

**LINEAMIENTOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y  
READECUACIÓN ESTRUCTURAL**

**MANUEL ALFREDO LÓPEZ MENJIVAR  
JAIME HERNÁNDEZ DE PAZ  
SERGIO SUNLEY**

**DICIEMBRE 2020**

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción .....	4
2.	Fundamentos para la evaluación de edificios existentes.....	5
2.1.	Introducción .....	5
2.2.	Niveles de desempeño .....	5
3.	Objetivos de desempeño y amenaza sísmica.....	10
3.1.	General.....	10
3.2.	Definiciones y símbolos.....	10
3.3.	Objetivos de Desempeño .....	11
3.3.1	Objetivo Básico de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE) .....	12
3.3.2	Objetivo Básico de Desempeño para Nuevos Estándares de Construcción (BPON) .....	14
3.4.	Niveles Limite en los Objetivos de Desempeño .....	14
3.4.1.	Niveles de Desempeño Estructural.....	14
3.4.2.	Niveles de Desempeño No Estructural .....	15
3.4.3.	Designación de Límites en los Niveles de Desempeño .....	15
3.5.	Amenaza Sísmica.....	16
3.5.1	Procedimiento general para la amenaza sísmica. ....	16
3.5.2	Análisis de sitio .....	17
3.5.3	Aceleración historia del movimiento del terreno.....	17
3.5.4	Espectro general de respuesta .....	17
3.5.5	Nivel de Sismicidad .....	18
4.	Procedimientos de análisis y criterios de aprobación.....	19
4.1.	General.....	19
4.2.	Selección del procedimiento de análisis .....	19
4.2.1	TIER 1 Revisión .....	19
4.2.2	TIER 2 Evaluación y Reforzamiento Basados en Déficit .....	19
4.2.3	TIER 3 Evaluación y Reforzamiento Sistemático .....	20
4.3.	Determinación de las fuerzas y desplazamiento objetivo .....	23
4.3.1	Calculo de la pseudo fuerza sísmica estática para el procedimiento estático lineal (ASCE 41-17, sección 7.4.1).....	23
4.3.2	Escaleo de la pseudo fuerza sísmica para el procedimiento lineal dinámico (ASCE 41-17, sección 7.4.2).23	
4.3.3	Determinación del desplazamiento objetivo.....	23
4.4.	Elementos primarios y secundarios .....	26
4.5.	Acciones controladas por fuerza y controladas por deformación .....	28
5.	Tier 1, tier 2 y TIER 3 .....	30
5.1.	General.....	30

5.2.	Tier 1 Revisión (ASCE 41-17 capítulo 4).....	30
5.3.	Tier 2 Evaluación y reforzamiento basados en déficit (ASCE 41-17 capítulo 5) .....	31
5.4.	Tier 3 Evaluación y reforzamiento sistemáticos (ASCE 41-17 capítulo 6) .....	32
6.	Evaluación de edificios dañados por sismos .....	35
6.1.	Introducción .....	35
6.2.	Preparación de la respuesta.....	35
6.2.1	Estrategia base .....	36
6.2.2	Personal .....	38
6.2.3	Capacitación .....	38
6.2.4	Equipo.....	39
6.2.5	Instituciones que conforman el Sistema Nacional de Evaluadores .....	40
6.2.6	Protocolo para asignación de los edificios a evaluar .....	40
6.2.7	Verificaciones adicionales.....	41
6.3.	Metodologías para la evaluación de edificios dañados por sismos .....	42
6.4.	Etapa 1: Evaluación rápida .....	43
6.4.1	Objetivo .....	44
6.4.2	Procedimiento .....	45
6.4.3	Formulario .....	47
6.4.4	Colocación de la bandera .....	49
6.5.	Etapa 2: Evaluación intermedia.....	49
6.6.	Etapa 3: Evaluación estructural.....	54
7.	Lineamientos generales para la readecuación estructural .....	60
7.1.	General.....	60
7.2.	Proceso de rehabilitación.....	62
7.3.	Descripción general de algunas técnicas de rehabilitación.....	63
7.3.1	Reparación de grietas .....	63
7.3.2	Conexión entre elementos existentes y materiales o elementos nuevos .....	63
7.3.3	Encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado.....	64
7.3.4	Encamisados de vigas, columnas o nudos con acero .....	65
7.3.5	Encamisados de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras ..	65
7.3.6	Adición de muros de concreto.....	66
7.3.7	Adición de arriostramientos de acero .....	67
7.3.8	Separación y recorte de pretilas en marcos de concreto o acero .....	68
7.3.9	Sistema de protección pasiva .....	69
8.	Referencias.....	71

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad de un edificio se define como el proceso o metodología para identificar, tasar y determinar las deficiencias estructurales y no estructurales que no le permiten alcanzar un determinado objetivo de desempeño. Por otra parte, la readecuación estructural se puede establecer como las medidas tendientes a mejorar el desempeño sísmico de los componentes de un edificio corrigiendo las deficiencias identificadas en la evaluación sísmica respecto a un objetivo de desempeño dado.

Este documento tiene por objeto presentar lineamientos básicos para la evaluación de la vulnerabilidad y la readecuación estructural con el fin de que sirvan como insumos para desarrollar, con mayor amplitud y especificidad, disposiciones que se empleen en el proceso de evaluación, diagnóstico y rehabilitación estructural de edificaciones y en programas de mitigación del riesgo por sismos en la infraestructura física del país.

En general, se deberá revisar la seguridad estructural de una edificación cuando se tengan indicios de que ha sufrido algún daño, presente problemas de servicio o de durabilidad, vaya a sufrir alguna modificación, o bien, cuando se requiera verificar el cumplimiento del nivel de seguridad establecido en estas normas de construcción vigentes en el país.

Este documento se divide en tres grandes secciones, la primera, de los capítulos 2 al 5 se desarrollan los diferentes apartados para la evaluación del nivel de seguridad estructural de edificios existentes. Tales premisas son aplicables a todos los tipos de edificios y permitirán desarrollar una metodología práctica y efectiva para estimar el desempeño estructural de un edificio. Se llegó a la conclusión que, en base al trabajo que se ha realizado en conjunto con los otros componentes del proyecto, y debido a que la tendencia en la Ingeniería Sísmica y Estructural es hacia la evaluación y diseño por desempeño se ha seleccionado el ASCE 41-17 *“Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings”* como base para esta sección, adaptando lo concerniente a la amenaza sísmica a nuestra realidad.

La segunda sección, comprendida en el capítulo 6, está orientada a la evaluación de edificios después de un sismo. Allí se desglosa la estrategia base a seguir, el personal necesario y el protocolo de actuación. Vale la pena aclarar que, en este caso, en base a la extensa literatura consultada la propuesta descrita es la que mejor se adapta a las condiciones nacionales, tomando en consideración aspectos tales como el tipo de estructuras aplicables, las características a evaluar, los niveles de seguridad, el nivel de pericia y conocimiento de los evaluadores y el tiempo de ejecución.

Y, la tercera sección, en el capítulo 7, esboza lineamientos generales para la readecuación o rehabilitación estructural. Debido a que los casos de rehabilitación estructural son tan variados y cada uno de ellos presentan características particulares es imposible dar soluciones completas para cada eventualidad. Por lo anterior, en este apartado únicamente se esbozan líneas generales relativas a esta situación.

## 2. FUNDAMENTOS PARA LA EVALUACIÓN DE EDIFICIOS EXISTENTES

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos del 2 al 5 se presentan diferentes apartados a seguir para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios existentes. Los conceptos como niveles de desempeño, objetivos de desempeño, amenaza sísmica para la evaluación de edificios existentes y los procedimientos generales de análisis y criterios de aprobación son explicados. Todo lo anterior enmarcado en los conceptos de la evaluación y diseños basados en el desempeño propuesta por el ASCE 41-17. En resumen, estos conceptos se implementan a través de una selección de uno o más Objetivos de Desempeño los cuales consisten en la combinación de los Niveles de Desempeño del Edificio y los Niveles de Amenaza Sísmica. Por otra parte, un Nivel de Desempeño del Edificio resulta de la combinación del desempeño de los componentes estructurales y no estructurales. Vale la pena mencionar que algunos aspectos han sido adaptados a la realidad nacional, principalmente lo relacionado a la amenaza sísmica, en base a los nuevos criterios presentados por el MARN al respecto.

### 2.2. NIVELES DE DESEMPEÑO

La premisa básica en cualquier metodología exitosa de evaluación de edificios se basa en la selección clara y unívoca de los niveles de desempeño y amenaza que serán utilizados para tal fin, dependiendo de la Categoría de Riesgo en la que se ubique a las estructuras.

Debido a que el costo económico de lograr un nivel mayor de certeza en el desempeño de los edificios existentes es, en general, desproporcionado en comparación al benéfico adicional alcanzado y que la vida útil restante de tales estructuras es usualmente menor a los 50 años que considera para las edificaciones nuevas, se recomienda hacer una distinción de los niveles y objetivos de desempeño para estructuras nuevas y para estructuras existentes. Por ejemplo, el ASCE 41-17 (ASCE, 2017) define Objetivos de Desempeño para edificaciones nuevas y otras diferentes para edificaciones existentes, en base a sus categorías de riesgo y el nivel de amenaza sísmica. Es necesario mencionar que los Objetivos de Desempeño se enmarcan en los conceptos de diseño basado en desempeño.

Los Objetivos Básicos de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE, por sus siglas en inglés), que se utiliza para la evaluación o reforzamiento estructural de edificios existentes, consta de tres procedimientos para ejecutar tal fin, denominados TIER. El TIER 1 definido como una Revisión (Screening) es usado para evaluar los componentes y las conexiones primarios en el sistema que resiste las acciones sísmicas, así como los sistemas no estructurales, haciendo uso de listas de control y cálculos estructurales simplificados. TIER 2 definido como una Evaluación

Basada en Déficit (Deficiency-Based Evaluation) puede ser ejecutado utilizando procedimientos analíticos lineales para revisar los ítems identificados como deficiencias potenciales. TIER 3, la Evaluación Sistemática (Systematic Evaluation) es un análisis más completo y complejo que los dos anteriores y pueden utilizarse análisis lineales y no lineales.

Para evaluar los Objetivos Básicos de Desempeño Equivalente para Nuevos Estándares de Construcción (BPON, por sus siglas en inglés) solo se permite el uso del Tier 3. En este caso la idea primordial es una evaluación o reforzamiento estructural de edificios existentes para que alcancen un nivel de desempeño conmensurado con el desempeño previsto de edificios diseñados con un nuevo estándar de construcción.

El Objetivo de Desempeño se define por un estado de daño esperado, estructural y no estructural, ante un nivel de intensidad de una sacudida. En esencia, cuando se escoge un Objetivo de Desempeño, uno está definiendo cuanto daño es aceptable en su edificación ante un evento sísmico. Este concepto es un avance respecto a los simples Factores de Importancia que se han utilizado en el pasado; sin embargo, se puede hacer una analogía, muy burda, por cierto, con éstos, refiérase a la Figura 2.1 (SEAOC, 2000). En esta figura los objetivos de desempeño básico, esencial y crítico se asocian con un nivel de terremoto más un nivel de desempeño esperado, y es en este punto donde pueden correlacionarse con el nivel de importancia utilizado en códigos de diseño anteriores.

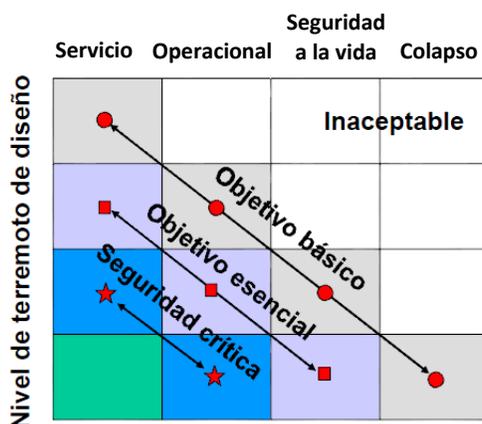


Figura 2.1. Objetivos de Desempeño (SEAOC, 2000).

Por otra parte, la Figura 2.2, contenida en el FEMA 273 (FEMA, 1997) y que expresa los Objetivos de Rehabilitación para estructuras, contiene cuatro objetivos de desempeño (1-A, 1-B, 3-C y 5-E). Nótese como la nomenclatura alfanumérica ya considera el sistema estructural y el sistema no estructural. Un punto interesante que destacar es el nivel de amenaza sísmica, que corresponde a probabilidades de excedencia y períodos de retorno, o en forma simplista,

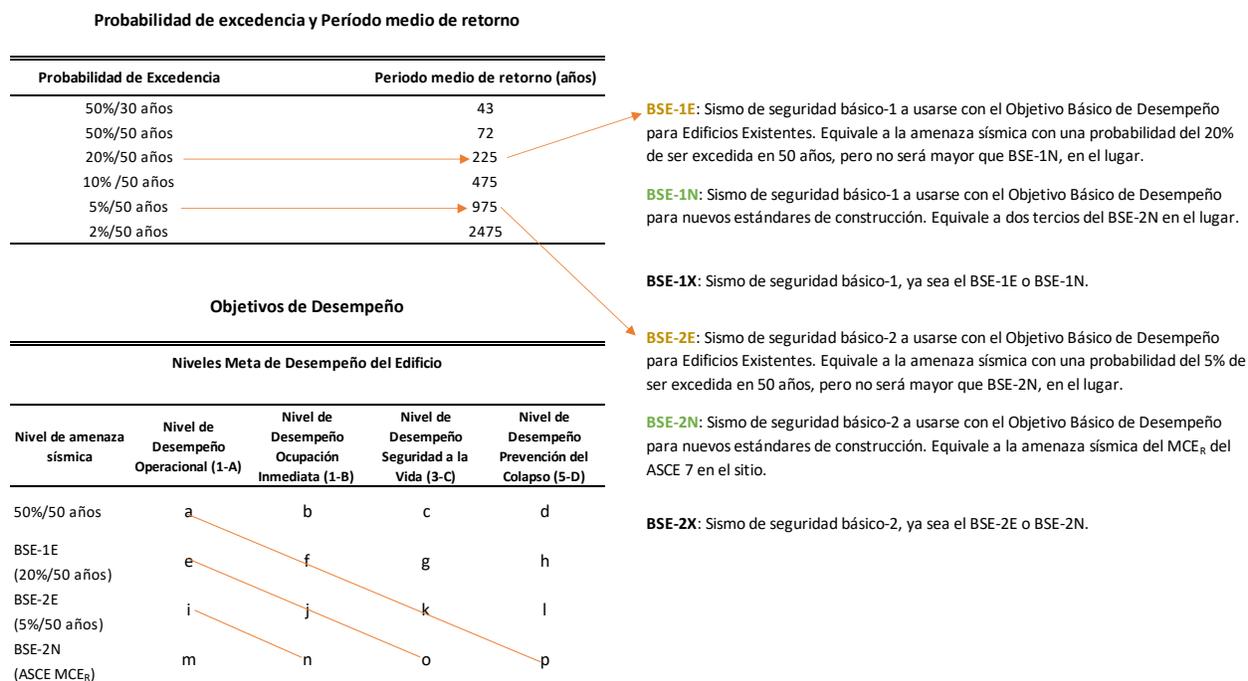
terremotos frecuentes, ocasionales, raros o muy raros. Este es un punto clave para entender en las secciones posteriores el nivel de amenaza respectivo a cada Objetivo de Desempeño.

		Niveles de Desempeño del Edificio			
		Nivel de Desempeño Operacional (1-A)	Nivel de Desempeño Ocupación Inmediata (1-B)	Nivel de Desempeño Seguridad a la Vida (3-C)	Nivel de Desempeño Prevención del Colapso (5-E)
<b>Probabilidad de excedencia del Sismo</b>	50% en 50 años				
	20% en 50 años				
	10% en 50 años				
	2% en 50 años				
<b>Periodo Medio de Retorno (años)</b>					
72 (frecuente)					
225 (ocasional)					
474 (raro)					
2475 (muy raro)					
<b>Nivel de amenaza sísmica</b>	50% en 50 años	a	b	c	d
	20% en 50 años	e	f	g	h
	BSE-1 (~10% en 50 años)	i	j	k	l
	BSE-2 (~2% en 50 años)	m	n	o	p

Figura 2.2. Objetivos de Desempeño (FEMA, 1997).

La Figura 2.3 corresponde al ASCE 41-13 (ASCE, 2013) en donde se observa que la nomenclatura alfanumérica de los Objetivos de Desempeño se conserva, pero existen notables diferencias en las probabilidades de excedencia y por ende en los periodos de retorno de los sismos que se utilizan para caracterizar la Amenaza Sísmica. Por ejemplo, el ASCE 41-13 define cuatro niveles de amenaza:

BSE-2E y BSE-1E para edificios existentes, los cuales corresponde a sismos con periodos de retorno de 975 años y 225 años, respectivamente; y para estándares de nuevas construcciones, BSE-2N, relacionado al Sismo Máximo Considerado (MCE), basado en un terremoto con un periodo de retorno de 2500 años, y BSE-1N, el que corresponde a dos tercios del sismo anterior.



**Figura 2.3. Objetivos de Desempeño (ASCE 41-13).**

Debido a una reorganización de los capítulos, esta información, contenida como comentarios, ha sido movida al final del documento en el caso del ASCE 41-17.

Tan importante como la selección de la amenaza es el estado de desempeño esperado de la edificación, a lo que se le llama Nivel Meta de Desempeño del Edificio. Este nivel se caracteriza estableciendo los niveles y rangos del desempeño estructural y no estructural.

Los Niveles de Desempeño Estructural de un edificio deberán ser elegidos a partir de seis Niveles discretos de Desempeño Estructural y dos rangos intermedios de Desempeño Estructural.

Los Niveles discretos de Desempeño Estructural son Ocupación Inmediata (S-1), Control de Daños (S-2), Seguridad a la Vida (S-3), Seguridad Limitada (S-4), Prevención del Colapso (S-5), y no Considerado (S-6).

Los Rangos intermedios de Desempeño Estructural son Rango de Seguridad Aumentada y Rango de Seguridad Reducida.

En tanto que, los Niveles de Desempeño No Estructural son: Operacional (N-A), Mantenimiento de la Posición (N-B), Seguridad a la Vida (N-C), Reducción de la Peligrosidad (N-D), y No Considerado (N-E).

Por lo tanto, un Nivel Meta de Desempeño del Edificio se representa combinando un nivel esperado de comportamiento estructural y uno no estructural, tal como se ilustra en la Figura 2.4.

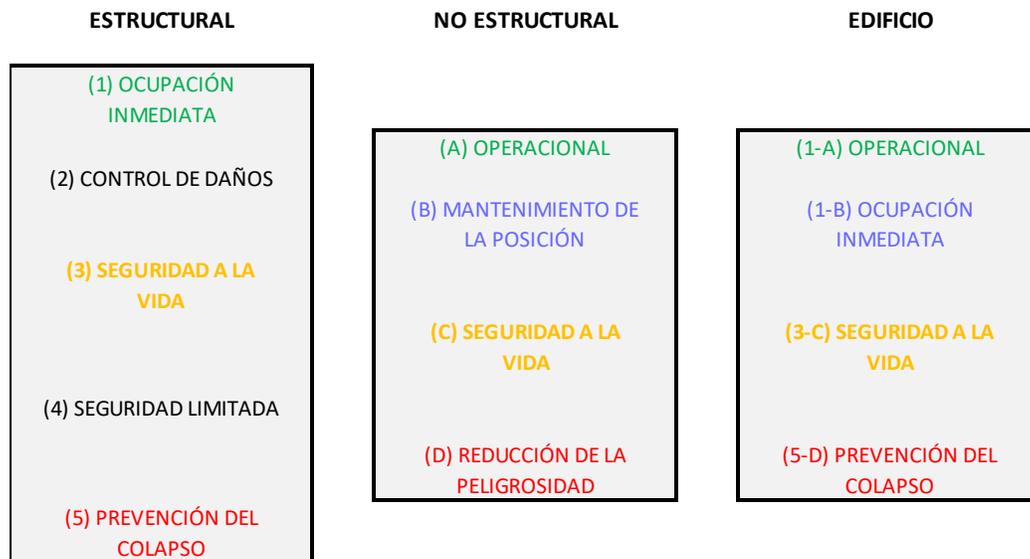


Figura 2.4. Definición de los Niveles Meta de Desempeño del Edificio.

