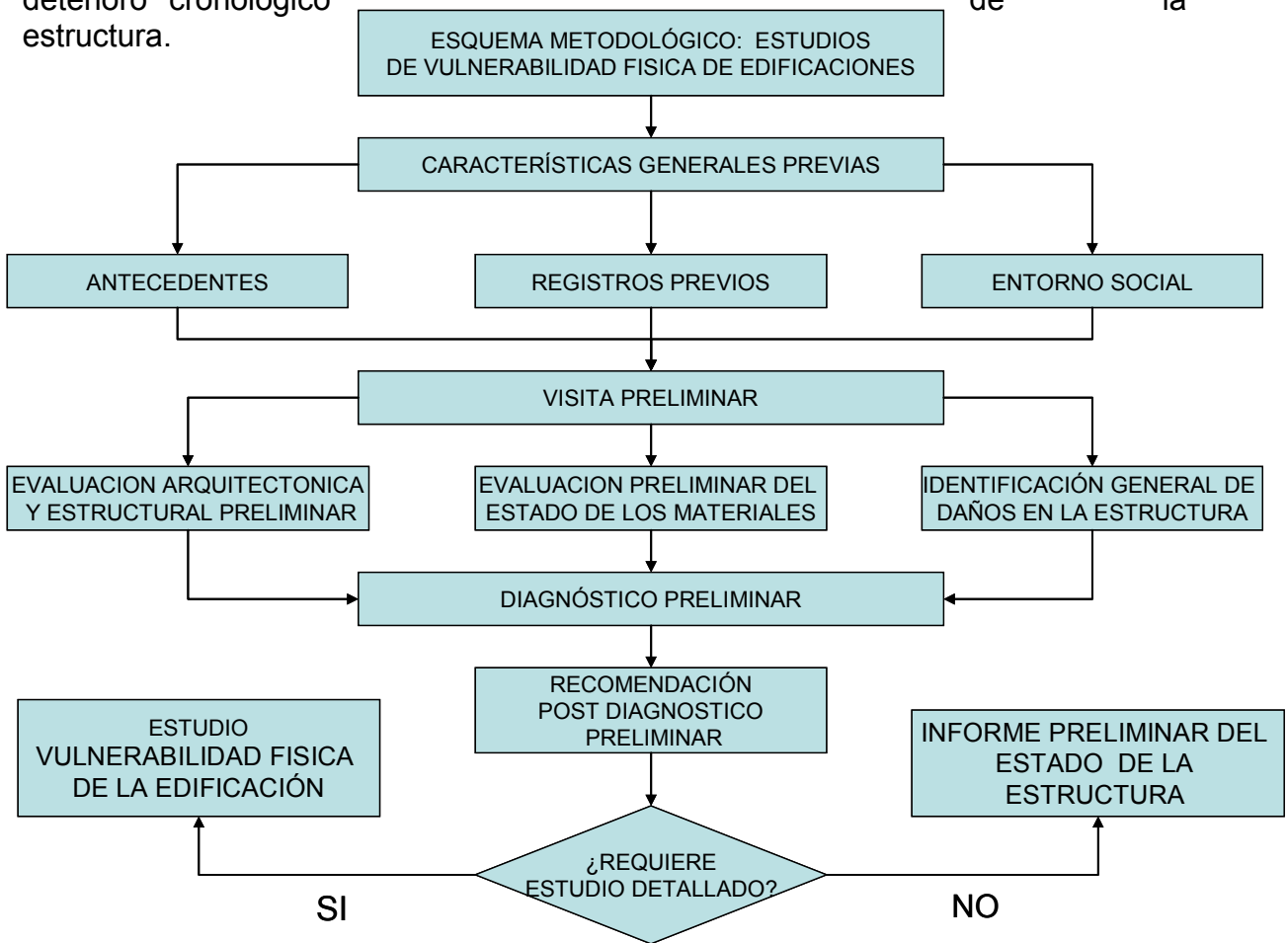


Gráfica 1. Esquema de vulnerabilidad estructural

En otras palabras, la vulnerabilidad de una estructura es su predisposición a sufrir daños ante una determinada solicitud, cuya susceptibilidad está asociada a los procesos de concepción, diseño, construcción, operación y mantenimiento intrínsecos a la estructura analizada.

METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

La metodología de estudio se basa en la adquisición de conocimiento determinista: el estado de la estructura se evalúa de acuerdo con las características evaluadas en campo por medio de una o varias visitas de inspección y diagnóstico y de acuerdo con los datos históricos de su diseño, construcción, operación y mantenimiento y la auscultación de información adicional suministrada por los ocupantes o vecinos a la obra en estudio, que puedan ayudar a identificar el comportamiento estructural debido a sucesos extraordinarios y determinar de forma preliminar la línea de degradación o deterioro cronológico de la estructura.



Gráfica 2. Esquema metodológico evaluación de vulnerabilidad preliminar.

En la gráfica 2 se muestra el proceso metodológico previsto para llevar a cabo el estudio preliminar de vulnerabilidad de una edificación, el cual se explica en los párrafos posteriores; más adelante se explica el procedimiento por seguir cuando se requiere un nivel de estudio más detallado, llegando a esquemas de reforzamiento u otro tipo de intervenciones necesarias.

Para la realización del diagnóstico de una estructura se requiere el conocimiento previo de las **características generales** de la obra que se requiere analizar. Estas características generales previas se pueden agrupar en tres grandes tipos:

Antecedentes. Información referida a los aspectos generales de la obra, como el sistema estructural empleado, las condiciones geométricas existentes, los materiales utilizados, el año de construcción, etc., y, en caso de existir, el nivel y naturaleza preliminar de los daños o deterioros encontrados en la estructura, que pudieran haber motivado la elaboración del estudio.

Registros Previos. Información referida a los planos de diseño originales, documentos de modificaciones, bitácoras de construcción, memorias de cálculo y todos aquellos documentos que muestren las especificaciones y procedimientos de cálculo y construcción que se tuvieron en cuenta para la edificación de la estructura analizada.

Entorno social. Hace referencia al tipo de importancia social de la estructura construida, junto con las implicaciones sociales y económicas que conllevaría a la comunidad del sector aledaño, a los ocupantes y al contratante del estudio su demolición total o parcial u otras reformas de posible rehabilitación propuestas.

Conocidos los aspectos generales de la estructura que se va a evaluar es necesario realizar una **visita preliminar**, en la cual se busca identificar el nivel de daño general que tiene la estructura y el tipo de ensayos y acciones (de ser necesarios) por seguir, para poder decidir si es preciso intervenir la estructura. En la visita preliminar se requiere recopilar información de tres tipos:

- **Revisión arquitectónica y estructural preliminar.** Información referida a la configuración geométrica en planta y perfil de la estructura por evaluar. Este tipo de información es necesaria para la confrontación de la estructura construida y la que se especifica en los planos, y en caso de que estos no existan es una herramienta importante para el reconocimiento geométrico, arquitectónico y estructural. En este tipo de revisión es necesaria la realización de un levantamiento preliminar que puede ser realizado con cinta métrica. Dentro del levantamiento preliminar se debe adjuntar las dimensiones de cada uno de los elementos estructurales que se puedan identificar.
- **Revisión del estado preliminar de los Materiales.** Por medio de ensayos *in situ* se determinan las resistencias aproximadas de los materiales que componen el sistema estructural principalmente. Estos ensayos, en su

mayoría, deben ser no destructivos, debido al carácter preliminar de la visita, pero en algunas ocasiones se determina utilizar ensayos de tipo destructivos, dependiendo del nivel de información que se desea obtener y de la calidad y magnitud del estudio que se realiza. Dentro de estos ensayos, de ser necesario, se debe evaluar las condiciones del suelo de fundación de la estructura. Además de los ensayos de tipo cuantitativo, es necesario evaluar los elementos estructurales y no estructurales por medio de análisis cualitativos que pueden ser fácilmente obtenidos por medio de encuestas realizadas durante la visita. Los formatos de las encuestas son previamente elaborados en la oficina de acuerdo con la información previa analizada y las estrategias por diseñar, para abarcar todos los objetivos propuestos en la visita de campo.

