



GUÍA

DE EVALUACIÓN SÍSMICA Y **DISEÑO DE REFORZAMIENTO SÍSMICO** DE EDIFICIOS EXISTENTES



COAMSS
OPAMSS



CRÉDITOS

Con la cooperación técnica y financiera de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), a través del Proyecto HOKYO, el presente documento, fue elaborado por La Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).

Dirección Ejecutivo de OPAMSS

MSc. Luis Rodríguez – Director Ejecutivo de OPAMSS

Representante y coordinación de JICA

Hiromi Nai – Jefa Representante

Equipo de JICA

Ken Uchimoto – Asesor de Formulación de Proyectos
Ernesto Cruz – Oficial de Programa

Gerente del Proyecto

Alex Chávez

Miembros de los Grupos de Trabajo

Grupo de trabajo 1

Susan Durán – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Eduardo García – Coordinador, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Claudia López – Supervisora, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Douglas Palacios – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS

Grupo de trabajo 2

Edward Quintanilla – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Karla López – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Yanira Muñoz – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS

Grupo de trabajo 3

Juan Carlos Henríquez – Supervisor, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Daniel Rosales Henríquez – Técnico, Subdirección de Control

Grupo de trabajo 4

Claudia Avelar – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Laura Quintanilla – Supervisora, Unidad de Simplificación de Procedimientos, Acreditaciones y Mejora de la Reglamentación, OPAMSS
Kathya Cruz – Subdirectora de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Karla Solano – Técnico, Subdirección de Control y Desarrollo Urbano, OPAMSS
Armando Barrios – Técnico, Unidad de Comunicaciones y Relaciones Públicas, OPAMSS

Expertos japoneses del Proyecto HOKYO

Jun Matsuo – Líder del Equipo de Expertos
Koichi Shiwaku – Sublíder del Equipo de Expertos
Akira Inoue – Experto en evaluación sísmica y diseño del reforzamiento sísmico
Matsutaro Seki – Experto en evaluación sísmica
Noboru Nara – Experto en diseño del reforzamiento sísmico
Seiichi Horikoshi – Experto en supervisión de la calidad de la construcción
Yoko Shiraishi – Experta para la revisión e inspección de edificios
Masanori Kobayashi – Experto para el desarrollo del plan de promoción del reforzamiento sísmico

ÍNDICE

1

Introducción

1.1	Antecedentes	09
1.2	Prefacio	10
1.3	Proposito	10

2

Generalidades

2	Generalidades	11
2.1	Comentarios generales sobre la evaluación sísmica	11
2.1.1	Edificios objetivos para la evaluación sísmica	11
2.1.2	Diferencia con edificios construidos recientemente	11
2.1.3	Evaluación cuantitativa de la resistencia y ductilidad – Edificios existentes	12
2.2	Flujograma general para la selección de edificios para proyectos de reforzamiento	12

3

Proceso de planificación del reforzamiento sísmico

3	Proceso de evaluación sísmica	16
3.1	Alcance de aplicación	16
3.2	Demanda sísmica	18
3.3	Selección del edificio objetivo	18
3.4	Recolección de información del edificio	18
3.5	Información necesaria para la evaluación sísmica	20
3.6	Levantamiento para evaluación inicial	21
3.7	Evaluación Simplificada	22
3.8	Evaluación Simplificada Avanzada	23
3.9	Metodología: Evaluación Simplificada y Evaluación Simplificada Avanzada	23

4

Implementación del plan y seguimiento

4	Esquema general – Evaluación sísmica	25
4.1	Métodos de evaluación sísmica	25
4.2	Concepto básico de desempeño sísmico	28
4.3	Análisis estático y dinámico	29
4.4	Evaluación sísmica para el diseño de reforzamiento	30
4.4.1	Método basado en el índice sísmico: Segundo nivel de evaluación	30
4.4.2	Método basado en el índice sísmico: Evaluación sísmica detallada	33
4.4.3	Categoría 3 – Método de espectro de capacidad y Método de los coeficientes de desplazamiento.	34

5

Proceso de evaluación sísmica desplazamiento

5	Proceso de evaluación sísmica desplazamiento	37
5.1	Generalidades	37
5.2	Esquema general de diseño de reforzamiento sísmico	40
5.2.1	Proceso de diseño de reforzamiento sísmico	40
5.2.2	Resistencia requerida para reforzamiento sísmico mediante cálculo del índice sísmico	41
5.2.3	Aplicando el índice sísmico I_s	42
5.3	Modificaciones de diseño	49

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Para la definición detallada de términos, símbolos y abreviaturas utilizadas en esta Guía, refiérase a los Manuales complementarios:

- **MSE:** Manual para la Evaluación Sísmica de Edificios Existentes de Concreto Reforzado.
- **MRD:** Manual para el Diseño de Reforzamiento Sísmico de Edificios Existentes de Concreto Reforzado.

En la presente Guía únicamente se emplean estas abreviaturas (**MSE y MRD**) para simplificar la referencia a los manuales.



Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

“Fortalecimiento de Capacidades para la Evaluación y Reforzamiento Sísmico de Edificaciones en el Área Metropolitana de San Salvador”, denominado como Proyecto HOKYO.

El Proyecto HOKYO comenzó en febrero de 2022. Durante su ejecución, se identificó la necesidad de una estrategia para promover el reforzamiento sísmico de edificios públicos. Como parte de esta estrategia, se desarrollaron Manuales y Guías para la implementación.

La metodología para la evaluación sísmica y diseño de reforzamiento sísmico se desarrolla en los respectivos manuales; mientras que en esta Guía para la Evaluación Sísmica y Diseño de Reforzamiento Sísmico para Edificios Existentes de Concreto Reforzado se especifican los elementos clave para desarrollar los proyectos de reforzamiento sísmico. La Guía puede servir como herramienta principal para las instituciones responsables de la evaluación y el diseño, facilitando el acceso a la información esencial contenida en los Manuales.

Las referencias de esta Guía apuntan a los manuales técnicos correspondientes para más detalles específicos, destinados a profesionales que lleven a cabo el proceso de evaluación sísmica y diseño de reforzamiento sísmico de edificios existentes.

Tal y como se describió previamente, la metodología se encuentra contenido en sus respectivos Manuales, los cuales, para mayor facilidad de lectura, se referirán bajo la siguiente nomenclatura:

- **MSE:** Manual para la Evaluación Sísmica de Edificios Existentes de Concreto Reforzado.
- **MRD:** Manual para el Diseño de Reforzamiento Sísmico de Edificios Existentes de Concreto Reforzado

1.2

PREFACIO

Esta Guía será utilizada por la OPAMSS y podrá ser aplicada también por otras instituciones públicas y diseñadores estructurales. No obstante, los documentos específicos que se deben presentar en cada institución dependen del marco legal de la entidad que gestiona los proyectos.

En materia de costos, al tratarse de información sensible y considerablemente variable que depende de las condiciones particulares de cada proyecto, para obtener una estimación precisa y confiable, se requiere un estudio de costos, lo cual esta fuera del alcance del Proyecto HOKYO.

La elaboración de esta Guía se realizó en el marco del Proyecto HOKYO, con fondo otorgados por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). En su desarrollo participaron también miembros de instituciones nacionales como CASALCO, Universidad de El Salvador (UES), Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA), y otras entidades relacionadas. Se expresa un agradecimiento especial a JICA, al Ministerio de Obras Públicas y de Transporte (MOPT), al Ministerio de Educación y Tecnología (MINEDUCYT), Ministerio de Salud (MINSAL), y a todas las instituciones involucradas por su valioso apoyo y contribución a este esfuerzo conjunto.

1.3

PROPÓSITO

El propósito de esta guía es establecer un marco metodológico que permita evaluar de manera sistemática el desempeño sísmico de edificaciones existentes de concreto reforzado y diseñar soluciones de reforzamiento adecuadas. Busca ofrecer a profesionales, tanto del sector público como privado, una herramienta práctica que facilite la toma de decisiones técnicas y la implementación de medidas de reducción de riesgo sísmico, contribuyendo a la seguridad de los ocupantes, a la sostenibilidad de la infraestructura y a la construcción de ciudades más resilientes frente a los riesgos sísmicos.

2. GENERALIDADES

El capítulo expone los fundamentos, alcances y criterios generales para la evaluación y el reforzamiento sísmico de edificaciones.

2.1

COMENTARIOS GENERALES SOBRE LA EVALUACIÓN SÍSMICA

La evaluación sísmica es el punto de partida para valorar la seguridad de edificios existentes. Permite relacionar la demanda sísmica con la capacidad estructural de cada edificación, ofreciendo un panorama inicial de su nivel de desempeño y valorar si este edificio requiere o no un reforzamiento sísmico acorde a su necesidad específica.

2.1.1

EDIFICIOS OBJETIVOS PARA LA EVALUACIÓN SÍSMICA

- a) Muchos edificios construidos antes del actual código de diseño resistente a sismos NTDS 94 (promulgado en 1996) no fueron diseñados para ser muy resistentes y se consideran generalmente carentes de resistencia sísmica.
- b) Incluso los edificios diseñados utilizando el actual código de diseño resistente a sismos NTDS 94 (promulgado en 1996) pueden carecer de resistencia sísmica si se considera que la calidad de construcción es insuficiente debido a la baja resistencia del concreto o al uso inadecuado de varillas de refuerzo.
- c) Incluso los edificios diseñados utilizando el actual código de diseño resistente a sismos NTDS 94 (promulgado en 1996) pueden no tener la resistencia sísmica esperada si presentan columnas cortas o pisos débiles (y pisos de pilares sin paredes) debido a paredes no estructurales como paredes de ladrillo y paredes de bloque de concreto.

2.1.2

DIFERENCIA CON EDIFICIOS CONSTRUIDOS RECIENTEMENTE

En el caso del diseño de nuevos edificios, se utilizan fuerzas sísmicas de diseño basadas en el movimiento sísmico, la ductilidad del marco, el factor de importancia, etc. Se emplea un análisis lineal del marco para obtener tensiones de diseño para columnas, vigas, etc. La cantidad o el refuerzo principal y el refuerzo a corte se calcula en función de esta tensión. Además, se aplican los detalles de refuerzo estipulados en las especificaciones. De esta manera, se aplica un método relativamente simplificado al diseño sísmico de edificios recién construidos, y no se realiza una evaluación cuantitativa de la resistencia y la ductilidad. Aunque estos valores no se muestran explícitamente, parece asegurarse el rendimiento sísmico necesario.

