

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN TIPO HOSPITAL *

Alfonso Amézquita**

Édgar Eduardo Muñoz***

José Quintero****

Miguel Forero*****

Resumen: De acuerdo con los estudios realizados en el país, Bogotá se encuentra ubicada en zona de amenaza sísmica intermedia. La normativa establece que a las estructuras cuyo uso se clasifique como edificaciones indispensables y de atención a la comunidad, localizadas en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia, construidas con anterioridad a 1998, se les debe evaluar su vulnerabilidad sísmica. Por otro lado, en el estudio de *Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá*, la zona de estudio fue ubicada en la zona 2 de la ciudad (aceleración máxima del espectro en la rampa de 0,75 g). Existen en Bogotá diferentes edificaciones hospitalarias que en su época fueron diseñadas y construidas sin considerar detalles sismorresistentes, tal como se plantea en la normativa actual. Por esta razón es poco probable que los elementos estructurales y no estructurales de este tipo de edificaciones sean capaces de soportar las solicitaciones inducidas por un terremoto de alguna importancia. El presente artículo resume la metodología del estudio preliminar de vulnerabilidad sísmica de una edificación hospitalaria empleando las recomendaciones del documento

* Fecha de recepción: 29 de marzo de 2004. Fecha de aceptación para publicación: 14 de mayo de 2004.

** Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: amezquit@javeriana.edu.co.

*** Ingeniero civil, Universidad de la Salle. Magíster en Ingeniería civil, Universidad de los Andes. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: edgar.munoz@javeriana.edu.co.

**** Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana.

***** Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana.

de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA-310). Se calculan los daños esperados en los elementos estructurales de este tipo de edificaciones ante las solicitaciones sísmicas calculadas basándose en estudios de amenaza sísmica local. Es muy corriente encontrar en la mayoría de éstas sistemas estructurales del tipo reticular celulado, los cuales son altamente vulnerables.

Palabras clave: amenaza sísmica, vulnerabilidad, microzonificación, reticular celulado, aceleración, rigidez, *pushover*.

Abstract: Accordingly with Colombian seismic hazard studies, Bogotá D.C. is located in an intermediate hazard seismic zone. The law establishes the evaluation of the seismic structures vulnerability in buildings in which it use is classified as indispensable for public service facilities, built before 1998 and located in areas of high and intermediate seismic activity. On the other side, in the Micro-Zonation Study of Bogotá the hospital facility in study, is located in a zone with ground acceleration of 0.75g (Hazard seismic zone 2 of the Micro-Zonation). There are hospital's structures that were designed and builded in the early 1950's without considering detailed structural seismic resistance. For these reason it is probable that structural and not structural elements of this structures would not be able to withstand the solicitations induced by an earthquake of some importance. This paper resumes the methodology followed in the study of the seismic vulnerability of a hospitaly structures, following by the Federal Emergency Management Agency (FEMA-310). It is estimated the expected damage in the structural elements of this building's type based on the local threat. It is very common to find in most of this buildings, structural systems as the waffle construction that is highly vulnerable.

Key words: Seismic hazard, vulnerability, Micro-Zonation, waffle construction, acceleration, rigidity, *pushover*

INTRODUCCIÓN

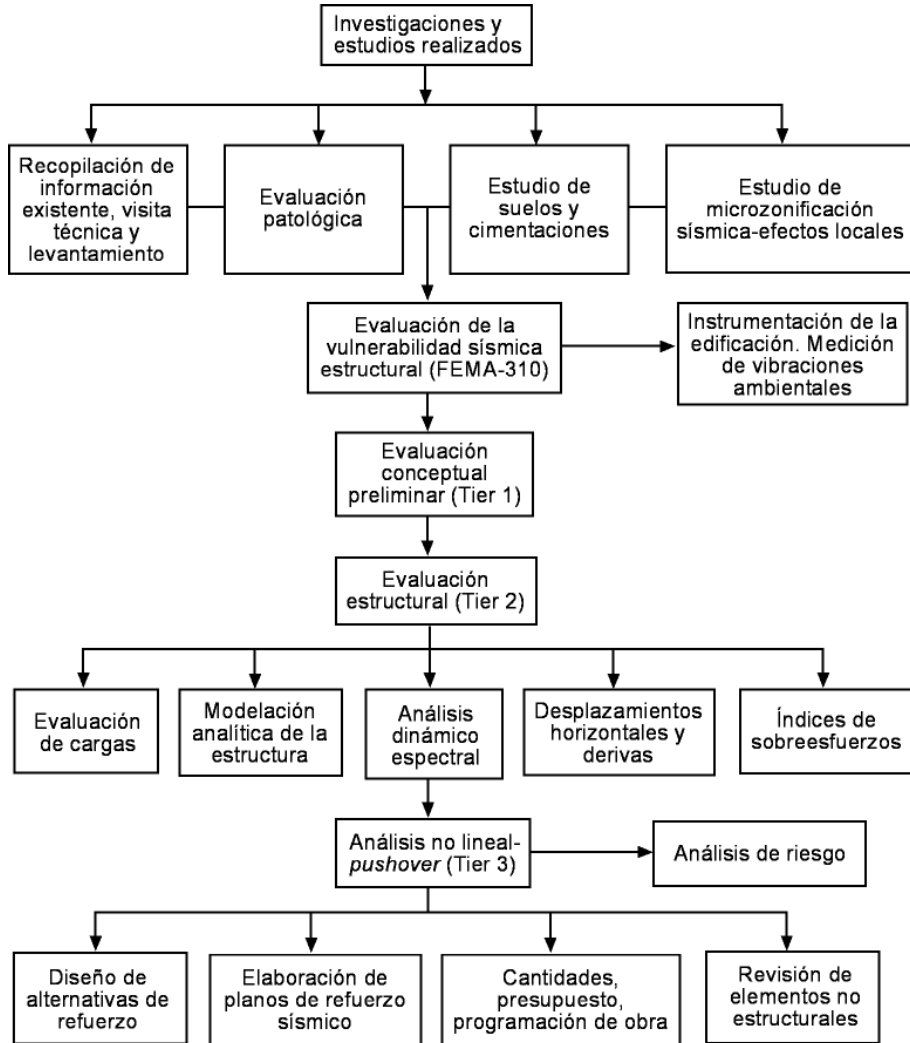
A partir de las especificaciones de Federal Emergency Management Agency (FEMA-310) [1998] y empleando algunos de los lineamientos de la norma colombiana de diseño y construcción sismorresistente (NSR-98), se describe la metodología y las etapas de un estudio de vulnerabilidad sísmica estructural (véase Figura 1). Por último, se presentan el análisis, la evaluación y los resultados de la fase 1 del estudio de una edificación hospitalaria.

1. INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS REALIZADOS

1.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE Y VISITA TÉCNICA

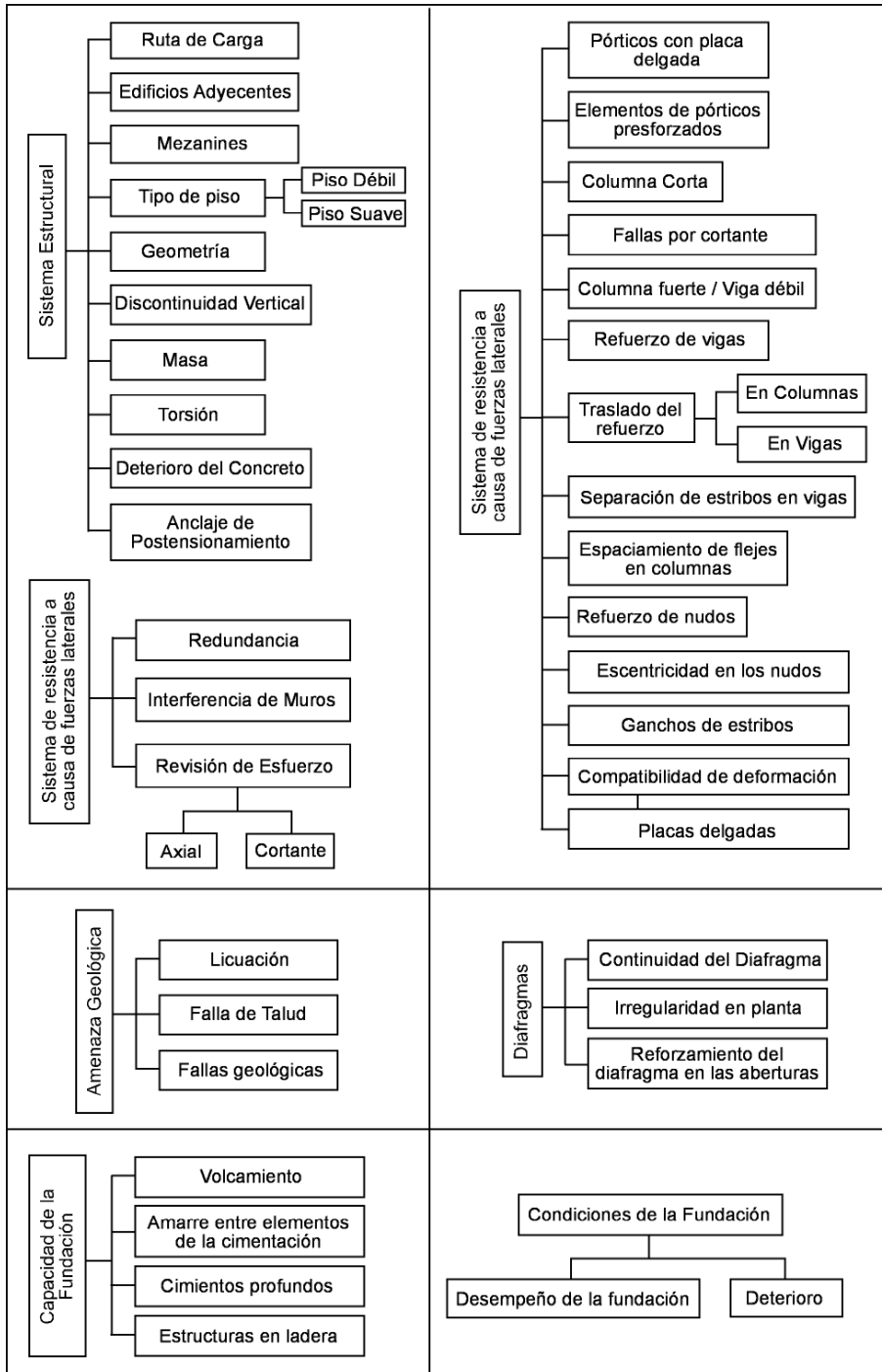
Esta etapa de las investigaciones y de los estudios realizados consiste en la recopilación de la información existente de la edificación, especialmente documentos como planos de diseño, planos *as built*, planos

Figura 1. Etapas de un estudio de vulnerabilidad sísmica estructural



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Aspectos principales para la evaluación preliminar de la edificación



Fuente: elaboración propia.

arquitectónicos, estudios de suelos, memorias de cálculo, estudios de adecuación, estudios de rehabilitación, etc. Posteriormente, es importante una visita técnica de inspección con el objeto de hacer una primera evaluación del estado de la edificación, planear los ensayos patológicos y organizar las labores de levantamiento, de acuerdo con la información existente.

1.2 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL, ARQUITECTÓNICO Y DE INSTALACIONES

Este paso consiste en un levantamiento estructural geométrico de las dimensiones de los elementos principales de la edificación (columnas, vigas, muros cortina, etc.) y del refuerzo tanto a flexión como a cortante de dichos elementos. Para esto se pueden emplear equipos de ultrasonido, combinados con algunas verificaciones mediante apiques o remociones parciales del concreto.

El levantamiento arquitectónico debe incluir todos los elementos no estructurales, como muros divisorios, fachadas, ventanas, cielo raso, materas, equipos, accesorios, etc. Además, se debe hacer un levantamiento de las instalaciones eléctricas, hidráulicas, de gas, de aire acondicionado y otras, incluida su distribución y la forma como están ancladas, para evaluar su comportamiento ante un evento sísmico. Mediante los planos se identifican las diferentes zonas de uso del hospital, como son la zona de cirugía, el cuarto de equipos, las habitaciones de pacientes, etc. Se deben localizar los equipos, su tipo y peso, pues esta labor es necesaria para la evaluación de la masa en la edificación.