- **Identificación de daños generales.** Luego de ejecutar el levantamiento general de la estructura y de determinar de forma preliminar la resistencia y estado de los materiales, se procede a la identificación de los daños más relevantes observados. Es importante reseñar la localización exacta de estos daños, el elemento o los elementos –tantos estructurales y no estructurales– que afectan, la magnitud de los deterioros y la posible fuente generadora de estas fallas. Para poder obtener una visión más global de los daños de la estructura, es conveniente realizar indagaciones a los ocupantes y vecinos a la estructura, debido al posible conocimiento que puedan llegar a tener en cuanto al comportamiento de la estructura ante sucesos extraordinarios ocurridos e información cronológica sobre apariciones y propagaciones de daños detectados en la obra analizada.

Es necesario que dentro de la visita preliminar se reconozca la estructura como un elemento que interactúa con las edificaciones adyacentes y con el medio ambiente (microclima, clima y macroclima), ya que estos factores pueden ser fuentes potenciales de daño a la construcción evaluada.

A partir de la información recopilada en la visita preliminar y de su respectivo análisis en la oficina, donde se efectúa la confrontación entre los registros previos adquiridos y lo observado, se realiza el **diagnóstico preliminar**. Este diagnóstico debe ser concluyente en aspectos como:

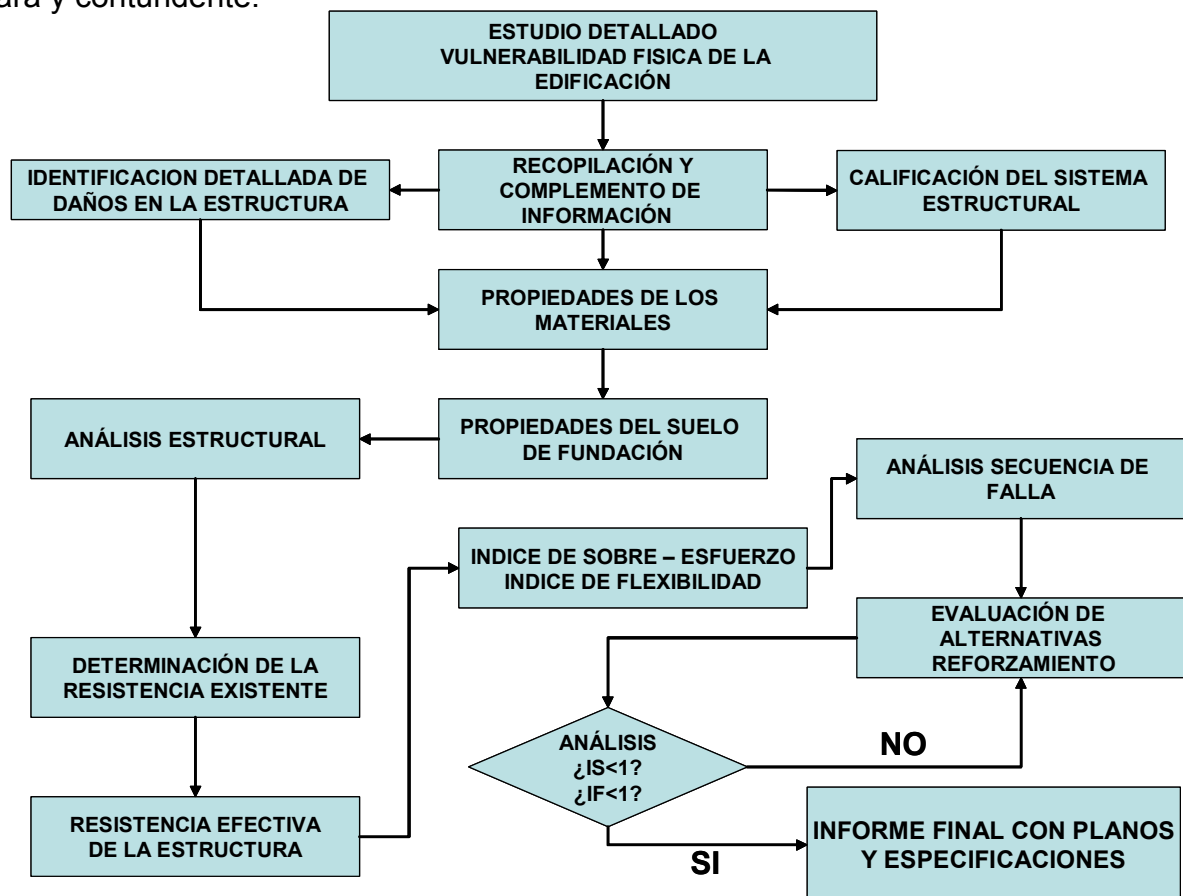
- Nivel de **vulnerabilidad estructural preliminar** de la estructura evaluada.
- Afectación general de la estructura en caso de continuar los daños sin ningún tipo de intervención.
- Determinación de la necesidad o no de realizar un **diagnóstico profundo o detallado** a la estructura en estudio.
- En caso de no encontrar la necesidad de realizar un diagnóstico más profundo, debido a causas como el buen estado de la edificación, los altos costos que se generarían al realizar una estudio más profundo y una posible reforma, o el alto

