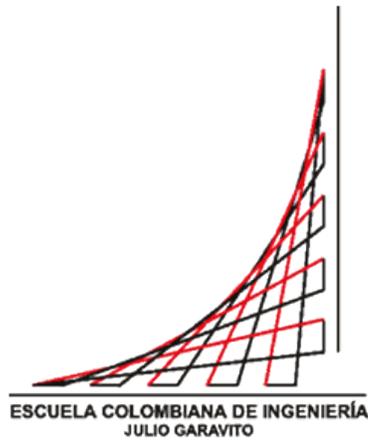


**PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DEL DOCUMENTO ASCE/SEI31-03
“EVALUACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES”**

PAULO MARCELO LÓPEZ PALOMINO



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA “JULIO GARAVITO”
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2014

PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DEL DOCUMENTO ASCE/SEI31-03
“EVALUACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES”

Ing. PAULO MARCELO LÓPEZ PALOMINO

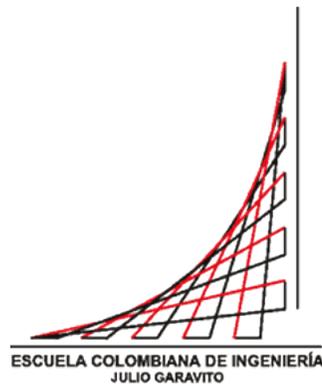
TESIS DE MAESTRÍA

Directores

Ing. PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA

Ing. NANCY TORRES CASTELLANOS

Profesores de Planta



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2014

Bogotá D.C., Enero 30 de 2015

Ingeniero
Germán Santos Granados
Director de Maestría en Ingeniería Civil
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá D.C.

Asunto: Proyecto de Grado

Respetado ingeniero Santos:

De acuerdo al asunto, como aspirante al Título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Estructuras, se presenta el informe final del Proyecto de Grado denominado "Propuesta de Adaptación del Documento ASCE/SEI31-03 "Evaluación Sísmica de Edificaciones Existentes" que fue dirigido por los Ingenieros Pedro Nel Quiroga Saavedra y Nancy Torres Castellanos.

Cordialmente,

Paulo Marcelo López Palomino
C.C. 10.290.312 Popayán (Cauca)
Carné 2082189

Nota de Aceptación

El proyecto de grado denominado “Propuesta de Adaptación del Documento ASCE/SEI31-03 “Evaluación Sísmica de Edificaciones Existentes” presentado por el Ing. Paulo Marcelo López Palomino, con Carné de Estudiante No 2082189, para optar al Título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Estructuras que otorga la Escuela Colombiana de Ingeniería, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Ing. Pedro Nel Quiroga Saavedra
Director de Proyecto

Ing. Nancy Torres Castellanos
Directora de Proyecto

Ing. German Santos Granados
Director de la Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Enero 30 de 2015

*A Techy, Alfredo, Itayosara, Cristabell, Nadia Catalina,
mi bonita Gina y mi sobrino Edoardo por ese apoyo,
cariño y amor iridiscente.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar al ing Pedro Nel Quiroga por su valiosa enseñanza, orientación, paciencia y todo ese tiempo invertido en este trabajo.

A los profesores Nancy Torres, Sandra Jerez, Sandra Aguilar y Carlos Palomino, por esa colaboración y motivación infinita.

A todas esas personas que de una u otra manera brindaron todo ese apoyo que necesité en los momentos más difíciles en el desarrollo del trabajo, como a mis estimados estudiantes, amigos, familiares y compañeros de trabajo.

Y a mi hermana Cristabell por ese “agúzate que te están velando”.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	9
1. OBJETIVOS.....	11
1.1. Objetivo general.....	11
1.2. Objetivos específicos.....	12
2. COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA ASCE/SEI31-03 EVALUACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES” CON EL NSR-10.....	12
2.1. Información preliminar.....	16
2.1.1. Recopilación de la información preliminar.....	16
2.1.2. Nivel de sismicidad.....	16
2.1.3. Nivel de desempeño.....	17
2.1.4. Tipologías de edificaciones.....	18
2.2. Fase No 1 (evaluación simplificada).....	20
2.3. Fase No 2 (evaluación).....	22
2.4. Fase No 3 (evaluación detallada).....	23
3. CONCLUSIONES.....	29
4. RECOMENDACIONES.....	31
5. BIBLIOGRAFÍA.....	32
ANEXO 1. PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DEL DOCUMENTO ASCE/SEI 31-03 “EVALUACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES”	

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Niveles de desempeño de la edificación.....	15
Tabla 1. Parámetros de sismos establecidos.....	16
Tabla 2. Lista de verificación requeridas.....	21
Tabla 3. Ejemplo de elementos controlados por fuerza y deformación.....	24

RESUMEN

En este documento se presenta una propuesta de adaptación de la norma ASCE/SEI31-03 “Seismic Evaluation of Existing Buildings” de la American Society of Civil Engineers, para proporcionar una metodología de evaluación de edificaciones existentes en Colombia. Dicha metodología contiene el procedimiento de evaluación de edificaciones de diversos sistemas estructurales con materiales como: madera, mampostería, acero y concreto reforzado; también determina y analiza progresivamente y con complejidad incremental las posibles deficiencias que presentan los elementos estructurales, no estructurales, cimentaciones y riesgos geológicos, a través de la evaluación de la resistencia, rigidez, configuración estructural y detalles básicos de ductilidad. De esta manera se contará con herramientas para la elección del procedimiento de rehabilitación en función del mejoramiento del desempeño sísmico de la edificación.