1.3 EVALUACIÓN PATOLÓGICA

En esta etapa se debe analizar la calidad y durabilidad de los materiales de los elementos principales que hacen parte de la estructura, por ejemplo, columnas, vigas, capiteles y viguetas. Se deben hacer ensayos destructivos y no destructivos para establecer la resistencia y el módulo de elasticidad del concreto y el acero de refuerzo. Los ensayos no destructivos necesarios para evaluar la durabilidad de los materiales de la edificación son: índice de pH, contenidos de cloruros, contenido de sulfatos, materia orgánica, etc.

1.4 ESTUDIO DE SUELOS Y CIMENTACIONES

Con respecto al estudio de suelos y cimentaciones, se debe hacer una investigación del subsuelo con sus respectivos ensayos de laboratorio, de acuerdo con los lineamientos estipulados en el capítulo H de la NSR-98; realizar los ensayos de clasificación completos para cada unidad estratigráfica, como humedad natural y peso unitario, y evaluar las propiedades mecánicas e hidráulicas del subsuelo con ensayos detallados como resistencia al corte, consolidación, deformabilidad y permeabilidad. Con los ensayos anteriores se pretende evaluar la capacidad portante del suelo y los asentamientos, ya que esta información es útil para la revisión de la cimentación existente y el diseño de alguna nueva (si se requiere).

1.5 ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

En el estudio de microzonificación sísmica inicialmente se debe hacer una evaluación de la amenaza sísmica en términos de:

Niveles de movimientos y probabilidad de excedencia, para definir acelerogramas y espectros de diseño.

Estudio de las fuentes sísmicas que incluyan localización, actividad y magnitudes máximas probables.

Estudio geológico de la zona, para evaluar las fallas activas cercanas.

Selección de sismos cercanos y lejanos nacionales e internacionales con características congruentes con el sitio.

Posteriormente, se deben hacer ensayos dinámicos con el objeto de estudiar el comportamiento del suelo ante eventos sísmicos y evaluar la velocidad de onda de cortante mediante los ensayos geofísicos *down hole* o *cross hole*. Además, se debe evaluar el módulo cortante y el amortiguamiento mediante el ensayo triaxial dinámico y la columna resonante.

Por último, se realiza un análisis de respuesta local para evaluar el efecto de los suelos en el sitio y características del movimiento que afectan a la estructura. Finalmente, se determina un espectro local de diseño con un período de retorno de 450 años con la probabilidad de un 10% de ser excedido en cincuenta años.

2. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA ESTRUCTURAL

2.1 EVALUACIÓN CONCEPTUAL PRELIMINAR (TIER 1)

De acuerdo con los lineamientos del FEMA-310, se debe hacer una evaluación preliminar del comportamiento sísmorresistente de la estructura. Mediante ésta se revisan los aspectos principales relacionados con el comportamiento sísmico de la edificación: sistema estructural, sistema de resistencia a fuerzas laterales, conexiones, diafragmas, amenaza geológica, condición de la fundación y capacidad de la fundación. En la Figura 2 se presentan los diferentes puntos que se van a evaluar, basados en la inspección realizada y la información existente del complejo hospitalario.

2.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

2.2.1 EVALUACIÓN DE CARGAS

La evaluación de cargas consiste en la evaluación la carga muerta y masa de cada uno de los pisos de las edificaciones que hacen parte del complejo hospitalario. Además, la carga viva, de acuerdo con el uso en cada uno de los sectores. Su aplicación en el modelo estructural depende del sistema de entrepiso que tenga la edificación. Para la

carga sísmica se emplea el espectro de diseño, evaluado mediante el estudio de microzonificación sísmica de la zona.

2.2.2 MODELACIÓN ANALÍTICA DE LA ESTRUCTURA

Basándose en los levantamientos de la edificación, el tipo de cimentación, el sistema estructural, el tipo de entrepiso, las cargas y el estudio patológico, se deben elaborar modelos tridimensionales por medio de elementos finitos discretos o continuos. Generalmente se emplean programas de estructuras de análisis lineal y no lineal, lo que depende del tipo de estructura y las deficiencias estructurales que se encuentren en el estudio.

2.2.3 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

La instrumentación sísmica consiste en la instalación de acelerógrafos o acelerómetros, con los cuales se permita la medición de los períodos de vibración natural de la edificación, con lo cual se calibran los modelos tridimensionales mencionados en el numeral anterior. Además, permiten determinar el daño que puede ocurrir en la edificación en la ocurrencia de un sismo y la identificación de los efectos de sitio causados por la amplificación de las ondas sísmicas. Para esto se recomienda seguir con los lineamientos especificados en el capítulo A.11 de la NSR-98.

2.2.4 ANÁLISIS DINÁMICO ESPECTRAL

En el modelo estructural se hace un análisis dinámico espectral en las dos direcciones principales de la edificación, con el objeto de determinar los desplazamientos y las fuerzas internas probables que se generan en la edificación. Mediante esta labor se tiene información sobre la rigidez de las edificaciones y, por supuesto, se calcula la deriva.

2.2.5 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES Y DERIVA

En esta parte se debe evaluar la deriva de cada una de las edificaciones que hacen parte del complejo hospitalario. Se entiende por deriva el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos niveles consecutivos de la edificación. La edificación debe cumplir los requisitos de deriva, con el objeto de asegurar la estabilidad global de la estructura, de evitar los daños en elementos no estructurales y de disminuir el pánico de las personas que ocupan la edificación. La deriva máxima permitida para edificaciones de concreto reforzadas, metálicas y de madera es del 1% de la altura de piso, de acuerdo con el numeral A.6.4 de la NSR-98.

2.2.6 ÍNDICES DE SOBRESFUERZOS

De acuerdo con la evaluación de las fuerzas internas basadas en las diferentes combinaciones de carga y con el cálculo de la resistencia de los elementos principales, se determinan los índices de sobreesfuerzos

de los elementos principales. Este índice se expresa como la relación entre las solicitaciones equivalentes y la resistencia efectiva. Cuando es mayor que uno, se considera un elemento estructural deficiente.