grado de deterioro de la estructura, se debe recomendar el tipo y grado de intervención necesaria. Dicha intervención se puede diferenciar en dos tipos principales:

Rehabilitación o reforzamiento. A partir de las condiciones de la estructura evaluada se propone un conjunto de reformas a todos o algunos elementos estructurales y no estructurales, buscando que la estructura cumpla con los requisitos mínimos de la normativa vigente.

Demolición. La demolición de la estructura, que puede ser total o parcial; conlleva la destrucción de elementos estructurales y no estructurales, debido al alto grado de deterioro que presentan o porque su rehabilitación o reforzamiento resultaría más costoso que una nueva construcción.

El **diagnóstico profundo o detallado** (ver gráfica 3) busca realizar una evaluación de la estructura aún más detallada, debido a que el grado de incertidumbre de la información obtenida en el diagnóstico preliminar es alto y no permite la toma de una decisión en cuanto al diagnóstico de la estructura de forma clara y contundente.



Gráfica 3. Esquema metodológico vulnerabilidad detallada

Para la realización de este tipo de diagnóstico se hace necesario la programación de una o varias visitas a la estructura, en las que se busca **recopilar o complementar información** que en la visita preliminar pudo haberse considerado muy superficial y que por medio de otro tipo de ensayos o auscultaciones más profundas se pueda llegar a concluir. Este tipo de estudios más detallados conlleva generalmente visitas programadas al sitio de estudio de expertos en suelos, estructuras, arquitectura, etc., según como el estudio y la complejidad de la situación encontrada lo amerite.

Paralelamente a la recopilación y complemento de la información, se debe realizar:

- **Identificación detallada de daños en la estructura:** inventario detallado de cada uno de los daños que presenta la estructura y que no se incluyeron en el diagnóstico preliminar por considerarlos de pequeña magnitud. Igualmente, como se realizó en la visita preliminar, se debe reseñar la localización exacta de estos daños, el elemento o los elementos –tanto estructurales y no estructurales– que afectan, la magnitud de los daños y la posible fuente generadora de estas fallas.

- **Calificación del sistema estructural:** con base en las características encontradas en la estructura, por medio de las visitas y su confrontación con lo especificado en planos y memorias de diseño y construcción, se realiza una evaluación del estado del sistema estructural en general, tomando en cuenta dos aspectos que se evalúan por medio de coeficientes de reducción como bueno (0,90), regular (0,70) y malo (0,50):

1. Calidad del diseño y construcción de la estructura original (Φ_c). Se evalúa la configuración estructural general (identificando posibles irregularidades), la pertinencia del sistema estructural empleado, la calidad y eficiencia de los procesos constructivos realizados (basados en el cumplimiento de lo especificado en los planos) y las posibles falencias que en la ejecución de la obra se pudieron presentar, y todos aquellos aspectos que definan la concepción y ejecución de la obra como fue puesta en operación.
2. Estado de mantenimiento y conservación de la estructura (Φ_e). Se determina el grado de preservación que ha tenido la estructura a lo largo de su vida útil, a partir de las condiciones bajo las cuales fue puesta en operación originalmente.