Considerando que en Colombia la información existente para realizar evaluación y posterior rehabilitación sísmica no proporciona una orientación prescriptiva para evaluar las construcciones existentes, es necesario contribuir al enriquecimiento de los elementos que contiene el reglamento colombiano de construcción sismo resistente -NSR-10- a través de una propuesta de adaptación del documento ASCE/SEI31-03 “Evaluación Sísmica de Edificaciones Existentes”

Palabras claves: Evaluación Sísmica, Rehabilitación Sísmica, Vulnerabilidad Sísmica, Edificaciones Existentes

INTRODUCCIÓN

La metodología de evaluación e intervención de edificaciones existentes se menciona en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente -NSR-10- capítulo A.10 y, de acuerdo al numeral A.10.4, el procedimiento consiste en confrontar la demanda y la capacidad de la estructura, es decir, que por un lado, se debe comparar las solicitaciones equivalentes estipuladas por dicho reglamento contra la resistencia efectiva de la estructura (basada en planos -si los hay-, o con pruebas de laboratorio que pueden ser destructivas, o en supuestos dependiendo de la configuración estructural) y por otro lado se comparan las deflexiones verticales y las derivas de piso obtenidas contra los desplazamientos permitidos. La metodología de NSR-10 está enfocada a la evaluación de los requisitos de resistencia y rigidez de una edificación.

El NSR-10 da la posibilidad de realizar estudios de evaluación sísmica empleando metodologías alternas como: “Seismic Evaluation of Existing Buildings” de la American Society of Civil Engineers -ASCE/SEI 31-03- y NEHRP “Handbook for Seismic Evaluation of Existing” FEMA 178.

En ese sentido, la metodología ASCE/SEI31-03 para la evaluación de edificaciones existentes además de valorar los requisitos de resistencia y rigidez tiene en cuenta la configuración estructural y los detalles básicos de ductilidad. El proceso de evaluación consta de tres fases de complejidad progresiva para encontrar de manera ordenada las posibles deficiencias de la edificación:

Fase 1 (Inspección o evaluación simplificada): busca encontrar las posibles deficiencias que tiene la edificación a través del uso de tres grupos de listas de verificación (elementos estructurales, no estructurales y de cimentación / problemas geológicos), de acuerdo al nivel de desempeño de la edificación y de la zona de amenaza sísmica.

Fase 2 (Evaluación): se comprueban las deficiencias encontradas en la fase anterior a través de un análisis basado en métodos lineales simplificados o especiales, también se puede analizar el edificio completo si el diseñador lo considera necesario, esta fase tiene por objeto identificar las edificaciones que no requieren una intervención alguna. Si las deficiencias no cumplen con los criterios de aceptación se realizará una evaluación más detallada.

Fase 3 (Evaluación detallada): ahora se evalúan las deficiencias aplicando metodologías para rehabilitación sísmica, se pueden emplear métodos de análisis no lineales.

Con la aplicación de la metodología ASCE/SEI31-03, se determina si la edificación cumple con el objetivo de desempeño seleccionado y de esta manera se escoge el procedimiento de intervención o rehabilitación sísmica más adecuado para los elementos que presenten deficiencias.

En este documento se presenta en el capítulo 2 la comparación de la metodología ASCE/SEI31-03 "evaluación sísmica de edificaciones existentes" con el NSR-10. Y en el anexo a este documento se presenta en medio magnético la propuesta de adaptación del documento ASCE/SEI31-03 "evaluación sísmica de edificaciones existentes".

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Elaborar propuesta de adaptación de la metodología “Seismic Evaluation of Existing Buildings” ASCE/SEI 31-03, del American Society of Civil Engineers (ASCE).

1.2. Objetivos específicos

- Comparar la metodología ASCE/SEI 31-03 con el capítulo A.10 del NSR-10.
- Adaptar las ecuaciones del documento ASCE/SEI 31-03 “Seismic Evaluation of Existing Buildings” al sistema internacional de unidades (S.I).
- Promover la metodología ASCE/SEI 31-03 para que se incluya como un apéndice del reglamento NSR-10 para su estudio preliminar.

2. COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA ASCE/SEI31-03 EVALUACIÓN SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES” CON EL NSR-10

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10, es esencialmente un código de diseño y construcción para edificaciones nuevas, aunque contiene algunas secciones dedicadas a la evaluación y reforzamiento de edificaciones diseñadas y construidas antes de la vigencia del reglamento. Existen otras metodologías desarrolladas específicamente para la evaluación y reforzamiento sísmico de edificaciones, como son las normas: “evaluación sísmica de edificaciones existentes”, ASCE/SEI 31-03, y “rehabilitación sísmica de edificaciones existentes” ASCE/SEI 41-06 y cuyo uso es aceptado por la NSR-10.