2.1.3

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA RESISTENCIA Y DUCTILIDAD – EDIFICIOS EXISTENTES

A menudo no se dispone de memoria de cálculos estructurales para edificios existentes. Además, si no hay planos de diseño estructural disponibles (no almacenados) es necesario restaurar los planos estructurales mediante levantamientos. También son necesarias investigaciones de materiales de concreto y varillas de refuerzo. Comprender el desempeño sísmico requiere la evaluación de la resistencia y la ductilidad (capacidad de deformación) de los marcos del edificio existente, que exhibe un comportamiento no lineal. Estos se evalúan mediante métodos que apliquen el análisis “Pushover” (Método de Espectro de Capacidad o Método de los Coeficientes de Desplazamiento de la Evaluación de Categoría 3 o Análisis de Ingeniería Detallada) o bien mediante la utilización de métodos simplificados (Procedimientos Basados en el Índice Sísmico) después de confirmar que se cumplan con las condiciones aplicables.

2.2

FLUJOGRAMA GENERAL PARA LA SELECCIÓN DE EDIFICIOS PARA PROYECTOS DE REFORZAMIENTO

La Figura 1 muestra el flujograma general para la selección de edificios existentes para ser sometidos a evaluaciones iniciales.

Tras el inventario de edificios existentes, basado en la Guía para la Planificación de Reforzamiento Sísmico, se seleccionan edificaciones que cumplan determinadas características. Finalizada esta tarea, los edificios se puntúan mediante procedimientos establecidos en las siguientes metodologías.

- Primer nivel de evaluación – Sección 3.2 del MSE.
- Evaluación Simplificada (SE) – Sección 4.1 del MSE.
- Evaluación Avanzada Simplificada (ASE) – Sección 4.2 del MSE.

Los métodos previamente descritos permiten puntuar múltiples edificios para clasificarlos acorde a su desempeño sísmico obtenido. Sin embargo, para llevar a cabo este tipo de evaluación, se debe considerar:

- 1) Contar con planos arquitectónicos.
- 2) En caso de no contar con planos arquitectónicos, se deben generar mediante un levantamiento, donde se sugiere realizar exploraciones para determinar en el sitio la distribución del acero de refuerzo y la resistencia a la compresión del concreto mediante pruebas no destructivas, es decir, mediante pruebas con detector de acero de refuerzo, martillo Schmidt, etc.

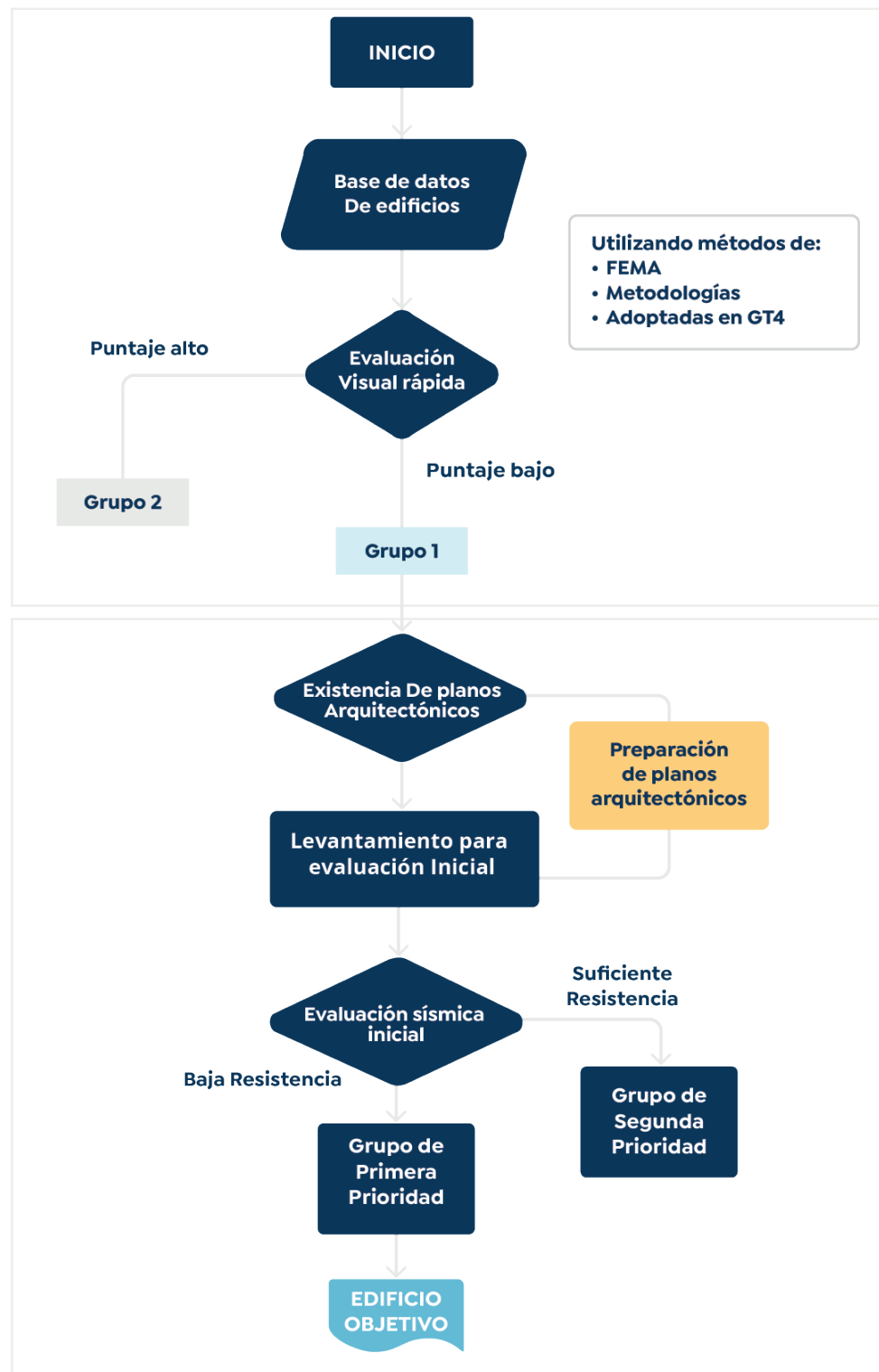
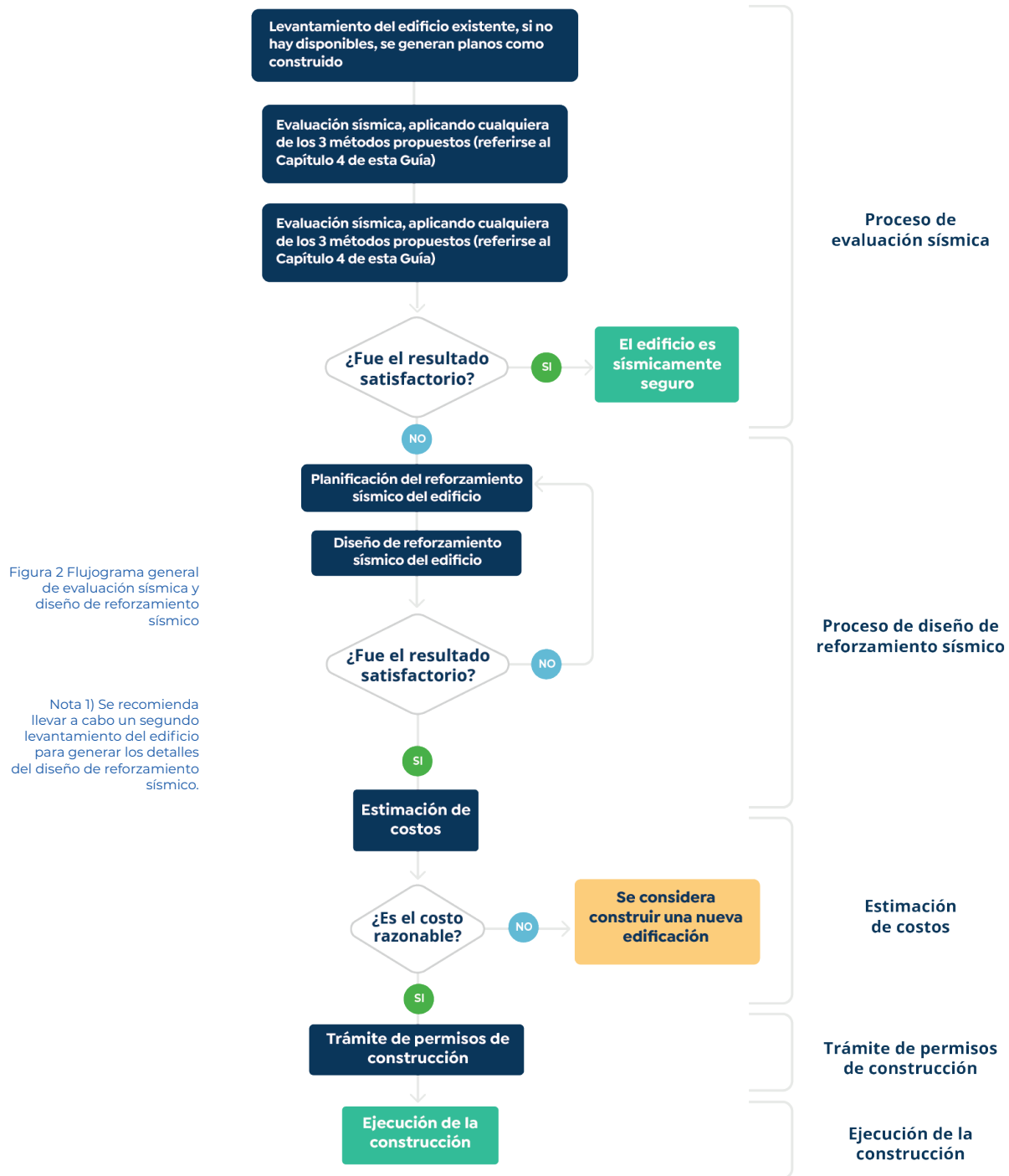


Figura 1 Flujograma para la selección de edificios

El flujograma general de evaluación sísmica y diseño de reforzamiento sísmico de un edificio determinado se muestra en la siguiente Figura 2.





Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

3. PROCESO DE EVALUACIÓN SÍSMICA

El proceso de evaluación sísmica comprende una serie de etapas destinadas a determinar la vulnerabilidad y el nivel de desempeño de edificios existentes. Incluye la definición de la demanda sísmica, la recopilación de información mediante levantamientos de la condición existente de la edificación y la aplicación de métodos de análisis que permitan valorar la seguridad estructural.

3.1 ALCANCE DE APLICACIÓN

1) Tipo de estructura

Esta guía es aplicable para edificios existentes de concreto reforzado con o sin paredes de relleno de mampostería, ya sean paredes de ladrillo de obra o paredes de bloque de concreto.