Cada uno de estos factores indica de forma **global** el estado actual de la estructura ante la(s) solicitud(es) de carga(s) requeridas. Adicionalmente a estos factores de evaluación generales, se determina un factor de reducción (β), que determina el grado de daño o deterioro de cada uno de los elementos de la estructura, por lo tanto, es un factor local aplicado a un determinado componente de la estructura, que se puede llegar a apartar de las condiciones generales de esta.

Posterior a la evaluación realizada, y por medio de las visitas programadas y los ensayos aplicados a los elementos constituyentes de la estructura, se determinan las **propiedades físico-mecánicas de los materiales**, a fin de que se establezcan correlaciones para la obtención de resistencias reales de los elementos estructurales y no estructurales. Estos ensayos, generalmente, requieren la toma de muestras en la obra analizada, para luego ser fallados en laboratorio.

En algunos casos es necesario realizar estudios al suelo de fundación de la estructura. Estos estudios están encaminados a conocer el grado de asentamiento y resistencia del suelo ante la aplicación de las cargas presentes y futuras de la estructura. Entre los parámetros que se deben obtener del estudio de suelos se encuentran: geomorfología, geología, estratigrafía y tectónica preliminar de la zona en estudio, capacidad portante, asentamiento esperados, estudio patológico donde se muestre la condición actual de la cimentación. Dependiendo del proyecto y los requerimientos del estudio se puede llegar a ser necesario la inclusión de estudios sísmicos de tipo preliminar o detallado como la determinación del Coeficiente de reacción del subsuelo (K), ensayos de Down Holl, Cross Holl, entre otros, para establecer la Interacción entre el suelo y la estructura.

Con base en los resultados arrojados en la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los materiales que componen el conjunto estructural, y de ser necesario, el estudio de suelos, se **determina la resistencia real** de los elementos estructurales bajo parámetros como el módulo de elasticidad del material, la resistencia máxima del elemento ante la aplicación de cargas, el grado de deformabilidad y degradación del material, etc. Todos estos parámetros buscan caracterizar los elementos por analizar mediante parámetros de resistencia que posteriormente serán evaluados.

Esta resistencia real está afectada por el grado de deterioro de cada elemento de la estructura en particular. Basados en esta premisa, se debe **determinar la resistencia efectiva**, que muestra de forma cualitativa la resistencia esperada de dicho elemento ante el nivel de daño al que ha sido expuesto. Esta resistencia efectiva se determina como:

$$R_{efectiva} = R_{real} * \phi_c * \phi_e * \beta \quad (1)$$

Donde como ya se dijo, $R_{efectiva}$ representa la resistencia efectiva del elemento; R_{real} , la resistencia real del elemento; Φ_c , la calidad del diseño y construcción de toda la estructura; Φ_e , el estado de conservación y mantenimiento global, y β , el factor de reducción por deterioros o degradación del elemento estructural en estudio.

Posterior a esto, es necesario conocer el estado de esfuerzos al cual se encuentra sometida o podría estar sometida la estructura. Para esto se debe realizar el **análisis estructural** pertinente, con base en la configuración geométrica y estructural actual, en las propiedades de los materiales encontrados y en los estados de carga previstos. Es importante que el modelo creado sea lo más representativo posible de las condiciones reales de la estructura estudiada, con el fin de encontrar las solicitaciones de esfuerzos más cercanas a la realidad.