El propósito de la norma ASCE/SEI 31-03 es dar una guía a los diseñadores estructurales que efectúan la evaluación para que determinen si un edificio está adecuadamente diseñado y construido para resistir las fuerzas sísmicas.

Dicha metodología evoluciona a partir del FEMA 310 (1998) -manual para la evaluación sísmica de edificaciones-, para que fuera compatible con el FEMA 356 (2000) –rehabilitación sísmica de edificaciones existentes- fue constituida como norma en el año 2003.

En particularidad, la metodología ASCE/SEI 31-03 es una guía para determinar la vulnerabilidad sísmica de una edificación existente: a través de 3 fases de evaluación de orden progresivo.

La filosofía de la ASCE/SEI 31-03 se basa en el diseño por desempeño que consiste en la selección de esquemas de evaluación apropiados que permitan el dimensionado y detalle de los componentes estructurales, no estructurales y contenidos, de manera que, para unos niveles de movimiento del terreno

determinados y con ciertos niveles de fiabilidad, los daños en la estructura no deberán superar ciertos estados límites (BERTERO V V) (2000).

El nivel de desempeño se refiere a los daños esperados de una edificación conforme al sismo utilizado, el informe del comité Visión 2000 de la Asociación de Ingenieros estructurales de California (SEAOC), definió los siguientes niveles de desempeño:

Operacional (O): se esperan daños mínimos por lo que la edificación permanece apta para su uso normal, no hay deflexiones permanentes y la estructura mantiene su resistencia y rigidez inicial.

Ocupación Inmediata (IO): se pronostica poco daño tanto de los elementos estructurales como de los no estructurales, no hay deflexiones permanentes, se requerirá de algunas reparaciones menores, pero las partes críticas de la edificación son habitables. La estructura mantiene la mayor parte de su resistencia y rigidez inicial

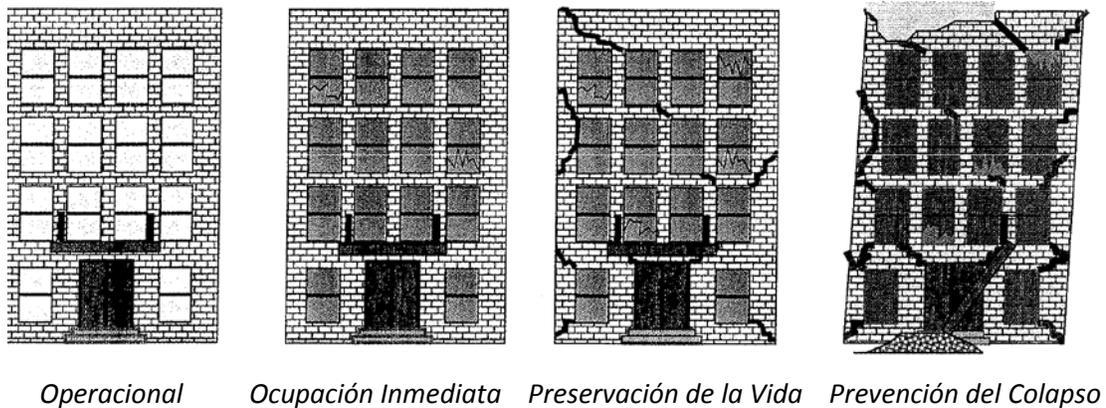
Preservación de la Vida (LS): Los daños de la estructura son importantes pero se mantiene un margen contra el colapso estructural, ya sea parcial o total, pueden producirse lesiones, pero se espera que el riesgo total de amenaza para la vida como resultado de un daño estructural sea bajo. Aunque la estructura dañada no es un riesgo inminente de colapso, sería prudente para implementar las reparaciones estructurales, instalar arriostramientos temporales antes de volver a ocupar el edificio.

Prevención del Colapso (CP): los daños son tan importantes que el edificio está en el borde de un colapso parcial o total. Se ha producido un daño sustancial a la estructura, incluyendo la degradación significativa en la rigidez y la resistencia del sistema de resistencia de fuerza lateral, grandes deformaciones permanente

laterales de la estructura, y (en un grado limitado) la degradación de la capacidad de transporte de carga vertical. Sin embargo, todos los componentes importantes del sistema de resistencia de carga vertical seguir transportando las cargas. Existe riesgo significativo de lesiones debido a los peligros de la caída de escombros. La estructura puede no ser posible repararla y no es seguro volver a ocuparla (Portland Public Schools -KPF Project No. 209193) (2009).

En la figura 1 se ilustra el daño esperado de la edificación para los niveles de desempeño:

Figura 1. Niveles de desempeño de la edificación



Portland Public Schools -KPF Project No. 209193 (2009)

Se definieron estos niveles de desempeño esperando que cuando ocurra un sismo se preserve la vida; está basado en el comportamiento histórico de las edificaciones ante sismos pasados, por ejemplo en la experiencia del sismo de San Francisco en 1971 se evidenció el daño en los hospitales dejando como conclusión que se deben diseñar edificaciones indispensables (necesarias para la operación después del sismo de diseño) (ASCE 31-03) (2003).