2) Método aplicable

Los métodos de evaluación sísmica se introducen en la Tabla 1. En general, el primer nivel de evaluación, la Evaluación Simplificada y la Categoría 1 son métodos que se utilizan para la selección de edificios objetivo. Luego de la selección de los edificios objetivo, se consideran para evaluación sísmica. Los métodos propuestos para conducir la evaluación sísmica y el diseño de reforzamiento sísmico son los siguientes:

1. Método basado en el índice sísmico: segundo nivel de evaluación.
2. Método basado en el índice sísmico: evaluación detallada.
3. Método basado en el desempeño sísmico, categoría 3: método de espectro de capacidad y método de los coeficientes de desplazamiento.

Para la descripción en detalle de cada método de evaluación, referirse al Manual de Evaluación Sísmica de Edificios Existentes de Concreto Reforzado.

Nota. Fuente Tabla 2 Contenidos – Manual de Evaluación Sísmica de Edificios Existentes de Concreto Reforzado

Tabla 1 Esquema general de evaluación sísmica en código y manual

Tipo	Evaluación Simplificada		Evaluación Detallada		Estándares de Referencia	Características
Procedimientos Basados en el Índice Sísmico	I	1º nivel	2º nivel	3º nivel	JBDPA (Japan Building Disaster Prevention Association)	Índice Is (para todos los niveles)
		Vigas rígidas (columnas y paredes)	Vigas rígidas (columnas y paredes)	Todos los elementos		
	II	Evaluación Sísmica Simplificada (SE por sus siglas en	Evaluación Sísmica Avanzada Simplificada (ASE por sus siglas en inglés)	Evaluación Sísmica Detallada (DSE por sus siglas en inglés)	JBDPA & ASCE 41	✓ Índice Is (para todos los niveles)
		Vigas rígidas (columnas y paredes)	Vigas rígidas (columnas y paredes)	Todos los elementos		✓ Las paredes de relleno pueden ser consideradas dentro del análisis (para todos los niveles).
						✓ Criterio de desempeño de los elementos (DSE)
						✓ Análisis Pushover (DSE)
		Grado 1	Grado 2	Grado 3		
		Checklist para evaluar de manera general el desempeño estructural	Revisión de la capacidad y la deficiencia de cada elemento Acciones controladas por fuerzas Acciones controladas por deformaciones	1. Estático lineal 2. Dinámico lineal 3. Estático no lineal 4. Dinámico no lineal Para todos los elementos (Nota 1)	ASCE41 (American Society of Civil Engineers), FEMA 440	✓ Máximo desplazamiento relativo Grado 3, No. 3, No. 4 ✓ Criterio de desempeño de los elementos (Grado 3, No. 3) ✓ Análisis Pushover (Grado 3, No. 3) ✓ Método de Espectro de Capacidad (Grado 3, No. 3) ✓ Método de los Coeficientes (Grado 3, No. 3)

3.2 DEMANDA SÍSMICA

La demanda sísmica, definida como el desempeño sísmico requerido para la evaluación sísmica, así como para el reforzamiento sísmico, se muestran en la Sección 1.2 del MSE. Esta se basa en el espectro de aceleración de la NTDS 94. En este contexto, la política básica de esta Guía y Manuales es que los profesionales encargados puedan elegir uno de los tres métodos previamente planteados utilizando la misma demanda sísmica.

3.3 SELECCIÓN DEL EDIFICIO OBJETIVO

Dado el caso que haya un cantidad considerable de edificios objetivo, es necesario establecer una prioridad para su evaluación. Para ello, se recomienda aplicar:

- Procedimiento Basado en el Índice Sísmico: Primer Nivel de Evaluación – Sección 3.2 del MSE.
- Procedimiento Basado en el Índice Sísmico: Evaluación Simplificada – Sección 4.2 del MSE.
- Procedimiento Basado en el Índice Sísmico: Evaluación Avanzada Simplificada – Sección 4.2 del MSE.
- Procedimiento Basado en el Desempeño Sísmico: Evaluación de Categoría 1 – Sección 5.2 del MSE.
- Procedimiento Basado en el Desempeño Sísmico: Evaluación de Categoría 2 – Sección 5.3 del MSE.

3.4 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL EDIFICIO

La información básica por recolectar del edificio se deberá compilar basada en la hoja formato del Apéndice 1.



Fotografía:
Fuente Agencia
de Cooperación
Internacional del Japón
(JICA)

3.5 INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EVALUACIÓN SÍSMICA

En El Salvador, los edificios antiguos existentes no suelen contar con planos de diseño disponibles, como planos arquitectónicos o estructurales. Además, varios edificios han sufrido modificaciones respecto a su diseño original. Por lo tanto, si la información necesaria para la evaluación sísmica es insuficiente, es necesario generar la información requerida para la evaluación inicial.

Existen varios métodos de evaluación inicial, pero el Proyecto HOKYO recomienda utilizar la Evaluación Simplificada y la Evaluación Simplificada Avanzada, ya que son adecuadas para el método de diseño en El Salvador. Estas evaluaciones pueden calcularse mediante hojas de EXCEL para estimar el Índice Sísmico, I_s , definido en el MSE.

Este I_s se compara con el Índice de Demanda Sísmica de la Estructura, I_{so} . Si $I_s \geq I_{so}$, el desempeño sísmico del edificio es satisfactorio (referirse a Capítulo 3 y 4 del MSE). El edificio tendrá un I_s único, lo que permite comparar la vulnerabilidad del edificio y usando la fórmula correspondiente, se puede estimar la cantidad de reforzamiento necesario (referirse a MRDS, Sección 2.2.1).

Cuando se llevan a cabo la Evaluación Simplificada y la Evaluación Simplificada Avanzada, la información necesaria se presenta en la siguiente Tabla 3

Tabla 3 Información necesaria para desarrollar SE y ASE.

Metodología	Información necesaria	Comentarios
Evaluación Simplificada (SE)	- Resistencia del concreto - Dimensión de columnas - Claro entre columnas - Altura del edificio - Dimensión de vigas - Peso sísmico del edificio - Resistencia de paredes (en caso de considerarla, la ductilidad será baja)	Los siguientes parámetros pueden ser asumidos en base a la experiencia del profesional encargado del levantamiento: - Peso sísmico del edificio, por nivel. - Resistencia a la compresión del concreto. - Resistencia de fluencia del acero de refuerzo. - Resistencia de las paredes.
Evaluación Simplificada Avanzada (ASE)	- Resistencia del concreto - Dimensión de columnas - Claro entre columnas - Altura del edificio - Dimensión de vigas - Peso sísmico del edificio - Resistencia de acero de refuerzo - Distribución de acero de refuerzo en columnas (acero principal, estribos, ángulo de gancho, diámetro de varillas). - Resistencia de paredes (en caso de considerarla, la ductilidad será baja)	

3.6 LEVANTAMIENTO PARA EVALUACIÓN INICIAL

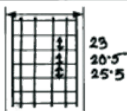
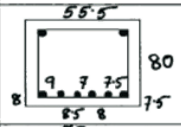
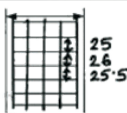
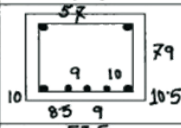
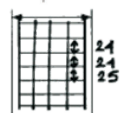
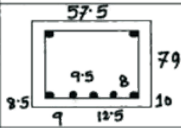
Los detalles del levantamiento para la evaluación sísmica inicial o levantamiento preliminar se muestran en el Apéndice 2. La Figura 3 que se muestra a continuación es un ejemplo de información recabada en este tipo de levantamiento.

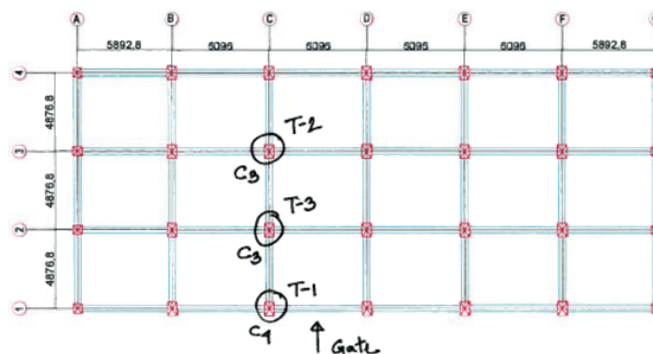
Prueba de materiales de la hoja de encuesta

Equipo A

Nombre del edificio: 48 Sala de registro de resistencia de Tejgaon

Nombre de la prueba: Ubicación de las barras de refuerzo para la columna Fecha: 13/03/18

Column ID	Rebar details	Cross-section
1 C-1, T-1		
2 C3, T-2		
3 C3, T-3		



Plan view (Ground Floor) showing the location of test

Name of investigator:	S.M. Ahsanul Amin
Name of Technician:	H.R. Forhad Hossain

Figura 3 Información de levantamiento preliminar

Prueba de materiales de la hoja de encuesta

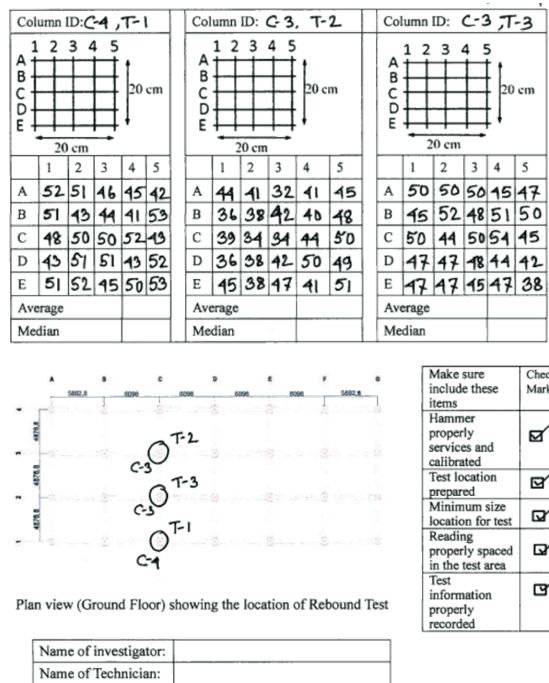
Equipo A

Nombre del edificio

Fecha: 13/03/18

Nombre de la prueba: Prueba de rebote Hammer tipo: NR En el plotter se eliminó la superficie

Figura 4 Información de levantamiento preliminar



3.7 EVALUACIÓN SIMPLIFICADA (ES)

La Evaluación Simplificada (ES) permite estimar la capacidad del edificio existente en función de su diseño. La NTDS 94 se aplicó oficialmente en 1996 y actualmente se prevé una actualización. Por ello, es probable que aumente la cantidad de edificios que requieran de reforzamiento sísmico. Bajo este contexto, la Evaluación Simplificada permite una primera selección para clasificar el nivel de necesidad de reforzamiento de los edificios. Este método, desarrollado por el Dr. Matsutaro Seki, se presenta en el Capítulo 4 del MSE.

