

Interreg
POCTEFA



Proyecto cofinanciado por el Fondo
Europeo de Desarrollo Regional



Por una cultura común del riesgo sísmico
Pour une culture commune du risque sismique

GUÍA PARA LA REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS

Guía – E4.2.3



Editor: "BRGM - ACE"

«5 de diciembre de 2021»

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Autores:

Diseño y redacción: Kristel Meza Fajardo²

Ilustraciones, asesoría y revisión: Antoni Blázquez¹⁰

Asesoría y revisión:

Ramón González-Drigo³

Nieves Lantada³

Luis Pujades³

Revisión

Goula¹⁰ X, Martín⁶ C, Olivier⁶ D, Weleman⁶ H.

Ilustraciones de tipologías

BIS structures: Centelles¹⁰ X, Padrós¹⁰ C y Garcia¹⁰ D

Fotografías de edificios

Blázquez-Guanter: Blázquez¹⁰ A, Barbat³ A, González-Drigo³ R, Alcocer S, Murià D, Davidovici V, y algunos sitios en línea.

Otras ilustraciones

Valcárcel J, Rojas N., y algunos sitios en línea.

Palabras clave:

Rehabilitación sísmica. Peligro sísmico. Vulnerabilidad sísmica. Niveles de comportamiento sísmico. Diagnóstico estructural.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

1. ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
2. BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
3. UPC: Universitat Politècnica de Catalunya
4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
5. IEA: Institut d'Estudis Andorrans
6. ENIT : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique - Délégation Alsace
8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
9. DW: Deveryware
10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

© «23 de febrero del 2022», proyecto POCRISC

Síntesis

Este documento es un resumen de métodos de evaluación de debilidades de edificios existentes frente a demandas potenciales asociadas a movimientos sísmicos. El documento también incluye descripciones breves de algunos métodos de rehabilitación estructural, asociados a las deficiencias comúnmente identificadas en la práctica. En los primeros capítulos se presentan conceptos básicos de ingeniería sismorresistente, relacionados con la seguridad estructural y el peligro sísmico, necesarios para la comprensión de los criterios técnicos utilizados en la identificación de debilidades estructurales. En los últimos capítulos se ha realizado un esfuerzo importante ilustrando los métodos comunes de rehabilitación sísmica, con figuras y ejemplos reales.

Aunque la aplicación de este documento está orientada a edificaciones esenciales, entendidas como aquellas necesarias para la atención a la población y a los servicios en caso de terremoto, su alcance va más allá. La mayoría de los métodos, técnicas y elementos de esta guía pueden ser aplicados a edificios de importancia normal, como por ejemplo, edificios residenciales y edificios de especial importancia, sea por la función que desempeñan, por su alto nivel de ocupación, sea por su valor económico o patrimonial, entre otros. Es importante recalcar también que esta guía está basada en recomendaciones de análisis e intervención sísmo-resistente y no en reglamentos o códigos de obligatorio cumplimiento. Sin embargo, el diseño de toda modificación estructural, o la adición de nuevos elementos estructurales, debe, sin duda, cumplir con las reglamentaciones de diseño y construcción vigentes en cada región.

CONTENIDO

Síntesis.....	3
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tablas.....	9
1 Introducción.....	10
1.1 El contexto.....	10
POCRISC: el proyecto.....	10
La acción 4.....	11
1.2 A quien se dirige.....	12
Los grupos objetivo.....	12
El ámbito geográfico.....	12
Los edificios esenciales.....	12
2 Conceptos Básicos de Rehabilitación Sísmica.....	13
2.1 Rehabilitación Sísmica de Edificios.....	13
2.2 Seguridad estructural.....	13
2.3 Reglamentos Sísmicos.....	14
Reglamentos basados en niveles de comportamiento.....	14
Reglamentos normativos.....	14
2.4 Comportamiento Sísmico.....	15
Diseño sismorresistente.....	15
Importancia de la edificación.....	15
Niveles de comportamiento.....	16
Niveles de comportamiento para la estructura.....	17
Nivel de comportamiento para los elementos no estructurales.....	17
Nivel de comportamiento de la edificación.....	17
2.5 Peligro sísmico.....	19
Niveles de peligro sísmico.....	19
Sismo de Servicio (SS).....	19
Sismo de Diseño (SD).....	19
Sismo Máximo (SM).....	19
Solicitaciones sísmicas.....	20
Espectro de diseño estándar.....	20
Espectro de diseño para un sitio específico.....	20
Acelerogramas.....	20
2.6 Objetivos de rehabilitación.....	21