El tipo de sismo de diseño está en función de la probabilidad de excedencia o periodo de retorno:

Tabla 1. Parámetros de sismos establecidos

Probabilidad de excedencia del sismo	Periodo de retorno en años
50% / 50 años	72
20% / 50 años	225
10% / 50 años	474
2% / 50 años	2,475

ASCE 41-06 (2007)

El tipo de sismo de 10% / 50 años se denomina BSE-1, este es el nivel de sismo de diseño utilizado en los códigos de construcción actuales.

El sismo de 2% / 50 años es denominado BSE-2, también es conocido como el Sismo Máximo Considerado (EMC) o el mayor sismo que se cree que es posible en el sitio. Este evento es lo que podría denominarse como "el grande", o el caso de zona de subducción de Cascadia de la costa de Oregon USA (Portland Public Schools -KPF Project No. 209193) (2009).

Por otro lado, el reglamento NSR-10, es una adaptación del documento ATC-63 (Applied Technology Council) y con algunos aspectos de NEHRP, (National Earthquake Hazard Reduction Program), en donde se incluyen estudios de zonificación sísmica para el territorio colombiano.

La filosofía de diseño NSR-10 manifiesta que “una edificación diseñada siguiendo los requisitos de este reglamento, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño a los elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso”. El diseño de elementos se basa

en la comparación de la resistencia requerida y la de diseño usando el método de la resistencia última.

2.1. Información preliminar

2.1.1. Recopilación de información de la edificación

La metodología ASCE/SEI 31-03 inicia con una fase denominada de inspección, en donde se recopilan datos de la edificación como los planos, tipo y edad de la edificación, se hace la respectiva visita al sitio y se practican las pruebas necesarias para evaluar la resistencia de los elementos.

Una posible desventaja que se tiene a la hora de hacer una evaluación, es la de no poder contar con información, a menudo es común que la edificación carezca de planos, además de que no se pueda llevar a cabo ensayos destructivos como lo indican las normas de materiales, entonces el profesional de diseño se ve obligado a realizar la revisión por medio de unos valores por defecto.

Para la ASCE/SEI 31-03 los valores por defecto, son los siguientes:

- $f'c = 14$ MPa para concreto
- $f_y = 240$ MPa para el acero de refuerzo
- $f_y = 240$ MPa para el acero estructural
- $f'm = 7$ MPa
- $v_{te} = 0.14$ MPa para unidades de mampostería de concreto
- $v_{te} = 0.07$ MPa para unidades de mampostería de arcilla
- $F_{pe} = 110$ kN para resistencia efectiva de un torón presforzado

Dichos valores resultan muy conservadores e indican que los materiales tienen una resistencia mínima. El NSR-10, no proporciona unos valores por defecto, el profesional de diseño los establece Implícitamente conforme a las indicaciones de

los programas de computador o de su experiencia profesional de acuerdo al tipo de edificación que se está evaluando.

2.1.2. Nivel de sismicidad

El nivel de sismicidad corresponde a lo que el NSR-10 denomina “zona de amenaza sísmica” que depende de localización de la edificación y está en función de la aceleración pico efectiva. La zona de amenaza sísmica se clasifica en alta, moderada y baja.

2.1.3. Nivel de desempeño

El documento ASCE/SEI 31-03 aplica la metodología para los niveles de desempeño ocupación inmediata (IO) y preservación de la vida (LS).

El NSR-10 no hace referencia directamente a niveles de desempeño, pero los utiliza implícitamente mediante el coeficiente de importancia (I), que tiene como objeto amplificar la aceleración espectral (S_a) para contar con fuerzas sísmicas más grandes. El coeficiente I está en función del uso de la edificación, el NSR-10 define cuatro grupos de uso: indispensables, de atención a la comunidad, ocupación especial y ocupación normal.

Con la aplicación del coeficiente I pretende llevar a las edificaciones de uso indispensable al nivel de desempeño ocupación inmediata, y las de ocupación normal al nivel de desempeño preservación de la vida.

La ASCE 31-03 considera el máximo sismo para una probabilidad de excedencia de 2% / 50 años (periodo de retorno de 2500 años). El NSR-10 considera un sismo máximo de 10% / 50 años (periodo de retorno de 475 años). Sin embargo, la ASCE 31-03 hace una aclaración con respecto a este tema, indicando que el

diseñador o el propietario de la edificación o la autoridad reguladora podrían considerar el uso del valor del 10% / 50 años, porque la mayoría de edificaciones porque la mayoría de códigos de edificaciones nuevas usan dicho parámetro.

Adicionalmente, el NSR-10 en su Cap. A.10.3 permite ajustar la probabilidad de excedencia del 20% / 50 años en una rehabilitación sísmica para el rango de desempeño de seguridad limitada y está en función de la aceleración pico efectiva reducida (A_e) caracterizada para cada región del país. Y para los movimientos sísmicos de umbral de daño el sismo considerado es de 20% / 50 años (grupos de IV – III), para la determinación de la operatividad de la edificación en el rango elástico después de ocurrir el sismo de diseño.