Al finalizar el modelamiento de la estructura se han determinado los esfuerzos a los cuales está o va a estar sometida la estructura, y anteriormente se han calculado las resistencias aproximadas de cada uno de los elementos; de esta forma, se puede establecer una relación entre los esfuerzos actuantes y los esfuerzos resistentes. Este tipo de correlación se denomina **índice de sobreesfuerzo** y busca establecer la proporción entre la demanda y la capacidad del elemento analizado, a partir de la resistencia efectiva y las solicitaciones previstas.

$$I_s = \frac{P_{actuantes}}{P_{resistentes}} \quad (2)$$

Donde I_s representa el índice de sobre esfuerzo; $P_{actuantes}$ hace referencia a las cargas, momentos, esfuerzos, etc., actuantes en el elemento, y $P_{resistentes}$, las cargas, momentos, esfuerzos, etc., resistentes del elemento. Con base en los índices de sobreesfuerzo encontrados en los elementos analizados, se determina el grado de vulnerabilidad global de la estructura, como el inverso del mayor índice de sobreesfuerzo encontrado en el análisis anterior. Este valor determina el grado de capacidad de respuesta de la estructura ante las solicitaciones previstas en el análisis estructural.

Paralelamente a la determinación del índice de sobreesfuerzo se calcula el **índice de flexibilidad**, que busca definir el grado de deformación de la estructura y se calcula con base en la relación existente entre los desplazamientos y las deformaciones de la estructura ante la aplicación de las solicitaciones de carga previstas y los requisitos de deriva y deflexiones establecidos en la NSR – 98.

Con base en los índices de sobreesfuerzo se determina la **secuencia de falla de la estructura**, que es un indicativo del modo prevaleciente de colapso de la estructura a partir del grado de sobresolicitación de cada uno de los elementos que componen la obra estudiada. Esta secuencia de falla es un recorrido secuencial por los mayores valores de índice de sobreesfuerzo encontrados en el paso anterior.

Una vez evaluados cada uno de los parámetros anteriores, se puede establecer con claridad las falencias estructurales y funcionales de la estructura estudiada.

Con estos resultados se determinan **alternativas de reforzamiento**, que le permitan tener la suficiente capacidad de resistir los esfuerzos actuantes calculados. La determinación de la alternativa más conveniente debe ser evaluada no solo a la luz de los requerimientos estructurales, sino que además debe tener en cuenta el nivel socioeconómico del contratante y su posibilidad de solventar el reforzamiento propuesto, el grado de afectación de la estructura, los ocupantes (de haberlos) y demás factores que puedan llegar a dificultar la puesta en marcha de las recomendaciones propuestas.

Estas alternativas de reforzamiento cumplen un proceso iterativo, basado en los índices de sobreesfuerzo y flexibilidad, ya que las opciones de reforzamiento propuestas serán inicialmente válidas solo si estos índices son menores a la unidad.

Finalmente, y luego de determinar la alternativa de reforzamiento más conveniente para el contratante, se debe realizar la entrega del **informe final**, que debe contener como mínimo:

- Informe completo de cada uno de los pasos durante el diagnóstico realizado, con énfasis en los resultados de cada proceso.
- Vulnerabilidad estructural final de la estructura analizada.
- Determinación del tipo de intervención al cual se debe someter, parcial o totalmente, la estructura para cumplir con las solicitudes de carga previstas y los requisitos mínimos de la normativa vigente.
- Especificaciones, planos y memorias de cálculo completas del tipo de reforzamiento escogido y la forma como debe ser implementado en la estructura de acuerdo con las necesidades del contratante.

DISCUSIÓN

La ejecución de la metodología plasmada permite la adquisición de información referente al estado de los materiales, al sistema estructural, al nivel o grado de necesidad social y económica de la estructura y demás aspectos que provean los suficientes datos de entrada para evaluar de forma coherente y con una muy buena aproximación el desempeño que podría mostrar la estructura ante las solicitudes estáticas o dinámicas a que se considere que puede estar sometida.

La determinación de la vulnerabilidad estructural y de la alternativa de reforzamiento más conveniente debe tener en cuenta las repercusiones inducidas por las solicitudes sísmicas que actúen sobre la estructura y el grado de funcionalidad y seguridad que esta pueda brindar a sus ocupantes luego de la acción esperada, y no evaluar tan solo la respuesta de la estructura ante la ejecución del evento.