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Objetivo Básico de Seguridad	21
Objetivos Ampliados de Rehabilitación	22
Objetivos Limitados de Rehabilitación	22
Objetivos Reducidos de Rehabilitación	22
3 Diagnóstico del estado general de la estructura	24
3.1 Historia, uso futuro y ubicación	24
3.2 Investigación de las condiciones del sitio	24
3.3 Estado actual	25
3.4 Puntos débiles y factores de riesgo del edificio	25
Dimensiones y número de pisos	25
Sistema de cargas gravitatorias y de cargas laterales.	25
Irregularidad en planta	26
Irregularidad del edificio en altura	27
Pilar corto	28
Juntas y conexiones	29
Localización de aberturas en forjados.....	30
Calidad de la ejecución.....	30
3.5 Características de los materiales	30
Inspección visual de las características de los materiales	30
Patologías en el hormigón.....	31
Patologías en el acero.....	31
Patologías en los materiales de fábrica	31
Patologías en la madera	32
Toma de muestras y pruebas de laboratorio	32
3.6 Elementos no estructurales.....	33
4 Clasificación de Edificios Existentes	34
4.1 Sistemas resistentes a cargas	34
Muros de carga	34
Pórticos resistentes a momento	35
Pórticos arriostrados	35
Sistemas duales.....	36
4.2 Materiales constructivos	36
Mampostería	36
Mampostería con fábrica de piedra	37
Mampostería de fábrica de ladrillo o bloque sin armar.....	37
Mampostería de fábrica armada	37

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Mampostería confinada o reforzada globalmente	38
Edificios rehabilitados.....	39
Hormigón armado	39
Estructuras metálicas y de madera	40
4.3 Forjados.....	42
Forjados unidireccionales	42
Forjados bidireccionales	43
4.4 Cimientos.....	44
Cimentaciones superficiales	44
Cimentaciones profundas	45
5 Evaluación sísmica de la estructura	46
5.1 Tipos de deficiencias estructurales más frecuentes	46
Capacidad global	46
Rigidez global.....	46
Irregularidades en planta y en altura	46
Trayectoria de transmisión cargas	46
Detallado de elementos	47
Forjados	47
Cimientos	47
Otras deficiencias	48
Peligros geológicos	48
Edificios adyacentes	48
5.2 Métodos de Análisis Estructural.....	48
Métodos de análisis lineal.....	48
Análisis estático equivalente	49
Análisis modal.....	49
Historias de carga	49
Métodos de análisis no lineal.....	49
Análisis no lineal estático	50
Análisis no lineal dinámico	50
5.3 Criterios de aceptación.....	50
Clasificación de elementos	50
Criterios para Análisis Lineal	51
Elementos controlados por deformaciones.....	51
Elementos controlados por fuerzas	52
Cimientos	52

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Criterios para Análisis No Lineal	53
Elementos controlados por deformaciones.....	53
Elementos controlados por fuerzas	53
Cimientos	53
6 técnicas de rehabilitación	54
6.1 Estrategias de rehabilitación	54
Modificación local de elementos.....	54
Reducción o eliminación de irregularidades estructurales	56
Aumento de la Rigidez Global	58
Aumento de la Capacidad Global.....	58
Reducción de la masa	59
Aislamiento sísmico de base	59
Sistemas suplementarios de disipación de energía.....	59
6.2 Técnicas comunes de rehabilitación	60
Adición de elementos.....	60
Refuerzo de uniones entre elementos	63
Eliminación de elementos estructurales.....	63
Rehabilitación de la cimentación	64
6.3 Otras consideraciones.....	66
Costos 67	
Interrupción temporal de la ocupación	67
Funcionamiento del edificio	67
Aspectos arquitectónicos.....	67
6.4 Elementos no estructurales.....	67
7 BIBLIOGRAFÍA	70