2.1.4. Tipologías de edificaciones

La ASCE 31-03 cuenta con 15 tipologías de estructuras de materiales madera, acero estructural, concreto armado y mampostería:

1. Pórticos de madera livianos (W1 – W1A)
2. Pórticos de madera, comercial e industrial (W2)
3. Pórticos de acero a momento (S1)
4. Pórticos de acero arriostrados (S1A – S2 – S2A)
5. Pórticos de acero livianos (S3)
6. Pórticos de acero con muros a cortante de concreto (S4)
7. Pórticos de acero con muros a cortante de mampostería no reforzada (S5 – 5A)
8. Pórticos de concreto resistentes a momento (C1)
9. Muros a cortante de concreto (C2 –C2A)
10. Pórticos de concreto con muros a cortante de mampostería no reforzada (C3 –C3A)
11. Muros a cortante de concreto prefabricado –Tilt-Up- (PC1 –PC1A)

12. Pórticos de concreto prefabricado (PC2 – PC2A)
13. Muros portantes de mampostería reforzada con diafragmas flexibles (RM1)
14. Muros portantes de mampostería reforzada con diafragmas rígidos (RM2)
15. Muros portantes de mampostería no reforzada (URM – URMA)

El NSR-10 reconoce 4 tipos de sistemas estructurales y toda edificación o cualquier parte de ella debe quedar clasificada allí:

- Sistema de muros de carga: sistema estructural que no dispone de un pórtico esencialmente completo y en el cual las cargas verticales son resistidas por los muros de carga y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales.
- Sistema combinado: (a) Las cargas verticales son resistidas por un pórtico no resistente a momentos, esencialmente completo, y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales, o (b) Las cargas verticales y horizontales son resistidas por un pórtico resistente a momentos, esencialmente completo, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales, y que no cumple los requisitos de un sistema dual.
- Sistema de pórtico: compuesto por un pórtico espacial, resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, que resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales.
- Sistema dual: tiene un pórtico espacial resistente a momentos y sin diagonales, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales.

La evaluación se hace en tres fases de complejidad creciente:

Fase 1. Evaluación simplificada

Fase 2. Evaluación

Fase 3. Evaluación detallada

2.2. Fase 1 (evaluación simplificada)

Esta fase consiste en tres grupos de listas de verificación que permiten una evaluación rápida de los elementos estructurales y no estructurales de la edificación así como de las condiciones del sitio. El propósito de esta fase es identificar rápidamente edificios que cumplen con los requisitos o por el contrario deficiencias potenciales de otros edificios. El nivel de análisis es mínimo y muchos cálculos se pueden hacer de forma aproximada y rápida.

Una vez clasificada la edificación (sistema estructural, zona de amenaza y nivel de desempeño), la ASCE 31-03 indica que se debe completar unas listas de verificación de los diferentes componentes de la edificación como: nivel de sismicidad bajo, estructural básica, estructural complementaria, cimentaciones y sitios de riesgo geológico, no estructural, no estructural intermedia y no estructural complementaria, tal como se indica en la tabla 2.

Para la categoría llamada “zona de amenaza sísmica baja” se emplea para las edificaciones que se encuentran en esas zonas.

El propósito de las listas de verificación es identificar rápidamente a las edificaciones que cumplen con las indicaciones de dicha metodología. Familiariza a los diseñadores con la edificación y sus posibles deficiencias y comportamiento sísmico.

Tabla 2. Lista de verificación requeridas

Zona de Amenaza Sísmica	Nivel de Desempeño	Lista de Zona de amenaza sísmica baja	Lista Estructural básica	Lista Estructural complementaria	Lista Cimentaciones y Sitios de Riesgo Geológico	Lista No estructural básica	Lista No estructural intermedia	Lista No estructural complementaria
Baja	LS	▶						
	IO		▶		▶	▶		
Moderada	LS		▶		▶	▶		
	IO		▶	▶	▶	▶	▶	
Alta	LS		▶	▶	▶	▶	▶	
	IO		▶	▶	▶	▶	▶	▶

ASCE 31-03 (2003)

El propósito de las listas de verificación es identificar rápidamente a las edificaciones que cumplen con las indicaciones de dicha metodología. Familiariza a los diseñadores con la edificación y sus posibles deficiencias y comportamiento sísmico.

Por ejemplo, la lista de verificación estructural contiene los siguientes puntos a evaluar:

- Sistema de construcción: verificación de la geometría, discontinuidades, irregularidades (torsión – piso débil – flexible).
- Sistema de resistencia de fuerza lateral: comprobaciones de esfuerzo cortante y axial.
- Conexiones: verificación de los detalles de las uniones o conexiones.

Para comprobar la resistencia y rigidez la metodología ASCE 31-03 utiliza ecuaciones aproximadas de ciertos elementos de la edificación como: deriva de piso, esfuerzo cortante en columnas, esfuerzo cortante en muros, arriostramiento diagonal, conexiones de prefabricados, fuerza axial debido al volcamiento, fuerzas de conexión del diafragma flexible y elementos presforzados.

Para el análisis del sistema de resistencia lateral, utiliza el pseudo cortante lateral que representa la fuerza que se requiere en un análisis estático lineal para imponer la deformación real esperada de la estructura en su estado de fluencia para el sismo de diseño.