El resultado obtenido mediante la Evaluación Simplificada puede clasificarse en las siguientes tres categorías, según la Tabla 4.

Tabla 4 Clasificación - Evaluación Simplificada

Ranking	Recomendación
I	Puede ser seguro.
II	Se recomienda evaluación sísmica.
III	Evaluación sísmica inmediata.

3.8

EVALUACIÓN SIMPLIFICADA AVANZADA

La Evaluación Simplificada (ES) evalúa la capacidad de los edificios sin considerar deficiencias por vicios constructivos, como la aplicación de concretos de baja calidad. Para considerar estos parámetros, se deberá llevar a cabo la Evaluación Simplificada Avanzada (ESA), basándose en los resultados del levantamiento del edificio.

Si la resistencia real del concreto resultara ser menor que la indicada en los planos de diseño, existe la posibilidad de que la ES evalúe positivamente el desempeño actual del edificio, ya que no considera la resistencia real del concreto. Sin embargo, si la ESA incluye la resistencia real del concreto, es posible que el resultado de la evaluación sea más bajo. Es decir, la ESA puede reflejar el comportamiento del edificio de manera más precisa que el SE. Al igual que el SE, este método ESA fue desarrollado por el Dr. Matsutaro Seki, y puede desarrollarse mediante una hoja de cálculo desarrollada también por el Dr. Yosuke Nakajima (Seki – Nakajima).

Así como en el SE, los resultados del ESA se pueden clasificar en tres categorías, como se muestra en la Tabla 5

Tabla 5 Clasificación -
Evaluación Simplificada
Avanzada

Ranking	Recomendación
I	Puede ser seguro.
II	Se recomienda evaluación sísmica.
III	Evaluación sísmica inmediata.

3.9

METODOLOGÍA: EVALUACIÓN SIMPLIFICADA (ES) Y EVALUACIÓN SIMPLIFICADA AVANZADA (ESA)

Para más información, referirse a la Sección 4.2 y 4.3 del MSE, respectivamente.



Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

4. ESQUEMA GENERAL – EVALUACIÓN SÍSMICA

Se describen los métodos y procedimientos para analizar el desempeño sísmico de edificios existentes, según el Manual de Evaluación de Edificios de Concreto Reforzado, y la relación entre los enfoques de evaluación, la demanda y el desempeño sísmico requerido.

4.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN SÍSMICA

Se proponen tres métodos para evaluar y diseñar el reforzamiento sísmico de edificios existentes de concreto reforzado.

1. Procedimiento basado en el índice sísmico: Segundo Nivel de Evaluación **(2NE)**.
2. Procedimiento basado en el índice sísmico; Evaluación Sísmica Detallada **(ESD)**.
3. Procedimiento basado en el desempeño sísmico: categoría 3 – método de espectro de capacidad y método de los coeficientes de desplazamiento.

La Tabla 6 muestra las características técnicas de los tres métodos y la comparación de los procedimientos de cada uno de los métodos. En términos sencillos, la diferencia de cada método es:

- El análisis llevado a cabo mediante el 2NE se realiza con el uso de hojas de cálculo de Excel.
- El análisis llevado a cabo mediante el procedimiento basado en el índice sísmico DSE y el procedimiento basado en el desempeño sísmico categoría 3 se basan en el acercamiento analítico utilizando el análisis Pushover, el cuál es un análisis estático no lineal que se conduce con el uso de softwares computacionales.
- El análisis mediante el 2NE y el ESD permite analizar cada nivel y cada dirección del edificio; mientras que el procedimiento basado en el desempeño sísmico lleva a cabo el análisis de toda la estructura como un sistema de un solo grado de libertad (SDOF por sus siglas en inglés) en cada dirección de análisis.

Tabla 6 - Características técnicas y comparación procedimientos de cada método.

Ítem	Procedimiento Basado en el Índice Sísmico (Tipo 1 – Segundo Nivel de Evaluación) Sísmico	Procedimiento Basado en el Índice Sísmico (Tipo 2 – DSE)	Procedimiento Basado en el Desempeño Sísmico (Categoría 3 – CSM ² ; CM ³)
1. Concepto básico de desempeño sísmico.	Resistencia×Ductilidad (Principio de energía constante modificado).	Resistencia×Ductilidad (Principio de desplazamiento constante).	Punto de desempeño en la curva $S_a - S_d$.
2. Desempeño sísmico objetivo y evaluación de período de la edificación.	Espectro de aceleración de diseño según NTDS 94. Donde el período se calcula en función de la altura del edificio como un método empírico.	Al igual que en el recuadro señalado.	Espectro de aceleración de diseño según NTDS 94. El período se analiza en función de la rigidez efectiva y el peso sísmico del edificio.

Ítem	Procedimiento Basado en el Índice Sísmico (Tipo 1 – Segundo Nivel de Evaluación). Sísmico	Procedimiento Basado en el Índice Sísmico (Tipo 2 – DSE)	Procedimiento Basado en el Desempeño Sísmico (Categoría 3 – CSM ² ; CM ³)
3. Absorción de energía por el comportamiento plástico de los marcos y reducción del valor objetivo.	No se muestra de manera explícita. La absorción de energía se ha considerado al introducir el concepto de índice de ductilidad.	← Al igual que en el recuadro señalado.	La absorción de energía depende de la relación plástica de las características de la fuerza restauradora, se evalúa como una relación de amortiguamiento viscoso equivalente (linerización), y el objetivo inicial S_s (espectro de aceleración) se reduce de forma acorde. No se muestra de manera explícita en el CM.
4. Rango de evaluación.	En cada nivel y en cada dirección principal (X-Y).	← Al igual que en el recuadro señalado.	Sistema SDOF ⁴ equivalente para cada dirección principal.
5. Evaluación de desempeño sísmico básico.	Se evalúan el índice de resistencia y el índice de ductilidad de cada columna.	El análisis Pushover (análisis estático no lineal) se lleva a cabo para obtener la curva de capacidad y así determinar el índice de resistencia y el índice de ductilidad.	Se conduce el análisis Pushover (análisis estático no lineal) para obtener la curva de capacidad como parte del CSM.
6. Criterios de aceptación.	$I_s \geq I_{so}$ I_s : índice sísmico de la estructura. I_{so} : índice de demanda sísmica.	$I_s \geq I_{so}$ Aquí también se comprueban aspectos como: • Ángulos de rotación plástica (propiedades de rótulas) de los elementos. • Relación de momento – curvatura en elementos viga y columna. • Relación de fuerza y deformación axial, para elementos de arrostramiento. • Relación de fuerza cortante y deformación, para paredes de cortante de concreto reforzado.	El punto de desempeño (intersección de la curva de capacidad y la demanda sísmica reducida) se obtiene y se chequean aspectos como: • Ángulos de rotación plástica (propiedades de rótulas) de los elementos. • Relación de momento – curvatura en elementos viga y columna. • Relación de fuerza y deformación axial, para elementos de arrostramiento. • Relación de fuerza cortante y deformación para paredes de cortante de concreto reforzado.

Sistema de un Solo Grado de Libertad (SDOF por sus siglas en inglés)

Ítem	Procedimiento Basado en el Índice Sísmico (Tipo 1 – Segundo Nivel de Evaluación), Sísmico	Procedimiento Basado en el Índice Sísmico (Tipo 2 – DSE)	Procedimiento Basado en el Desempeño Sísmico (Categoría 3 – CSM ² ; CM ³)
7. Límites de aplicación.	- 6 niveles como máximo - Marcos de concreto reforzado con modo de colapso de las columnas,	En principio, marcos con modo de colapso de vigas y columnas	En principio, no hay limitaciones. Se requiere comprobar las propiedades de las rótulas de vigas y columnas en el punto de desempeño.
8. Irregularidad de los marcos.	Se introduce el concepto del índice de irregularidad (S_D)	Al igual que en el recuadro señalado →	Se evalúa en el análisis tridimensional
9. Deterioro de los marcos por el transcurso del tiempo.	Se introduce el concepto del índice de tiempo (T).	← Al igual que en el recuadro señalado.	Valoración por parte del ingeniero responsable del diseño.
10. Cálculo operacional.	Es posible realizar el cálculo de manera manual.	Se aplica un software informático para el análisis estático no lineal (Pushover).	Se aplica un software informático de análisis estático no lineal (pushover) y el CSM.
11. Modelo de marcos de arrostramiento de acero.	Se evalúan la resistencia y la ductilidad mediante cálculo manual.	Al igual que en el recuadro señalado →	Evaluable como elemento de acero directamente (tensión y compresión) o pared equivalente de concreto reforzado.
12. Modelo de paredes de cortante de concreto reforzado.	Se evalúan la resistencia y la ductilidad mediante cálculo manual.	Al igual que en el recuadro señalado →	La pared de cortante de concreto reforzado se imputa como una línea hasta el límite de fluencia y sin absorción de energía hasta el límite de fluencia.
13. Otros	En principio, se valora el modo de colapso de las columnas mediante la aplicación de la siguiente fórmula en la conexión viga-columna (nodo) típica: $\Sigma M_c < 1.2 \Sigma M_b$ Donde: M_c: momento flector de la columna. M_b: momento flector de las vigas	Al igual que en el recuadro señalado →	Se suele utilizar $1,1 \times \sigma_y$ como valor por defecto. El acero de refuerzo de las losas no se evalúa directamente para la resistencia de las vigas. Nota: σ_y: límite de fluencia del acero de refuerzo.

Nota. Fuente Tabla 1.2-1
Comparación de métodos
de diseño de reforzamiento
sísmico de Manual de
Diseño de Reforzamiento
Sísmico, JICA, Proyecto
HOKYO.

En cuanto al ítem 1 de Tabla 6, se presenta la Figura 5 para la explicación de dos conceptos; el principio de energía constante y el principio de desplazamiento constante. El principio de energía constante es aplicado para edificios con rangos cortos de períodos de vibración, mientras que el principio de desplazamiento constante se utiliza para edificios con rangos largos de períodos de vibración.

4.2 CONCEPTO BÁSICO DE DESEMPEÑO SÍSMICO.

El concepto básico de desempeño sísmico de la Tabla 6 se muestra en la Figura 5. La curva que muestra la relación entre la fuerza cortante de entrepiso - deflexión de entrepiso (deriva) se expresa mediante una curva bilineal, cuyo recta formada por el Origen B y B - C muestra el mismo comportamiento sísmico. El punto D muestra la fuerza cortante de diseño, mientras que el punto A muestra la aceleración espectral de diseño de la NTDS 94, denotando una respuesta elástica.