Dentro de la evaluación de la vulnerabilidad estructural y del reforzamiento propuesto se debe tener especial cuidado en el comportamiento esperado de los

elementos no estructurales y en el grado de debilidad que estos podrían llegar a tener ante la ocurrencia del evento sísmico, y que podrían poner en alto riesgo la vida de los ocupantes y los bienes materiales.

Dentro de la metodología no se establece la forma de modelación en *software* de la estructura, por considerar que depende del criterio del ejecutor del estudio, con una u otra metodología o herramienta que permita conocer el estado de esfuerzos y deformaciones de los elementos de la estructura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a cada uno de los estudiantes de Ingeniería Civil que, mediante el desarrollo de proyectos adscritos a los grupos de investigación GIMOC y GIISAG en el campo de la vulnerabilidad estructural, permitieron dar el impulso necesario para la elaboración del presente artículo. Igualmente, una mención especial a los docentes del área de estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil y a aquellos pertenecientes al GIISAG.

BIBLIOGRAFÍA

Aponte, Ana y Freddy Navarrete: *Caracterización de muros con ladrillo tolete como sistema de construcción de mampostería confinada para vivienda de interés social de uno y dos Pisos en la ciudad de Tunja*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2004.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica: *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR – 98*, Bogotá D.C., 2000.

Buitrago, Henry y Jerleidyth Jiménez: *Estudio de vulnerabilidad sísmica a nivel preliminar para el edificio de psicología de la UPTC Sede Central*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2004.

Chaparro, Diana y Maritza Guerra: *Estudio de vulnerabilidad sísmica a nivel preliminar para el edificio de laboratorios de la UPTC, sede central, y adaptación a la NSR-98*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2003.

Fonseca, Julián y Héctor Rojas: *Estudio de vulnerabilidad sísmica del claustro de san Francisco, patrimonio histórico y cultural de Villa de Leyva*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2003.

Galindo, Freddy y Jaime Pinzón: *Estudio de patología estructural y vulnerabilidad sísmica del Hospital Regional de Miraflores, ESE, según la NSR-98*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2002.

Martínez, Leonardo y Bernardo Sua: *Rehabilitación estructural de la torre de la iglesia del municipio de Nobsa*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2003.

Páez, Diego: *Estudio de suelos, materiales y análisis estructural del monumento histórico 'Casa Eduardo Santos'*. Informe Técnico. Tunja (Boyacá). 2005.

_____ *Visita de inspección y estudio de diagnóstico técnico sobre el estado de las obras realizadas en el centro de salud – sector urgencias*. Informe Técnico. Santana (Boyacá). 2005.

_____ *Visita de inspección y estudio de diagnóstico técnico a nivel preliminar de las obras realizadas en la Casa de la Cultura 'Laura Victoria'*. Informe Técnico. Soatá (Boyacá). 2005.

_____ y Javier Hernández: *Experiencias y metodología de diagnóstico en el estudio de vulnerabilidad sísmica de edificaciones*. Producto de Investigación, Grupo de Investigación en Materiales y Obras Civiles. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2005.

Rodríguez, Diana y Edgar Martínez: *Evaluación estructural y estudio de vulnerabilidad sísmica para el edificio principal de la UPTC seccional Chiquinquirá*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2003.

Villate, Fabián y Julián Guerrero: *Etapas preliminar para el estudio de vulnerabilidad sísmica y reforzamiento estructural del edificio de la Sección Integrada del Colegio de Boyacá*. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2003.

SAP2000. (1998) Integrated finite element análisis and desing of structures Basic Analysis Reference. Computers and structures, Inc. Berkeley, USA.

RUIZ J.; SANCHEZ, T. & MIRANDA, E. (2002). Observaciones sobre el comportamiento y diseño de edificaciones de mampostería en zonas sísmicas. En: ICA (eds). Edificaciones de mampostería para vivienda. Capítulo 7. México D.F. p.155-183

AGUILAR, G & ALCOCER, M.S. (2001). Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales. 181 p.