### 3. OBJETIVOS DE DESEMPEÑO Y AMENAZA SÍSMICA

#### 3.1. GENERAL

En esta sección se plantean los Objetivos de Desempeño, los Niveles Meta de Desempeño del Edificio, así como los Niveles de Amenaza Sísmica propuestos a ser utilizados por el Propietario el ingeniero o la autoridad competente en la evaluación y/o rehabilitación de un edificio.

#### 3.2. DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

- BPOE** Objetivo de Desempeño Básico para Edificios Existentes: Una serie de Objetivos de Desempeño basados en la Categoría del Riesgo Sísmico del edificio que se usan para la evaluación y reforzamiento de edificios existentes.
- BSE-1E** Sismo de Seguridad Básico-1 usado con el Objetivo de Desempeño para Edificios Existentes, y que es igual a la amenaza sísmica con una probabilidad del 20% de ser excedida en un periodo de 50 años, pero no debe ser mayor que BSE-1N, en el lugar.
- BSE-1N** Sismo de Seguridad Básico-1 usado con el Objetivo de Desempeño Básico para Nuevos Estándares de Construcción, y es igual a dos tercios de BSE-2N en el lugar.
- BSE-1X** Sismo de Seguridad Básico -1, ya sea el BSE-1E o BSE-1N.
- BSE-2E** Sismo de Seguridad Básico-2 usado con el Objetivo de Desempeño para Edificios Existentes, y que es igual a la amenaza sísmica con una probabilidad del 5% de ser excedida en un periodo de 50 años, pero no debe ser mayor que BSE-2N, en el lugar.
- BSE-2N** Sismo de Seguridad Básico-2 usado con el Objetivo de Desempeño Básico para Nuevos Estándares de Construcción, se toma como el movimiento del terreno basado en el Terremoto Máximo Considerado (MCE) en un lugar.
- BSE-2X** Sismo de Seguridad Básico -2, ya sea el BSE-2E o BSE-2N.
- BPON** Objetivo de Desempeño Básico para Nuevos Estándares de Construcción. Una serie de Objetivos de Desempeño basados en la Categoría del Riesgo Sísmico del edificio que se usan para la evaluación y reforzamiento de edificios existentes con la intención de lograr un nivel de desempeño adecuado acorde con el desempeño destinado al de un edificio diseñado con un estándar para nueva construcción.
- CATEGORIA DE RIESGO:** Categorización de un edificio para la determinación del desempeño sísmico basado en la regulación, código o política de construcción aplicable. También puede consultarse el *Documento 3* en donde han sido definidas las Categorías de Riesgo para el país.
- TIER 1** Revisión: Lista de evaluación para identificar posibles deficiencias en un edificio en función del desempeño de edificios similares en terremotos pasados.

- TIER 2 (Evaluación): Enfoque aplicable a ciertos tipos de edificios y Objetivos de Desempeño basados en la evaluación específica de posibles deficiencias para determinar si representan deficiencias reales que pueden requerir mitigación. Es posible que no se requiera un análisis de todo el edificio.
- TIER 2 (Reforzamiento): La mitigación de deficiencias identificadas en el Tier 1.
- TIER 3 (Evaluación): Enfoque de evaluación en el que se realiza un análisis completo del edificio para condiciones de sismo, utilizando implícita o explícitamente la respuesta no lineal del edificio.
- TIER 3 (Reforzamiento): Enfoque de reforzamiento en el que se realiza un análisis completo del edificio para condiciones de sismo, utilizando implícita o explícitamente la respuesta no lineal del edificio.
- MCE Máximo terremoto considerado. Este evento será proporcionado por la Autoridad Competente, MARN.
- NIVEL DE AMENAZA SISMICA. Demandas del movimiento de terreno desarrolladas sobre una base probabilista o determinista.
- NIVEL DE DESEMPEÑO DEL EDIFICIO. Un estado límite de daño para un edificio, considerando los componentes estructurales y no estructurales, usando la definición de los Objetivos de Desempeño.
- NIVEL DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL. Un estado límite de daño estructural usado en la definición de los Objetivos de Desempeño.
- NIVEL DE DESEMPEÑO NO ESTRUCTURAL. Un estado límite de daño no estructural en los componentes del edificio usado para definir los Objetivos de Desempeño.

### 3.3. OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

Como se esbozó en el capítulo anterior, el primer paso en el proceso de la evaluación de la competencia sísmica de un edificio, y su posterior rehabilitación, es establecer criterios que serán definidos en términos de Objetivos de Desempeño. Éstos pueden ser definidos por el propietario, un ingeniero o la Autoridad Competente. Los Objetivos de Desempeño se especifican por un estado de daño esperado (Nivel de Desempeño del Edificio) y por una intensidad sísmica dada (Nivel de Amenaza Sísmica). Dicho de otra manera, al elegir el Objetivo de Desempeño, uno define cuanto es el daño que es aceptable ante una sacudida dada. Nótese que la rehabilitación de un edificio puede perseguir más de un Objetivo de Desempeño; por ejemplo, uno puede diseñar un reforzamiento de tal manera que sufra solamente daños menores ante un terremoto moderado, pero que se evite el colapso en un evento raro. Nótese que, en general, los Objetivos de Desempeño no son mandatos, sino que son definiciones que sirven como guías en la evaluación y/o rehabilitación.

Seguidamente, deberá definirse que Objetivo de Desempeño se seleccionará entre Objetivos de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE) y Objetivos de Desempeño para Nuevos Estándares de Construcción (BPON); así mismo, la Categoría de Riesgo a la cual pertenece el edificio deberá ser establecida.

### **3.3.1 Objetivo Básico de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE)**

Tradicionalmente, los edificios existentes han sido evaluados o rehabilitados para demandas sísmicas menores de las que son usadas en el diseño de estructuras nuevas. Esto se hace así porque se acepta un mayor riesgo al reconocer que la vida útil restante de los edificios existentes es más corta comparada con la de los edificios nuevos, además el costo del reforzamiento puede ser mucho mayor que el construir una nueva estructura, y en los países en los cuales hay cambios constantes de las normativas de construcción, es de evitar que un edificio construido se vuelva inmediatamente deficiente con un cambio de los reglamentos de construcción.

Los BPOE para los edificios que pertenecen a las Categorías de Riesgo I y II se definen por la combinación de dos Objetivos de Desempeño discretos:

1. Nivel de Desempeño de Seguridad a la Vida a un Nivel de Amenaza Sísmica definida por el 20% probabilidad de excedencia en 50 años; y
2. Nivel de Desempeño de Prevención del Colapso a un Nivel de Amenaza Sísmica definida por el 5% de probabilidad de excedencia en 50 años.

El BPOE intenta reproducir el criterio de desempeño reducido para edificaciones existentes comparado con el de las nuevas construcciones. Nótese que los procedimientos de evaluación del TIER 1, TIER 2 y TIER 3 pueden ser usados con el BPOE.

La Tabla 3.1 muestra los Objetivos Básicos de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE) en base a la Categoría de Riesgo. En términos generales, para cada Categoría de Riesgo dada deberá evaluarse para dos Niveles de Amenaza Sísmica (BSE-1E, BSE-2E) verificando que se cumplan tanto los Niveles de Desempeño Estructural y No Estructural correspondiente en cada caso. Es decir, por ejemplo, un edificio con Categoría de Riesgo III deberá verificarse que para el Nivel de Amenaza Sísmica BSE-1E cumple con un Desempeño Estructural de Control de Daños y un Desempeño No Estructural de Retención de Posición (2-B); además, se verificará que para un Nivel de Amenaza Sísmica BSE-2E tenga un Desempeño Estructural de Seguridad Limitada y un Desempeño No Estructural de Amenaza Reducida (4-D).

**Tabla 3.1. Objetivo Básico de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE)**

Categoría de Riesgo	Nivel de Amenaza Sísmica	
	BSE-1E	BSE-2E
I y II	Desempeño Estructural: Seguridad a la Vida	Desempeño Estructural: Prevención del Colapso
	Desempeño No Estructural: Seguridad a la Vida (3-C)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (5-D)
III	Desempeño Estructural: Control de Daños	Desempeño Estructural: Seguridad Limitada
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (2-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (4-D)
IV	Desempeño Estructural: Ocupación Inmediata	Desempeño Estructural: Seguridad a la Vida
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (1-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (3-D)

La Tabla 3.2 muestra los BPOE a ser evaluados utilizando los procedimientos del TIER 1 y TIER2, siempre teniendo en mente que, para cada Categoría de Riesgo, se evalúa para ambos Niveles de Amenaza Sísmica (BSE-1E, BSE-2E) verificando que se cumplan tanto los Niveles de Desempeño Estructural y No Estructural correspondiente en cada caso.

**Tabla 3.2. Alcance de la evaluación necesaria para el Tier 1 y Tier 2 con el Objetivo Básico de Desempeño para Edificios Existentes (BPOE)**

Categoría de Riesgo	TIER 1 y 2	
	BSE-1E	BSE-2E
I y II	No se evalúa	Desempeño Estructural: Prevención del Colapso
	Desempeño No Estructural: Seguridad a la Vida (3-C)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (5-D)
III	No se evalúa	Desempeño Estructural: Seguridad Limitada
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (2-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (4-D)
IV	Desempeño Estructural: Ocupación Inmediata	Desempeño Estructural: Seguridad a la Vida
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (1-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (3-D)

### 3.3.2 Objetivo Básico de Desempeño para Nuevos Estándares de Construcción (BPON)

La selección de este objetivo de desempeño (BPON) implica que el objetivo de desempeño especificado ha de usarse únicamente con el procedimiento de revisión estructural sistemático o reforzamiento TIER 3, el cual varía con el Riesgo Sísmico de acuerdo con la Tabla 2-3 del ASCE 41-17. Como en el caso anterior para cada Categoría de Riesgo dada se evaluará para dos Niveles de Amenaza Sísmica (BSE-1E, BSE-2E) verificando que se cumplan tanto los Niveles de Desempeño Estructural y No Estructural correspondiente en cada caso.

**Tabla 3.3. Objetivo Básico de Desempeño para Nuevos Estándares de Construcción (BPON)**

Categoría de Riesgo	Nivel de Amenaza Sísmica	
	BSE-1N	BSE-2N
I y II	Desempeño Estructural: Seguridad a la Vida	Desempeño Estructural: Prevención del Colapso
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (3-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (5-D)
III	Desempeño Estructural: Control de Daños	Desempeño Estructural: Seguridad Limitada
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (2-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (4-D)
IV	Desempeño Estructural: Ocupación Inmediata	Desempeño Estructural: Seguridad a la Vida
	Desempeño No Estructural: Retención de Posición (1-B)	Desempeño No Estructural: Amenaza Reducida (3-D)

### 3.4. NIVELES LIMITE EN LOS OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

Un límite en el Nivel de Desempeño de un edificio consiste en una combinación de un límite del Nivel de Desempeño Estructural (Sección 3.4.1) y un límite del Nivel de Desempeño No Estructural (Sección 3.4.2). El límite del Nivel de Desempeño de un edificio es designado alfanuméricamente (Sección 3.4.3).

#### 3.4.1. Niveles de Desempeño Estructural

El Nivel de Desempeño Estructural de un edificio debe seleccionarse de seis maneras discretas:

- a) **Ocupación Inmediata (S-1).** Es definido como el estado de daño post-terremoto en el cual una estructura conserva con seguridad a sus ocupantes y esencialmente conserva su resistencia y rigidez pre-terremoto.

- b) **Control de Daño (S-2).** Es definido como el estado de daño post-terremoto entre Seguridad a la Vida (S-3) y ocupación Inmediata (S-1).
- c) **Seguridad a la Vida (S-3).** Es definido como el estado de daño post-terremoto en el cual una estructura presenta daños en sus componentes, pero conserva un margen de seguridad contra el inicio de un colapso parcial o total.
- d) **Seguridad Reducida (S-4).** Es definido como el rango de daño entre los estados de Seguridad a la Vida (S-3) y Prevención del Colapso (S-5).
- e) **Prevención del Colapso (S-5).** Es definido como el estado de daño post-terremoto en el cual una estructura presenta daños en sus componentes y continúa dando soporte para cargas gravitacionales, pero no conserva margen de seguridad contra colapso.
- f) **No Considerado (S-6).** Cuando una evaluación o reforzamiento no aborda el sistema estructural.

#### 3.4.2. Niveles de Desempeño No Estructural

El Nivel de Desempeño No Estructural de un edificio debe seleccionarse de cinco maneras discretas:

- a) **Operacional (N-A).** Es el estado de daño post-terremoto en el cual los componentes no estructurales son capaces de proveer la funcionalidad que ellos proporcionan en el edificio después de un terremoto.
- b) **Retención de Posición (N-B).** Es el estado de daño post-terremoto en el cual los componentes no estructurales podrían dañarse en la medida que no podrían funcionar de inmediato, pero son seguros en sus puestos para evitar su caída o falla en sus conexiones.
- c) **Seguridad a la Vida (N-C).** Es el estado de daño post-terremoto en el cual los componentes no estructurales pueden dañarse, pero el daño consecuente no representa una amenaza para la vida.
- d) **Amenaza Reducida (N-D).** Es el estado de daño post-terremoto en el cual los componentes no estructurales son dañados y pueden potencialmente tener riesgos de caídas.
- e) **No Considerado (N-E).** Cuando una evaluación o reforzamiento no aborda todos los componentes no estructurales.

#### 3.4.3. Designación de Límites en los Niveles de Desempeño

Un límite del Nivel de Desempeño es designado alfanuméricamente con un número que representa el Nivel de Desempeño Estructural y una letra que representa el Nivel de Desempeño No Estructural, por ejemplo: 1-A, 1-B, 3-C ó 5-D:

- a) **Operacional (1-A).** Los componentes estructurales cumplen los requerimientos del Nivel de Desempeño Estructural (S-1) de Ocupación Inmediata y los requerimientos del Nivel de Desempeño No Estructural (N-A) Operacional.
- b) **Ocupación Inmediata (1-B).** Los componentes estructurales cumplen los requerimientos del Nivel de Desempeño Estructural (S-1) de Ocupación Inmediata y los requerimientos del Nivel de Desempeño No Estructural (N-B) de Retención de Posición.
- c) **Seguridad a la Vida (3-C).** Los componentes estructurales cumplen los requerimientos del Nivel de Desempeño Estructural (S-3) de Seguridad a la Vida y los requerimientos del Nivel de Desempeño No Estructural (N-C) de Seguridad a la Vida.
- d) **Prevención del Colapso (5-D).** Los componentes estructurales cumplen los requerimientos del Nivel de Desempeño Estructural (S-5) de Prevención del Colapso y los requerimientos del Nivel de Desempeño No Estructural (N-D) de Amenaza Reducida.

### 3.5. AMENAZA SÍSMICA

La Amenaza sísmica causada por un terremoto deberá ser definida como la aceleración espectral o aceleración del terreno histórica determinada probabilista o deterministamente. La aceleración espectral deberá ser desarrollada en acorde con la sección 3.5.1 o un análisis de sitio acorde a la sección 2.5.2. La aceleración histórica del terreno deberá ser desarrollada en acorde con la sección 2.5.3. El Nivel de Sismicidad del sitio deberá ser determinado acorde a la sección 2.5.4.

#### 3.5.1 Procedimiento general para la amenaza sísmica.

La amenaza sísmica causada por un terremoto es definida como el Nivel de Amenaza Sísmica usando un espectro de respuesta amortiguado al 5% con ordenadas de periodo corto (0.2 segundos) y periodo largo (1.0 segundo) en la dirección de máxima respuesta horizontal. El espectro de respuesta de aceleración para periodos corto y largo,  $S_{XS}$  y  $S_{XL}$ , respectivamente, debe determinarse de la siguiente manera:

- a) **Espectro de Respuesta de Aceleración para Estándares de Nuevas Construcciones – BSE-2N.** El parámetro de diseño de la aceleración espectral para periodo corto,  $S_{XS}$ , y el parámetro de diseño de la aceleración espectral para el periodo de 1 s,  $S_{XL}$ , para definir el Nivel de Amenaza Sísmica BSE-2N, puede ser determinados con los procedimientos de la sección 6.3 del *Documento 3*.
- b) **Espectro de Respuesta de Aceleración para Estándares de Nuevas Construcciones – BSE-1N.** El parámetro de diseño de la aceleración espectral para periodo corto,  $S_{XS}$ , y el parámetro de diseño de la aceleración espectral para el periodo de 1 s,  $S_{XL}$ , para definir el Nivel de Amenaza Sísmica BSE-1N deberán ser tomados como dos tercios de los valores de los parámetros del Nivel de Amenaza Sísmica BSE-2N, determinados en el literal anterior.

- c) **Espectro de Respuesta de Aceleración para Edificios Existentes – BSE-2E.** El parámetro de diseño de la aceleración espectral para periodo corto,  $S_{XS}$ , y el parámetro de diseño de la aceleración espectral para el periodo de 1 s,  $S_{X1}$ , para definir el Nivel de Amenaza Sísmica BSE-2E deberán ser obtenidos del espectro de respuesta de aceleración para una probabilidad de excedencia del 5% en 50 años.
- d) **Espectro de Respuesta de Aceleración para Edificios Existentes – BSE-1E.** El parámetro de diseño de la aceleración espectral para periodo corto,  $S_{XS}$ , y el parámetro de diseño de la aceleración espectral para el periodo de 1 s,  $S_{X1}$ , para definir el Nivel de Amenaza Sísmica BSE-1E deberán ser obtenidos del espectro de respuesta de aceleración para una probabilidad de excedencia del 20% en 50 años.

### 3.5.2 Análisis de sitio

Donde un análisis específico de sitio del movimiento de terreno sea usado como la base de evaluación o reforzamiento estructural, la caracterización deberá estar acorde con el Capítulo 21 del ASCE 7.

### 3.5.3 Aceleración historia del movimiento del terreno.

El desarrollo de la aceleración histórica del movimiento del terreno deberá ser desempeñado acorde con la Sección 16.2 del ASCE 7 con las modificaciones de la Sección 2.4.3 del ASCE 41-17.

### 3.5.4 Espectro general de respuesta

*Espectro horizontal general de respuesta.*

Un espectro horizontal general de respuesta, Figura 3.1, deberá ser desarrollado usando la sección 6.3 *Documento 3* reemplazando  $S_{Ds}$  y  $S_{D1}$  por  $S_{XS}/B_1$  y  $S_{X1}/B_1$ , respectivamente, excepto donde  $T < T_0$  en donde  $S_a$  deberá ser interpolada entre  $0.4 S_{XS}$  y  $S_{XS}/B_1$  entre 0 y  $T_0$  donde:

$$B_1 = 4/[5.6 - \ln(100\beta)] \quad (3.1)$$

Y  $\beta$  es la razón de amortiguamiento viscoso efectiva

El uso de la aceleración espectral en el rango de periodos muy cortos ( $T < T_0$ ) se permite únicamente en los procedimientos en los que se involucra el análisis dinámico y solamente para otros modos diferentes al modo fundamental

*Espectro vertical general de respuesta*

Cuando el espectro vertical de respuesta se necesite se desarrollará tomando dos tercios de las máximas ordenadas espectrales horizontales, para cada periodo, obtenidas del espectro de respuesta horizontal o por algún procedimiento racional alternativo.