Donde:

V. Fuerza cortante de entrepiso

$$C=V/W$$

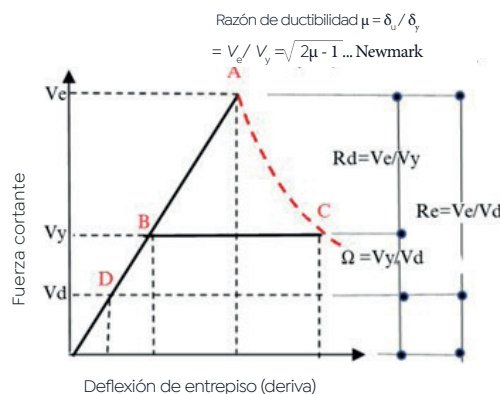
W. Peso sísmico

Donde:

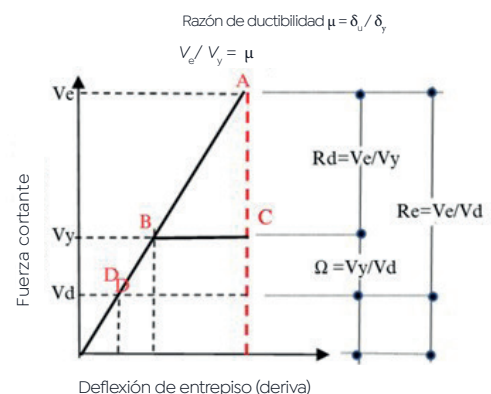
μ : Razón de ductilidad

$$\mu = \delta_u / \delta_y$$

Figura 5 Concepto básico de desempeño sísmico



a) Principio de energía constante



b) Principio de desplazamiento constante

Donde:

V_e = Fuerza cortante de respuesta elástica.

V_y = Resistencia cortante de fluencia.

V_d = Cortante basal de diseño.

δ_d = Deflexión (deriva) de entrepiso en el cortante basal.

δ_y = Deflexión (deriva) de entrepiso de fluencia.

δ_e = Deflexión (deriva) de entrepiso en la fuerza cortante de respuesta elástica.

δ_d = Deflexión (deriva) de entrepiso en el estado último

El Índice de Ductilidad F , representa la ductilidad de respuesta máxima frente al nivel de movimiento sísmico objetivo. El índice F en el método japonés se basa en la Figura 5, el cual sigue el principio de energía constante de J.A. Blume, N.M. Newmark et al., 1961 [19]. Se considera que este principio es aplicable a edificios con un período fundamental de vibración corto. Por otro lado, los estándares estadounidenses utilizan la Figura 5, que se basa en el principio de desplazamiento constante y se aplica a edificios con un período fundamental de vibración largo. En el Proyecto HOKYO se adopta este último para la definición del Índice F .

La curva de fuerza cortante-deriva de entrepiso se expresa mediante una curva bilineal desde el origen a B, y de B a C. El punto D refleja la fuerza cortante de diseño. El punto A muestra la respuesta elástica, definida por la aceleración espectral de la NTDS 94.

4.3 Análisis estático y dinámico

El análisis dinámico se define en la evaluación de Categoría 3 (2. Dinámico lineal y 4. Dinámico no lineal), pero se sugiere adoptar un enfoque estático no lineal por razones prácticas, ya que:

1. La aceleración del espectro de diseño, i.e. la demanda sísmica, es el resultado del análisis dinámico lineal.
2. La idea de la demanda sísmica reducida en la evaluación de Categoría 3 (CSM) muestra la absorción de energía debido a la deformación plástica causada por la carga sísmica repetitiva.
3. El índice de ductilidad F , que se introduce en la evaluación de Tipo 1, se introduce considerando los resultados de la respuesta dinámica del modelo tri-lineal (considerando las características de la fuerza restauradora) de marcos de concreto reforzado.
4. El factor de modificación de cortante de entrepiso, $(\frac{n+1}{n})$ de la evaluación de Tipo 1 y Tipo 2, muestra el ajuste de la distribución vertical de la respuesta de aceleración horizontal en cada nivel.

Por lo que se puede afirmar que el presente enfoque estático no lineal es práctico e incorpora los resultados del análisis dinámico. Como resultado, en esta Guía y en los Manuales se ha recomendado la adopción del enfoque estático no lineal.

4.4 Evaluación sísmica para el diseño de reforzamiento

La evaluación sísmica orientada al diseño de reforzamiento sísmico permite vincular los resultados del análisis estructural con las decisiones a tomar al momento de plantear el reforzamiento sísmico específico, acorde a las necesidades del edificio en cuestión. En esta Guía se contemplan tres distintos métodos, los cuales se presentan a continuación.

Nota: En esta Guía se recomienda priorizar el uso del método de Categoría 3, dado que está basado en estándares estadounidenses y es el enfoque más conocido y utilizado en por profesionales en El Salvador.

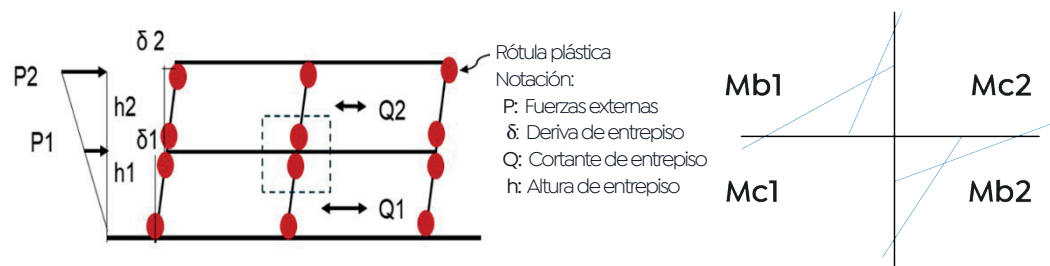
4.4.1. Método basado en el índice sísmico: Segundo nivel de evaluación (2LE)

Para más información, referirse a la Sección 3.3 del MSE.

a) Este procedimiento, como lo dice su nombre, se basa en el segundo nivel de evaluación, el cual supone que el mecanismo de colapso se desarrolla en las columnas, un mecanismo de colapso típico en edificios existentes antiguos cuyo sistema principal consta de marcos de concreto reforzado. La confirmación de tal mecanismo de colapso se lleva a cabo mediante la comparación de la resistencia a flexión de vigas y columnas en nodos típicos, para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$\Sigma M_c < 1.2 \Sigma M_b$$

Figura 6 Mecanismo de colapso
de los marcos



B) El índice sísmico básico E_o , el cual se expresa mediante la relación $C \times F$, representa el desempeño sísmico básico de un edificio, donde C es el índice de resistencia y F el índice de ductilidad.

C) El índice de resistencia C se calcula mediante la suma de fuerzas cortantes en el momento que las columnas entran en estado de fluencia.



Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

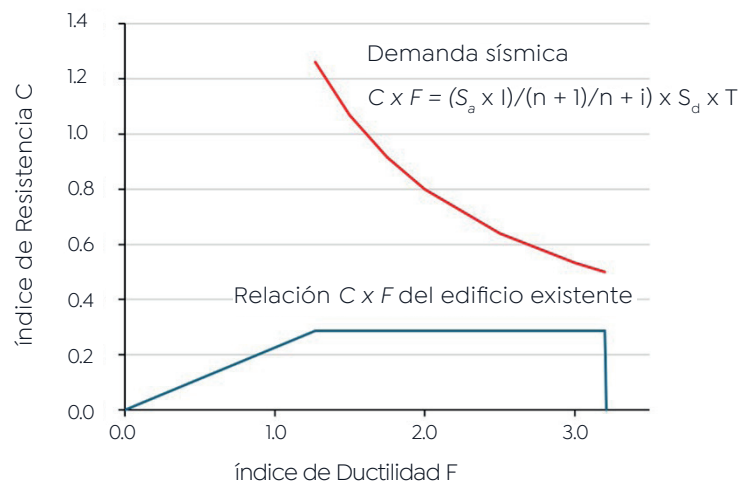
D) El índice de ductilidad F se calcula a través de la razón de ductilidad μ , que éste a su vez se determina a partir de la tolerancia ante la falla por cortante de las columnas.

E) El índice sísmico de la estructura I_s se determina mediante E_o y otros factores, en cada dirección y en cada nivel.

F) El índice de demanda sísmica I_{so} , el cual se define mediante la aceleración espectral de la NTDS 94, se compara con el índice I_s .

G) Nótese que el cálculo manual mediante hojas de cálculo se puede llevar a cabo el índice sísmico de la estructura I_s . En el caso, el diseño de reforzamiento sísmico se lleva a cabo más como un proceso puro de diseño y no mediante un proceso analítico.

Figura 7 Desempeño y demanda sísmica, expresados en términos de C-F



Como se aprecia en la figura, la curva color roja, una curva hiperbólica, representa la demanda sísmica, es decir, el desempeño sísmico objetivo, el cual se establece mediante la siguiente expresión:

$$C \times F = S_a \times I / (n + 1) / (n + i) \times S_d \times T$$

4.4.2.

Método basado en el índice sísmico: Evaluación sísmica detallada

Para más información, referirse a la Sección 4.4 del MSE,

En este tipo de procedimiento se siguen los siguiente de pasos:

- Llevar a cabo el análisis Pushover hasta alcanzar el estado final para la evaluación sísmica.
- Evaluar el cortante y la deriva de entrepiso en cada uno de los niveles y en cada dirección.
- Evaluar el índice de ductilidad F a partir de las derivas de entrepiso en el estado de fluencia en Prevención de Colapso (PC).
- Determinar el índice de ductilidad C , dividiendo el cortante entre el peso sísmico.
- Determinar el índice sísmico básico de la estructura E_o y el índice sísmico de la estructura I_s , a partir de los índices C y F .
- Establecer el índice de demanda sísmica I_{so} , a partir del espectro de aceleración de la NTDS 94 y el factor de importancia I para poder compararlo con el índice I_s .