Lista de Figuras

Figura 1-1. Zona elegible POCTEFA.....	11
Figura 2-1. Ejemplo de acelerogramas de 3 componentes.	21
Figura 3-1. Ejemplos de situaciones que pueden producir pilares cortos y pilares largos.....	28
Figura 3-2. Ilustración de formación de un mecanismo típico de pilar corto.....	28
Figura 4-1. Esquema de muros de carga.	34
Figura 4-2. Esquema de pórticos resistentes a momento.	35
Figura 4-3. Esquema de pórticos arriostrados.....	35
Figura 4-4. Esquema de sistema dual.....	36
Figura 4-5. Ejemplo de tipos de fábrica de piedra: a) ordinaria, b) concertada y c) sillería.	36
Figura 4-6. Ejemplo de muros de fábrica sin armar: a) ladrillo, b) bloque de hormigón.	37
Figura 4-7. Ejemplo de muros de fábrica armada.	37
Figura 4-8. Imágenes de muros de fábrica armada.....	38
Figura 4-9. Esquema de mampostería confinada.....	38
Figura 4-10. Ejemplo de muro reforzados globalmente.....	38
Figura 4-11. Ejemplo de edificios de hormigón armado en construcción.	39
Figura 4-12. Ejemplo de edificio con estructura metálica.	40
Figura 4-13. Ejemplo de edificio con cubierta de madera.....	41
Figura 4-14. Ejemplo de edificio con estructura de láminas de madera.	41
Figura 4-15. Diagramas de transmisión de cargas desde los forjados hasta el terreno.	42
Figura 4-16. Ejemplo de forjados unidireccionales.....	42
Figura 4-17. Ejemplo de forjados unidireccionales.....	42
Figura 4-18. Ejemplo de forjados unidireccionales.....	43
Figura 4-19. Ejemplos de forjados bidireccionales:.....	43
Figura 5-1. Curvas Fuerza-Deformación para elementos.....	51
Figura 6-1. Encamisado de viga, mediante angulares y pletinas de acero: izquierda, sección transversal; derecha, sección longitudinal.	54
Figura 6-2. Encamisado de pilar de hormigón armado, mediante angulares y pletinas de acero.	55
Figura 6-3. Refuerzos con tejidos de polímero reforzado con fibra (FRP): a) a flexión y cortante, b) a flexión, cortante y confinamiento a compresión.	55
Figura 6-4. Encamisado de pilares con hormigón armado.	56
Figura 6-5. Estructuras irregulares.....	57
Figura 6-6. Arriostramientos externos con diagonales.	58
Figura 6-7. Rigidización mediante nuevos muros de cortante.....	58
Figura 6-8. Aislamiento de base: a) reducción de la aceleración, gracias al amortiguamiento de la base, b) reducción de los desplazamientos y esfuerzos en la estructura.	59
Figura 6-9. Aislador de base.	60
Figura 6-10. Disipadores de energía.	60
Figura 6-11. Refuerzo de extremos o adición de muro entre pilares.....	61
Figura 6-12. Adición de muro en pórtico.....	61