2.3 ANÁLISIS NO LINEAL (*PUSHOVER*)

Cuando en la edificación se identifican deficiencias estructurales y problemas en la patología, se hace un análisis no lineal, con el fin de verificar los resultados obtenidos en los análisis lineales evaluados en el TIER 1 y 2 del FEMA-310 [1998]. Los métodos modernos permiten adelantar análisis no lineales simplificados con el fin de calcular el tipo de respuesta de una estructura ante la ocurrencia de un evento sísmico. Uno de los métodos simplificados de mayor aplicación es el *pushover*, que consiste en empujar lateralmente una edificación mediante una distribución de cargas horizontales dadas, controlando el proceso mediante las cargas aplicadas o mediante las deformaciones del edificio. El proceso se realiza paso a paso teniendo en cuenta el comportamiento no lineal de la edificación, a fin de la iniciación de la fluencia, las plastificaciones de los diferentes elementos (columnas y vigas) y, en últimas, la formación del mecanismo de colapso. En la referencia ATC40 se presentan varios aspectos de desempeño estructural que dependen del daño alcanzado por los diferentes elementos estructurales. A continuación se describen brevemente:

- Ocupación inmediata (IO): los riesgos a la vida o daños personales por fallas estructurales son prácticamente descartables, y la edificación es segura para ocupar, ingresar o egresar.
- Rango de daños controlados (IO-LS): se presentan daños estructurales controlados.
- Protección a la vida (LS): en este nivel pueden haber ocurrido daños estructurales significativos, pero se garantiza un margen suficiente contra el colapso total o parcial.
- Rango de seguridad limitada (LS-CP): en este rango de comportamiento no se espera que ocurran colapsos o inestabilidad estructural, aunque no se garantizan todos los aspectos estructurales para alcanzar el nivel de protección a la vida.
- Estabilidad estructural (C-D): corresponde al estado de daño estructural posterremoto, en el cual el sistema estructural se encuentra en el límite para experimentar colapso parcial o total.
- Colapso (E).

2.3.1 DISEÑO DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO

En caso de que se detecten deficiencias estructurales y vulnerabilidades sísmicas en la edificación, se deben estudiar y evaluar, por lo menos, tres alternativas de rehabilitación tanto para los elementos estructurales y la cimentación, con el objeto de seleccionar la más adecuada desde el punto de vista técnico y económico. Así se seleccio-

na la mejor alternativa de rehabilitación de acuerdo con el tipo de estructura y de los requerimientos desde el punto de vista arquitectónico, la funcionalidad del hospital y la disponibilidad presupuestal. Entre los tipos de refuerzo sísmico de edificaciones se deben estudiar el sistema de muros cortina en concreto reforzado, los pórticos de acero exteriores o internos, los disipadores de energía, el aislamiento sísmico, el reforzamiento mediante materiales compuestos, etc.

2.3.2 EVALUACIÓN DE LOS ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

De acuerdo con el capítulo A.8 de la NSR-98, se deben evaluar y revisar los elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica, así como realizar su diseño y adecuación mediante sistemas de anclajes u otros, para asegurar su estabilidad y funcionamiento en un evento sísmico. En el caso de hospitales, es muy importante estudiar el comportamiento de las instalaciones eléctricas e hidráulicas ante un sismo.

2.3.3 PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE UNA OBRA DE REHABILITACIÓN

Para cada una de las alternativas de rehabilitación es necesario una evaluación económica detallada y la presentación de una programación de obra, donde se establezcan los recursos y los tiempos necesarios para su ejecución. En esta parte se deben analizar los procesos de construcción óptimos para que no afecten el funcionamiento adecuado del hospital.

3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE UNA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA

Como ejemplo de aplicación de la metodología descrita, se presentan los resultados de un estudio de vulnerabilidad sísmica estructural de un complejo hospitalario localizado en Bogotá. Este caso no incluye todas las etapas mencionadas y solamente se presentan resultados hasta el análisis estructural (TIER 2), de acuerdo con el FEMA-310 [1998].

3.1 INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS REALIZADOS

3.1.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE Y VISITA TÉCNICA

En esta primera etapa se recopiló la información disponible, tal como planos estructurales y arquitectónicos, memorias de cálculo, estudios de suelos y diversos documentos técnicos de vital importancia para el estudio de vulnerabilidad estructural. Basándose en las visitas técnicas de inspección a las edificaciones del hospital (en compañía de asesores estructurales) se pudieron establecer los criterios básicos para el desarrollo del estudio. Además, durante estas visitas técnicas se verificaron las dimensiones de los elementos principales de la estruc-

tura, así como la ubicación y distribución del refuerzo de acero para corroborar la información de los planos estructurales, y se ubicaron las zonas estratégicas para la ejecución de ensayos parcialmente destructivos y no destructivos para las evaluaciones de patología estructural. Para ello se llevaron a cabo auscultaciones con equipos de detección de refuerzo mediante técnicas no destructivas. De esta etapa se concluyó que la calidad de la construcción fue buena.

Asimismo, se realizaron levantamientos arquitectónicos para establecer las condiciones de uso de los diferentes pisos de los edificios que componen el complejo hospitalario. Esta actividad permitió, adicionalmente, elaborar un presupuesto detallado de elementos no estructurales, con el fin de calcular costos de movimiento de equipos que eventualmente se llevarán a cabo en el momento de ejecutar un eventual reforzamiento sísmico.

3.1.2 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL Y ARQUITECTÓNICO

El complejo está conformado por varias estructuras construidas en diferentes épocas; por lo tanto, las características de los materiales utilizados y los sistemas constructivos cambian para cada una de ellas. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las principales características de las diferentes edificaciones.

Tabla 1. Descripción de las estructuras del Hospital

Estructura	Sistema estructural	Tipo de entepiso
Edificaciones 1 y 2	Sistema aproximado de pórticos de concreto resistentes a momento	Reticular celulado (capitel aligerado)
Edificación 3	Sistema aproximado de pórticos de concreto resistentes a momento del primero al tercer piso. Pórticos de concreto del cuarto al sexto piso	Reticular celulado del primero al tercer piso (capitel macizo) y placas aligeradas armadas en una dirección
Edificación 4	Sistema aproximado de pórticos de concreto resistentes a momento	Reticular celulado
Edificación 5	Sistema aproximado de pórticos de concreto	Reticular celulado
Edificación 6	Pórticos en concreto reforzado resistentes a momento	Losa armada en una dirección
Edificación 7	Pórticos en concreto reforzado resistentes a momento	Losa armada en una dirección
Edificación 8	Pórticos en concreto reforzado resistentes a momento	Losa armada en una dirección

Fuente: elaboración propia.