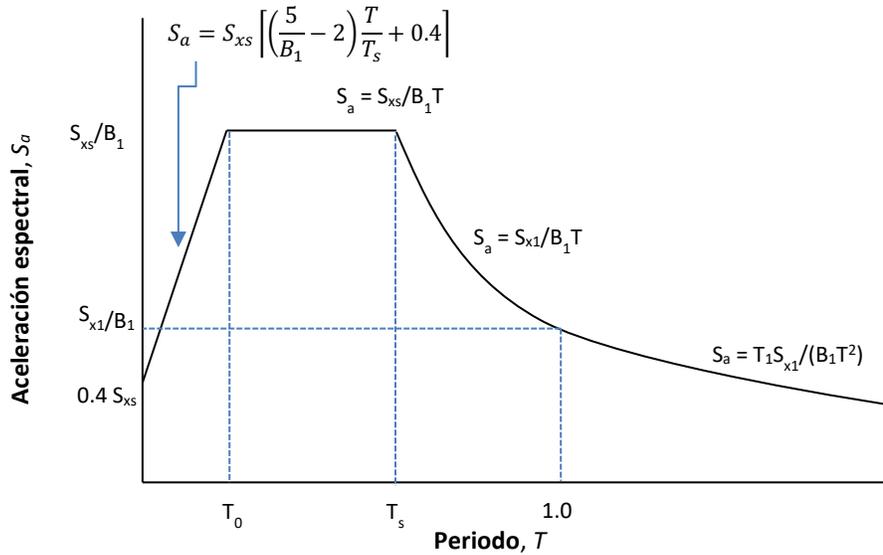


Figura 3.1. Espectro horizontal general de respuesta

**3.5.5 Nivel de Sismicidad**

El Nivel de Sismicidad deberá ser definido como Alto, Moderado, Bajo o muy Bajo, como se define en la Tabla 3.4 en donde  $S_{DS}$  y  $S_{D1}$  son definidos como:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_s \tag{3.2}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1 \tag{3.3}$$

y  $F_a$  y  $F_v$  son coeficientes de sitio determinados en acorde con la sección 6.3 del Documento 3.

Nótese que el mayor nivel de sismicidad obtenido ya sea por  $S_{DS}$  y  $S_{D1}$  regirá.

**Tabla 3.4. Definición de los niveles de sismicidad**

Nivel de Sismicidad	$S_{DS}$	$S_{D1}$
Muy bajo	<0.167 g	<0.067 g
Bajo	$\geq 0.167$ g	$\geq 0.067$ g
	<0.33 g	<0.133 g
Moderado	$\geq 0.33$ g	$\geq 0.133$ g
	<0.50 g	<0.20 g
Alto	$\geq 0.50$ g	$\geq 0.20$ g

## 4. PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS Y CRITERIOS DE APROBACIÓN

### 4.1. GENERAL

Este capítulo provee una explicación de un grupo de tópicos específicos que afectan a varios tipos de edificios. Éstos incluyen:

- a) Selección del procedimiento de análisis
- b) Determinación de fuerzas y deformaciones a ser utilizadas en el análisis
- c) Categorización de elementos primarios y secundarios
- d) Categorización de elementos controlados por fuerza y controlados por deformación

### 4.2. SELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

El tipo de análisis requerido para hacer la evaluación sísmica depende de muchos factores tales como el tipo del edificio, la altura, la configuración estructural y el nivel de evaluación. Estos atributos y las limitaciones inherentes de los análisis se presentan en el ASCE 41-17 desde los capítulos 3 al 7. Nótese, por ejemplo, que el uso de los procedimientos de evaluación del TIER 1 y TIER 2 están limitados a un tipo específico de edificios y alturas con ciertos Niveles de Desempeño (ASCE 41-17, sección 3.4.1), en tanto que el procedimiento de evaluación sistemático del TIER 3 se permite para todos los edificios y todos los Niveles de Desempeño.

#### 3.2.1 TIER 1 Revisión

La mayor parte del procedimiento del “TIER 1 Revisión” consiste en una lista de evaluación cualitativa. Sin embargo, para varios tipos de edificios y Niveles de Sismicidad, hay cálculos simplificados incluidos como “Revisiones rápidas”. Estas revisiones rápidas se ejecutan utilizando un análisis pseudo sísmico acorde a ASCE 41-17, sección 4.4.1, y completando el Checklist del capítulo 17 del ASC 41-17, dependiendo del tipo de edificio y nivel de desempeño evaluado.

#### 3.2.2 TIER 2 Evaluación y Reforzamiento Basados en Déficit

Para este procedimiento, el método de análisis se limita a, ya sea un procedimiento estático lineal (LSP, por sus siglas en inglés) o un procedimiento dinámico lineal (LDP, por sus siglas en inglés) tal como se especifica en ASCE 41-17, sección 5.2.4. Nótese, que el análisis no lineal no está permitido. El uso del LSP está sujeto a cinco limitaciones como se establece en ASCE 41-17, sección 7.3.1.2. las que se refieren a estructuras de periodo largo, edificios con irregularidades geométricas y de rigidez, o sistemas que resisten cargas laterales no ortogonales. Para estos escenarios el LDP debe ser empleado para predecir de mejor manera la probable compleja distribución de fuerzas sísmicas en el edificio. Como se hace notar en ASCE 41-17, sección 5.2.4, las limitaciones adicionales de los procedimientos no lineales especificados en ASCE 41-17,

sección 7.3.1.1. no aplica a la evaluación del TIER 2. Específicamente, la presencia de discontinuidades en el plano y fuera del plano, así como irregularidades de resistencia torsional y piso débil, no imposibilita el uso de los procedimientos lineales del TIER 2. En donde el LDP es el método de análisis seleccionado o se necesita debido a las restricciones antes mencionadas, ya sea el método de espectro de respuesta o el método de la historia de la respuesta se permite.

### **3.2.3 TIER 3 Evaluación y Reforzamiento Sistemático**

La Evaluación Sistemática TIER 3 se permite para cualquier tipo de edificio o configuración estructural, pero el procedimiento de análisis usado para la evaluación está sujeto a las limitaciones contenidas en ASCE 41-17, sección 7.3. Estas limitaciones y su fundamento teórico se resumen en las siguientes secciones para los procedimientos analíticos lineales y no lineales.

#### **TIER 3 Procedimientos Lineales.**

- a) Para edificios regulares con rutas de carga sin interrupción, los procedimientos lineales se consideran lo suficientemente precisos para predecir la distribución de las demandas sísmicas, y los correspondientes criterios de aprobación tienen incluidos márgenes de seguridad que son apropiados para este nivel de exactitud.
- b) El uso del LSP para la evaluación en el TIER 3, sin embargo, está limitado a edificios regulares de baja y mediana altura con sistemas resistentes a cargas laterales ubicadas de manera ortogonal. Los criterios cuantitativos específicos se encuentran en ASCE 41-17, sección 7.3.1.2 y son consistentes con las restricciones impuestas en la evaluación por el TIER 2.
- c) Tanto el LSP y LDP están sujetos a provisiones límites tal como se especifica en ASCE 41-17, sección 7.3.1.1. Cuatro diferentes tipos de irregularidades se establecen: Discontinuidad en el plano, Discontinuidad fuera del plano, Piso débil, o Rigidez torsional. Los procedimientos lineales no se permiten en estructuras con discontinuidades en el plano y fuera del plano debido a las potenciales imprecisiones que se derivan del análisis lineal. Para estructuras ya sea con irregularidad por piso débil o irregularidad por resistencia torsional (o ambas), los procedimientos lineales pueden ser utilizados solamente si puede ser demostrado que el edificio tiene una respuesta inelástica limitada para el Nivel de Amenaza Sísmica considerada. Esta demostración consiste en calcular la relación (o razón) demanda-capacidad (DCR) para todos los componentes primarios usando el ASCE 41-17, ecuación 7.16, y comparándola con el valor de 3.0 o con el valor del factor- $m$  relacionado a la acción del componente, cualquiera que sea el menor. Este cálculo DCR se refiere a la magnitud de la respuesta inelástica de un componente en particular y su propósito es determinar la aplicabilidad de los procedimientos lineales de análisis. Los procedimientos lineales tienen límites en el DCR, debido a que los análisis elásticos no incluyen la redistribución de fuerzas

causadas por la fluencia de algunos miembros a menores fuerzas relativos a otros componentes en el sistema. Donde la evaluación del DCR indique esta condición, los procedimientos no lineales se requerirán para determinar con mayor precisión el comportamiento estructural.

### **TIER 3 Procedimientos No Lineales.**

- a) Las evaluaciones del TIER 3 requieren el uso de métodos no lineales cuando un edificio tiene una o más irregularidades listadas en ASCE 41-17, sección 7.3.1.1, con la excepción por la razón DCR discutida en la sección anterior para una irregularidad de piso débil o resistencia torsional.
- b) Los procedimientos de análisis no lineales intentan proveer una determinación más precisa de la respuesta del edificio. Por lo tanto, estos procedimientos requieren una comprensión más robusta de las propiedades de los materiales y la configuración del edificio, lo que puede significativamente afectar el comportamiento inelástico de la estructura. Los requisitos para la recolección y compilación de datos se especifican en ASCE 41-17, sección 6.2.4.3, lo que divide tales requisitos en “mínimo”, “ordinario” (usual) y “exhaustivo” (comprehensive) definidos en la Tabla ASCE 41-17, Tabla 6-1.
- c) Para sistemas o configuraciones estructurales complejas puede ser más eficiente proceder directamente al análisis no lineal. El esfuerzo en crear un modelo lineal completo para evaluar si los procedimientos lineales son aplicables o no, puede ser mayor que el que se requiera para generar un simple modelo inelástico.
- d) El procedimiento estático no lineal (NSP, por sus siglas en inglés) se limita a edificios con dos características distintivas de acuerdo con el ASCE 41-17, sección 7.3.2.1:
  - La estructura debe tener una razón de resistencia,  $\mu_{strength}$ , que sea menor que la razón de resistencia máxima,  $\mu_{max}$ . Estas relaciones se calculan de acuerdo con el ASCE 41-17, ecuaciones 7-31 y 7-32, respectivamente. Estos cálculos son, en esencia, una comparación entre el grado de no linealidad del sistema primario, respecto al nivel de degradación que puede llevar a una inestabilidad dinámica (para el Nivel de Amenaza Sísmica en consideración).
  - La respuesta estructural no debe tener efectos significativos de los modos superiores de vibración, a menos que un procedimiento lineal adicional sea ejecutado. La contribución relativa de los modos de vibración superiores se determina comparando el cortante basal de la respuesta del primer modo respecto al cortante basal de todos los modos combinados, usando un número suficiente de modos de tal manera de capturar el 90% de la participación de la masa. Sin embargo, el NSP se permite si un análisis LDP se ejecuta adicionalmente. Para este escenario, los componentes estructurales deben cumplir los criterios de aprobación

para ambos procedimientos de análisis, excepto que a los factores- $m$  lineales se les permite un incremento de 1.33 para el LDP.

- e) El procedimiento dinámico no lineal (NDP, por sus siglas en inglés) se permite para todos los edificios y configuraciones.

Un resumen de los procedimientos a seguir es el siguiente:

### **TIER 1 Revisión**

Procedimiento de análisis:	Análisis estático lineal
Limitaciones del análisis:	A ser usado con revisiones rápidas (Quick Checks)
Excepciones del análisis:	Ninguna
Sección de Referencia:	4.4 (ASCE 41-17)

Si en la evaluación del TIER1 se encuentran deficiencias, pasar al TIER2.

### **TIER 2 Evaluación y Reforzamiento Basados en Déficit**

Procedimiento de análisis:	LSP o LDP
Limitaciones del análisis:	Con el uso del LSP (Sección 7.3.1.2)
Excepciones del análisis:	Ninguna
Sección de Referencia:	5.2.4, 7.4.1, 7.4.2 (ASCE 41-17)

Si el TIER2 no aplica o se encuentran deficiencias, usar la evaluación elástica del TIER3

### **TIER 3 Evaluación y Reforzamiento Sistemática. Procedimientos Lineales**

Procedimiento de análisis:	LSP o LDP
Limitaciones del análisis:	Con el uso del LSP y LDP (Sección 7.3.1.1, ASCE 41-17) Con el uso del LSP (Sección 7.3.1.2, ASCE 41-17)
Excepciones del análisis:	Piso débil o irregularidad en la resistencia torsional con $DCR < \min(3.0, \text{factor-}m)$
Sección de Referencia:	7.4.1, 7.4.2 (ASCE 41-17)

Si una evaluación elástica con TIER3 no se permite, pasar a la evaluación no lineal del TIER3

### **TIER 3 Evaluación y Reforzamiento Sistemática. Procedimientos No lineales**

Procedimiento de análisis:	NSP o NDP
Limitaciones del análisis:	Con el uso del NSP (Sección 7.3.2.1, ASCE 41-17)

Excepciones del análisis:	NSP con LDP cuando los modos de vibración superiores son importantes
Sección de Referencia:	7.4.3, 7.4.4 (ASCE 41-17)

### 4.3. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS Y DESPLAZAMIENTO OBJETIVO

#### 4.3.1 Cálculo de la pseudo fuerza sísmica estática para el procedimiento estático lineal (ASCE 41-17, sección 7.4.1)

La pseudo fuerza sísmica es la suma de las fuerzas inerciales laterales aplicadas al edificio que producen desplazamientos aproximadamente iguales a los que se espera que la estructura experimentará durante el terremoto de diseño. La pseudo fuerza sísmica, para el ASCE 41-17 ecuación 7.21, incluye los factores  $C_1$  y  $C_2$  que modifican el desplazamiento de diseño para representar el desplazamiento por fluencia esperado. Estos valores se basan en la investigación analítica y experimental de la respuesta sísmica de estructuras que fluyen. El valor  $C_m$  en la ecuación antes mencionada se incluye en la pseudo fuerza para reducir el efecto conservador del LSP para edificios en donde los modos de participación superiores reducen las fuerzas sísmicas.

El ASCE 41-17, en su sección 7.4.1.3 presenta un método alternativo para determinar las fuerzas pseudo sísmicas donde el producto de  $C_1 C_2$  se selecciona de la Tabla 7-3, del mismo documento, y que se basa en el periodo fundamental y el máximo factor- $m$  ( $m_{max}$ ) que se usa en la dirección bajo estudio para todos los elementos primarios que resisten la fuerza sísmica lateral en el sistema.

#### 4.3.2 Escaleo de la pseudo fuerza sísmica para el procedimiento lineal dinámico (ASCE 41-17, sección 7.4.2)

La pseudo fuerza sísmica utilizada en el procedimiento lineal dinámico (LDP) no necesita ser escaleada como se hace en otras metodologías, tal es el caso del ASCE 7. El LDP en el ASCE 41-17 se espera que desplace la estructura a su desplazamiento esperado, lo cual se toma como  $C_1 C_2$  veces la pseudo fuerza sísmica sin reducir relacionada con la Amenaza Sísmica y Nivel de Desempeño considerado.

Por otra parte, las fuerzas de diafragmas determinadas por el LDP, establecidas en ASCE 41-17 sección 7.4.2.3.2, es necesario que se escaleen, de manera similar a como se hace en el ASCE 7, y no deberán ser tomadas menos del 85% del valor de las fuerzas estáticas.

#### 4.3.3 Determinación del desplazamiento objetivo

Para el procedimiento estático no lineal (NSP), el desplazamiento objetivo se define en ASCE 41-17 sección 7.4.3.3. El desplazamiento objetivo representa el desplazamiento esperado a

nivel de techo ante el Nivel de Amenaza Sísmica impuesta. Los elementos del sistema sismo-resistente del edificio son evaluados a ese desplazamiento para determinar si éstos tienen la suficiente capacidad para acomodar tal desplazamiento. El ASCE 41-17 ecuación 7-28 define el desplazamiento objetivo:

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (\text{ASCE 41-17 Ec 7-28})$$

Donde:

$C_0$  = Factor de modificación que relaciona el desplazamiento espectral de un sistema de un solo grado de libertad (SDOF system) respecto al desplazamiento del techo de un edificio de múltiples grados de libertad (MDOF system).

$C_1$  = Factor de modificación que relaciona el desplazamiento inelástico máximo esperado respecto al desplazamiento calculado a partir de la respuesta lineal elástica.

$C_2$  = Factor de modificación que representa el efecto de pinching en la curva histerética, la degradación cíclica de la rigidez, y la reducción de la resistencia en la respuesta del desplazamiento máximo.

$C_m$  = Factor de la masa efectiva

$S_a$  = Aceleración espectral en el periodo fundamental y con la razón de amortiguamiento del edificio en la dirección bajo consideración.

$T_e$  = Periodo fundamental efectivo del edificio en la dirección bajo estudio, definido como:

$$T_e = T_i (K_i/K_e)^{1/2} \quad (\text{ASCE 41-17 Ec 7-27})$$

Donde:

$T_i$  = Periodo elástico fundamental (en segundos) en la dirección considerada

$K_i$  = Rigidez lateral elástica del edificio en la dirección considerada

$K_e$  = Rigidez lateral efectiva del edificio en la dirección considerada, ASCE 41-17 Fig 7-3

Alguna información adicional respecto a cada coeficiente:

$C_0$ : Hay tres métodos para determinar este factor. El primero es usar el factor de participación de la masa del primer modo multiplicado por la ordenada de la deformada modal del primer modo en el punto de control. El segundo es el factor de participación de la masa calculado

usando un factor de forma correspondiente a la deformada modal del edificio en el desplazamiento objetivo multiplicado por la ordenada del vector de forma en el nudo de control. El valor de cualquiera de estos métodos puede obtenerse de un modelo de computador que calcule las propiedades dinámicas del edificio. El tercer método es usar los valores por defecto de la Tabla 7-5 del ASCE 41-17 los cuales dependen del número de niveles, el tipo de perfil de carga usada (triangular o uniforme), y si el edificio es o no un edificio catalogado como “shear building” en el cual las derivas de entrepiso decrecen al incrementar la altura. El tercer método es el más común.

$C_1$ : El cálculo de  $C_1$  primeramente requiere la determinación de  $\mu_{strength}$ , el cual es:

$$\mu_{strength} = [S_a / (V_y / W)] C_m \quad (\text{ASCE 41-17 Ec 7-31})$$

donde:

$S_a$  = Como ha sido definido anteriormente

$W$  = Peso sísmico efectivo de acuerdo a ASCE 41-17 sección 7.4.1.3.1

$C_m$  = Factor de masa efectiva

El valor  $\mu_{strength}$  es la razón de la resistencia elástica respecto a la resistencia plástica. El NSP no se permite cuando  $\mu_{strength}$  exceda a  $\mu_{max}$ .  $\mu_{max}$  se define en ASCE 41-17 ecuación 7-32 e involucra calcular la pendiente negativa post fluencia de la curva fuerza-deformación y el efecto  $P-\Delta$  en esa pendiente. Después que  $\mu_{strength}$  ha sido calculado, se puede usar la ecuación 7-29

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{strength}^{-1}}{\alpha T_e^2} \quad (\text{ASCE 41-17 Ec 7-29})$$

Donde:

$\alpha$  = Factor de suelo: 130 para Clases A o B, 90 para Clase C, 60 para Clase D, E, o F

$T_e$  = Periodo fundamental efectivo

$C_1$  también tiene límites dependiendo del periodo efectivo del edificio. Cuando  $T_e$  es menor que 0.2 segundos, entonces  $C_1$  no se tomará mayor que el valor calculado para  $T = 0.2$  segundos. Para  $T_e$  mayor que 1.0 segundos entonces  $C_1 = 1.0$ .

$C_2$ : El cálculo de  $C_2$  también depende de  $\mu_{strength}$  y  $T_e$  y se define como:

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left( \frac{\mu_{strength}^{-1}}{T_e} \right)^2 \quad (\text{ASCE 41-17 Ec 7-30})$$

Para  $T_e$  mayor que 0.7 segundos, entonces  $C_2 = 1.0$

$C_m$  : Existen dos métodos para calcular  $C_m$ . El primero es usar el factor de masa efectiva en ASCE 41-17 Tabla 7-4, el cual depende del sistema que resiste la fuerza sísmica y el número de pisos. El segundo es usar el factor de participación de la masa modal efectiva calculada para el modo fundamental usando un análisis de eigenvalues. Para  $T_e$  mayor que 1.0 segundo, entonces  $C_m = 1.0$ .

Como se puede ver, aun cuando la ecuación 7-28 del ASCE 41-17 parece fácil de ser calculada, la obtención de cada uno de los coeficientes no lo es. Involucra el desarrollo del modelo inelástico del edificio, desplazarlo hasta obtener la curva global de fuerza-desplazamiento, idealizar la curva, calcular las propiedades de la rigidez efectiva y el periodo efectivo, determinar la resistencia esperada más allá de la resistencia por fluencia, y calcular la porción de rigidez negativa post-fluencia de la curva global fuerza-desplazamiento. Además, todo el proceso es iterativo. Un desplazamiento objetivo preliminar se calcula, luego, en base a este desplazamiento, la idealización de la curva global fuerza-desplazamiento se redefine, y los coeficientes son recalculados. El proceso se repite hasta que una convergencia razonable se alcanza.