Figura 8 Ejemplo de modo de colapso de un marco

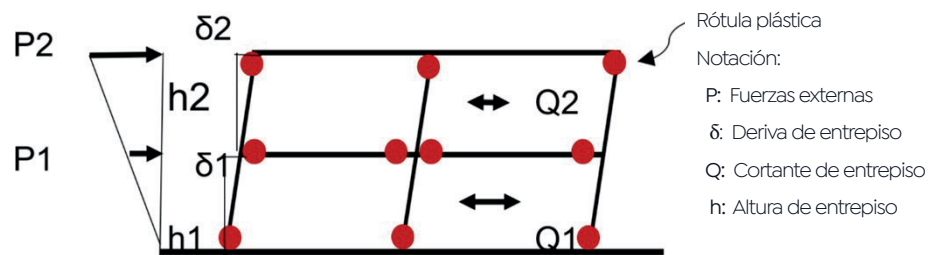
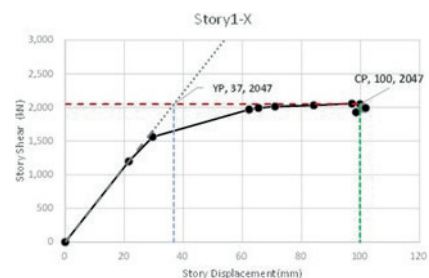
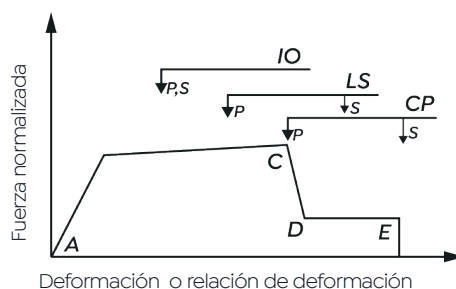


Figura 9 Ejemplo de propiedades de rótulas y curva de cortante - deriva de entrepiso mediante análisis Pushover



4.4.3.

Categoría 3 – Método de espectro de capacidad y Método de los coeficientes de desplazamiento

Para más información, referirse a la Sección 5.4 del MSE.

En la evaluación sísmica mediante la categoría 3 se sigue la siguiente secuencia:

- Conducir el análisis Pushover hasta alcanzar el estado final, al igual que en la evaluación sísmica detallada.
- Expresar la curva Pushover como una curva de capacidad de un sistema de un solo grado de libertad, es decir, en términos de $S_a - S_d$ para cada dirección.
- Expresar la demanda sísmica en términos de $S_a - S_d$. La curva de la demanda sísmica se reducirá por la absorción de energía causada por la deformación plástica repetida tras la formación de rótulas plásticas.
- Comprobar si se ha obtenido el punto de desempeño, el cual es la intersección entre la curva de capacidad y la curva de demanda sísmica reducida. Además, evaluar la respuesta de las rótulas plásticas de cada elemento estructural, para determinar si la respuesta de las rótulas está o no dentro de los límites de respuesta aceptables según la categoría de ocupación del edificio.

Figura 10 Ejemplo de curva de capacidad y curva de demanda en términos de $S_a - S_d$

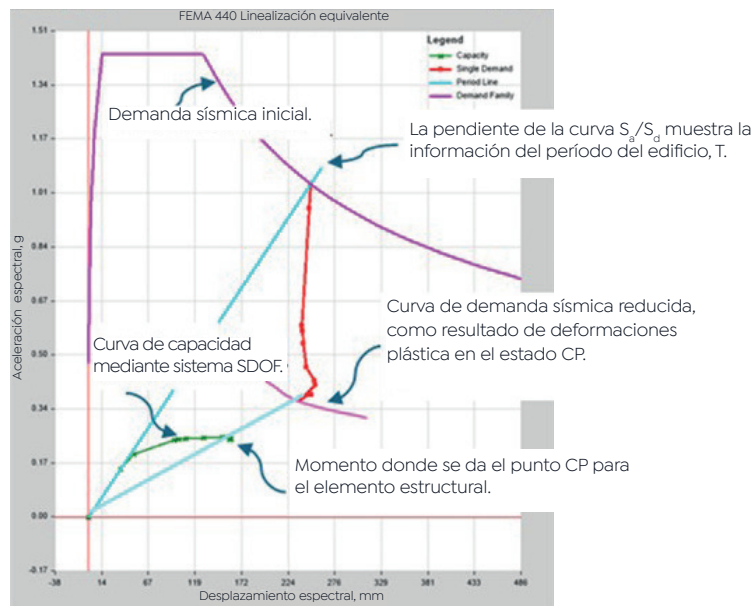
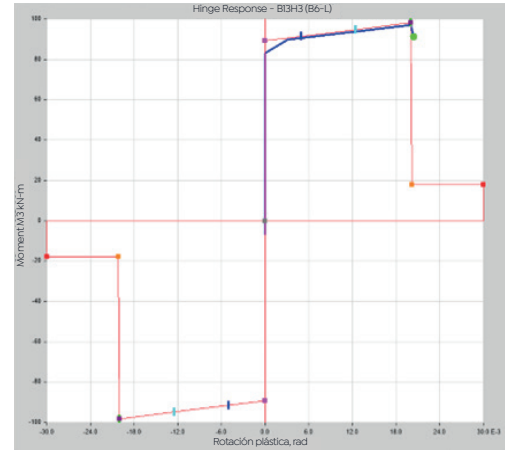
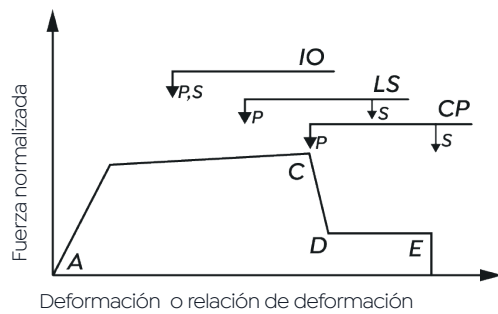


Figura 11 Ejemplo de propiedades de rótulas plásticas (ASCE 41-17) y respuestas de rótulas.



En el caso mostrado en la figura anterior, no se obtuvo el punto de desempeño, por lo cual se considera que el desempeño sísmico no es satisfactorio.

Método de los coeficientes

Adicional al método del espectro de capacidad, también se aplica el método de los coeficientes de desplazamiento. En este método se evalúa un desplazamiento objetivo para el análisis Pushover. Para la aplicación de este método se utiliza la ecuación 7-28 de ASCE 41-17.

$$\delta_t = C_o C_1 C_2 S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

La ecuación S_a denota la aceleración espectral de respuesta en el período fundamental efectivo del edificio y la relación de amortiguamiento del edificio en la dirección bajo consideración, la cual se convierte en términos de aceleración espectral.

Los coeficientes C_o , C_1 y C_2 son factores de modificación se multiplican para así determinar el desplazamiento espectral objetivo.



Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

5. PROCESO DE EVALUACIÓN SÍSMICA DESPLAZAMIENTO.

El proceso de diseño de reforzamiento sísmico se enfoca en plantear una solución acorde a los resultados obtenidos en la evaluación sísmica del edificio existente. Donde se incluye la selección de métodos de reforzamiento, la verificación de la resistencia y los ajustes necesarios para garantizar que el edificio alcance el nivel de seguridad estructural requerido.

5.1. Generalidades

La clasificación de los métodos de reforzamiento sísmico o sistemas de mejora sísmica se muestra en la siguiente Figura 12



Figura 12 Clasificación de los métodos de reforzamiento/sistemas para mejora de la sismicidad – Manual de Diseño de Reforzamiento Sísmico. Proyecto HOKYO



Nota 1



Nota 2



Nota 3



Nota 4



Nota 5



Nota 6

Figura 13 Clasificación de métodos de reforzamiento / sistemas de mejora sísmica
Nota. Fuente: Obras de Prueba en Universidad de El Salvador, Proyecto HOKYO.

Los métodos/sistemas de reforzamiento sísmico mostrados se introducen en el Manual de Diseño de Reforzamiento Sísmico. Se analizar los detalles de cada sistema, el método de evaluación relacionado con la resistencia y la ductilidad de estos.

Tabla 6 Referencia a los Capítulos del MRD de los elementos/sistemas de reforzamiento sísmico

Método/sistema de reforzamiento sísmico	Capítulo de Manual de Diseño de Reforzamiento Sísmico
Diseño de elementos de reforzamiento sísmico	Capítulo 3
Encamisado de columnas (concreto reforzado y fibra de carbono)	Capítulo 3.2
Pared de cortante de concreto reforzado	Capítulo 3.3
Marco de arriostramiento de acero	Capítulo 3.4
Laminación con ferrocemento	Capítulo 3.5
Anclajes post-instalados	Capítulo 3.6

En cuanto al modelamiento de los elementos de reforzamiento sísmico, es importante analizarlo, por lo que esto se introduce en los siguientes capítulos.

Tabla 7 Referencia a las Secciones del MRD de modelamiento de los elementos / sistemas de reforzamiento sísmico.

Modelamiento de elementos de reforzamiento sísmico	Capítulo 4
Pared de cortante de concreto reforzado	Capítulo 4.1
Marco de arriostramiento de acero	Capítulo 4.3
Laminación con ferrocemento	Capítulo 4.3

Asimismo, en el Manual de Diseño de Reforzamiento Sísmico se muestra la aplicación de cada método en el Edificio Modelo introducido en el Manual de Evaluación Sísmica.

Tabla 8 Referencia a los Capítulos del MRD del cálculo de los elementos / sistemas de reforzamiento sísmico

Procedimiento basado en el índice sísmico: tipo 1 (segundo nivel de evaluación)	Capítulo C1
Procedimiento basado en el índice sísmico: tipo 2 (evaluación sísmica detallada)	Capítulo C2
Procedimiento basado en el desempeño sísmico: categoría 3 (Método de espectro de capacidad, Método de los coeficientes de desplazamiento)	Capítulo C3

5.2. Esquema general de diseño de reforzamiento sísmico

Como se indica en el Capítulo 4 de esta Guía, se recomienda que el diseño se realice mediante los resultados del análisis estático no lineal.

Utilizando la evaluación de Categoría 3, la cantidad de reforzamiento sísmico se calcula mediante softwares de análisis estructural, como ETABS (ver Capítulo 3C de MRD). Sin embargo, si se utiliza el índice sísmico I_s , se determina la cantidad de elementos de reforzamiento sísmico tras la evaluación sísmica, esta cantidad puede calcularse manualmente. En la presente Guía se menciona la cantidad necesaria de elementos de reforzamiento sísmico.

5.2.1. Proceso de diseño de reforzamiento sísmico

Los pasos siguientes son aquellos que deberán ser considerados para el plan de reforzamiento sísmico utilizando el 2LE;

1. Identificar el nivel con más deficiencias basado en el resultado de la evaluación sísmica, especialmente el índice de resistencia C y el índice de ductilidad F de cada nivel y en cada dirección. Así como el índice de irregularidad S_D .
2. Definir la demanda sísmica, es decir, el desempeño sísmico requerido.
3. Evaluar las limitaciones del reforzamiento sísmico, como las características de la estructura existente, y las funciones del edificio. En cuestión de la construcción, se debe evaluar el costo, tiempo y facilidad de ejecución.
4. Seleccionar el método de reforzamiento sísmico efectivo para lograr el desempeño sísmico objetivo.
5. Estimar el volumen requerido de reforzamiento sísmico en materia de volumen de construcción.
6. Preparar los planos para los elementos estructurales que serán reforzados.
7. Determinar los valores de los índices I_s , C y su distribución vertical en elevación después del reforzamiento.
8. Evaluar el impacto sobre las fundaciones existentes, recomendándose realizar el diseño de reforzamiento sísmico sin llegar a reforzar las fundaciones existentes.