Las edificaciones 1 y 2 consisten en un sistema estructural de concreto reforzado con losa o entepiso de reticular celulado con columnas rectangulares y cuadradas de sección variable apoyadas en un siste-

ma de zapatas aisladas. Éstas constituyen nueve pisos con una altura total de 30,8 metros. La edificación 3 consta de seis pisos; sin embargo, sólo se construyeron inicialmente los tres primeros. Posteriormente se modificó el diseño original y se rediseñaron los últimos tres pisos, que fueron construidos en 1980.

La edificación 6 tiene un sistema estructural de pórticos espaciales de concreto reforzado, con un entrepiso de placa aligerada armada en una dirección. En la parte del frente tiene columnas inclinadas hasta el cuarto piso, las cuales tienen una cimentación mediante pilotes ubicados a una profundidad aproximada de 9,50 metros. La edificación consta de nueve pisos y está localizada entre la zona occidental de la edificación 2 y la parte sur de la edificación 1. Dicha edificación se encuentra completamente unida lateralmente a las estructuras 1 y 2, mediante anclajes horizontales.

La edificación 4 está localizada en el costado nororiental del complejo y consta de dos pisos. La estructura fue diseñada en 1955. A pesar de no contar con planos estructurales, se estableció que su sistema estructural es de placa reticular celular. La cimentación se compone de zapatas sin vigas de amarre y algunas de las columnas se encuentran apoyadas sobre las zapatas existentes de la edificación 3.

La edificación 5 está localizada en el extremo oriental, con el cual comparte el cuarto piso (salas de cirugía). Debido a que de esta edificación no se encontraron planos constructivos o de diseño, fue necesario asumir las condiciones del sistema estructural basado en las fechas de construcción, los ensayos de patología estructural y de localización de refuerzo, los levantamientos arquitectónicos y la información suministrada por personas que participaron en la construcción. Este edificio fue erigido en la década de los cincuenta. Se presume que su diseño original fue de tres pisos; posteriormente, en fecha aún no determinada, se hizo una ampliación en la que se adosaron a la estructura original tres pisos en el costado occidental. Para ello se colocaron a las columnas existentes otras para soportar el cuarto piso. La cubierta del cuarto piso está compuesta por cerchas metálicas en celosía y tejas de asbesto cemento. Adicionalmente, en el quinto piso se construyó una sala de descanso, para lo cual se construyeron nuevas columnas sobre la placa del cuarto piso y sobre esta estructura se colocó un sistema de ventilación en aluminio bajo una cubierta liviana acrílica soportada por una estructura metálica.

La edificación 7, localizada en el costado norte, fue diseñada en febrero de 1979. La estructura principal está conformada en ambos sentidos por pórticos de concreto reforzado. La edificación 8, localizada en el costado oriental, fue diseñada en febrero de 1997. La estructura principal está conformada en ambos sentidos por pórticos de concreto reforzado y está cimentada en dos niveles diferentes. Las columnas a lo largo de los ejes 1 y 2 están empotradas en una placa de concreto maciza de $e = 1,15$ m en el nivel +5,40. Esta placa, a su vez, se encuentra apoyada en el centro sobre muros pantalla en concreto reforzado con espesores que varían entre 1,00 m hasta 2,45 m.

En el perímetro, la placa se apoya sobre un muro pantalla de 30 cm de espesor anclado al suelo por medio de *tie-backs*. El resto de la estructura se cimienta sobre zapatas unidas entre sí con vigas de amarre de 60 cm de altura.

3.1.3 EVALUACIÓN PATOLÓGICA

Se llevó a cabo la evaluación física de las diferentes edificaciones mediante un estudio de patología estructural a partir de ensayos de sitio y laboratorio. Se adelantaron análisis de las características de los aceros de refuerzo y las resistencias de los concretos. Se realizó un programa de investigación que minimiza la cantidad de núcleos que se van a extraer y se complementaron esos resultados con ensayos no destructivos. Por último, se ensayaron en total cincuenta núcleos y se tomaron 188 lecturas de velocidad del pulso ultrasónico.

Basándose en lo anterior, se determinó que el concreto de los elementos estructurales posee buenas condiciones de resistencia y con valores de módulos de elasticidad adecuados, además de una baja degradación superficial del material. Lo anterior indica que el concreto se encuentra sano y sólo se presenta riesgo de sufrir fenómenos corrosivos en los últimos tres pisos de la edificación 4.

3.1.4 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESTUDIO DE SUELOS

Se desarrolló una exhaustiva investigación de las características y propiedades del suelo de cimentación de la zona del complejo hospitalario mediante la ejecución de cuatro sondeos de alrededor de 15 m de profundidad. Con estos sondeos se verificó el perfil estratigráfico y las propiedades índice de las diferentes capas de suelo bajo la cimentación de la estructura. Adicionalmente, se comprobaron las propiedades dinámicas del suelo a efectos de utilizar un espectro apropiado para las características dinámicas de la zona donde está ubicado el complejo hospitalario.

3.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA ESTRUCTURAL

Para llevar a cabo el estudio de la vulnerabilidad sísmica estructural fue necesario adoptar una metodología que fuera reconocida en todo el mundo y se aplicara en nuestro medio. En conjunto con la empresa consultora, firma asesora en materia estructural, se decidió tomar como guía para el estudio de vulnerabilidad sísmica el FEMA-310 [1998]. Basándose en las referencias consultadas y mediante la información recolectada en conjunto con las visitas técnicas de inspección fue posible determinar el mecanismo de falla de las diferentes estructuras que componen el complejo del hospital. Para esto se establecieron los daños esperado de acuerdo con el comportamiento ante un sismo, con una probabilidad de excedencia del 10% en cincuenta años [FEMA-310, 1998].