#### 4.4. ELEMENTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Los elementos de un edificio que resisten las cargas de gravedad y sísmicas como parte de una ruta de carga continua hasta la fundación, incluyendo vigas, columnas, losas, arriostramientos, paredes, vigas de acople, y conexiones pueden ser diseñados como primarios o secundarios. ASCE 41-17 secciones 7.2.3.3 y 7.5.1.1.

Componente primario se le denomina a un elemento que es necesario que resista la fuerza sísmica y que acomode las deformaciones sísmicas para que la estructura pueda cumplir con el Nivel de Desempeño seleccionado.

Los elementos primarios son elementos que tradicionalmente resisten las fuerzas laterales, tales como paredes de cortante, marcos arriostrados, marcos, y deben ser incluidos en el modelo analítico. Los elementos primarios pueden ser elementos existentes o elementos nuevos (como parte de un reforzamiento sísmico).

Componente secundario se le denomina a un elemento que acomoda las deformaciones sísmicas, pero no se necesita que resista las fuerzas sísmicas que posiblemente atraiga para que

la estructura pueda cumplir con el Nivel de Desempeño seleccionado. La rigidez total de los componentes secundarios no puede exceder el 25% de la rigidez de los componentes primarios.

Los elementos secundarios típicamente son elementos existentes que inintencionalmente participan en la respuesta sísmica y, en general, proveen una resistencia poco fiable a las cargas por sismo. Los elementos secundarios son usualmente elementos que están diseñados para soportar cargas por gravedad solamente o elementos no estructurales que no están aislados del sistema estructural.

El concepto de redundancia es una parte importante en el diseño de estructuras cuando se habla de la resistencia sísmica. En muchas estructuras, casi todos los elementos y componentes del edificio participan de alguna manera en el proceso de resistencia de las fuerzas sísmicas. El ASCE 41-17, y en general, se recomienda que se incluyan todos los elementos ya sean primarios o secundarios en el análisis para entender de mejor manera el comportamiento de la estructura. Si solamente los elementos primarios se incluyen en la evaluación, el ASCE 41-17 puede parecer conservativo especialmente cuando se utilizan análisis más avanzados.

Si los elementos secundarios no soportan ninguna carga por gravedad y la consecuencia de falla es relativamente insignificante, se pudiera pensar que en práctica sería suficiente modelar estos elementos con una relación fuerza-desplazamiento del Tipo 3, Figura 4.1. Esta clasificación puede permitirse si los requisitos del ASCE 41-17 sección 7.5.1.2 se cumplen; estos incluyen:

- El componente efectivamente muestra el comportamiento Tipo 3 “controlado por deformación” mostrado en la Figura 4.1.
- La ruta de las cargas gravitacionales no se altera o una ruta alternativa adecuada se provee.
- La totalidad de las cargas por gravedad que son resistidos por los componentes reclasificados no excede el 5% del total de ese piso.
- Todos los componentes restantes cumplen con sus criterios de aceptabilidad.
- Si la reclasificación resulta en un cambio en el mecanismo esperado del edificio, entonces la resistencia de los componentes del Tipo 3 deberá ser incrementada por la razón  $Q_{CE}/Q_y$ , ejecutar nuevamente el análisis, y revisar nuevamente todos los componentes.

Para el análisis lineal, si la rigidez total inicial de todos los elementos secundarios excede el 25% de la rigidez total inicial de todos los elementos primarios, algunos elementos secundarios deberán ser reclasificados como primarios e incluidos en el modelo analítico de tal manera que

la rigidez relativa de los elementos secundarios se reduzca hasta ser igual o menor al 25%, según el ASCE 41-17 sección 7.2.3.3. Todos los otros elementos secundarios que no se modelan explícitamente se revisan por deformaciones inducidas por sismos en combinación con las cargas gravitacionales. Para hacer esta confirmación, es en algunas veces útil hacer un segundo modelo analítico con las deformaciones inducidas en los elementos secundarios en combinación con las cargas por gravedad.

Es obligatorio que los elementos no estructurales se consideren y que se clasifiquen como elementos estructurales si la rigidez lateral inicial o su resistencia excede el 10% de la rigidez lateral inicial total o resistencia total de un nivel, respectivamente. Todos los elementos deberán ser incluidos si su participación modifica cualquier irregularidad. El proceso para determinar que elementos necesitan ser incluidos en el modelo puede ser iterativo y requiere una buena interpretación de como los elementos secundarios y no estructurales están detallados. Si su detallado y construcción no permite aislarlos de las deformaciones sísmicas, entonces deberán ser incluidos en el modelo inicial para conocer su rigidez relativa y determinar si es necesario que sean considerados como primarios.

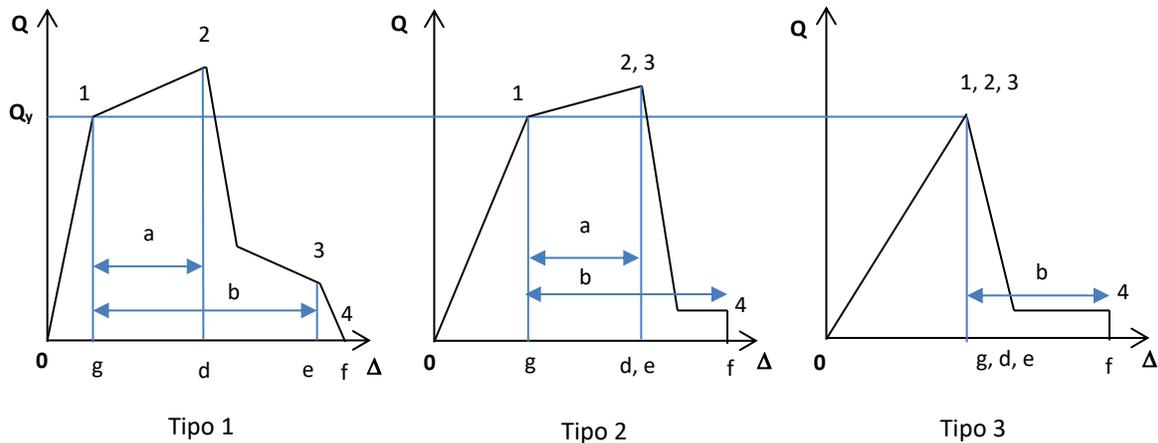
Para el análisis no lineal, todos los elementos (primarios y secundarios) deberán ser incluidos en el modelo con sus respectivas resistencias y rigideces, incluyendo sus degradaciones, para obtener resultados más precisos. El análisis no lineal considera los mismos criterios de aceptabilidad para elementos primarios y secundarios ya que la degradación de rigidez y resistencia y la redistribución de fuerzas se capturan explícitamente en el modelo analítico. El análisis lineal no puede considerar esta degradación, por lo que, solamente los elementos primarios se necesitan que se incluyan en el modelo.

#### **4.5. ACCIONES CONTROLADAS POR FUERZA Y CONTROLADAS POR DEFORMACIÓN**

Las acciones controladas por fuerza (FCA, por sus siglas en inglés) se espera que tengan una pérdida súbita de resistencia después de la fluencia, y no se les permite que excedan la resistencia nominal del elemento que está siendo evaluado. Por otra parte, las acciones controladas por desplazamiento (DCA, por sus siglas en inglés) se les permite que se deformen más allá de la fluencia tal como se estima por su factor de modificación (factor- $m$ ). Idealmente, un edificio tiene un sistema que resiste las fuerzas sísmicas. Algunos componentes tienen acciones que se prevé sean capaces de trabajar después de la fluencia inicial (acciones controladas por deformación), mientras que otras acciones es necesario que transmitan las fuerzas elásticamente debido a su limitada ductilidad (acciones controladas por fuerza). La Figura 4.1 (ASCE 41-17 Figura 7-4) ilustra el comportamiento de los componentes que define si un elemento es controlado por deformación (Tipo 1) o controlado por fuerza (Tipo 3). El

comportamiento entre el Tipo 1 y el Tipo 3 (Tipo 2) depende de la cantidad de la deformación plástica antes de la pérdida de resistencia, para determinar si se considera que es controlado por deformación o controlado por fuerza.

Cuando un pequeño número de elementos falla en cumplir los criterios de aceptabilidad, particularmente en elementos rígidos controlados por fuerzas, el ASCE 41-17 sección 7.5.1.2 y ASCE 41-17 Figura 7-4 permite la reclasificación de algunos elementos controlados por fuerzas para admitir la pérdida de resistencia, siempre y cuando la capacidad para soportar las cargas verticales se mantenga y la inestabilidad dinámica no ocurra. Un ejemplo de esto es una viga de acople que no soporta cargas por gravedad más que la suya propia y que presenta una falla temprana debido a su rigidez. Si el elemento es capaz de soportar mayor daño sin perder su capacidad para soportar cargas por gravedad, este elemento puede ser considerado un elemento controlado por deformación con una curva Tipo 3 según el ASCE 41-17 sección 7.5.1.2.



1. Notas:
2. Solamente acciones en los componentes secundarios se permiten entre los puntos 2 y 4;
3. La fuerza, Q, después del punto 3 se reduce hasta aproximadamente cero.

**Figura 4.1. Curvas fuerza-desplazamiento (ASCE 41-17 Figura 7-4).**

## 5. TIER 1, TIER 2 Y TIER 3

### 5.1. GENERAL

En este capítulo se presenta un análisis del TIER 1 Revisión y TIER 2 Evaluación y reforzamiento basados en déficit y TIER 3 procedimiento de evaluación sistemático que se muestran en el ASCE 41-17. Los procedimientos del TIER 1 y TIER 2 proveen a los ingenieros un método rápido y efectivo para evaluar y potencialmente reforzar solamente las deficiencias encontradas. El procedimiento de evaluación sistemática del TIER 3 es mucho más detallado y profundo, y se citan las principales referencias al ASCE 41-17 para que puedan revisarse en mayor detalle.

Los requisitos para el TIER 1 tienden a ser generales y conservadores por naturaleza, los procedimientos del TIER 2 son más detallados, y los procedimientos del TIER 3 son más específicos y complejos. Nótese que cuando se formularon estos niveles, se esperaba que el procedimiento de Revisión del TIER 1 identificaría más edificios como potencialmente inseguros que al usar los procedimientos del TIER 2 ya que éste usa estándares más exactos e involucra un trabajo más extenso de evaluación. De igual manera, el procedimiento de evaluación sistemática del TIER 3 encontraría que algunos edificios que no superaron el TIER 2 sean aceptables. En esencia, estos niveles han sido formulados de tal manera que la probabilidad de un error al evaluar un edificio como aceptable en los niveles inferiores sea mayor que los niveles superiores.

### 5.2. TIER 1 REVISIÓN (ASCE 41-17 CAPÍTULO 4)

El procedimiento de revisión del Tier 1 es efectivo en identificar rápidamente deficiencias sísmicas potencialmente peligrosas en un edificio, usando una lista de evaluación y cálculos para revisiones rápidas de los mayores componentes del edificio. Este procedimiento está limitado a tipologías comunes de edificios como se establece en el ASCE 41-17 sección 3.4.1 y Tabla 3-1 y para el número de pisos que se establece en la Tabla 3-4. El método está estructurado para evaluar edificios con los Objetivos de Desempeño Básicos para Edificios Existentes (BPOE). El procedimiento del Tier 1 no es aplicable a los Objetivos Básicos de Desempeño para Nuevos Estándares de Construcción (BPON).

El procedimiento del Tier 1 requiere un solo nivel de evaluación para el Nivel de Amenaza Sísmica de BSE-2E para edificaciones con Categorías de Riesgo comprendidas entre I y III y para estructuras con la Categoría de Riesgo de IV se necesita hacer análisis para dos Niveles de Amenaza Sísmica, BSE-1E y BSE-2E.

El procedimiento del Tier 1 utiliza listas de evaluación para rápidamente encontrar las deficiencias. El Estándar provee estas listas para cada tipología de edificios, componentes no estructurales, y fundaciones para varios niveles de sismicidad y desempeño. El ASCE 41-17 Tabla 4-6 proporciona una matriz de las listas de evaluación que se deberán llenar dependiendo de varias características, y que se encuentran en el Capítulo 17 del Estándar.

Cuando se ejecuta un procedimiento de Tier 1, una investigación in situ y una evaluación de las condiciones del edificio son necesarias. Pruebas de materiales no son necesarias, y se permite el uso de valores de resistencia por defecto presentados en el ASCE 41-17 sección 4.2.3. No se necesita aplicar el “factor de conocimiento” ya que esta implícitamente incorporado dentro del procedimiento.

Al finalizar el procedimiento, todos los ítems que resultan que no cumplen “non compliant” o desconocidos “unknown” necesitan de una investigación más profunda para demostrar que cumplen con el objetivo de desempeño que se está evaluando. Para que pase el Tier 1, todos los ítems que han resultado como desconocidos “unknown” deben ser buscados hasta que se encuentre la información y que el ítem en cuestión puede ser plenamente analizado. Los ítems que no cumplen “non compliant” deberán ser evaluadas con el procedimiento del Tier 2 para verificar si cumple con los objetivos de desempeño BPOE. A discreción y criterio del ingeniero evaluador, los ítems desconocidos “unknown” pueden ser investigados como parte del procedimiento del Tier 2 con una investigación más profunda; sin embargo, el edificio no se le da el aval de que ha pasado el Tier 1 con esos ítems considerados como desconocidos “unknowns”.

### **5.3. TIER 2 EVALUACIÓN Y REFORZAMIENTO BASADOS EN DÉFICIT (ASCE 41-17 CAPÍTULO 5)**

El procedimiento del Tier 2 se usa después de haber completado el procedimiento del Tier 1. El proceso es desarrollar una evaluación más detallada de los ítems que resultan que no cumplen “non compliant” o como desconocidos “unknown” identificados en el procedimiento del Tier 1, y si el ítem aún se determina que no cumple, el edificio se considera que no satisface el Objetivo de Desempeño establecido. El edificio o el componente deficiente puede ser reforzado y la lista de evaluación del Tier 1 revisada para satisfacer el Objetivo de Desempeño establecido. Cada lista de evaluación en el ASCE 41-17 capítulo 17 se refiere a una sección aplicable en el procedimiento del Tier 2 para una futura evaluación. La figura 5-1 en el ASCE 41-17 ilustra el proceso de evaluación del Tier 2 y es una guía útil para evaluar los componentes del edificio.

Debido a los ítems identificados que no cumplen “non compliant” en el Tier 1 pudiera necesitarse un análisis completo del edificio, en el procedimiento del Tier 2, para determinar las demandas en los ítems potencialmente deficientes. Según el ASCE 41-17 sección 5.2.4 solamente métodos de análisis lineales se permiten en el procedimiento del Tier 2. Si se fueran a usar métodos de análisis no lineales, es obligatorio usar el procedimiento Tier 3. Cuando se determina la capacidad de los elementos en el procedimiento Tier 2, ASCE 41-17 sección 5.2.6 indica que el “factor de conocimiento” sea igual a 0.75 a menos que la recopilación de los datos y la prueba de los materiales cumpla con el ASCE 41-17 sección 6.2.4.

El propósito del procedimiento basado en déficit del Tier 2 es limitar el alcance de la evaluación o reforzamiento a solamente a aquellos ítems clasificados como “non compliant” y “unknown” en el Tier 1. Este procedimiento es más simple y focalizado que el procedimiento del Tier 3 donde todos los componentes del edificio son evaluados. Como en el caso del Tier 1, el Tier 2 requiere un solo nivel de evaluación para el Nivel de Amenaza Sísmica de BSE-2E para edificaciones con Categorías de Riesgo comprendidas entre I y III y para estructuras con la Categoría de Riesgo de IV se necesita hacer análisis para dos Niveles de Amenaza Sísmica, BSE-1E y BSE-2E.

El alcance del reforzamiento del Tier 2 no va más allá de lo que es necesario modificar en el edificio para cumplir con las evaluaciones del Tier 1 o Tier 2. El reforzamiento del edificio deberá ser evaluado para confirmar que la estructura reforzada cumple con los objetivos de desempeño establecidos en el Tier 1 y Tier 2 y verificar que el procedimiento de mejora estructural no pasó la deficiencia a otro componente crítico. El ASCE 41-17 sección 2.3.3 plantea esta inquietud exigiendo que el diseño del reforzamiento no resulte en una reducción en el Nivel de Desempeño Estructural, que no cree una nueva irregularidad estructural o haga una existente aún más severa, y que no resulte en un incremento de fuerzas en cualquier componente que es deficiente en su capacidad para resistir tales fuerzas.

#### **5.4. TIER 3 EVALUACIÓN Y REFORZAMIENTO SISTEMÁTICOS (ASCE 41-17 CAPÍTULO 6)**

El Tier 3 es una metodología que utiliza procedimientos lineales o no lineales, estáticos y dinámicos, para evaluar cada elemento del sistema lateral sismo-resistente existente y de reforzamiento de una edificación. El TIER 3 fue concebido como un procedimiento sistemático para todos los edificios, independientemente del tamaño de configuración o sistema estructural. Este rango incluye edificios complejos que no pudieron ser clasificado en uno de los tipos de edificios comunes que se usaron para derivar las metodologías del TIER 1 y TIER 2. Para tales edificios, en los cuales no hay suficiente experiencia en su comportamiento ante sismos

anteriormente ocurridos, una evaluación completa debe ser llevada a cabo para garantizar la suficiente robustez y margen de seguridad más allá del nivel del terremoto de diseño.

El ingeniero debe analizar el edificio de acuerdo con el ASCE 41 capítulo 6 y evaluar todos los elementos sismo-resistentes de la edificación. Los elementos que resulten sobre esforzados o deficientes basados en la relación demanda-capacidad, requerirán medidas de mitigación usando el procedimiento de reforzamiento del Tier 3. Para los procedimientos específicos de análisis y criterios de aceptación se debe seguir el ASCE 41 capítulo 7.

Las evaluaciones Tier 3 no tiene límite en el tamaño y complejidad del edificio, análisis lineales o no lineales pueden utilizarse, sin embargo, los procedimientos lineales tienen algunas limitaciones, como son indicados en la sección 7.3 del ASCE 41. Los siguientes pasos mínimos debe realizarse en una evaluación Tier 3:

- Una evaluación debe desarrollarse para identificar potencias deficiencias sísmicas (Tier 1).
- Un esquema de reforzamiento preliminar debe desarrollarse usando uno o más de las estrategias de reforzamientos definidas en la sección 1.5 del ASCE 41.
- Un análisis del edificio, incluyendo medidas de reforzamiento, debe efectuarse, para verificar que las medidas de reforzamiento cumplen con el objetivo de desempeño seleccionado.
- Documentos constructivos, incluyendo planos, especificaciones, y control de calidad deben presentarse, como es definido en el capítulo 1 del ASCE 41.