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Figura 6-13. Encamisado de muros de carga.....	62
Figura 6-14. Refuerzo de muros de carga frente a acciones fuera del plano y en el plano con FRP.....	62
Figura 6-15. Refuerzo de un nudo mediante encamisado de (a) fibras de carbono (b) de hormigón armado.	63
Figura 6-16. Mitigación del efecto de columna corta.	63
Figura 6-17. Separación de los cerramientos de la estructura.	64
Figura 6-18. Tipos de refuerzos a cimientos superficiales.....	65
Figura 6-19. Recalce de zapatas corridas mediante: a) inyecciones de resinas expansivas y b) minipilotes metálicos de pequeño diámetro (aprox. 50 mm) combinados con inyecciones de resinas expansivas.	66
Figura 6-20. Recalces profundos mediante micropilotes.....	66
Figura 6-21. Arriostramiento de petos de cubierta con la estructura del forjado.	68
Figura 6-22. Fijación mecánica de instalaciones.....	69

Lista de Tablas

Tabla 2-1. Niveles de comportamiento de la edificación.	18
Tabla 2-2. Combinaciones de metas para objetivos de rehabilitación.....	23
Tabla 3-1. Clases de irregularidad en planta, descripción de las clases y pictogramas explicativos.....	26
Tabla 3-2.- Clases de irregularidad en altura.	27

1 INTRODUCCIÓN

Eventos sísmicos recientes han dejado en evidencia el potencial destructivo de los terremotos sobre las estructuras. Estas experiencias también han permitido constatar que una de las formas más efectivas de reducir pérdidas y proteger vidas durante los sismos y, por tanto, de reducir la vulnerabilidad sísmica, es procurar el buen comportamiento de las estructuras sometidas a movimientos sísmicos, especialmente manteniéndolas lejos del colapso. En la actualidad, la mayoría de los códigos de construcción ya incorporan medidas y requerimientos para evitar el colapso o daños significativos en construcciones nuevas. Sin embargo, la gran mayoría de construcciones existentes han sido construidas previamente a la vigencia de los códigos con requerimientos sísmicos, lo que impone la necesidad de plantearse intervenciones orientadas a mejorar su comportamiento sísmico. Los profesionales de la ingeniería y de la construcción ya han hecho progresos importantes en el desarrollo de recursos y técnicas para la rehabilitación sísmica de estructuras existentes.

Este documento presenta una revisión de técnicas comunes de reparación y refuerzo de edificios existentes para mejorar su comportamiento ante sollicitaciones sísmicas. Para referirnos a ese tipo de intervenciones en estructuras existentes, utilizaremos el término “rehabilitación sísmica”. El objetivo de la guía es familiarizar al lector con los aspectos más influyentes en el proyecto de rehabilitación sísmica de edificaciones, incluyendo la descripción de conceptos básicos de ingeniería sísmica que nos han parecido útiles y necesarios para su comprensión. Es importante recalcar que esta guía está basada en recomendaciones de análisis e intervención sismo-resistente y no en reglamentos o códigos de obligatorio cumplimiento. Sin embargo, el diseño de toda modificación estructural o la adición de nuevos elementos estructurales debe sin duda cumplir con las reglamentaciones de diseño y construcción vigentes en cada región.

1.1 El contexto

POCRISC: el proyecto

Esta guía es una contribución del proyecto “POr una Cultura común del Riesgo SísmiCo” (POCRISC), de referencia EFA158/16/POCRISC¹, que se realiza en el marco de los proyectos Interreg-POCTEFA² de la Unión Europea. El proyecto fue concedido en la segunda convocatoria de proyectos Interreg V España-Francia-Andorra, por un período de 3 años (2018-2020), habiéndose prorrogado hasta el 31 de diciembre de 2021. En el formulario de candidatura (EFA 2017), se describen los antecedentes, objetivos, acciones, tareas y resultados esperados. POCRISC da continuidad a proyectos anteriores en la misma zona

¹ Proyecto POCRISC-EFA 158/16: <https://pocrisc.eu/es> (último acceso: 11 de febrero de 2022)

² POCTEFA: Acrónimo del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra, que es un programa europeo de cooperación transfronteriza creado para promover el desarrollo duradero de los territorios fronterizos de los tres países. <https://www.interreg-alert.eu/poctefa/> (último acceso: 10 de marzo de 2021).