Para tener en cuenta el comportamiento de la estructura en el rango inelástico utiliza unos factores denominados m que están incluidos dentro de algunas ecuaciones nombradas anteriormente. Estos factores se establecen con valores diferenciados para la fase 1 y 2. Este parámetro se profundizará cuando se mencione en la fase 2.

Los elementos no estructurales que se evalúan de acuerdo a la listas de verificación son los siguientes: particiones, cielos rasos, accesorios de iluminación, acristalamientos, enchapes, parapetos, cornisas, chimeneas, escaleras, equipo eléctricos y mecánicos, tuberías, almacenamiento de materiales peligrosos, Ascensores, equipamiento de la edificación (archivadores).

El NSR-10 no contiene listas de verificación para los componentes de las edificación ni ecuaciones aproximadas que evalúen preliminarmente la resistencia y rigidez de la edificación, pero menciona en el Cap. A.10.2 que se deben hacer investigaciones o exploraciones a la estructura a los siguientes aspectos: documentos descriptivos del diseño de la estructura y cimentación; calidad de la construcción; estado de conservación; evidencia de deflexiones, corrosión de armaduras y fallas locales; asentamientos de la cimentación y su efectos en la estructura, y las modificaciones que pudieron haber afectado la integridad de la estructura como explosiones, incendios, sismos, remodelaciones, aumentos de cargas y otras. El procedimiento de evaluación se mencionará en la fase No. 2.

2.3. Fase 2 (evaluación)

La metodología ASCE 31-03 para esta fase presenta dos opciones para realizar la evaluación: solo para los elementos que presentaron deficiencias en la fase No. 1 o para toda la edificación.

El método de análisis sísmico a utilizar son: el estático lineal (LSP), dinámico Lineal (LDP), método especial (mampostería no reforzada con diafragmas flexibles), método para elementos no estructurales (para este último indica pruebas de resistencia para los materiales). El método especial se basa en la investigación de ABK (1984) donde se demostró que las edificaciones de mampostería no reforzada con diafragmas flexibles se comportan de manera única.

El LSP modela la estructura con la rigidez lineal elástica y con un amortiguamiento viscoso.

Los métodos lineales representan una idea aproximada del comportamiento no lineal de la estructura pero ignoran la redistribución de esfuerzos en el campo plástico y otros efectos no lineales.

LDP se basa en el uso de valores reales de aceleración espectral resultante de los propios espectros de respuesta y no se reduce por el coeficiente de disipación de energía.

Para el modelo estructural se deben clasificar los elementos primarios y secundarios de acuerdo al grado de participación que tiene cada uno de ellos para resistir fuerzas sísmicas.

Los criterios de aceptación esta basados en las acciones de cada elemento, que pueden ser de dos tipos: controladas por deformación (elementos dúctiles) o por

fuerza (elementos frágiles). Algunos ejemplos de elementos controlados por deformación o fuerza se presentan en la tabla No. 3.

Tabla 3. Ejemplo de elementos controlados por fuerza y deformación

Elementos	Acciones Controladas por Deformación	Acciones controladas por Fuerza
Momentos en Pórticos:		
Vigas	M	V
Columnas	M	P, V
Nudos	-	V'
Muros a Cortante	M, V	P

ASCE 31-03 (2003)

Acciones Controladas por deformación: es una acción con una deformación asociada a la que se le permite exceder el valor límite de fluencia del elemento que se está evaluando.

$$Q_{CE} \geq Q_{UD} / m$$

Q_{CE} = Resistencia esperada,

Q_{UD} = Acciones de cargas gravitacionales y cargas sísmicas.

$$Q_{CE} = 1.25 R_n$$

El factor de 1.25 se destina a eliminar el conservadurismo del método de la resistencia última, la cual fundamenta en el comportamiento inelástico de la estructura en el instante de la rotura cuando está sometida a unas cargas amplificadas. Porque aplicando este factor, la resistencia real de los elementos es generalmente mayor que la resistencia de diseño. Este factor es el que utiliza el NSR-10 en su capítulo 21 para el diseño a cortante de elementos dúctiles, donde se calcula un momento probable indicando que el acero estará trabajando en la zona de endurecimiento de la curva esfuerzo deformación y tal vez llegará al máximo esfuerzo a tensión del acero.

El factor ϕ de reducción de resistencia nominal de los códigos de edificaciones nuevas no se emplean en el cálculo de las capacidades de los elementos en el análisis estático o dinámico lineal.

Acciones Controladas por fuerza: es una acción con una deformación asociada a la que no puede exceder el valor límite de fluencia del elemento que se está evaluando.

$$Q_{CN} \geq Q_{UF}$$

Q_{CN} = Resistencia nominal

Q_{UF} = Acciones de cargas gravitacionales y cargas sísmicas.

Los factores de modificación m se encuentran en el denominador de la resistencia requerida, para limitar la capacidad de ductilidad de los elementos controlados por la deformación, porque con el cálculo del seudo cortante basal, la estructura experimenta esfuerzos mayores a los que realmente desarrollaría, entonces los factores m reducen la capacidad para la respuesta no lineal. La ASCE 31-03 lo establece para cada tipo de elemento y material.