5.2.2.

Resistencia requerida para reforzamiento sísmico mediante cálculo del índice sísmico

A través de la evaluación del índice de ductilidad F después del reforzamiento sísmico, se calcula la resistencia requerida aplicando las siguientes ecuaciones. Esto presenta una ventaja al optar por este método, por lo que se puede decir que, es el que posee enfoque de diseño.

Retomando la ecuación para determinar el índice sísmico de la estructura, I_s :

$$I_s = E_o \times S_D \times T = \frac{n+1}{n+I} \times C \times F \times S_D \times T$$

$$C \times F = \frac{n+I}{n+1} \times \frac{I_s}{S_T \times t} ; \text{Donde } C = \frac{Q}{W}$$

Luego, en el caso de estructuras orientadas a la resistencia, se estima la cantidad de resistencia que el reforzamiento debe proveer con el índice de ductilidad previsto; aplicando la siguiente ecuación;

$$\Delta Q_i = \Delta C_i \times \Sigma W_i = \frac{n+I}{n+1} \times \frac{I}{F'} \times \left(\frac{I_s}{S'_D T} - \frac{I_{si}}{S'_D T} \right) \times \Sigma W_i$$

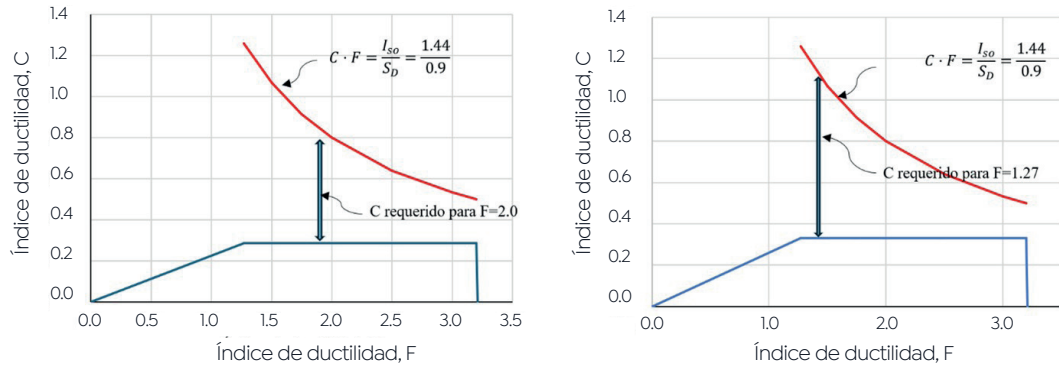
Para esta tarea se hace uso del formato presentado en la siguiente tabla:

TABLA 9 Formato de tabla -
RESISTENCIA REQUERIDA

Nivel	Peso sísmico ΣW (omitiéndose factor de carga) (kN)	$\frac{n+I}{n+1}$	Resistencia cortante de diseño luego de reforzamiento Q $\frac{n+I}{n+1} \times \frac{I_s}{F' \times S_D \times T} \times \Sigma W_i$ (I) kN	Resistencia original $C_{orig} \times \Sigma W_i$ (2) C Q (kN)	Resistencia adicional requerida, Q (I)-(2) (kN) Q	Número de elementos requeridos (resistencia, kN) Número
2						
1						

Poniendo como ejemplo el Edificio Modelo, en el MRD se introduce que su reforzamiento será orientado a la resistencia; para ello, se planea incorporar marcos de arriostramiento de acero en la dirección longitudinal (dirección X) y paredes de cortante de concreto reforzado en la dirección transversal (dirección Y) como reforzamiento sísmico. Como caso típico, se propone como $F=1.27$ para paredes de cortante de concreto reforzado y $F=2.0$ para marcos de arriostramiento de acero. La resistencia requerida se muestra en la Figura 14. Para más información, referirse al Capítulo 3 del MRD. El Edificio Modelo, introducido en el Capítulo 1C del MSE, se utiliza en esta Guía a manera de ejemplo.

FIGURA 1 EJEMPLO DE RELACIÓN C-F EN EL PRIMER NIVEL (IZQUIERDA: MARCOS DE ARRIOSTRAMIENTO DE ACERO; DERECHA: PAREDES DE CORTANTE DE C/R)

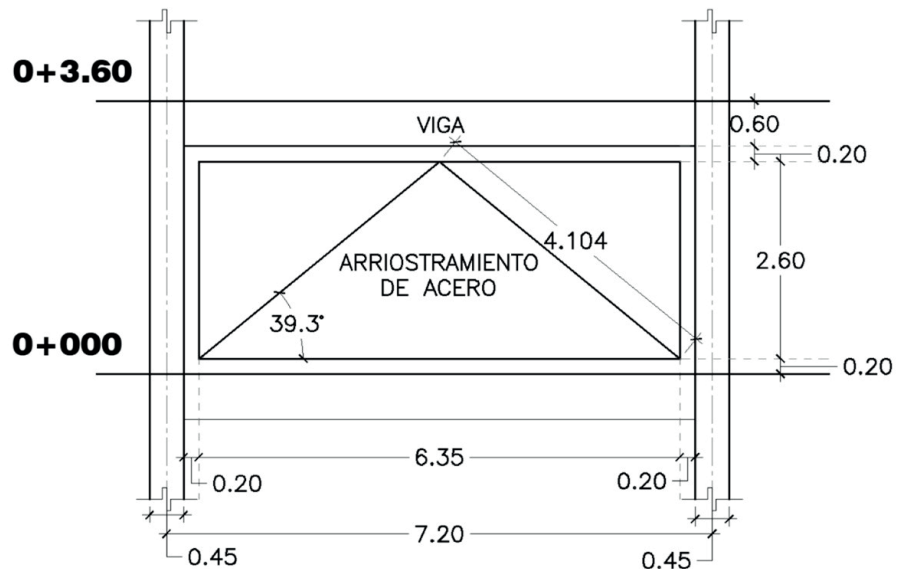


5.2.3. Aplicando el índice sísmico I_s .

El diseño de elementos de reforzamiento sísmico, como marcos de arriostramiento de acero, paredes de cortante de concreto reforzado y anclajes post instalados, así como del reforzamiento mediante laminación con ferrocemento, se introducen en el Capítulo 3 del MRD, se muestran en este apartado a manera de ejemplo.

- (1) Diseño de elementos de reforzamiento sísmico – Dirección X
 - a) Resistencia de marco de arriostramiento de acero

Figura 14 Formato de tabla - resistencia requerida



Selección de elementos de arriostramiento de acero
 Perfil: 250×200×6mm o equivalente
 Radio de giro: $i_x = i_y = 78.8\text{mm}$
 Relación de esbeltez: $\lambda = 4,104/78.8 = 52.1 < 58$ (límite superior)
 Sección transversal $A = 4,563\text{mm}^2$



Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

Resistencia horizontal

Acero: ASTM A500, Grado B, $\sigma_y = 320 \text{ N/mm}^2$

Resistencia especificada del acero: $\sigma_y = 320 \text{ N/mm}^2$

$$\text{Relación de esbeltez límite} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 205,000}{0.6 \times 320}} = 103$$

$$\text{Esfuerzo a la compresión límite} = \left[1 - 0.40 \left(\frac{\lambda}{\lambda} \right)^2 \times \sigma_y \right] = \left[1 - \left(\frac{52}{103} \right)^2 \times 320 \right] = 287 \text{ N/mm}^2$$

Contribución del arriostramiento a compresión: $287/320 = 0.897$

Arriostramiento a tensión: $T = A \times \sigma_y = 4,563 \times 320 = 1,460 \text{ kN}$

Arriostramiento a compresión: $C = 0.898 \times T = 0.898 \times 1,460 = 1,311 \text{ kN}$

Resistencia horizontal = $\cos(39.3^\circ) \times (T + C) = 0.774 \times (1,460 + 1,311) = 2,145 \text{ kN}$

Referirse a la Sección C1.5 del MRD para más información.

b) Cantidad requerida de marcos de arriostramiento de acero

Para marcos de arriostramiento de acero $F = 2.0$. Para más información, referirse a la Sección C1.5 del MRD.

$$E = \frac{n + 1}{n + i} \times C \times F$$

$$I_s = E_o \times S_D \times T = \frac{n + 1}{n + i} \times C \times F \times S_D \times T$$

Al evaluar bajo la condición reforzada:

$$C \times F = \frac{n + i}{n + 1} \times \frac{I_s}{S_D \times T}$$

Dónde:

$$C = \frac{I}{\sum W}$$

Por lo tanto, la resistencia requerida Q_{req} es:

$$Q_{req} = \frac{n + i}{n + 1} \times \frac{I_{so} \times \sum W}{F \times S_D \times T} \times C_{original F=2.0} \times \sum W$$

En el caso de llevar a cabo el análisis en el primer nivel, la anterior ecuación se simplifica de la siguiente forma:

$$Q_{req} = \frac{I_{so} \times \sum W}{F \times S_D \times T} \times C_{original F=2.0} \times \sum W$$

Tabla 10 Cantidad requerida de marcos de arriostamiento de acero

Nivel	Peso sísmico ΣW (omitiéndose factor de carga) (kN)	$\frac{n+i}{n+1}$	Resistencia cortante de diseño luego de reforzamiento Q $\frac{n+i}{n+1} \times \frac{1.44}{2.00 \times 1.0 \times 1.0} \times \Sigma W_i$ (l) kN	Resistencia original $C_{ev} \times \Sigma W_i$ (2)		Resistencia adicional requerida, q (l)-(2) (kN)	Número de elementos requeridos (resistencia, kN) Número
				C	Q (kN)		
3	612.6	1.50	-----	-----	-----	-----	1
2	5,000	1.25	4,500	0.238	1,190	3,310	2 $C = \frac{4290+1190}{5000} = 1.096$
1	9,403	1.00	6,700	0.180	1,693	5,077	4 $C = \frac{8,580+1693}{9,403} = 1.093$

NOTA. PARA MÁS INFORMACIÓN, REFERIRSE AL MANUAL DE DISEÑO DE REFORZAMIENTO SÍSMICO.