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

POCTEFA, siendo el proyecto SISPy³ el antecesor más reciente en la misma región EFA. Los principales retos de POCTEFA son:

- La evaluación de los posibles daños y su impacto en la población de las zonas afectadas,
- El desarrollo de medidas de reducción del impacto, y
- Una ayuda a la gestión de una crisis sísmica de gran importancia.

La propuesta es “contribuir a estas necesidades aportando herramientas de ayuda a la gestión de emergencias sísmicas y promoviendo la difusión de una información común en Andorra, Cataluña y Occitania, creando así una cultura común del riesgo sísmico que podrá ser extensible al conjunto de la zona pirenaica”. De hecho, los resultados podrán ser extensibles a toda la zona elegible POCTEFA (Figura 1-1).



Figura 1-1. Zona elegible POCTEFA.

Fuente: <https://www.poctefa.eu/wp-content/uploads/2016/02/mapa-POCTEFA-JPG.jpeg>

La acción 4

La Acción 4 de POCTEFA se dedica a la “Reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales” y persigue “dotar a protección civil, a los servicios técnicos de autoridades regionales y locales, y a los profesionales, de un marco metodológico y de herramientas prácticas para la evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica de los edificios esenciales”. Esta guía se enmarca en la actividad A4.2 que consiste en la “implementación de métodos y herramientas para evaluar la vulnerabilidad, establecer una jerarquización y definir acciones prioritarias para su reducción”. Más concretamente, “persigue ayudar a la toma de decisiones para la reducción de la vulnerabilidad”, y, en este sentido, se “redactarán dos guías: una (E4.2.1) para evaluación de la vulnerabilidad; otra (E4.2.3) sobre acciones para su reducción”. Este documento hace referencia al E4.2.3: guía para la reducción de la vulnerabilidad y se complementa con los otros dos entregables de la actividad A4.2, concretamente con el E4.2.1. Guía para la evaluación de la vulnerabilidad y el E4.2.2. Herramienta web para estimar el nivel de seguridad sísmica de un edificio. Los objetivos específicos de las guías para la caracterización y reducción de la vulnerabilidad son: “OE1:

³ Proyecto SISPy. <http://www.sispyr.eu/?lang=es> (último acceso: 11 de febrero de 2022)

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Desarrollar herramientas para gestionar el riesgo sísmico. Estimar la seguridad sísmica de edificios esenciales. Garantizar la adecuación de desarrollos a necesidades operativas. OE2. Publicar recomendaciones para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Mejorar el conocimiento del fenómeno sísmico de los grupos objetivos. OE3. Compartir experiencias sobre gestión transfronteriza de crisis. Realizar talleres de intervención post sísmica, utilizando herramientas desarrolladas”. Así, la actividad A4.2 persigue proporcionar “Ayuda a la toma de decisiones para la reducción de la vulnerabilidad de edificaciones” y, para ello, “Se desarrollarán dos guías de ayuda a la toma de decisión respecto a las acciones más eficaces para reducir la vulnerabilidad. La primera ayudará a evaluar la vulnerabilidad de un edificio y la segunda recomendará medidas para reducir la vulnerabilidad.”

1.2 A quien se dirige

Los grupos objetivo

POCRISC se dirige a los siguientes 4 grupos objetivo:

- GO1: Autoridad regional incluyendo, autoridades regionales de gestión de emergencias, servicios de protección civil y servicios de socorro
- GO2: Autoridad local, incluyendo autoridades y servicios municipales
- GO3: Población en general
- GO4: Servicios de prevención y planificación de riesgos en Francia.

El ámbito geográfico

Aunque POCRISC cuantifica estos grupos objetivo atendiendo a las regiones de actuación del proyecto, las instituciones y personas para quienes puede ser útil esta guía trasciende este ámbito geográfico, entendiendo así que esta guía se dirige a autoridades y servicios con responsabilidad en la evaluación, prevención y gestión del riesgo, incluyendo todo el personal involucrado en la planificación y gestión de emergencias y en la protección a la población. También a la población en general. Un mejor conocimiento y una mayor conciencia de la dimensión real del riesgo es un primer paso hacia la prevención y protección.