El NSR-10 inicia el estudio de vulnerabilidad calculando las solicitaciones equivalentes. Para ello se determina el factor R' (coeficiente de disipación de energía) de acuerdo al sistema estructural y la información disponible (corresponde a la unidad si la estructura es de mampostería no reforzada, y si no se tiene información de la edificación como planos y memorias de cálculo se considera como tres cuartos del establecido para el sistema estructural).

El factor de modificación R' de NSR-10 se basa en una filosofía de diseño ampliamente aceptada que considera la respuesta no lineal de la estructura cuando esta se somete a un sismo de diseño; los desplazamientos de la

edificación calculados mediante las fuerzas sísmicas reducidas por el factor R' son menores a las que el edificio experimentaría durante el sismo de diseño (ASCE 31-03) (2003).

El factor R' se aplica a todo el sistema estructural sin distinguir el comportamiento frágil de algunos elementos pretendiendo establecer que la edificación tendrá una ductilidad uniforme. El R' parte de la premisa que las deformaciones en el rango elástico son las mismas en la rango inelástico bajo el mismo nivel de carga (principio de iguales deformaciones) para periodos largos, para lo contrario utiliza el principio de igualdad de energía. A mayor R' la estructura alcanza prematuramente la fluencia generando mayor ductilidad, lo que indica que si hay disipación de energía pero con daños residuales (D. M. Ruiz) (2012). Es decir que la estructura debe degradarse más rápido si quiere disipar energía.

El análisis sísmico se realiza por el método estático lineal o dinámico lineal.

Una vez establecida las sollicitaciones equivalentes, se realiza una comparación entre la demanda y la capacidad de los elementos estructurales mediante la definición de los índices de sobreesfuerzo y de flexibilidad.

Índice de sobreesfuerzo = Resistencia actuante / Resistencia efectiva (N_{ef})

Resistencia actuante = Acciones de cargas gravitacionales y cargas sísmicas.

Resistencia efectiva (N_{ef})

$N_{ef} = \phi_c * \phi_e * N_{ex}$; donde los coeficientes ϕ_c y ϕ_e son calificadores de la calidad del diseño y la construcción o del estado de la construcción y se establecen de manera cualitativa. N_{ex} se refiere a la resistencia de los elementos obtenida a través de la información disponible.

Índice de flexibilidad = deflexión o deriva obtenida análisis / deflexión o deriva permitida

El análisis de la vulnerabilidad consiste en la determinación de los índices de sobreesfuerzo individual, formulación de mecanismos de falla y expresar la vulnerabilidad como fracción de la rigidez ($1/\text{índice de flexibilidad}$) y de la resistencia ($1/\text{índice de sobreesfuerzo}$). Estos parámetros indican el porcentaje de rigidez y de resistencia respectivas que tendría la edificación que se está evaluando en relación a una construcción nueva y para el sismo de diseño. Los criterios de aceptación son favorables cuando estos cocientes son mayores a 1.

2.4. Fase No 3 (evaluación detallada)

Se puede realizar la evaluación solo de los elementos que presentaron deficiencias en las evaluaciones de fase I o II, o en su defecto para toda la edificación. El diseñador tendrá el juicio de realizar una evaluación más detallada cuando encuentre que las evaluaciones de la fase I y II son conservadoras (debido a los factores simplificadores que usan) y habría una ventaja económica u de otro tipo respecto a una evaluación más detallada.

Se debe tener un cuidado especial en la aplicación de los procedimientos disponibles para realizar una evaluación detallada porque se utilizan disposiciones que no están hechas para la evaluación sísmica como las del ASCE 41-06 o del ATC-40 que son normas para el diseño de la rehabilitación sísmica. Además se puede emplear métodos de análisis sísmico no lineal.

La ASCE 31-03 indica que los niveles de fuerza se reducen por un factor de 0.75 por las siguientes razones: (a) la resistencia real de los elementos será mayor que la utilizada en la evaluación, (b) en un edificio existente no es necesario tener el

mismo nivel de factor de seguridad como un edificio nuevo porque la vida útil puede ser inferior.

El NSR-10 en su apéndice A.3 indica que se puede utilizar el método estático no lineal -push-over y establece su procedimiento. Dicho apéndice no es de carácter obligatorio y se ha incluido con el fin de que se estudie preliminarmente con el fin de adoptarlo en ediciones futuras del reglamento si se considera conveniente.

Igualmente, en el capítulo A.6.4.1.2, el NSR-10 indica que cuando se haya efectuado un análisis inelástico verificando el desempeño de la totalidad de los elementos estructurales en un rango de desempeño no mayor a “Protección de la Vida” (LS según los requerimientos del ASCE 31 y ASCE 41), las derivas pueden multiplicarse por 0.7 antes de hacer compararlas con las admisibles. Esto significa que la deriva permitida es del 1,41% ($1 / 0.7$) cercano al valor que exigía el código de 1984 (CCCSR84) que era del 1,5% (D. M. Ruiz) (2012).

En ese orden de ideas, la metodología ASCE/SEI 31 fue desarrollada específicamente para evaluar elementos estructurales, no estructurales, y de cimentación de las edificaciones existentes.