El procedimiento de análisis utilizado, para evaluar al edificio, debe cumplir con un análisis lineal estático, lineal dinámico, no lineal estático, o no lineal dinámico, según sea el caso. Cada procedimiento tiene sus propias limitaciones y no es aplicable a todos los edificios. La selección del procedimiento debe estar basado en las características estructurales como se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Selección de Procedimiento de Análisis. Modificado de LADBS (2020)**

Irregularidades	Características estructurales <sup>4</sup>	Procedimiento: Análisis lineal <sup>5</sup>		Procedimiento: Análisis no lineal <sup>5</sup>		
		Lineal estático (LSP)	Lineal dinámico (LDP)	No lineal estático (NSP)	No lineal dinámico (NDP)	
NO	Estructuras con $T \leq 3.5T_s$	P	P	P	P	
	Estructuras con $T > 3.5T_s$	NP	P	P	P	
SI	Solo una de las irregularidades definida en la sección 7.3.1.2	NP	P	P	P	
	Irregularidades definidas en las secciones 7.3.1.1.1 o 7.3.1.1.2	$\mu_{strength}^2 < \mu_{max}^3$	NP	NP	P	P
		$^1\mu_{strength}^2 > \mu_{max}^3$	NP	NP	NP	P
	Irregularidades definidas en las secciones 7.3.1.1.3 o 7.3.1.1.4, con $DCR < \min(3.0 \text{ y } m)$	P	P	P	P	
	Irregularidades definidas en las secciones 7.3.1.3 o 7.3.1.4 con $DCR > \min(3.0 \text{ y } m)$	$\mu_{strength}^2 < \mu_{max}^3$	NP	NP	P	P
$^1\mu_{strength}^2 > \mu_{max}^3$		NP	NP	NP	P	

1. NSP es permitido solamente si los efectos de los modos superiores no son significativos como es definido en la sección 7.3.2.1 (2). Si los modos superiores son significativos, el NSP debe ser permitido si un análisis LDP es además desarrollado para complementar el NSP de acuerdo con la sección 7.3.2.1 (2).
2.  $\mu_{strength}$  calculado de acuerdo con el ASCE 41 ecuación 7-31.
3.  $\mu_{max}$  calculado de acuerdo con el ASCE 41 ecuación 7-32.
4. DCR es la relación demanda-capacidad por sus siglas en ingles.
5. P: Permitido, NP: No Permitido

## 6. EVALUACIÓN DE EDIFICIOS DAÑADOS POR SISMOS

### 6.1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de edificios dañados por sismos es una actividad importante dentro del proceso “Preparación de la Respuesta” que constituye uno de los componentes primordiales de la Gestión del Riesgo por Desastres. En la actualidad existen varias metodologías tanto nacionales DGPC-VMVDU-OPAMSS-CASALCO (2008), ASIA (2012); como internacionales ATC-20 (ATC, 2005), FEMA P-154 (FEMA, 2015) o ATC 52-4 (ATC, 2010) entre otros. Un documento que presenta el estado del arte de las metodologías de evaluación post-sísmica a nivel mundial y hace una comparación entre ellas desde varios ángulos es el escrito por Alcocer et.al. (2019), al cual el lector puede consultar para entender como cada metodología se aplica, sus niveles de análisis, sus objetivos, el procedimiento de ejecución, sus atributos solicitados, los resultados obtenidos, las limitaciones, el costo relativo, la precisión y sus correspondientes anexos.

En base a la extensa literatura consultada, en las próximas secciones se esboza una metodología, que a criterio de los autores, es la que mejor se adapta a las condiciones nacionales, tomando en consideración aspectos tales como el tipo de estructuras aplicables, las características a evaluar, los niveles de seguridad, el nivel de pericia y conocimiento de los evaluadores y el tiempo de ejecución.

### 6.2. PREPARACIÓN DE LA RESPUESTA.

Los procesos claves, o misionales, de la Gestión del Riesgo de Desastre son:

1. Generar conocimiento sobre el riesgo de desastre en sus diferentes ámbitos
2. Prevenir el riesgo futuro
3. Reducir el riesgo existente
4. Preparar la respuesta
5. Responder y rehabilitar
6. Recuperar y reconstruir

En este apartado nos concentraremos en el proceso “Preparar la Respuesta” por las razones que se expondrán más adelante.

Este proceso clave se enmarca en la Prioridad 5 del Marco de Acción de Hyogo (UNISDR, 2005) y tiene como objetivo desarrollar capacidades, instrumentos y mecanismos para responder adecuadamente ante la inminencia y/o la ocurrencia de fenómenos peligrosos. Uno de sus



Deberá tenerse en mente que, debido a las condiciones sísmicas de El Salvador, pueden ocurrir sismos de igual magnitud en un periodo de tiempo y espacio extremadamente corto (Ambraseys, 2001; Harlow et.al., 1993) por lo que la evaluación y subsiguiente asignación de bandera, principalmente para edificaciones sin daño estructural y no estructural, se deberá analizar si el edificio es susceptible a sufrir daño en un hipotético evento futuro. Se hará un breve informe de cada una de las evaluaciones ejecutadas.

Esta etapa puede tener una duración de una semana después de la ocurrencia del evento.

**Etapa 2:** Evaluación intermedia. Esta se aplica a las edificaciones cuyo resultado de la Etapa 1 haya sido bandera de color verde o amarillo. Se ejecuta haciendo una inspección visual desde el interior de la estructura. Aquí se evalúa el nivel de seguridad y de vulnerabilidad sísmica de los edificios y se usará un formulario (producto de una metodología para la estimación de la vulnerabilidad). A las edificaciones que tuvieron bandera verde en la Etapa 1 se examinará si son propensas a ser vulnerables. En tanto que las estructuras de poseen bandera amarilla en la etapa 1 pueden cambiar a bandera verde (Habitabilidad y uso inmediato), mantenerse en amarillo (Acceso restringido a ocupantes) o cambiar a bandera roja (Acceso prohibido a ocupantes) y se indicará si necesitan apuntalamiento, la utilización de algún equipo especializado o ser acordonadas.

Esta etapa puede tener una duración de tres a cuatro semanas. Cada evaluación puede durar en promedio dos horas y deberá hacerse un breve reporte por cada una de ellas.

**Etapa 3:** Evaluación estructural: Esta se aplica a las edificaciones que después de las dos evaluaciones anteriores tengan bandera amarilla o roja. El resultado de este análisis permite calcular la capacidad de una estructura e identificar aquellas estructuras que tienen la posibilidad de ser rehabilitadas, en base a consideraciones técnicas, económicas y financieras o que por el contrario se deba proceder a la demolición. Por otra parte, a las estructuras que tengan bandera verde de las dos etapas anteriores se puede evaluar si éstas se deben rehabilitar en base a consideraciones técnicas, económicas y financieras.

Esta etapa puede tener una duración de varios meses.

Nótese que, a pesar de haberse tomado todas las precauciones del caso, y debido a lo expuesto en los párrafos anteriores, puede suceder que un evento sísmico posterior cambie las condiciones estructurales y/o no estructurales del edificio. Entonces se deberá hacer una

reevaluación de las Etapas 1 y 2 si en dado caso no se encuentra ya en una evaluación estructural o Etapa 3.

### **6.2.2 Personal**

Los evaluadores estarán organizados en brigadas de inspección de al menos tres personas, de preferencia profesionales en Ingeniería Civil y/o Arquitectura y/o estudiantes de último año de esas mismas carreras, los cuales hayan recibido un curso intensivo para la evaluación de edificaciones post terremoto. Es deseable incluir en cada brigada un trabajador social, o persona que conozca el territorio, para la gestión de accesos y coordinación de visitas. Esta cuadrilla será suficiente para la Etapa 1 de la metodología de evaluación.

Para la Etapa 2 de evaluación se requiere que un ingeniero con especialidad en estructuras se incorpore a las brigadas de inspección.

Para la Etapa 3, es en general, una empresa de ingeniería la que se encargará de ejecutar tal actividad.

Cada institución que cuente con el personal idóneo descrito en los párrafos anteriores deberá designar un grupo de personas que cumplan la función de evaluador de daños para que reciban el curso previamente y ante la ocurrencia de un sismo, ellos se encargarán de formar las brigadas de inspección de su respectiva institución y ejecutarán tal función allí. Al finalizar rendirán su reporte y se pondrán a disposición de la institución que los capacitó que en general deberá ser la Dirección General de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres. Si por el contrario no hay personal que pueda ejecutar la evaluación post sismo deberá solicitar alguna brigada a la Dirección General antes mencionada.

### **6.2.3 Capacitación**

Deberá haber cursos de capacitación para todas las personas que hayan sido designadas como evaluadores. En estos cursos se cubrirá, como mínimo:

- Presentación y uso de la metodología de evaluación
- Identificación de las funciones de los integrantes de las brigadas
- Reconocimiento y cuantificación de daños
- Reconocimiento de las diferentes tipologías estructurales
- Descripción del terreno
- Descripción de vulnerabilidades de las edificaciones
- Toma de fotografías a los puntos de interés
- Manual de campo con el uso de las fichas de recolección de información tanto en formato digital e impreso y que hacer en caso de no tener acceso a internet desde el lugar de inspección.

- Uso de mapas tanto en papel como digitales, para coordinación de rutas de evaluación.
- Criterios para producir una evaluación unificada entre los evaluadores

Se elaborarán manuales y material que ayude a los evaluadores en el reconocimiento de los diferentes tipos y magnitudes de daños estructurales y no estructurales y su clasificación.

Se creará una base de datos y algoritmos de calculo que gestione y almacene la información que sea enviada por los evaluadores al centro de operaciones.

Las fichas de evaluación, además de estar disponibles en línea, deberán poder almacenarse, tanto ellas como sus datos, en los dispositivos electrónicos que se usen en el proceso. Debido a que podría haber lugares que la señal de internet sea débil o inexistente.

Como parte de la capacitación de deberá hacer una evaluación de las edificaciones previas a un evento sísmico. Tal información es valiosa ya que tiene muchos beneficios, primeramente, se conocerá la condición de vulnerabilidad presente de la estructura; segundo, se tendrá un parámetro de comparación de las condiciones actuales del mismo y, tercero, como ventaja adicional, no menos importante, servirá de entrenamiento a los futuros evaluadores, los cuales ejercitarán tal actividad sin la presión de que ha ya sucedido un evento sísmico. Esta acción se considera una **Etapas 0**.

#### 6.2.4 Equipo

El equipo específico que se deberá tener listo para cada brigada de inspección es el siguiente:

- Plano de la región del país/región/ciudad a donde se hará la visita identificando la ruta a seguir. Se debería tener tanto en papel como en digital
- Datos de las personas o autoridades con las que se puede hacer contacto para realizar los recorridos. De ser posible se debe contar con alguna carta o documento que acredite al equipo de trabajo.
- Al menos una cámara fotográfica digital con flash para detalles cercanos o en interiores o cámara de celular con buenas características para la toma de fotografías.
- Casco.
- Zapatos especiales por si camina sobre escombros o zonas difíciles.
- Lámpara de mano con baterías en buen estado.
- Brújula para orientar la estructura.
- Grietómetro y cinta métrica (5 m o mayor).
- Tabla de broche para escribir.

- Las fichas de evaluación en papel y digital. Es importante que el dispositivo electrónico que se use para llenar las fichas (preferentemente una tableta) pueda almacenar la información en su memoria en caso de que no haya acceso confiable a internet. Nótese que las fichas en papel es un instrumento indispensable de portar, aun en este tiempo, ante cualquier falla del equipo electrónico, por tal motivo, también se deberá formular protocolo para su uso y manejo de información.
- Hojas de papel
- Radio y teléfono.
- Agua y alimentos
- Impermeable o paraguas en caso de lluvia y gorra o sombrero para el sol.

Todo este equipo deberá ser proporcionado por la Dirección General de Protección Civil. Sin embargo, algunas instituciones posiblemente tengan la capacidad para proporcionarle a sus grupos de evaluadores algunos de los insumos antes listados.

La Dirección General de Protección Civil deberá suscribir convenios con los diferentes proveedores de internet inalámbrico en el país de manera tal que cuando ocurra un sismo se les proporcione ese servicio a las diferentes brigadas de evaluadores, evitando así que los miembros gasten sus propios recursos informáticos.

#### **6.2.5 Instituciones que conforman el Sistema Nacional de Evaluadores**

La Dirección General de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres, por ley, es el ente rector en este tipo de actividades. Es por lo tanto la encargada de sistematizar todas las actividades de capacitación y planeamiento previo a un evento sísmico y de coordinar los esfuerzos de evaluación después que el evento ocurra.

Entre las instituciones que pueden servir de apoyo a esta iniciativa se encuentran MOPT, MVDU, MARN, OPAMSS, Instituciones de Educación Superior (Universidades que cuenten con las carreras de Ingeniería Civil y Arquitectura), ASIA y CASALCO, entre otras. Todas éstas están llamadas a formar el núcleo que se capacitará, primeramente, en la evaluación de edificaciones post sismos y luego ellas replicarán este proceso con otras instituciones y organizaciones que lo requieran y/o necesiten.

De esta manera se crea el Sistema Nacional de Evaluadores.

#### **6.2.6 Protocolo para asignación de los edificios a evaluar**

Pueden existir dos mecanismos para asignar las inspecciones a las estructuras:

1. La Dirección General de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres recibe las peticiones de solicitud directamente del propietario de la estructura o de la persona que la ocupa.
2. Después del evento sísmico, La Dirección General de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres recibe información de las diferentes instituciones que conforman el Sistema Nacional de Protección Civil de los lugares que han ocurrido los mayores efectos por el sismo. Puede coordinar vuelos y desplazamientos terrestres, con otros organismos, para determinar las zonas con infraestructura afectada. A partir de esta información, delimita cuadrantes de estudio y análisis que les serán asignados a las diferentes brigadas que conforman el Sistema Nacional de Evaluadores.

Vale la pena mencionar que una herramienta importante para determinar, casi en tiempo real, las áreas con mayores sacudidas en una región en particular son a través del uso de Shakemaps, los cuales pueden ser desarrollados fácilmente por MARN. Obviamente, debe haber una capacitación por parte de esta institución hacia La Dirección General de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres y el Sistema Nacional de Evaluadores, en general, para obtener el mejor provecho de tal herramienta.

Los edificios se clasificarán en dos grupos para su evaluación: *Los edificios prioritarios*, que abarcan, pero no están limitados a, edificaciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana o de desastre tales como hospitales, centros de salud, estaciones de bomberos, centrales telefónicas y de telecomunicaciones, centros escolares donde se imparta educación a nivel inicial, preescolar, primaria, secundaria, media, media superior y superior, y edificaciones que servirán como albergues para los desplazados por los sismos, los cuales serán los primeros en ser evaluados y después serán examinados el resto de las edificaciones o *edificios generales*.

La Dirección General de Protección Civil será la encargada de la logística de las visitas, por lo que, asignará los edificios y la ruta de evaluación a cada brigada de inspección y deberá coordinar con el responsable en campo el día y hora que llegaran a ejecutarla.

Cada edificación tendrá un código único que estará respaldado por sus coordenadas geodésicas.

#### **6.2.7 Verificaciones adicionales**

Para las edificaciones cuyos usos son hospitales, centros de salud, estaciones de bomberos, centrales telefónicas y de telecomunicaciones, centros escolares donde se imparta educación a

nivel inicial, preescolar, primaria, secundaria, media, media superior y superior se ejecutará un levantamiento físico de verificación de daños cuando se haya producido un sismo cuyas aceleraciones fueren superiores a 0.15g.

Para las edificaciones cuyos usos son hospitales, centros de salud, estaciones de bomberos, centrales telefónicas y de telecomunicaciones, centros escolares donde se imparta educación a nivel inicial, preescolar, primaria, secundaria, media, media superior, y superior se deberá verificar, por un responsable de la seguridad estructural, y hacer constar la seguridad estructural de las mismas, cada cinco años, de acuerdo con las disposiciones vigentes.

### 6.3. METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE EDIFICIOS DAÑADOS POR SISMOS

La evaluación de edificios dañados persigue, en primer lugar, establecer los niveles de daños en una edificación y que puede constituirse en un primer criterio de habitabilidad en los días posteriores a la ocurrencia de un sismo severo. Posteriormente se procede a evaluar con más profundidad aquellas estructuras que, dependiendo de su primera calificación, no han podido catalogarse como seguras o habitables y a las cuales se les evalúa su vulnerabilidad a partir de su condición de daño.

Dentro del contexto de la velocidad de la respuesta con la cual debe ser ejecutada la evaluación de una estructura después de un sismo, y como se describió en la sección 6.2 ,se pueden definir tres etapas de evaluación:

**Etapas 1:** Evaluación rápida. Es un tipo de evaluación visual que se completa utilizando listas de chequeo. En general está diseñada para identificar daños potenciales o reales con una verificación rápida de las edificaciones y puede realizarse con una inspección exterior del edificio. En esta etapa se evalúa el nivel de daño y la habitabilidad. El tiempo aproximado de cada inspección es de media hora; y se consideran tres banderas:

- Verde: Sin daño estructural, mientras que el sistema no estructural puede no presentar daños o puede tener daños leves. Las edificaciones que caen esta clasificación se les puede dar la habitabilidad y pueden ser usadas inmediatamente.
- Amarillo: Daño ligero a moderado tanto en el sistema estructural como no estructural. El acceso está restringido a los ocupantes.
- Rojo: Daño severo a colapso tanto en el sistema estructural como no estructural. El acceso está prohibido a los ocupantes. Se indicará si estas estructuras necesitan apuntalamiento, la utilización de algún equipo especializado o ser acordonadas. Estas edificaciones pasan directamente a la Etapa 3 de evaluación.

Deberá tenerse en mente que, debido a las condiciones sísmicas de El Salvador, pueden ocurrir sismos de igual magnitud en un periodo de tiempo y espacio extremadamente corto (Ambraseys, 2001; Harlow et.al., 1993) por lo que la evaluación y subsiguiente asignación de bandera, principalmente para edificaciones sin daño estructural y no estructural, se deberá analizar si el edificio es susceptible a sufrir daño en un hipotético evento futuro. Se hará un breve informe de cada una de las evaluaciones ejecutadas.

**Etapla 2:** Evaluación intermedia. Esta se aplica a las edificaciones cuyo resultado de la Etapa 1 haya sido bandera de color verde o amarillo. Se ejecuta haciendo una inspección visual desde el interior de la estructura. Aquí se evalúa el nivel de seguridad y de vulnerabilidad sísmica de los edificios tomando en cuenta los daños recibidos y se usará un formulario (resultado de una metodología para la estimación de la vulnerabilidad) para tal fin. A las edificaciones que tuvieron bandera verde en la Etapa 1 se examinará si son propensas a ser vulnerables. En tanto que las estructuras de poseen bandera amarilla en la etapa 1 pueden cambiar a bandera verde (Habitabilidad y uso inmediato), mantenerse en amarillo (Acceso restringido a ocupantes) o cambiar a bandera roja (Acceso prohibido a ocupantes) y se indicará si necesitan apuntalamiento, la utilización de algún equipo especializado o ser acordonadas.

Esta etapa puede tener una duración de tres a cuatro semanas. Cada evaluación puede durar en promedio dos horas y deberá hacerse un breve reporte por cada una de ellas.

**Etapla 3:** Evaluación estructural: Esta se aplica a las edificaciones que después de las dos evaluaciones anteriores tengan bandera amarilla o roja. Se revisa el comportamiento sísmico de la estructura con base en análisis estructurales detallados conforme lo indican las normativas propias de cada país o metodologías de rehabilitación bien establecidas. El resultado de este análisis permite calcular la capacidad de una estructura e identificar aquellas estructuras que tienen la posibilidad de ser rehabilitadas, en base a consideraciones técnicas, económicas y financieras o que por el contrario se deba proceder a la demolición. Por otra parte, a las estructuras que tengan bandera verde de las dos etapas anteriores se puede evaluar si éstas se deben rehabilitar en base a consideraciones técnicas, económicas y financieras.

En los siguientes apartados se describe el ámbito de aplicación de cada una de las evaluaciones mencionadas, los objetivos particulares y los resultados que producen.

#### **6.4. ETAPA 1: EVALUACIÓN RÁPIDA**

**6.4.1 Objetivo**

Es un tipo de inspección visual que se realiza posteriormente a la ocurrencia de un sismo. Este tipo de evaluación se diseña para ser realizada por inspectores, ingenieros civiles y estructurales, y otros agentes que están relacionados al diseño y construcción de edificios, que no necesariamente deben ser especialistas en estructuras, pero si deben tener experiencia en la inspección de daños o áreas relacionadas. El objetivo de este nivel es distinguir los edificios aparentemente seguros de los obviamente no seguros de manera rápida, y con la mínima mano de obra colocar una calificación que se utiliza también como criterio de habitabilidad, en una inspección que toma minutos con la ayuda de una lista de verificación. Como resultado de esta evaluación se asignará una bandera cuyo color indica el nivel de seguridad y condición de habitabilidad de la estructura. La Tabla 6.1 muestra las tres posibles calificaciones y sus banderas correspondientes.