Los edificios esenciales

Por otra parte, la guía focaliza en edificios esenciales, entendidos como aquellos que tienen una función especial en una emergencia, incluyendo hospitales, escuelas, edificios que albergan centros estratégicos para la gestión de emergencias, como son los servicios de protección civil y de socorro. En consecuencia, esta guía se dirige también al personal implicado en la dirección, administración, gestión y, en general, en el normal funcionamiento de estos centros. Es decir, aunque a niveles distintos, dependiendo de su nivel de responsabilidad, a todos los trabajadores, pero, y en particular, a los servicios de mantenimiento y a los logísticos, que, por ejemplo, en el caso de hospitales, deben hacer posible el normal funcionamiento de las actividades de medicina y enfermería.

2 CONCEPTOS BÁSICOS DE REHABILITACIÓN SÍSMICA

2.1 Rehabilitación Sísmica de Edificios

Por rehabilitación sísmica se entiende la modificación de elementos estructurales y no estructurales, o de la estructura global, para elevar o mejorar su nivel de comportamiento frente a movimientos sísmicos. Continuamente se desarrollan técnicas y reglamentos para la adecuada rehabilitación estructural en diferentes países, a medida que las poblaciones van tomando conciencia de la importancia de la protección sísmica de los edificios esenciales. Es importante recalcar que los métodos de rehabilitación sísmica, en muchos casos, pueden provocar un daño irreparable en la estructura existente, o suponer unos costos prohibitivos, por lo que la selección de la técnica de rehabilitación debe ser realizada por profesionales con el conocimiento y la experiencia técnica suficientes en esta materia.

2.2 Seguridad estructural

Para que una edificación cumpla las funciones para las que fue construida, debe satisfacer ciertos criterios ingenieriles que garanticen la exigencia de aptitud al servicio y la de resistencia y estabilidad. En principio, el *margen de seguridad* de una estructura puede entenderse como “el exceso” o “la reserva” de resistencia en relación con las cargas máximas estimadas que pueden actuar sobre ella. En otras palabras, una estructura se considera segura si las cargas máximas estimadas no exceden su resistencia; son los denominados “estados límite últimos” por los códigos estructurales. Por otro lado, la aptitud al servicio se refiere a las condiciones que la estructura debe ofrecer para no interferir con el uso que le den sus ocupantes. Se expresa en términos de límites de respuesta estructural (deformaciones o esfuerzos) bajo cargas normales de funcionamiento, distantes e inferiores a las cargas máximas esperadas. Cuando se establece que la estructura existente no cumple con algunas de las exigencias requeridas, el planteamiento de un proyecto de rehabilitación se hace necesario.

La aptitud al servicio estructural se vuelve un aspecto importante en estructuras esenciales, donde la continuidad de las actividades de los ocupantes debe garantizarse durante y posteriormente a un evento sísmico, como es el caso de las instalaciones hospitalarias. Por otro lado, en ciertas estructuras el deterioro de los materiales debido a sobrepasar los límites de servicio, puede conllevar a la reducción del margen de seguridad o incluso al colapso, como es el caso de los puentes.

En la ingeniería sísmica el margen de seguridad abarca altos niveles de incertidumbre ya que, aunque tengamos buenos conocimientos del comportamiento de las estructuras, la intensidad y la duración de las sollicitaciones sísmicas son actualmente difíciles de precisar. Además de esto, las sollicitaciones sísmicas inducen fuerzas en las estructuras que, rápidamente, sobrepasan los estados límites de servicio (o funcionamiento), por lo que es común que éstas queden dañadas después de un evento sísmico. Un diseño que asegure una estructura sin daños frente a movimientos sísmicos es generalmente inviable, considerando los costos de construcción de la actualidad. Debido a estas razones, los requerimientos sísmicos usualmente establecen “niveles de comportamiento” o “niveles de desempeño”, dependiendo de si se requiere que la estructura experimente daños pero que se mantenga con cierto grado de servicio, o si solo se espera que no llegue al colapso ante un evento sísmico. La diferencia entre el nivel de servicio y el nivel de comportamiento se entiende entonces como el “margen de seguridad”.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Algunas situaciones que interfieren con la resistencia y la aptitud al servicio estructural son los siguientes:

- La estructura no cumple con los requerimientos sísmicos del código (porque fue construida antes de su vigencia, por ejemplo).
- Las solicitaciones no fueron estimadas adecuadamente.
- Los materiales utilizados no fueron los adecuados.
- Procesos de construcción defectuosos.
- Factores ambientales que conllevan al deterioro de los materiales.
- Modificaciones a la estructura no previstas en el momento de su diseño (usos, ampliaciones, cambios de uso, etc.).

Cuando se establece que algún margen de seguridad se reduce, por alguna de las razones arriba mencionadas, las condiciones de la estructura deben ser mejoradas con acciones de reparación y/o refuerzo, utilizando principios técnicos e ingenieriles que garanticen además la viabilidad económica de la intervención.

2.3 Reglamentos Sísmicos

Los reglamentos sísmicos que sirven de base a la concepción de proyectos de rehabilitación estructural pueden clasificarse en dos tipos:

Reglamentos basados en niveles de comportamiento

Son guías y criterios que se han desarrollado para la evaluación y rehabilitación de estructuras, de acuerdo con el nivel de comportamiento esperado por el proyectista. Los documentos más representativos son el FEMA 547 “Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings”, y el (ASCE/SEI 41-06, 2007) “Seismic Rehabilitation of Existing Buildings”. Estos documentos son el resultado de proyectos de investigación propiciados por el sismo de Northridge de 1994, en Estados Unidos, que, si bien no causó el colapso de muchas estructuras, éstas quedaron en un estado que no permitía la continuación de su uso, y muchas de ellas terminaron por ser demolidas.

Reglamentos normativos

Éstos se encuentran en los códigos o normas de construcción, de obligatorio cumplimiento; se caracterizan por ser especificaciones rigurosas que se deben garantizar de acuerdo con el nivel de peligrosidad sísmica, también establecido en los códigos. Sin embargo, los códigos de construcción no son predictivos, es decir, no determinan el nivel de comportamiento que tendrá una estructura existente, y, por tanto, deben usarse con cuidado para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Con frecuencia el uso de códigos de construcción para estructuras nuevas en proyectos de rehabilitación sísmica conduce a soluciones menos eficaces y antieconómicas.

Los reglamentos actuales en la región del proyecto son:

- España:
 - NCSE-02 Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación. 27/09/2002.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

- Francia:
 - NF EN 1998-1 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 1: règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments.
 - NF EN 1998-1 N/A Annexe nationale à la NF EN 1998-1:2005.
 - NF P 06-014/A1 Règles de construction parasismique. Construction parasismique des maisons individuelles et des bâtiments assimilés — Règles PS-MI 89 révisées 92
- Andorra:
 - Se aplica la norma francesa o española según el criterio del proyectista y del promotor.

2.4 Comportamiento Sísmico

Diseño sismorresistente

La mayoría de los códigos de diseño sísmico establecen como filosofía general de diseño sismorresistente, que la seguridad de las vidas humanas sea la consideración más importante en el proyecto de un edificio (ATC-3-06, 1978). En este sentido, los requisitos y recomendaciones de los códigos pretenden dar prescripciones de diseño que permitan a la mayoría de los edificios cumplir con las siguientes características:

- Resistir sin daño sismos pequeños.
- Resistir sismos moderados sin que haya daño estructural de importancia, siendo admisibles daños en elementos no estructurales.
- Resistir un sismo fuerte sin defectos graves del sistema estructural del edificio, sus elementos componentes o equipos, manteniendo la seguridad de las vidas humanas. Además, se debe disponer de criterios de proyecto que les permitan a ciertas instalaciones esenciales permanecer en funcionamiento durante y después del sismo, para la seguridad y bienestar del público, en caso de una emergencia.