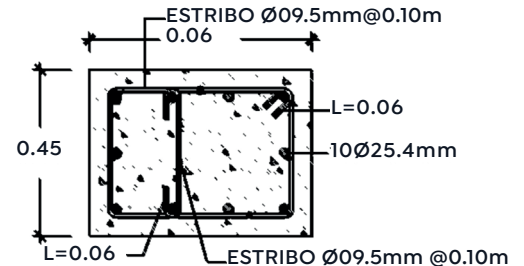
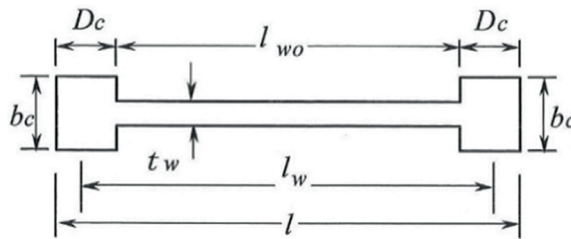
(2) Diseño de elementos de reforzamiento sísmico – Dirección Y

a) Resistencia cortante de pared de cortante unida con las columnas existentes

Al evaluar la resistencia cortante de las paredes de cortante concreto reforzado, se evalúan dos escenarios: el primero, donde se analiza en conjunto la pared unida a las columnas; y, el segundo, donde se analiza la resistencia de la pared independiente ubicada entre las columnas existentes. De los dos valores obtenidos, se toma el menor de ellos para utilizarlo en el diseño de este elemento de reforzamiento.

$$Q_{su} = \left[\frac{0.053 p_{te}^{0.23} (18 + F_c)}{\frac{M}{(Q \cdot l)} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{se} \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_{oe} \right] \cdot b_e \cdot j_e$$

NOTA. PARA LAS NOTACIONES, REFERIRSE AL MANUAL DE DISEÑO DE REFORZAMIENTO SÍSMICO.



Nota. Para más información, referirse a la Sección C1.5 del MRD.

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 \times (0.17)^{0.23} \times (18+20.6)}{1.0 + 0.12} + 0.85 \sqrt{0.000456 \times 400 + (0.1 \times 0.403)} \right\} \cdot 207 \times 13,600$$

$$Q_{su} = (1.284 + 1.148 + 0.040) \cdot 207 \times 13,600 = [2,472 + 2,815] \times 10^3$$

$$Q_{su} = 6,959 \text{ kN}$$

Nota. Para las notaciones, referirse al Manual de Diseño de Reforzamiento Sísmico Resistencia cortante

b) Resistencia cortante de la pared independiente de cortante de concreto reforzado

$${}_wQ_{su} = \max \left(p_w \cdot {}_w\sigma_y, \frac{F_{cw}}{20} + 0.50 \cdot p_w \cdot {}_w\sigma_y \right) \cdot t_w \cdot l_w$$

$${}_wQ_{su} = \max \left(0.0052 \times 400, \frac{20.6}{20} + 0.5 \times 0.00524 \times 400 \right) \cdot 180 \cdot (6,400, 5,700)$$

$${}_wQ_{su} = \max (2.96, 2.078) \cdot 180 \cdot (6,400, 5,700)$$

Nota. Para más información, referirse a la Sección C1.5 del MRD.

$${}_wQ_{su} = 2,590 \text{ kN para } l_w = 6,400 \text{ mm} \quad {}_wQ_{su} = 2,300 \text{ kN para } l_w = 5,700 \text{ mm}$$

$${}_wQ_{su} = 2,590 + 2,300 = 4,890 \text{ kN}$$

Por lo tanto ${}_wQ_{su} = 4,890 \text{ kN}$ se utiliza para el diseño de la resistencia a cortante de la pared de concreto reforzado.

c) Número requerido de paredes para reforzamiento sísmico

Tabla 11 Cantidad requerida de paredes de cortante de concreto reforzado y laminación con ferrocemento en paredes de bloque de concreto existente

Nivel	Peso sísmico ΣW (omitiéndose factor de carga) (kN)	$\frac{n+i}{n+1}$	Resistencia cortante de diseño, luego de reforzamiento Q $\frac{n+i}{n+1} \times \frac{1.44}{2.00 \times 1.0 \times 1.0} \times \Sigma W_i$ (l) kN	Resistencia original $C_{orig} \times \Sigma W_i (2)$		Resistencia adicional requerida, Q (l)-(2) (kN)	Número de elementos requeridos (resistencia, kN) Número
				C	Q (kN)		
3	612.6	1.50	----	----	----	----	1
2	5,000	1.25	7,087	0.655	3,275	3,812	$C = \frac{3,275 + 4890}{5000} = 1.53$
1	9,403	1.00	10,662	0.320	3,009	7,653	$C = \frac{3,009 + 9,780}{9,404} = 1.36$

Nota. Para más información, referirse al Manual de Diseño de Reforzamiento Sísmico.

(3) Resultados de reforzamiento sísmico

a) Relaciones C-F antes y después de reforzamiento sísmico en cada nivel

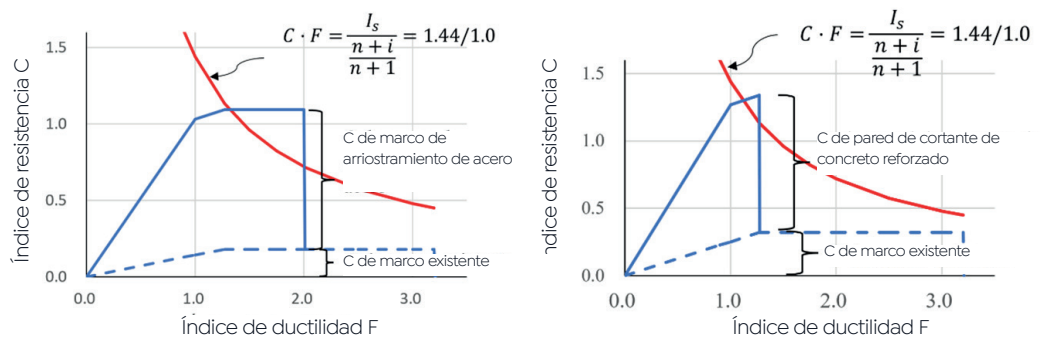
Como se pudo observar en el apartado anterior, el diseño de reforzamiento sísmico se llevó a cabo y se satisfizo el desempeño sísmico objetivo. Sin embargo, para un mejor entendimiento, se presenta la relación C-F antes y después del reforzamiento sísmico en el primer nivel y en cada dirección de análisis (X e Y). Donde el desempeño sísmico objetivo, en la figura, se define como se muestra a continuación:

$$C \times F = I_s / [(n+1) / (n+1)] \times S_D \times T$$

Dado que $S_D=1.0$ y $T=1.0$ para el primer nivel, la expresión se simplifica de la siguiente manera:

$$C \times F = I_s / [(n+1) / (n+1)]$$

FIGURA 15 RELACIÓN C-F Y DESEMPEÑO SÍSMICO OBJETIVO - PRIMER NIVEL



Dirección X

Dirección Y



Fotografía:
Fuente Oficina de
Planificación del Área
Metropolitana de San
Salvador (OPAMSS)

5.3 MODIFICACIONES DE DISEÑO

En el caso del Proyecto Piloto, ejecutado en el marco del Proyecto HOKYO, cuando fue necesario elaborar planos ante la ausencia de información existente, se presentaron inevitablemente limitaciones al momento de recabar dicha información, generando circunstancias imprevistas al plantear el diseño de reforzamiento. En estas situaciones, el diseñador estructural debe proponer contramedidas según sea necesario. A continuación, se muestran las principales actividades realizadas durante la ejecución del Proyecto Piloto dentro del marco del Proyecto HOKYO.

TABLA 12 APOYO DE DISEÑO DE HOKYO PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO PILOTO.

Fecha	Ítem	Actividad realizada
2023.6	Evaluación sísmica	HOKYO evidenció la vulnerabilidad de los edificios mediante la evaluación sísmica.
2023.8	Diseño de reforzamiento	HOKYO proporcionó los planos de diseño sísmico y el presupuesto preliminar del proyecto.
2024.4.25	Permiso de construcción	Se brindó apoyo técnico al MINED para la solicitud del permiso de construcción del proyecto piloto.
2024.4.25	Permiso de construcción	Se brindó apoyo técnico al MINED para la solicitud del permiso de construcción del proyecto piloto.
2024.5~6	Modificación del permiso de construcción	Presentación de planos topográficos y gestión de exención de impuestos para bienes fijos del MINED.
2024.7.18	Explicación al contratista sobre el diseño de reforzamiento sísmico.	Se realizaron reuniones explicativas con la empresa Contratista y Supervisora, así como diseñadores del Proyecto Piloto en la UCA y la UES.
2024.8.16	Permiso de construcción	OPAMSS emitió el permiso de reforzamiento sísmico (fecha correspondiente a la entrega al MINED).
2024.09.09	Organización de equipos de apoyo	Se discutió con el MINED la organización del sistema de apoyo durante la construcción.
2024.09.20 2024.11.06	Modificación del diseño	Se cambiaron las especificaciones de diseño de reforzamiento sísmico dado hallazgos de las condiciones encontradas en campo.
2024.12.01	Preparación del procedimiento de construcción	Explicación del procedimiento para el uso de reforzamiento mediante laminación con ferrocemento.
2024.12.05	Preparación de preguntas y respuestas	Se elaboró un cuestionario, incluyendo preguntas sobre el reforzamiento sísmico.
2025.02.16	Modificación del diseño	Se adoptaron miembros de acero para los marcos de arriostramiento de acero adaptados al mercado local y se actualizaron los planos.
2025.02.25	Documento complementario	Se prepararon y presentaron materiales explicativos para el detallado del refuerzo mediante paredes de cortante de concreto reforzado.
2025.03.18	Modificación del diseño	Se cambiaron pernos tipo stud a la disponibilidad del mercado local y se actualizaron los planos.
2025.06	Solicitud de mejora del sistema de control de calidad del contratista	Según el contrato con el MINED, la empresa contratista del Proyecto Piloto aún no había implementado al gerente de control de calidad ni al ingeniero estructural, cargos obligatorios a junio.

BIBLIOGRAFIA

J.A. Blume, N.M. Newmark, and L.H. Corning, 1961: Design of Multistory Reinforced Concrete Building for Earthquake Motions, Portland Cement Association, Chicago, 1961.

Seki M (2015): A proposal on the Simplified Structural Evaluation Method for Existing Reinforced Concrete Buildings based on the Japanese Seismic Evaluation Standard vis-à-vis the International Seismic Code, Journal of Earthquake Science and Engineering, Publisher ISES, <http://www.joes.org.in>

M. Seki(1), M. R. Islam(2), J. Matsuo(3), y Nakajima (A PROPOZAL ON THE ADVANCED SIMPLIFIED STRUCTURAL EVALUATION METHOD FOR EXISTING BUILDINGS IN BANGLADESH)

M.Seki and Y.Nakajima, Simplified Evaluation (SE) Software for Seismic Evaluation of RC Buildings, Ver.2023/Jan.

Guía para la planificación del
Reforzamiento Sísmico



Guía para la Evaluación y
Diseño del Reforzamiento



Manuales de Evaluación
y Diseño







<http://opamss.org.sv>