Considerando que en Colombia la disponibilidad de información existente para realizar evaluación sísmica y su posterior procedimiento de rehabilitación no proporciona una orientación prescriptiva para la evaluación de las construcciones existentes, se hace necesario contribuir con una propuesta basada en el documento ASCE/SEI 31-03, para enriquecer los elementos que contiene el reglamento NSR-10 que permita al ingeniero estructural contar con una mayor variedad de herramientas (criterios – procedimientos) de orientación acerca de los detalles, deficiencias y comportamientos usuales de los tipos de edificaciones

comunes observados ante sismos pasados para los niveles de desempeño de Preservación de la Vida y Ocupación Inmediata.

Adoptar la metodología de la evaluación sísmica de construcciones existentes contribuye al avance del país en la promoción de soluciones para la rehabilitación estructural en todos los niveles de amenaza sísmica. No debemos olvidar que el primer reglamento sismorresistente se puso en vigencia en Colombia en 1984 y muchas de las construcciones anteriores a ese año, no cumplen con requisitos de sismo resistencia.

En el anexo 1. Se presenta la propuesta de adaptación del documento ASCE/SEI31-03 “Evaluación Sísmica de Edificaciones Existentes”.

3. CONCLUSIONES

La metodología de evaluación sísmica que indica la norma ASCE/SEI 31-03 es adecuada para su uso en los edificios de nuestro país porque proporcionan un procedimiento ordenado, pedagógico y exhaustivo. La evaluación sísmica contiene varios niveles de evaluación con diferentes grados de complejidad aplicados para una variedad de tipos de estructuras y de materiales. El análisis sísmico tiene en cuenta la ductilidad diferenciada en toda la edificación para cada elemento en función del material y del tipo de acción.

De igual manera la metodología ASCE/SEI 31-03 tiene en cuenta procedimientos para elementos no estructurales, cimentaciones y riesgos geológicos. Sin embargo, requiere un mayor grado de comprensión por parte de los profesionales del diseño y a veces puede ser confuso para la falta de datos específicos.

Es de resaltar la importancia que le da a la evaluación de elementos no estructurales (ecuaciones para criterios de aceptación) que son los más vulnerables bajo un sismo, y en nuestro país no se les presta la atención necesaria.

Los criterios de aceptación de la metodología ASCE/SEI 31-03 permiten estudiar de una manera más precisa el comportamiento de la edificación en el rango inelástico. Da herramientas para la toma de decisiones de un óptimo sistema de rehabilitación sísmica traducidas en ahorro (costos en la reconstrucción). Además es compatible con la norma ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings”

El procedimiento de la NSR–10 para la evaluación y rehabilitación sísmica utiliza principios elementales de metodologías aplicables al diseño de edificios nuevos

como es el uso del factor de disipación de energía asumido uniforme para toda la edificación. La aplicación de la metodología NSR-10 carece de medidas específicas de evaluación y rehabilitación por lo que el procedimiento queda a juicio del diseñador. Su procedimiento solo considera un nivel de excitación BSE-1 (10%/50 años) por lo que se deben definir espectros de diseño que tengan la siguiente probabilidad de excedencia: 50% / 50 años, 20% /50 años y el 2%/50 años.

La futura actualización de la NSR deberá incluir un apéndice que contenga una adaptación de la metodologías ASCE/SEI 31-03 y 41-06 para sea estudiado preliminarmente por los diseñadores del país con el fin de adoptarlo en ediciones futuras del reglamento si se considera conveniente.

Esta metodología contribuye a la ingeniería del país para que se mejoren las prácticas constructivas y los estudios de evaluación sísmica (vulnerabilidad).

4. RECOMENDACIONES

Realizar estudios para definir los factores m propios de los de elementos para los materiales empleados en Colombia.

Se debe tener en cuenta los valores de resistencia de los materiales empleados en el país, porque los modelos estructurales parten de valores sobreestimados, por ejemplo la ecuación de referencia del módulo de elasticidad.

Se debe incluir en las listas de verificación sistemas estructurales usados en el país como es el caso de mampostería confinada.

Se debe consolidar las deficiencias propias de las edificaciones del país ante sismos pasados, para que se incluyan dentro de las listas de verificación de los sistemas estructurales más usados en Colombia.

5. BIBLIOGRAFÍA.

Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. (2010). Ley 400 de 1997 (Modificada Ley 1229 de 2008), Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá D.C.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (2004). Seismic Evaluation of Existing Buildings. ASCE/SEI 31-03 Reston, Va.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. ASCE/SEI 41-06 Reston, Va.

OLEJUA, F. (2012). Propuesta de Traducción y Adaptación a Colombia de la Norma ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Trabajo de grado de maestría. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.

BERTERO, V V. (2000). Seismic engineering: conventional vs. innovative approach. 12WCEE. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Portland Public Schools (PPS) (2009). Seismic Study of Existing School Facilities. KPFF Project No. 209193.

Rai, D. C. (2005). Review of Documents on Seismic Evaluation of Existing Buildings, IITKGSDMA-EQ03-V1.0, National Information Center of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, India.

RUIZ, D M. (2012). Edificios de concreto reforzado siguiendo la NSR-10 vs sismo de Quetame registrado en Bogotá D.C. Ingeniería y Ciencia - ing.cienc., [S.l.], v. 8, n. 16, p. 129-189, nov. 2012. ISSN 2256-4314.