3.2.1 EVALUACIÓN CONCEPTUAL PRELIMINAR

A cada uno de los edificios que hacen parte del complejo hospitalario se realizó una evaluación preliminar (TIER 1) basándose en las recomendaciones del FEMA-310 [1998], que tiene como objetivo analizar y evaluar la vulnerabilidad de cada una de las estructuras mediante el estudio de los planos existentes y la inspección visual de la edificación. Las principales vulnerabilidades detectadas en esta evaluación conceptual (TIER 1) fueron:

- En las edificaciones 1 y 2 se hallaron deficiencias en el detallado sismorresistente de los elementos principales y en el sistema de entrepiso en reticular celulado. Se encontraron los siguientes problemas asociados con la vulnerabilidad sísmica en esta etapa de evaluación preliminar: deficiente detallado de refuerzo de las vigas y en los nudos, inadecuado traslapeo en el refuerzo de columnas y vigas, demasiado espaciamiento de flejes en columnas, excentricidad en los nudos y placas delgadas, discontinuidad del diafragma, así como irregularidad en planta y edificios adyacentes (golpeteo).
- Con relación a la edificación 3, en el detallado estructural del refuerzo de los tres primeros pisos se detecta que no se tuvieron en cuenta criterios de ductilidad en el diseño original. Las placas correspondientes al sistema reticular celulado se asemejan a placas delgadas, no permitidas de acuerdo con FEMA-310 [1998]. La estructura cumple el criterio de redundancia en el sistema de resistencia de fuerzas laterales, puesto que todos los pórticos están conformados por más de una luz en ambos sentidos. Adicionalmente, la estructura es regular debido a su configuración tanto en planta como en altura.
- En la evaluación preliminar de la edificación 5 se detectaron algunas vulnerabilidades sísmicas: discontinuidad vertical, interferencia de muros, inadecuados traslapes en el refuerzo en vigas, separación excesiva de los estribos y excentricidad en los nudos. En la estructura 6 se encontró que el detallado del refuerzo tiene en cuenta criterios de ductilidad en el diseño original; sin embargo, no cumple con los criterios exigidos por FEMA-310 [1998]. La estructura no cumple el criterio de redundancia en el sistema de resistencia de fuerzas laterales, puesto que existen pórticos con una sola luz y no en ambos sentidos.

De acuerdo con la evaluación de la edificación 3, mediante la verificación de los planos existentes y la inspección visual de la edificación, se concluyó que la estructura es muy deficiente en su detallado estructural. De la evaluación conceptual de la edificación 7 se determina que la estructura tendrá un comportamiento favorable durante un sismo. Se esperan daños en la mampostería, debido a que está ligada a la estructura y por su rigidez pero poca ductilidad, intentará absorber inicialmente las cargas.

3.2.2 EVALUACIÓN DE CARGAS

Se realizó una evaluación de las cargas muertas, vivas y de sismo de cada una de las estructuras, de acuerdo con las especificaciones de

la NSR-98. En la Tabla 2 se presentan las cargas por metro cuadrado típicas determinadas para cada una de las edificaciones.

Tabla 2. Resumen de la evaluación de cargas de las edificaciones

Estructura	Carga muerta (kgf/m²)	Carga viva (kgf/m²)
Edificaciones 1 y 2	899 del 2° al 8° piso 544 para el 9° piso	200
Edificación 3	795 del 2° al 4° piso 808 para el 5° y el 6° piso 200 para la cubierta principal	200
Edificación 4	800 para el 2° piso 435 para la cubierta	200
Edificación 5	900	200 y 400
Edificación 6	771 del 2° al 8° piso 416 para el 9° piso	200
Edificación 7	802 para el 2° piso 560 para la cubierta	200
Edificación 8	850 del 2° al 3 ^{er} piso 940 del 4° al 5° piso	200

Fuente: elaboración propia.

La evaluación de la carga de sismo se basó en el espectro en roca para un período de retorno de 475 años [Fuente].

3.2.3 MODELACIÓN ANALÍTICA DE LAS ESTRUCTURAS

Para la evaluación y revisión del comportamiento sísmico y dinámico de las estructuras se elaboraron diferentes modelos tridimensionales en el programa SAP-2000. Mediante un análisis elástico lineal se desarrollaron modelos espaciales conformados por elementos *frame* y *shell*. Para el caso de los edificios con entrepiso en reticular celulado se consideró la rigidez equivalente de las vigas como una sección rectangular correspondiente a la suma de las viguetas que convergen al capitel, más una zona rígida que proporciona el capitel aligerado.

3.2.4 ANÁLISIS DINÁMICO ESPECTRAL

La revisión y la evaluación de las estructuras se llevaron a cabo mediante un análisis modal dinámico utilizando el espectro determinado mediante el estudio de microzonificación sísmica. En la Tabla 3 se presentan los períodos fundamentales obtenidos para cada uno de los modelos de los edificios estudiados.

3.2.5 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES Y DERIVAS

A continuación se presenta la evaluación de las derivas de algunas de las estructuras, de acuerdo con cada uno de los modelos estructurales elaborados. Como se observa en las figuras 3 y 4, las derivas de

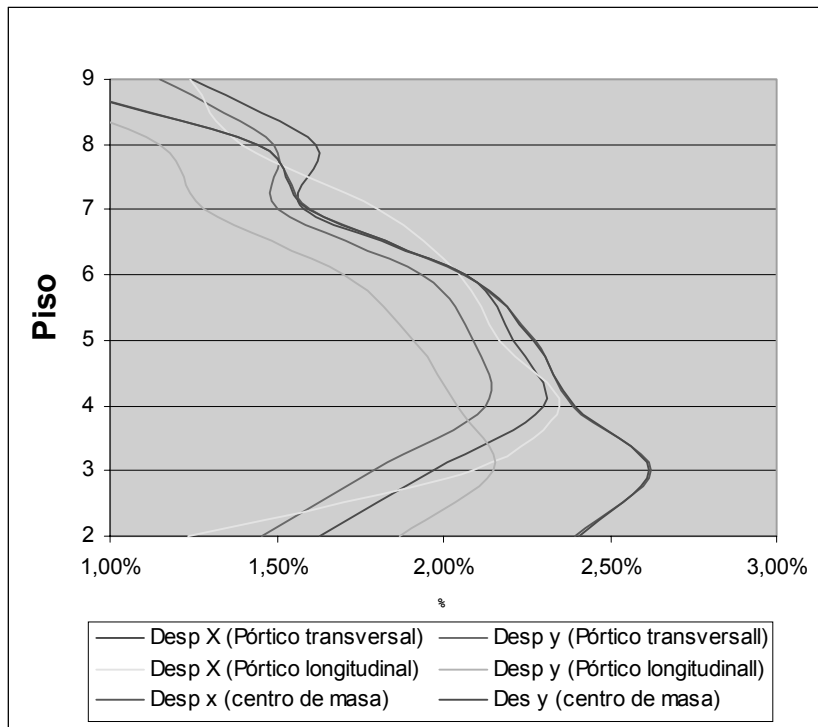
Tabla 3. Resumen de los períodos fundamentales de los edificios

Estructura	Número de pisos	Períodos fundamentales- Modo 1 (s)	Aceleración espectral (m/s ²)
Edificio 1	9	2,60	0,19
Edificio 2	9	2,48	0,20
Edificio 3	6	1,16	0,43
Edificio 4	2	0,57	0,72
Edificio 5	4-5	0,62	0,72
Edificio 6	9	2,09	0,24
Edificio 7	1-2	1,46	0,35
Edificio 8	5	0,98	0,51

Fuente: elaboración propia.