**Tabla 6.1. Calificación y bandera para la Etapa 1 de evaluación**

<b>Color de la bandera</b>	<b>Calificación</b>	<b>Descripción</b>
Verde	Habitable	Edificios donde no se han encontrado peligros aparentes, aunque podrían ser requeridas reparaciones. La capacidad ante carga lateral no ha disminuido significativamente. No hay restricciones de uso o de ocupación.
Amarillo	Seguridad Incierta	Edificios para los cuales se sospecha de la existencia de una condición de peligro. Se permite la entrada al propietario únicamente para propósitos de emergencia y bajo su propio riesgo. No se permite el uso de los edificios de manera continua y se prohíbe el acceso al público. Existe posibilidad de peligrosidad asociada a réplicas.
Rojo	Insegura	Edificios para los cuales existe un peligro inminente de colapso debido a una réplica. Son edificios inseguros para ocupación o entrada, exceptuando a las autoridades competentes.

Adicionalmente a la clasificación y banderas descritas, se identificarán áreas de los edificios que son inseguras pero cuya condición no compromete la seguridad global de la estructura, es decir, sectores localmente inseguros en edificios con bandera verde. A estos sectores se les calificará como “Área insegura” y se delimitarán en el edificio acordonándolos. De esta manera, aunque el edificio se considerará “Habitable” el acceso a estos sectores quedará restringido hasta que sean reparados.

#### 6.4.2 Procedimiento

La evaluación se llevará a cabo por brigadas de inspección, que han recibido el curso de capacitación correspondiente (ver sección 6.2.3), en un tiempo de aproximadamente 15-30 min por edificio. Los inspectores examinarán las estructuras en búsqueda de evidencias de fallas como colapso parcial, desplomes, daños severos en elementos portantes, condiciones del suelo y otras características que podrían llevar a la estructura a calificarse como “Insegura”. En general, esta evaluación se realizará inspeccionando los edificios desde el exterior, es decir, que la clasificación de la estructura se hará con base en los daños que son fácilmente identificables de manera visual.

Para realizar la calificación se evaluará una lista de condiciones, de manera cualitativa mediante las respuestas “Sí”, “No” o “Existen dudas”, para describir el estado de la edificación. Para algunas condiciones se requerirá indicar la extensión del daño identificado como “Local” o “Global”. Esta lista se presenta en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2. Condiciones de evaluación para la metodología de la Etapa 1**

Condición	Descripción	Respuesta	Extensión
1	Falla total	Sí, No o Existen dudas	No aplica
2	Falla parcial		
3	Edificación separada de su cimentación		
4	Asentamiento diferencial o hundimiento		
5	Desplome notorio de la edificación o de algún entrespacio		
6	Daños severos en elementos estructurales (columnas, vigas, muros de carga)		
7	Daños moderados en elementos estructurales tales como columnas, vigas, losas, muros de corte, arriostramientos.		
8	Grietas en el subsuelo		Local o Global
9	Deslizamiento de talud o corte		
10	Daños severos en elementos no estructurales (muros divisorios, acabados, cancelería)		
11	Daños moderados en elementos no estructurales		
12	Daños en instalaciones eléctricas		
13	Daños en instalaciones hidrosanitaria		
14	Daños en instalaciones de gas		
15	Pretilos, balcones u otros objetos en peligro de caer		
16	Otros peligros (líneas o ductos rotos, derrames tóxicos, etc.)		

Para clasificar la edificación de acuerdo con su nivel de seguridad se evalúan las 16 condiciones en el siguiente orden:

- Si la respuesta es “No” para todas las condiciones la edificación se clasificará como “Habitable” y se colocará bandera verde.
- Si la respuesta es “Si” para al menos una de las condiciones de la 1 a la 6 la edificación se clasificará como “Insegura” y se colocará bandera roja.
- Si la respuesta es “Si” para la condición 7 la edificación se clasificará como “Seguridad Incierta” y se colocará bandera amarilla.
- Si la respuesta es “Si” para al menos una de las condiciones 8 y 9 existen dos posibilidades:
  - ✓ La extensión del daño en al menos una de ellas es “Global” se clasificará como “Insegura” y se colocará bandera roja.
  - ✓ La extensión del daño en ninguna de ellas es “Global” se clasificará como “Área Insegura” y se colocará bandera verde.
- Si la respuesta es “Si” para al menos una de las condiciones de la 10 a la 16 existen dos posibilidades:
  - ✓ La extensión del daño en al menos una de ellas es “Global” se clasificará como “Seguridad Incierta” y se colocará bandera amarilla.
  - ✓ La extensión del daño en ninguna de ellas es “Global” se clasificará como “Área Insegura” y se colocará bandera verde.
- Si existen dudas se clasificará como “Seguridad Incierta”.

Los pasos recomendados para la aplicación del método son los siguientes:

1. Reconocimiento del área dañada, o área con sospecha de daño. El inspector debe caminar alrededor de la estructura externamente si es posible.
2. Examinar el suelo y el área en busca de fisuras y grietas, suelo abultado, hundimientos, signos de movimiento de taludes y/o pendientes o expansión del terreno.
3. Ordinariamente ingresar al edificio solamente cuando la estructura no puede observarse suficientemente desde afuera o a menos que se sospeche o se haya reportado un problema, como por ejemplo daños estructurales importantes (muros, columnas y vigas), problemas como caída de cielos rasos, de muros no estructurales dañados, entre otros. No se recomienda entrar a estructuras obviamente inseguras.
4. Evaluar la estructura de acuerdo con los 16 criterios básicos correspondientes a la evaluación rápida. Se debe recordar que el riesgo de colapso puede presentarse por el mal estado de edificaciones vecinas, por lo que se debe revisar si las rutas de evacuación de la edificación son seguras.

5. Llenar el formulario de evaluación Etapa 1, en el cual se completa la información básica que ayuda a identificar las características de la edificación que se evalúa, el estado en que se encuentra y las conclusiones de esta evaluación.
6. Asignar una calificación y bandera a la estructura de acuerdo a los resultados de evaluación (Ver Tabla 6.2 ).
7. Explicar el significado de las calificaciones y banderas a los ocupantes del edificio y aconsejar el desalojo inmediato en los casos que se requiera. Las áreas catalogadas como Área Insegura también deben ser evacuadas.

#### 6.4.3 Formulario

Para asignar la calificación a los edificios se utilizará un formulario de evaluación correspondiente a esta etapa. Este formulario será adecuado para llenar como lista de chequeo, para su fácil uso con dispositivos electrónicos como teléfono inteligente o tableta electrónica y deberá contener como mínimo la siguiente información:

- I. Datos generales de la inspección
  - Inspector
  - Fecha y hora de inspección
  - Número de edificio evaluado: Se asignará un número correlativo único a cada edificio evaluado
  - Código: se asignará un código único que corresponde con el evento sísmico ocurrido, número de edificio evaluado, y la etapa de evaluación. De esta manera se garantiza tener un registro de cada evaluación realizada al edificio.
  - Año de la construcción
- II. Ubicación y descripción de la edificación.
  - Dirección: Incluye el Departamento, municipio, distrito y barrio, colonia, cantón o caserío.
  - Zona: Rural o urbana
  - Coordenadas geodésicas
  - Persona contactada y número de teléfono
  - Número de niveles sobre el nivel de suelo
  - Numero de sótanos
  - Uso del edificio: Vivienda, oficinas, comercios, escuela, hospital, iglesia, reunión, industrial, otro (escribir).
  - Sistema estructural (en dirección X e Y): se especificará de ser posible la tipología del sistema estructural. Se incluirán en la lista los sistemas más comunes en el país: marcos de concreto, marcos de acero, muros de

mampostería, marcos de concreto con relleno de mampostería, marcos y muros de diafragma de concreto (sistema dual), marco de acero con muros de diafragma, marcos de acero contraventeados, muros de adobe, muros de bahareque, madera, lámina, mampostería sin reforzamiento/sin confinar, otros (escribir).

- Área en planta y forma aproximada: describir la forma de manera aproximada como rectangular o compuesta por formas rectangulares, circular, combinación curva recta, planta irregular y otros (escribir).
- Número de personas que habitan el edificio (opcional)
- Tipo de inspección (se indica si se realizó desde el interior o exterior)
- Topografía del terreno
- Cimentación
- Sistema de techo
- Sistema de piso

### III. Estado de la edificación

Contiene las condiciones para evaluación mencionadas en la Tabla 6.2

### IV. Calificación

Se indica el resultado de la evaluación asignando al edificio una calificación como “Habitable”- bandera verde, “Seguridad incierta”- bandera amarilla o “Insegura”- bandera roja.

En este apartado se debe indicar restricciones particulares como la existencia de sectores catalogados como “Área insegura”. La información de esta sección debe coincidir con la que se colocará en la bandera que se le asignará al edificio.

### V. Fotografías de daños, ubicación de daños, descripción de la magnitud de daños utilizando esquemas tanto en planta como elevación: Para los daños en elementos estructurales y no estructurales descritos, en ocasiones, no se tiene la evidencia o ésta no es clara. Es frecuente que las fotos se hayan hecho para el detalle del daño (acercamiento del daño local) sin que exista evidencia de la magnitud y localización relativa del daño en la estructura.

### VI. Recomendaciones

En esta sección se colocarán las recomendaciones que deriven de la evaluación realizada:

- No se requiere evaluación futura
- Se requiere evaluación Etapa 2
- Apuntalar
- Se requiere maquinaria para remover escombros
- Se requiere asistencia de protección civil
- Otros

## VII. Comentarios y observaciones

En esta sección se colocan observaciones relevantes de la evaluación que complementen la información de las otras secciones del formulario. Se explica los motivos de la clasificación asignada que puedan servir como insumo para acciones posteriores.

### 6.4.4 Colocación de la bandera

Esto incluye:

- El nivel correspondiente a la etapa de evaluación realizada. En este caso, Etapa 1
- Clasificación: “Habitable”- bandera verde, “Seguridad incierta”- bandera amarilla o “Insegura”- bandera roja. La bandera debe ser del color correspondiente a la clasificación.
- Restricciones y comentarios: Se indicará la existencia de sectores catalogados como “Área insegura” así como otros particulares.
- Tipo de inspección: se indicará si se realizó desde el exterior o desde el interior
- Fecha de evaluación
- Dirección
- Inspectores

## 6.5. ETAPA 2: EVALUACIÓN INTERMEDIA

Es un tipo de inspección que se realizará a aquellos edificios que, de acuerdo a la Evaluación rápida se determinen como cuestionables. Es decir, que en el nivel de evaluación anterior no se pudo determinar si son aparentemente seguros u obviamente inseguros. Este nivel de evaluación está diseñado para ser realizada por ingenieros estructurales y especialistas en levantamiento de daños estructurales, con la ayuda de un algoritmo de verificación cuya interfase será un formulario. Este tipo de inspección toma unas horas para ser realizada en cada edificio y su objetivo final es evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones. En este tipo de evaluación el criterio y experiencia del evaluador es indispensable para estimar la rigidez y resistencia lateral de la estructura, por lo cual este debe ser especialista en esa área. Uno de los problemas habituales para llevar a cabo este tipo de evaluación es la carencia de suficientes especialistas capacitados para realizarla; sin embargo, en la sección 6.2 se han dado pautas para solventar esta carencia.

Existen varias propuestas metodológicas para ejecutar un análisis de vulnerabilidad de forma rápida y lo suficientemente preciso en situaciones post terremoto tales como Hassan y Sozen (1997), Yakut (2004), JBDPA (2005), García et al. (2012), Aragón Cárdenas (2013) y Sucuoğlu et al. (2015), entre otras. Para estructuras de concreto reforzado y mampostería, esta última es una opción que fácilmente puede ser adaptada a las condiciones de El Salvador, ya que se basa

en una relación demanda-capacidad estructural y que puede ser adaptada a un algoritmo de verificación.

Para esta etapa, además de la información obtenida en la Etapa 1, se necesitará lo siguiente:

- Año de construcción
- Norma de diseño utilizada, nacional o extranjera
- Definir tipo de suelo, al menos definir si es tierra blanca o roca.
- Forma y dimensiones de la planta del edificio
- Mantenimiento de la edificación (Nulo o Regular)
- Posición en la cuadra (Esquina, Medio, Aislado)
- Estado de los elementos estructurales: Grietas en concreto (ancho), grietas en muros de mampostería (ancho).
- Daños en otros elementos
- Estado del piso/techo: Colapso, grietas y su ancho máximo.
- Dimensiones de los elementos estructurales tales como ancho, altura y peralte de secciones de vigas y columnas
- Longitud y espesor de muros
- Claro promedio
- Altura de entrepisos
- Altura total del edificio
- Número de elementos estructurales (columnas y muros)
- Cargas promedio
- Resistencias promedio de los materiales

No se omite manifestar que tanto el formulario de obtención de datos, así como el algoritmo de cálculo deberá estar presente en el dispositivo electrónico que se utilizará de tal manera que se puedan ejecutar los cálculos independientemente si haya conexión directa con el servidor central o no. Por otra parte, las operaciones matemáticas son tan sencillas de hacer que se pueden realizar con una calculadora, en la eventualidad que el dispositivo electrónico tenga algún mal funcionamiento.

La metodología a emplear para estructuras de concreto reforzado y mampostería es la siguiente:

Primeramente, deberá hacerse una estimación de demanda, para ello es necesario conocer algunas características de la estructura, tales como su periodo fundamental de vibración, el peso total de la estructural y el uso de la estructura.

El periodo de la estructura puede ser conocida utilizando la fórmula propuesta en el Método A de la NTDS:

$$T = C_t h_n^{3/4}$$

Donde:  $C_t$  es igual a 0.085 para sistemas A con marcos de acero; 0.073 para sistemas A con marcos de concreto reforzado y 0.049 para el resto de sistemas.

Podría ocuparse fórmulas más precisas que la anterior, en donde se tome en cuenta la sección agrietada de los elementos de marco, como por ejemplo,  $T_1 = 0.002 H^{2.27}$ , H en metros.

El peso total de la estructura se estima con base en los planos estructurales y memorias de cálculo. Este intervalo de valores considera la influencia de las cargas gravitacionales y de las cargas vivas.

Para estimar la fuerza cortante en la base de la estructura ( $V_s$ ), se puede emplear la siguiente ecuación:

$$V_s = S_a(T_1) I W$$

Donde:  $S_a(T_1)$ , aceleración espectral calculada para el periodo fundamental de la estructura;  $I$  factor de importancia, para hospitales, centros de salud y edificaciones que servirán como albergue (1.5), escuelas (1.4) y edificios públicos ordinarios (1);  $W$ , peso total de la estructura.

El comportamiento de las columnas resistentes a cargas laterales puede estar controlada por fallas a flexión o por corte. Para tales efectos se calcula la capacidad (resistencia) a flexión y a cortante de las columnas. El menor valor de ellas controla la respuesta.

- **Capacidad a flexión**

La capacidad a flexión de las columnas depende de las cargas axiales presentes en el elemento. Estas cargas axiales son calculadas con base en las cargas gravitacionales actuantes en la estructura. Para el cálculo de la carga axial ( $N$ ) se emplea la siguiente ecuación:

$$N = A_{eq} n_s w$$

Donde:  $A_{eq}$ , área tributaria de la columna analizada,  $m^2$ ;  $n_s$ , número de niveles sobre el nivel de suelo;  $w$ , carga gravitacional distribuida.

La capacidad de la columna a flexión,  $M_p$ , puede ser calculada con precisión usando el análisis por sección; sin embargo, esto consume mucho tiempo y no es práctico para la priorización del riesgo; alternatively, alguna otra opción podría ser utilizada que produjera resultados razonablemente precisos con menor esfuerzo. Por ejemplo, las capacidades a flexión de columnas y vigas pueden ser calculada con suficiente precisión usando la ecuación propuesta por Ersoy et al. (2008).

$$M_p = 0.5 N (h - 1.2 (N/f'_c b)) + 0.5 A_{st} f_y (d - d')$$

Donde:  $h$  y  $b$  son el peralte y al ancho de la sección, respectivamente;  $d'$  es el recubrimiento,  $A_{st}$  es el área del refuerzo longitudinal,  $f'_c$  es la resistencia del concreto a compresión, y  $f_y$  es la resistencia a fluencia del refuerzo longitudinal;  $d = h - d'$  y  $d'$  puede ser considerado como 0.04 m, en la práctica. Haciendo notar que esta ecuación está en sistema internacional, por lo que todas las dimensiones estarán en m, el valor de  $f'_c$  en  $KN/m^2$  al igual que el valor de  $f_y$ .

Si no se puede obtener los valores de  $f'_c$  y  $f_y$  de planos o por pruebas, puede suponerse que  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$  ( $20600 \text{ KN/m}^2$ ) y  $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$  ( $275 \text{ MPa}$ ). Por otra parte, si se desconoce la cantidad del acero de refuerzo se usará la cuantía mínima permitida.

Si  $h_s$  es la altura de la columna, la carga lateral que resiste la columna debida a la flexión ( $V_{yi}$ ) se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{yi} = 2M_p/h_s$$

- **Capacidad a cortante**

La capacidad a cortante de las columnas ( $V_{ri}$ ) deberá ser calculada, y aquí se puede utilizar la expresión del ACI 318 para tal efecto, la cual toma la contribución del concreto y del acero de refuerzo.

Una vez obtenidos  $V_{yi}$  y  $V_{ri}$  para cada columna, se comparan estos valores y se toma el menor de ambos, tal que la capacidad de la columna ante cargas laterales ( $V_i$ ) será ese valor.

La resistencia global de la estructura ante cargas laterales se calcula como la suma de la resistencia de cada columna ( $V_i$ ):

$$V_b = \sum V_i$$

La capacidad de resistir cargas laterales de un edificio puede aumentar gracias al aporte en la rigidez lateral de los muros de relleno de mampostería por lo que la resistencia global de la estructura ( $V_b$ ) se modifica para tomar en cuenta a estos elementos y para tal efecto se emplea una ecuación propuesta por Yakut (2004), sin embargo, puede utilizarse cualquier expresión que calcule esta contribución:

$$V_{bw} = V_b (46 (A_{mw}/A_{ft}) + 1)$$

Donde:  $A_{sw}$  es el área total de las paredes de relleno en el entrepiso de análisis, sin aberturas, y  $A_{ft}$  es el área total de la planta.

Una vez determinadas la demanda ( $V_s$ ) y la capacidad ante fuerzas laterales ( $V_{bw}$ ), se procede a la obtención del índice de riesgo ( $RI$ ), el cual se obtiene dividiendo la demanda de cortante entre la capacidad de cortante de la estructura, como:

$$RI = V_s / V_{bw}$$

En base a estudios realizados con información nacional (edificios y señales sísmicas) Hernández De Paz & Ramírez (2016) el factor máximo de ductilidad obtenido es de 4, por lo que:

**Tabla 6.3. Valores para el índice RI**

Nivel de daño esperado (bandera)	Intervalo
Desempeño aceptable, riesgo bajo ( <i>Bandera verde</i> )	$RI < 2$
Sufrirá daños mayores, pero tiene riesgo bajo de colapso ( <i>Bandera amarilla</i> )	$2 < RI < 4$
Riesgo alto ( <i>Bandera roja</i> )	$RI > 4$

Estos valores pueden ser ajustados a medida haya mejor y más variada información sobre diferentes sistemas constructivos.

Para el caso de estructuras de acero se ejecuta un procedimiento semejante en donde se compara la resistencia por flexión y por cortante de la sección de cada una de las columnas, por cada eje, y se toma el menor valor. La demanda se calcula de igual manera como se hizo en el procedimiento anterior, y finalmente se obtiene los índices de riesgo. En este caso, sin embargo, deberán calibrarse la relación RI con los diferentes niveles de daño esperados con datos del país.

Un punto adicional a tener en mente en el caso de los marcos de acero es que de realizar inspecciones en cada conexión susceptible de fractura. Estas incluyen:

- Conexiones resistentes a momento viga-columna en las cuales las vigas están conectadas a las columnas utilizando soldaduras de penetración completa entre los patines de la viga y la columna, y para los cuales el comportamiento en fluencia es dominado por la formación de rótulas plásticas en la viga en la cara de la columna o en la zona de panel.
- Empalmes en columnas exteriores de marcos resistentes a momentos cuando los empalmes consisten en soldadura de penetración parcial entre la sección superior e inferior de la columna, o de conexiones empernadas que son incapaces de desarrollar la resistencia total en tensión en la columna superior.

Daños en las conexiones tales como: Fractura del patín superior o inferior de la viga, desgarre del patín de la columna, grieta en el patín de la columna, fractura de la soldadura de junta de penetración completa, ruptura del patín de la columna, entre otras, colocan a la estructura en bandera amarilla.

### **6.6. ETAPA 3: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL**

Los edificios que se les aplica esta etapa de evaluación son aquellos que han recibido bandera amarilla o roja producto de las dos etapas anteriores. En esta etapa se evalúan los edificios utilizando procedimientos de cálculo más profundos que los utilizados anteriormente para lo cual se vuelve necesario llevar a cabo un levantamiento detallado de información de la estructura que puede requerir ensayos destructivos y no destructivos, pruebas de laboratorio, entre otros. El propósito de estas evaluaciones es identificar aquellas estructuras que tienen la posibilidad de ser rehabilitadas, en base a consideraciones técnicas, económicas y financieras o que por el contrario se deba proceder a la demolición. Esta evaluación estructural puede ser aplicada a estructuras que se les haya asignado bandera verde de las dos etapas anteriores se puede evaluar si éstas se deben rehabilitar en base a consideraciones técnicas, económicas y financieras.

En general, esta etapa es ejecutada por una empresa consultora en ingeniería por lo que la metodología utilizada para este nivel de evaluación es responsabilidad del ingeniero encargado en conjunto con el propietario. Para esta etapa se sugiere seguir los procedimientos establecidos en el ATC 52-4 (ATC, 2015), FEMA 306 (ATC, 1998), FEMA 352 (ATC, 2000), entre otros.

Como ejemplo de este tipo de evaluación estructural se puede usar, para la evaluación de edificios de concreto y paredes de mampostería dañados por terremotos, el FEMA 306 (ATC, 1998).

Para evaluar los efectos del daño causado por un terremoto en el desempeño sísmico a futuro de un edificio se requiere del análisis por desempeño del edificio en su estado dañado y su estado previo al terremoto para uno o más objetivos de desempeño sísmico. Si el desempeño para el edificio dañado es significativamente peor que el anticipado para el edificio en su condición pre-sismo se desarrollan medidas de rehabilitación acorde a su desempeño esperado.

El trabajo se divide en dos fases:

- a) Fase de investigación: cuyo objetivo es recopilar la información básica en un formato que facilite su uso para evaluar los efectos del daño en el desempeño sísmico a futuro. Esto incluye:
- Información de la amenaza sísmica relacionada a los niveles de desempeño
  - Información del edificio como configuración estructural del edificio, planos, estudios de suelos, edad del edificio, uso o cambios de uso.
  - Identificación de los componentes estructurales y no estructurales, así como su comportamiento y como afectan a la resistencia total del edificio.
  - Documentación del daño.
  - Clasificación del daño del componente.

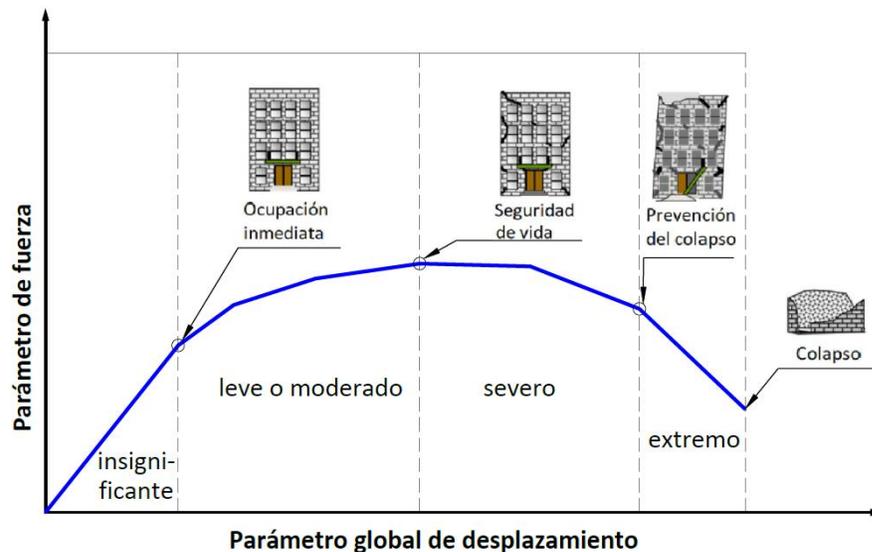
Nótese que mucha de esta información ha ya sido obtenida de la recopilación de datos de las dos Etapas de evaluación previas.

- b) Fase de evaluación:

La evaluación del daño se realiza tomando en cuenta un objetivo de desempeño para cuantificar los efectos del daño. La selección del objetivo de desempeño para un edificio es una decisión de política, que debería corresponderle a las autoridades regulatorias (y que depende de la edad, tamaño, uso, entre otras consideraciones) pero en general queda a criterio del ingeniero y el propietario del edificio. En algunos casos puede requerirse considerar múltiples objetivos de desempeño.

Cuando se han recopilado los efectos del daño causado por un sismo, el ingeniero responsable cuantifica estos efectos para el edificio completo. Para esto, se utiliza el

concepto de la curva de capacidad, que relaciona un parámetro global de desplazamiento con la fuerza lateral impuesta por el sismo a la estructura. La magnitud del desplazamiento global máximo que ocurre durante un terremoto depende de las deformaciones elásticas e inelásticas de cada componente individual de la estructura y su combinación en el sistema de respuesta. El nivel de desempeño estructural es un estado límite de daño estructural. Así, en la Figura 6.1, el nivel de desempeño estructural “Ocupación inmediata” queda definido por un parámetro global de desplazamiento y un parámetro global de fuerza, los cuales al ser superados indican que el edificio tiene daño leve o moderado en los componentes pero que conserva un margen de seguridad contra la aparición de un colapso total o parcial. De manera similar se definen los otros niveles de desempeño estructural.



**Figura 6.1. Adaptada de Heintz, Hamburger, Mahoney. FEMA P-58 Phase 2 - Development of Performance-Based Seismic Design Criteria**

Para evaluar el efecto de los daños en los componentes en la estructura global se lleva a cabo un análisis por desempeño relativo, que compara dos escenarios: el escenario de desempeño del edificio previo al terremoto y posterior al terremoto. Se calcula una relación demanda- capacidad ( $D/C$ ) para el escenario previo al sismo y para el escenario posterior. La reducción de la relación  $D/C$  para un determinado nivel de desempeño se considera la pérdida de capacidad de carga lateral y se expresa como porcentaje.

En resumen, el proceso consiste en lo siguiente

- Se realiza la fase de investigación, en la cual se recopila la información existente previo y posterior a la ocurrencia del terremoto experimentado. En este paso se registra el daño de los componentes del sistema estructural, caracterizándolo de acuerdo con guías de clasificación de daños. Este tipo de guías relaciona el patrón de daños y lo caracteriza por medio de sus parámetros más importantes como por ejemplo forma y tamaño de las grietas y clasifica el daño como insignificante, leve, moderado, severo y extremo, en correspondencia con los estados de daño definidos para el edificio globalmente.
- Se construye la curva de capacidad para el edificio previo a la ocurrencia del terremoto experimentado. Esto se hace a partir de un análisis estático no lineal que toma los componentes estructurales en su condición previa al sismo, es decir como no dañados o considerando el daño que pudieran tener previo al terremoto.
- Se construye la curva de capacidad del edificio posterior a la ocurrencia del terremoto experimentado. Esto se hace a partir de un análisis estático no lineal que toma los componentes estructurales del edificio en la condición posterior a este. Para caracterizar el daño en los componentes, se requiere relacionar el daño de los elementos (dado en las guías de clasificación de daños, FEMA 306) con su pérdida de resistencia y rigidez. Esto se hace modificando estos parámetros mecánicos por medio de factores de reducción.
- Se determina la relación  $D/C$  para el edificio previo al terremoto para un determinado objetivo de desempeño, esto se realiza con la curva de capacidad del edificio previo a la ocurrencia del terremoto. Para esto se determina el desplazamiento global  $d_c$  para el cual la estructura alcanza justo el nivel de desempeño estructural correspondiente al objetivo de desempeño seleccionado. Luego se determina el máximo desplazamiento global del edificio  $d_d$  esperado para el movimiento del terreno correspondiente al objetivo de desempeño. La relación  $D/C$  para el escenario previo al terremoto se calcula como  $d_c/d_d$ . Ver Figura 6.2.
- Se determina la relación  $D/C$  para el edificio posterior al terremoto para un determinado objetivo de desempeño, esto se realiza con la curva de capacidad del edificio posterior a la ocurrencia del terremoto. Para esto se determina el desplazamiento global  $d'_c$  para el cual la estructura alcanza justo el nivel de desempeño estructural correspondiente al objetivo de desempeño seleccionado. Luego se determina el máximo desplazamiento global del edificio  $d'_d$  esperado para el movimiento del terreno correspondiente al

objetivo de desempeño. La relación  $D/C$  para el escenario posterior al terremoto se calcula como  $d'_c/d'_d$ . Ver Figura 6.2.

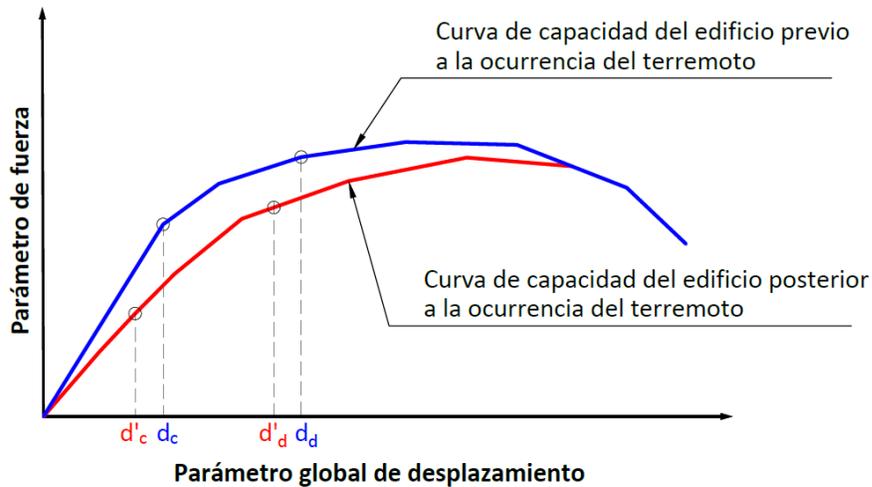


Figura 6.2. Deterioro de la curva de capacidad. Adaptado de FEMA 306

- Si la relación  $d'_c/d'_d < d_c/d_d$ , el edificio ha experimentado una pérdida de capacidad ante carga lateral. Para calcular la pérdida estas relaciones se expresan como un índice de desempeño:

$$P = \frac{d_c}{d_d}$$

$$P' = \frac{d'_c}{d'_d}$$

Donde:

P: es el índice de desempeño previo al terremoto experimentado para el objetivo de desempeño seleccionado.

P': es el índice de desempeño posterior al terremoto experimentado para el objetivo de desempeño seleccionado.

- La pérdida de capacidad ante carga lateral para el edificio para el objetivo de desempeño seleccionado se puede calcular como:

$$\%L = \left(1 - \frac{P'}{P}\right)$$

Donde:

%L: Es la pérdida de capacidad ante carga lateral del edificio expresada en porcentaje.

- Se compara el porcentaje de pérdida con el Desencadenante de Daño seleccionado para el nivel de sismo correspondiente al objetivo de desempeño. Entendiéndose el término “Desencadenante de Daño” como una pérdida de resistencia (o daño) ante fuerza lateral por sobre la cual se necesita algún tipo de rehabilitación y ha sido generalmente tomado como el 20%, o más, de pérdida de resistencia en cualquier dirección horizontal para sismos de gran intensidad. Debe aclararse que dicho nivel de pérdida de resistencia puede variar de acuerdo al estándar de diseño.
- Sobre la base de esa comparación se toman decisiones en cuanto a las acciones a tomar. Por ejemplo, para un sismo severo (se debe definir el nivel de aceleración para considerarlo severo) si el porcentaje de pérdida supera el Desencadenante de Daño se puede requerir rehabilitarlo de tal manera que cumpla con el objetivo de desempeño. Para ese mismo caso, si la pérdida no supera el Desencadenante de Daño se puede requerir únicamente rehabilitarlo para que recupere sus condiciones anteriores al sismo. La decisión de las acciones a tomar deberá ser establecida por las autoridades con jurisdicción en la región donde se aplica esta técnica de evaluación, en un caso ideal; sin embargo, esta decisión queda a discreción del ingeniero y el propietario de la estructura.

## 7. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA READECUACIÓN ESTRUCTURAL

### 7.1. GENERAL

Dentro de este documento se entenderá la readecuación o rehabilitación estructural como el proceso de reparación o modificación de una estructura para que alcance los estados límites de resistencia y servicios establecidos. La rehabilitación se considera constituida por dos actividades reparación y/o reforzamiento; entendiéndose cada una de ellas de la siguiente manera:

- Reparación. Reemplazar o corregir materiales, componentes o elementos de una estructura que se encuentren dañados o deteriorados.
- Reforzamiento. Incremento de la capacidad para resistir cargas de una estructura o de una parte de una estructura.

Debido a que los casos de rehabilitación estructural son tan variados y cada uno de ellos presentan características particulares es imposible dar soluciones completas para cada eventualidad. Por lo anterior, en este apartado únicamente se esbozan líneas generales relativas a esta situación. Existen algunos documentos tales como FEMA 273 (FEMA, 1997), ACI 369R-11 (ACI, 2011), FEMA 547 (FEMA, 2006), NMX-R-079-SCFI-2015 (DGN, 2015), Guía Técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México, (UNAM, 2019) los cuales son valiosas fuentes de información en el proceso de rehabilitación de variados sistemas estructurales.

Para desarrollar un proyecto de rehabilitación eficiente se requiere contar con información de las condiciones del edificio, tales como configuración, características estructurales, y deficiencias sísmicas. Se espera que con los procedimientos presentados en el Capítulo 6 la mayor parte de esta información esté disponible. En caso necesario, se tendrá que ampliar la investigación y la evaluación del edificio para contar con información suficiente para poder analizar, diseñar y construir la rehabilitación.

El proceso de diseño de la rehabilitación de un edificio es un proceso iterativo en el cual se suponen modificaciones a la estructura existente para fines de un diseño preliminar y del análisis estructural.

En el desarrollo de los diseños de la rehabilitación se debe considerar el nivel de redundancia, de modo que una falla localizada en uno o unos elementos no resulten en colapso local, parcial

o en inestabilidad del inmueble. La rehabilitación de un edificio se puede lograr mediante una o varias de las estrategias de rehabilitación tales como:

- a) Modificación de componentes estructurales
- b) Eliminación o mitigación de irregularidades o discontinuidades existentes
- c) Rigidización global de la estructura
- d) Reforzamiento global de la estructura
- e) Eliminación o corrección de problemas causados por la interacción entre edificios
- f) Reducción de la masa efectiva
- g) Adición de elementos de control de la respuesta

Todas ellas requieren la revisión, y la posible rehabilitación de la cimentación.

Una estrategia eficiente de rehabilitación debe:

- a) Corregir las deficiencias conocidas (especialmente ante sismos) de todo el sistema y de los componentes o elementos vulnerables
- b) Ser compatible estructuralmente con el sistema existente
- c) Ser compatible funcionalmente y, si se puede, estéticamente
- d) Lograr los objetivos de la rehabilitación acordados entre el propietario y el proyectista
- e) Minimizar las afectaciones a los ocupantes
- f) Ser costo-efectiva y utilizar materiales y equipos disponibles

Por otra parte, si se detectan daños en la estructura que puedan poner en peligro su estabilidad, deberá controlarse el acceso a la misma y proceder a su apuntalamiento temporal mientras se termina la evaluación. En aquellos casos en que los daños hagan inminente el derrumbe total o parcial, con riesgo para la construcción o vías de comunicación vecinas, será necesario proceder a la demolición urgente de la estructura o de la zona que representa riesgo.

Cuando el nivel de daños observados en una edificación así lo requiera, será necesario apuntalar, de modo que se proporcione la rigidez y resistencia provisionales necesarias para la seguridad de los trabajadores que laboren en el inmueble, así como de los vecinos y peatones en las zonas adyacentes. El apuntalamiento será igualmente necesario cuando se efectúen modificaciones a una estructura que impliquen la disminución transitoria de la rigidez o capacidad resistente de algún elemento estructural. Las obras de apuntalamiento deberán ser suficientes para garantizar la estabilidad de la estructura. En el documento Guía de operaciones de apuntalamiento – GOA (USACOE, 2013) se encontrará información al respecto.

## 7.2. PROCESO DE REHABILITACIÓN

El proceso a seguir para elaborar una técnica de rehabilitación sistemática se encuentra en FEMA 273 (FEMA, 1997) y se presenta en el siguiente flujograma.

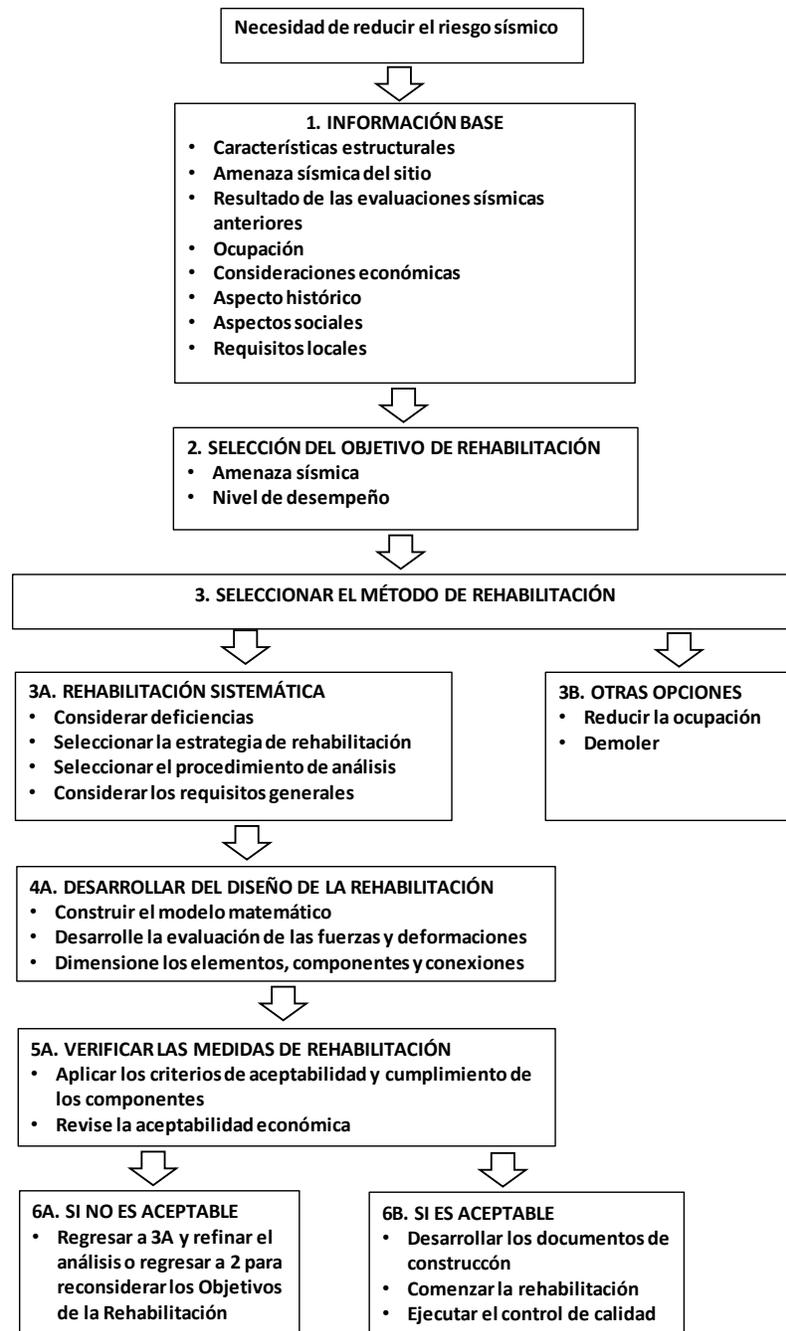


Figura 7.1. Flujograma del proceso de rehabilitación. Modificado de FEMA 273 (1997).