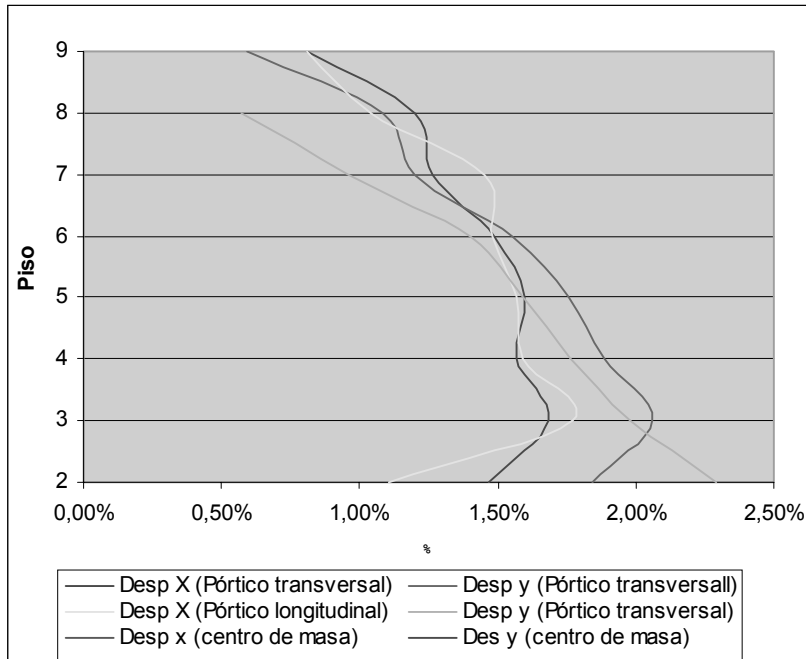
las edificaciones varían entre 1,0% y 3,0%, lo que indica que son estructuras en general flexibles y que no cumplen con las recomendaciones formuladas por la NSR-98 acerca de los desplazamientos horizontales. De acuerdo con diversas investigaciones sobre el comportamiento estructural de edificios con entrepisos de reticular celular, con derivas altas es posible que se acentúe el punzonamiento cerca de los capiteles, como sucedió en diversos edificios de Ciudad de México, en 1985. La deriva correspondiente a la edificación 3 cumple con los límites permisibles de las normas.

Figura 3. Evaluación de la deriva del edificio 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Evaluación de la deriva del edificio 2



Fuente: elaboración propia.

3.2.6 ÍNDICES DE SOBRESFUERZOS

3.2.6.1 Revisión de las columnas

Para cada una de las columnas de los pórticos se evaluó la falla de cortante que ocurre cuando el esfuerzo cortante generado por plastificación (que se presenta cuando se forman rótulas plásticas en los extremos de las columnas) es mayor al cortante resistente que proporciona el concreto y el acero. Por otro lado, se revisó en el estudio la falla frágil que se produce cuando el cortante máximo actuante supera la resistencia del elemento estructural. Durante la revisión se evaluaron los índices de esfuerzos generados en la estructura y sus deformaciones y se compararon con los rangos admisibles de comportamiento.

Debe anotarse que durante un evento sísmico el escenario deseado es que las estructuras fallen de forma dúctil para garantizar una adecuada disipación de energía. En el caso de estructuras indispensables y de atención a la comunidad, como es el caso de los hospitales, es inaceptable una falla de tipo frágil. Adicionalmente, en este tipo de edificaciones las deformaciones laterales deben mantenerse en rangos muy bajos, que permitan garantizar que los elementos no estructurales (fachadas, muros divisorios, equipos, etc.) no van a sufrir daños importantes durante el sismo o colapsen. En la Tabla 4 y en la Figura

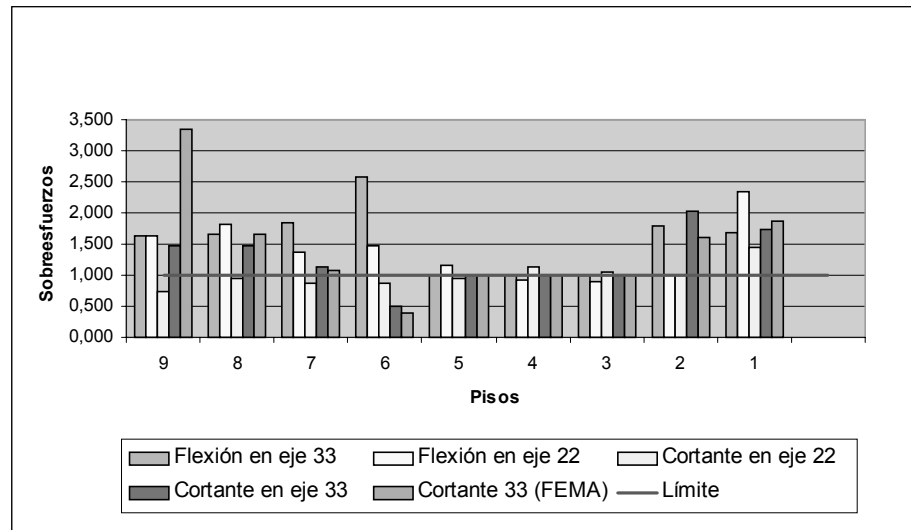
5 se presentan algunos resultados de los índices de sobreesfuerzo, a flexión y a cortante, de las columnas, calculados basándose en los modelos analíticos desarrollados.