### **7.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE ALGUNAS TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN**

En esta sección se presentan algunas de las técnicas de rehabilitación más comunes para ser aplicadas en edificios; en cada una se indica la deficiencia estructural que se puede corregir con su uso y se describen en qué consiste

#### **7.3.1 Reparación de grietas**

Esta técnica de rehabilitación se emplea reparar elementos estructurales de concreto agrietados debido a las acciones sísmicas. Sólo en algunos casos se pueden usar para reparar muros de mampostería. Con la inyección sólo se puede obtener:

- a) La unión del concreto entre sí, con lo cual le regresa a su estado monolítico
- b) La protección del acero de refuerzo del elemento de concreto.

Esta técnica usualmente se combina con otras necesarias para incrementar la capacidad de la estructura.

Este método de rehabilitación consiste en la utilización de una resina sintética a base de polímeros epoxi (o epoxy) que, con los componentes adecuados, se puede utilizar para la reparación de grietas causadas por sismos. Se aplica cuando el grado de deterioro del elemento es bajo y no se tiene desprendimientos de concreto significativos.

También se pueden reparar las grietas mediante la colocación por gravedad de lechadas a base de cemento con aditivos para acelerar el fraguado, incrementar la resistencia y estabilizar el volumen.

Para decidir el método de reparación de la grieta, se debe identificar su localización, espesor, extensión, orientación y origen.

#### **7.3.2 Conexión entre elementos existentes y materiales o elementos nuevos**

La decisión de colocar anclas (barras corrugadas ahogadas en resina epóxica) o conectores en elementos de concreto o de acero, dependerá del tipo de técnica de rehabilitación. Esta, a su vez, será seleccionada en función del modo de falla de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismos.

Las técnicas de rehabilitación que requieren la colocación de anclas o conectores en estructuras de concreto son:

- a) Encamisados de concreto

- b) Encamisados de acero
- c) Adición de muros de concreto
- d) Adición de arriostramientos metálicos
- e) Sustitución o adición de muros diafragma de mampostería

Mediante el diseño y colocación de las anclas se pretende lograr un comportamiento monolítico, así como establecer un mecanismo de transferencia de fuerzas entre la estructura existente y el nuevo material o elemento.

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica (o capacidad de desplazamiento inelástico) para diseño serán determinadas del análisis de la estructura rehabilitada, suponiendo un comportamiento monolítico de las conexiones.

### **7.3.3 Encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado**

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de falla de los marcos existentes, el cual será identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que pueden ser rehabilitados para mejorar su desempeño sísmico mediante encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado son:

- a) Edificios con columnas cuyo modo de falla está controlado por fuerza cortante o flexión y cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio
- b) Edificios a base de marcos resistentes a momento que posean una resistencia y/o rigidez lateral insuficiente ante las demandas sísmicas de diseño
- c) Edificios con vigas y/o columnas cuyos traslapes del refuerzo existente son escasos
- d) Edificios con pisos suaves/débiles, usualmente en la planta baja

El encamisado de vigas, columnas o nudos se emplea para incrementar la resistencia a flexión, flexocompresión, cortante, y la capacidad de deformación, sin cambiar el sistema estructural global.

Específicamente, con el encamisado de las columnas se puede:

- a) Incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante
- b) Incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica
- c) Aumentar la rigidez de elementos y del sistema estructural

El encamisado de vigas, columnas o nudos consiste en añadir una capa de concreto o mortero alrededor de los elementos existentes. El encamisado puede ser total si rodea al elemento en todas sus caras, o parcial. En el caso de columnas, es preferible que el encamisado sea total. Esta capa de concreto o mortero debe estar reforzada por medio de barras corrugadas longitudinales y transversales, o por malla de alambre soldado. Es menos frecuente el uso de ferrocemento en encamisados.

#### **7.3.4 Encamisados de vigas, columnas o nudos con acero**

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de falla de los marcos existentes que se identifique como resultado de la evaluación estructural ante sismos.

Los edificios que pueden ser rehabilitados para mejorar su desempeño sísmico mediante el encamisado metálico de columnas o vigas son:

- a) Edificios con columnas cuyo modo de falla está controlado por fuerza cortante o flexión
- b) Edificios cuyas columnas tienen escasa capacidad de deformación lateral o requieren incrementar su resistencia a carga axial mediante el confinamiento de las camisas metálicas
- c) Edificios con vigas y/o columnas cuyos traslapes del refuerzo existente son escasos

Los encamisados de vigas, columnas o nudos son de aplicación local, a nivel de elemento estructural.

El encamisado de vigas, columnas o nudos consiste en el recubrimiento del elemento estructural con elementos de acero, los cuales pueden ser placas delgadas o armaduras hechas de soleras y ángulos soldados entre sí. La camisa de acero puede extenderse en toda la altura del elemento (encamisado completo) o sólo en una zona de éste, normalmente donde se esperan deformaciones inelásticas, llamado encamisado local.

Para un correcto funcionamiento, se debe garantizar la sujeción y/o contacto entre los elementos metálicos y el concreto. Esto puede obtenerse a través de morteros entre los dos materiales y/o por medio de conectores.

#### **7.3.5 Encamisados de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras**

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de falla de la estructura que se identifique como resultado de su evaluación ante sismos.

El encamisado de vigas, columnas, nudos y muros con esta técnica se emplea para:

- a) Restaurar la capacidad original de un elemento estructural deteriorado
- b) Incrementar la capacidad de carga de elementos
- c) Incrementar la ductilidad y la capacidad a fuerza cortante o flexión de columnas y muros
- d) Incrementar la ductilidad y la capacidad a flexión y fuerza cortante de vigas

Este tipo de encamisado consiste en el recubrimiento del elemento estructural con capas de fibras que se adhieren por medio de resina epóxica. Dichas fibras trabajan de forma unidireccional, razón por la cual, su orientación depende de la característica estructural (resistencia, confinamiento) que se busca mejorar.

El encamisado del elemento estructural puede ser total o parcial, dependiendo si se cubren todas las caras del elemento estructural. Su alcance depende de la característica estructural que se quiera mejorar y el área en donde lo requiere. Es común encontrar este encamisado cubriendo de forma total a las columnas.

Debido a la ligereza del material y al bajo volumen empleado, los encamisados no cambian significativamente el peso de la estructura ni reducen la superficie útil de la planta.

Esta técnica resulta ser muy efectiva para incrementar la ductilidad (capacidad de deformación inelástica) y la resistencia a fuerza cortante y flexión que se pueden generar durante un sismo. En contraste, con la aplicación de este método no se logra un incremento en la capacidad global a flexión debido a la imposibilidad de dar continuidad al encamisado a través de las losas. Tampoco se incrementa la rigidez de los elementos en los que se aplica en una magnitud significativa.

Dentro del mercado existen distintos materiales que pueden ser usados con el fin de rehabilitar la estructura por medio de esta técnica, las cuales pueden ser fibras de carbono, vidrio o aramida. Las fibras de carbono son las más comunes.

Las fibras pueden ser preimpregnadas o no. Antes de colocar las fibras, es usual que el concreto del sustrato se repare localmente para lograr una superficie tersa y uniforme para promover una adecuada adhesión con la resina empleada para pegar las fibras.

### **7.3.6 Adición de muros de concreto**

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de falla de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que se pueden rehabilitar mediante la adición de muros de concreto son:

- a) Edificios que tengan una insuficiente rigidez y/o resistencia lateral
- b) Los que tienen pisos suaves o flexibles
- c) Edificios con muro de concreto que deben ser reforzados
- d) Edificios con asimetrías en la distribución de elementos resistentes y que pueden exhibir vibraciones de torsión

Con la adición de muros de concreto se puede:

- a) Incrementar la resistencia y la rigidez laterales
- b) Reducir excentricidades, en especial en la planta del edificio
- c) Mitigar cambios bruscos de distribución de rigidez y resistencia en la altura

Es posible que la adición de muros requiera la rehabilitación de otros elementos estructurales, como es el caso de las columnas existentes a las cuales se conectará el nuevo muro, así como elementos de la cimentación. Los muros se deben instalar de modo que no alteren significativamente el funcionamiento del edificio y que no induzcan excentricidades en planta o cambios bruscos de rigidez y resistencia en la altura de la estructura.

#### **7.3.7 Adición de arriostramientos de acero**

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de falla de la estructura existente que se haya identificado durante la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que pueden ser rehabilitados para mejorar su desempeño sísmico mediante la adición de arriostramientos de acero son:

- a) Edificios con columnas cuyo comportamiento está controlado por fuerza cortante y flexión y cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio
- b) Edificios a base de marcos resistentes a momento con insuficiente resistencia y/o rigidez lateral
- c) Edificios con pisos débiles, usualmente en la planta baja

La adición de arriostramientos metálicos permite:

- a) Incrementar la resistencia global de la estructura ante cargas laterales como las inducidas por sismo
- b) Aumentar la rigidez lateral global de la estructura y, consecuentemente, disminuir las demandas de desplazamiento lateral
- c) Colocar dispositivos de protección sísmica (disipadores de energía)

Esta técnica de rehabilitación consiste en la colocación de elementos metálicos laminados en caliente para incrementar la rigidez y la resistencia laterales de la estructura existente. Se pueden adicionar en el plano de acción de la estructura existente o externos a él. Los arriostramientos tienen la ventaja de que no incrementan el peso de la estructura de manera significativa.

No se recomienda combinar esta técnica de rehabilitación con otras que aumenten la rigidez considerablemente, como la adición de muros de concreto o marcos con muros diafragma de mampostería, por ejemplo. Si el marco es de concreto y sus elementos tienen daño severo, se deberá rehabilitarlos previamente a fin de mejorar su capacidad resistente y de deformación.

#### **7.3.8 Separación y recorte de pretilas en marcos de concreto o acero**

La necesidad de separar y/o recortar los pretilas construidos en contacto con o a una baja separación de las columnas de marcos de concreto o acero dependerá del modo de falla de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que se pueden rehabilitar mediante la separación y recorte de pretilas o muros bajo ventana son:

- a) Edificios a base de marcos resistentes a momento de concreto o de acero, con pretilas.

Con el recorte y separación de los pretilas se logra:

- a) Permitir el desplazamiento lateral de las columnas, de concreto o acero, del marco
- b) Evitar el modo de falla como columna corta de columnas de concreto, caracterizado por agrietamiento por cortante, pérdida de la capacidad lateral e, incluso, de la capacidad para resistir cargas verticales
- c) Evitar el modo de falla como columna corta de columnas de acero, caracterizado por pandeo del alma y ruptura de soldaduras que conduce a la pérdida de la capacidad lateral e, incluso, de la capacidad para resistir cargas verticales.

Esta técnica consiste en la separación de muros cortos bajo la ventana (pretilas) que están en contacto con las columnas de un marco, de concreto o de acero, o bien que están separados de ellas menos de la distancia requerida según los requisitos de las especificaciones de diseño o las normas de construcción. Si el muro es de mampostería, éste será recortado vertical y horizontalmente para poder construir nervios y soleras en sus extremos laterales y en la parte superior. Se permite recortar la altura del muro si la construcción de la solera afecta el funcionamiento del edificio, en especial, su iluminación y su ventilación.

Si el muro es de concreto, igualmente se demolerán los extremos para alojar refuerzo vertical y transversal, en forma de un nervio o columna.

El propósito del refuerzo vertical y transversal de los nervios o columnas es dotar al pretil de suficiente resistencia y rigidez fuera de plano y, así, evitar su volcamiento. El refuerzo longitudinal de los nervios o columnas se deberá anclar en la cimentación o losa.

### **7.3.9 Sistema de protección pasiva**

La decisión de colocar disipadores de energía sísmica dependerá del modo de falla de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismos y del objetivo de la rehabilitación.

Los edificios que se pueden rehabilitar mediante la colocación de disipadores de energía sísmica son:

- a) Edificios a base de marcos resistentes a momento, de concreto o acero, con rigidez y/o resistencia lateral insuficientes
- b) Edificios a base de marcos resistentes a momento, de concreto o de acero, cuya falla está controlada por fuerza cortante en las columnas
- c) Edificios a base de marcos resistentes a momento con excentricidades en la distribución de rigideces en planta

Con la adición de disipadores de energía sísmica se logra:

- a) Elevar el amortiguamiento de la estructura, lo que reduce su respuesta sísmica
- b) Dotar a la estructura de suficiente rigidez y resistencia para satisfacer las demandas normativas
- c) Evitar la falla por cortante de columnas existentes con dimensiones y cuantías de refuerzo insuficientes (frecuentemente acompañando al uso de disipadores de energía sísmica se usa el encamisado de las columnas existentes para mejorar su capacidad de desplazamiento lateral y/o su resistencia a fuerza cortante).
- d) Reducir daños estructurales y no estructurales ya que se limitan las distorsiones laterales

Será necesario revisar la capacidad de la cimentación y del suelo, tanto en términos de resistencia como de deformabilidad.

Esta técnica de rehabilitación consiste en la colocación de disipadores de energía sísmica, como sistema secundario, con objeto de reducir la respuesta sísmica del edificio. En la mayoría de los casos, los disipadores de energía sísmica están conectados a contraventeos metálicos. Dichos elementos deben permanecer dentro de su intervalo de comportamiento elástico ante fuerzas asociadas al estado límite de seguridad contra colapso.

## 8. REFERENCIAS

- Alcocer Martínez de Castro, S., Bautista Monroy, R., Valencia Ronquillo, G.A., (2019) Revisión de la literatura y del estado del arte de metodologías de evaluación post-sísmica. Preparado para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).
- Ambraseys, N.N., Bommer, J.J., Buforn, E. Udías, A. (2001). The earthquake sequence of May 1951 at Jucuapa, El Salvador, *Journal of Seismology*, 5: 23-39.
- American Concrete Institute. (2011). ACI 369R-11 Guide for Seismic Rehabilitation of Existing Concrete Frame Buildings and Commentary.
- American Society of Civil Engineers. (2017). ASCE/SEI 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings.
- Applied Technology Council. (1996). ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Volume 1 & 2.
- Applied Technology Council. (1998). FEMA 306 Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings, Basic procedures manual.
- Applied Technology Council. (2000). FEMA 352 Recommended postearthquake evaluation and repair criteria for welded steel moment-frame buildings.
- Applied Technology Council. (2005). ATC-20 Procedures for Post-Earthquake Safety Evaluation of Buildings.
- Applied Technology Council. (2015). ATC-52-4 Here Today—Here Tomorrow: The Road to Earthquake Resilience in San Francisco, Post-Earthquake Repair and Retrofit Requirements.
- Aragón Cárdenas, J. (2013). Evaluación sistematizada multinivel de la seguridad estructural de las edificaciones. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos ASIA (2012). Guía técnica para la inspección de edificaciones después de un sismo, Manual de Instrucción.
- Chicas Medrano, R.J., Díaz Ríos, W.O., Ventura Benítez, E.J. (2015). “Propuesta y aplicación de la metodología de evaluación estructural por desempeño sísmico para edificaciones”, Tesis de grado. Universidad de El Salvador.
- Aragón Cárdenas, J., Flores Corona, L.E., López Bátiz, O.A. (2011) Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural. Red Nacional de Evaluadores. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
- Dirección General de Normas (DGN). (2015). Norma Mexicana NMX-R-0-79-SCFI-2015 Escuelas-Seguridad estructural de la infraestructura física educativa-Requisitos
- Dirección General de Protección Civil, DGPC, Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, VMVDU, Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, OPAMSS, Cámara Salvadoreña de la Industria de la Construcción, CASALCO (2008). Manual de Evaluación Post - Sísmica de Edificaciones de El Salvador. San Salvador.

- Federal Emergency Management Agency (FEMA). 1997, “NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings.” FEMA 273, Washington, DC.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2006). FEMA 547 Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2015). FEMA P-154 Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A Handbook. Federal Emergency Management Agency, 388.
- García, H. J., Bernal, A. G., Contreras, C. G., Gama, A., García, E. P. P., & Islas, J. N. R., (2012). Método de evaluación simplificada de la capacidad sísmica de estructuras típicas de la ciudad de México, (método UAM-A). Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Harlow, D.H., White, R.A., Rymer, M.J., Alvarez G., S., 1993, The San Salvador Earthquake of 10 October 1986 and its historical context, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 83, No.4, pp. 1143-1154.
- Hassan, A. F., y Sozen, M. A. (1997). “Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes”. ACI Structural Journal, 94(1), 31-39.
- Hernández De Paz, J. & Ramírez Morales, C.B. (2016) Evaluación del efecto de sismos sucesivos sobre la respuesta sísmica de edificios de concreto reforzado, Tesis de Maestría. Universidad de El Salvador.
- Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México. (ISC-CDMX), (2019). Formato de Inspección Post-Sísmica – Evaluación Rápida, México, Secretaría de Obras y Servicios Gobierno del Distrito Federal, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.
- Japan Building Disaster Prevention Association. (2005). Standard for seismic evaluation of existing reinforced concrete buildings. Japan Building Disaster Prevention Association, Tokyo, Japan.
- Kattan Jokisch, C.; Menjivar Recinos, L. E.; Castellanos Araujo, R. A.; Ramos Huevo, J. A.; Ayala Leiva, N. E.; Méndez de Hasbun, P. (2012) “Modelación probabilista de escenarios de riesgo sísmico para el área metropolitana de San Salvador, incluye análisis de portafolios de educación, salud y gobierno”, Ministerio de medio ambiente y recursos naturales (MARN), San Salvador, 82 pp.
- Kattan, C., López, M., Menjivar, L. (2017) “Seismic risk scenarios for the city of Santa Tecla, El Salvador”, in Proceedings 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper N°982., 12 pp.
- Lavell, A., 2000, An Approach to Concept and Definition in Risk management Terminology and Practice. (Final Draft). ERD-UNDP, Geneva.

- Los Angeles Department of Building and Safety (LADBS) (2020). Procedures for the applications of ASCE 41-17 to existing buildings. Information bulletin/Public-General information. Document No: P/BC 2020-148.
- MARN, UES, MOPTVDU,
- Ministerio de Obras Públicas. (21 de enero de 1966). Reglamento de diseño sísmico de El Salvador. Diario Oficial No 15, Tomo 210(Decreto No 6).
- Ministerio de Obras Públicas. (14 de septiembre de 1989). Reglamento de emergencia de diseño sísmico de la República de El Salvador. Diario Oficial No 170, Tomo 304 (Decreto No 14).
- Ministerio de Obras Públicas. (30 de octubre de 1996-a). Norma técnica para diseño por sismo de la República de El Salvador. Diario Oficial No 204, Tomo 333(Decreto No 105).
- Ministerio de Obras Públicas. (30 de octubre de 1996-b). Reglamento para la seguridad estructural de las construcciones de la República de El Salvador. Diario Oficial No 204, Tomo 333(Decreto No 105).
- Narváez, L., Lavell, A., Pérez Orega, G., 2009, La gestión del riesgo por desastres: Un enfoque basado en procesos. Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina – PREDECAN, Lima, Perú.
- Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificaciones de Concreto Dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (N-Rehabilitación) (2017), Gobierno de la Ciudad de México, diciembre.
- Sucuoğlu, H., Yakut, A., Özmen, A., y Kubin, J. (2015). Seismic risk prioritization and retrofit cost evaluation of code-deficient RC public buildings in Turkey. *Earthquake Spectra*, 31(1), 601-614.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (2015). Marco de acción de Hyogo para 2005-2015. Conferencia mundial sobre la reducción de los desastres. Kobe. Japón.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2019). Guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACOE). (2013). Guía de operaciones de apuntalamiento – GOA.
- Yakut, A. (2004). A preliminary seismic assessment procedure for reinforced concrete buildings in Turkey. *In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada.
- World Bank (2018). Información técnica para el Plan de mitigación del riesgo sísmico de las edificaciones escolares en El Salvador.