Tabla 4. Índices de sobreesfuerzos (en porcentaje) en las columnas de las edificaciones estudiadas (evaluación aleatoria y no total de las columnas)

Estructura	Sobreesfuerzos a cortante (falla frágil) (%)	Sobreesfuerzos a cortante (falla dúctil) (%)	Sobreesfuerzos a flexión (%)	Sobreesfuerzos a compresión (%)
Edificio 1	64	46	60-75	10-25
Edificio 2	59	48	40-48	10-30
Edificio 3 (p1-p3)	8-100	0-100	31-76	0-58
Edificio 4 (p4-p6)	0-100	0-100	0-12	0-3
Edificio 5	50	33
Edificio 6	71	29
Edificio 7	5	10
Edificio 8	50-100	0-50	38-75	0
Edificio 9	20

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Índices de sobreesfuerzos de columnas del edificio 1



Fuente: elaboración propia

Según los análisis efectuados, se concluyó que son críticas las edificaciones 1, 2 y 3, principalmente, por el gran número de fallas de tipo frágil que podrían generar una falla parcial o total de las edificaciones ante la ocurrencia de un evento sísmico. Para las edificaciones 1 y 3 se detectaron posibles fallas por cortante, flexión y compresión en las columnas; así como por cortante y flexión en las vigas, de acuerdo con las especificaciones FEMA 310-356 y NSR-98. En la Tabla 5 se presentan

las posibles fallas de la edificación 1, las cuales indican una deficiencia estructural ante la ocurrencia de un sismo de alguna importancia.

Tabla 5. Porcentaje de fallas de las columnas de la edificación 1

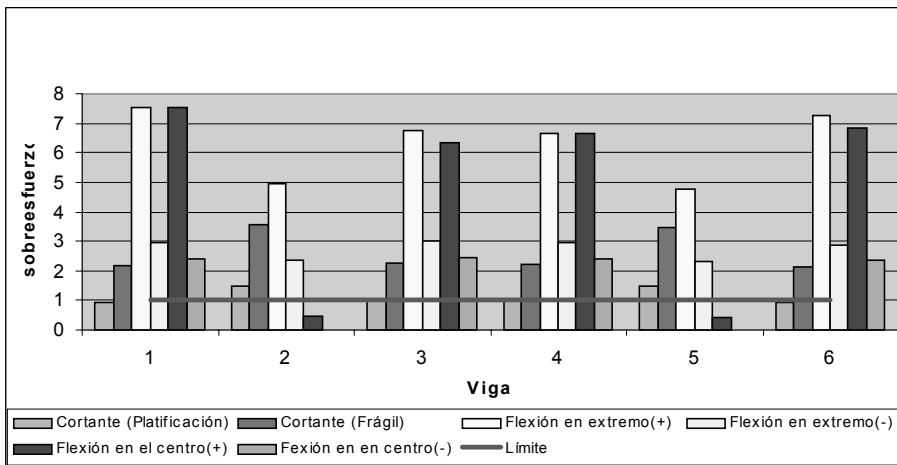
Tipo de falla	Columnas que fallan en la dirección del eje local 33 (%)	Columnas que fallan en la dirección del eje local 22 (%)
Columnas		
Cortante por plastificación de las rótulas en los extremos (NSR-98)	46	43
Cortante por plastificación de las rótulas en los extremos (FEMA-356)	46	36
Cortante por falla frágil (NSR-98)	64	64
Cortante por falla frágil (FEMA-356)	64	46
Falla por flexión	75	64
Falla por compresión	25	18
Vigas		
Falla por cortante y flexión	100	100

Fuente: elaboración propia.

3.2.6.2 Revisión de las vigas

Respecto a la evaluación estructural de las vigas, se revisaron los índices de sobreesfuerzos a flexión y a cortante para cada una de las edificaciones. A manera de ejemplo, en la Tabla 6 se presenta un resumen de los resultados encontrados. Asimismo, en la Figura 6 se presentan algunos resultados para la edificación 1.

Figura 6. Índices de sobreesfuerzos de las vigas del edificio 1



Fuente: elaboración propia

La evaluación de las vigas indica que todas pueden presentar fallas frágiles en las edificaciones 1, 2 y 3. La anterior observación sugiere que ante la ocurrencia de un terremoto, el sistema estructural de algunas de las edificaciones del complejo hospitalario no tendría la capacidad suficiente para soportar las solicitaciones sísmicas. Esto implica que la estructura no puede ser ocupada inmediatamente después del terremoto, tal y como se exige en FEMA-310 [1998] para las edificaciones indispensables. En particular, se destacan los altos índices de esfuerzos cortantes encontrados en las estructuras con entrepisos en sistema reticular celulado. Estos esfuerzos pueden inducir fallas por punzonamiento en la zona de unión entre las viguetas y los capiteles, lo cual podría inducir el colapso del entrepiso.

Tabla 6. Sobreesfuerzos en las vigas de las edificaciones analizadas. Evaluación aleatoria de la muestra y no total de las vigas

Estructura	Sobreesfuerzos a flexión	Sobreesfuerzos a cortante
Edificio 1	20-80	20-60
Edificio 2	20-80	20-60
Edificio 3, cubierta	0-67	0-67
Edificio 3, p2-p4	7-97	20-40
Edificio 3, capitel	50-90	0
Edificio 4D	...	2-69
Edificio 5	...	10-48
Edificio 6	0	20
Edificio 7	10-60	30-70
Edificio 8	...	30

Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Se estima que la metodología seguida, de acuerdo con los lineamientos del FEMA-310, es acorde con el estado de la cuestión de este tipo de estudios y que es aplicable en Colombia.

De la estructura analizada en este documento se puede afirmar que el llamado sistema reticular celulado (*waffle construction*) presenta muchas deficiencias, lo cual se comprobó en el sismo de México de 1985.

Basándose en lo anterior, se puede afirmar que es urgente en Colombia darle prioridad a la revisión de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras construidas con el sistema de reticular celulado.

En el estudio de vulnerabilidad sísmica estructural del complejo hospitalario que se presentó en este documento se encontraron deficiencias en la deriva y sobreesfuerzos en las columnas y en las vigas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., Bommer, J. J. *Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe*. Londres: Department of Civil Engineering, Imperial College of Science and Technology and Medicine, 1996.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Normas colombianas de diseño y construcción sísmo resistentes (NSR-98)*, Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998, Bogotá, 1988.
- ATC-40. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, s. l., 1996.
- ATC-14. *Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings*. San Francisco, 1987.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA)-310. *Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings a Pre-Standard*, s. l., 1998.
- Ingeominas-Uniandes. *Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá*, Bogotá: Ingeominas, 1997.
- Prieto, J. A. *Programa de generación de espectros para diferentes periodos de retorno*. Bogotá: s. e., 2003.
- Prieto, J. y Muñoz, E. *Hacia un diseño sísmico basado en riesgo*. II Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Medellín, Colombia, 2003.