De esta manera, se pretende garantizar en la mayoría de las estructuras, un adecuado margen de seguridad y una razonable economía en la construcción, a costa de tolerar cierta cantidad de daño como consecuencia de un terremoto.

Importancia de la edificación

Establecer la importancia del edificio es un paso clave en el proyecto de rehabilitación. La importancia determina el objetivo de la rehabilitación, y el nivel de daños asumido durante futuros terremotos. La importancia del edificio se puede establecer considerando los siguientes puntos:

- Identificando características particulares del edificio, como:
 - Uso, incluyendo si el edificio es necesario en caso de emergencias.
 - Número de ocupantes.
 - La importancia de las personas que ocupan el edificio.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

- Valor social de los materiales dentro del edificio.
- El tiempo de servicio que le queda a la estructura.
- Daños potenciales a los equipos dentro del edificio.
- La clasificación que la comunidad da al edificio (a nivel nacional, regional y local).
- Considerando las consecuencias sociales, si el edificio sufre daños.

En la Tabla 4.3 del Eurocódigo 8 (EN_1998-1) se dan las siguientes definiciones de clases de importancia:

- Clase de importancia I: Edificios de importancia mínima para la seguridad pública, por ejemplo, edificios agrícolas, etc.
- Clase de importancia II: Edificios corrientes, no pertenecientes a las demás categorías.
- Clase de importancia III: Edificios cuya sismo-resistencia es importante, considerando las consecuencias asociadas con su colapso, por ejemplo, colegios, salas de reunión, instituciones culturales, etc.
- Clase de importancia IV: Edificios cuya integridad durante los terremotos es de vital importancia para la protección civil, por ejemplo, hospitales, parques de bomberos, centrales eléctricas, etc.

Descripciones más detalladas se dan en la Tabla 2-1 de la Guía para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales (E4.2.1).

Una vez la importancia del edificio se ha establecido, se dispone de un criterio cualitativo para orientar la selección del objetivo de la rehabilitación, por ejemplo:

- Para edificios de vital importancia o esenciales: rehabilitación especial o deseable.
- Para edificios de importancia o necesidad moderada: rehabilitación básica o deseable.
- Para edificios de ordinaria o normal importancia: rehabilitación básica.
- Para edificios de menor importancia: sin rehabilitación.

Niveles de comportamiento

Los niveles de comportamiento son estados discretos de daño que han sido seleccionados de un espectro infinito de estados de daño que se pueden dar en una estructura, bajo el efecto de terremotos. Los niveles de comportamiento seleccionados son aquellos con los que se relacionan consecuencias post-sismo fácilmente identificables, y suelen expresarse en términos cualitativos de significación pública (impacto en ocupantes, usuarios, etc.) y en términos técnicos ingenieriles para el proyecto o evaluación de edificaciones existentes (extensión del deterioro, degradación de elementos estructurales o no estructurales, etc.) (SEAOC, 1995).

La propuesta de (FEMA-356, 2000) especifica separadamente *el nivel de comportamiento para la estructura y el nivel de comportamiento para los elementos no estructurales*, de manera que su combinación conduce a la definición del *nivel de comportamiento de la edificación*.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Niveles de comportamiento para la estructura

Describen los posibles estados de daño sobre la estructura. Para tal fin, se definen tres estados de daño discretos o límites: inmediata ocupación, seguridad y estabilidad estructural, y dos rangos intermedios: daño controlado, y seguridad limitada, los cuales se designan con la abreviación SP-n, (“Structural Performance”, donde n es un número).

SP-1. Inmediata ocupación: daño estructural muy limitado, el peligro para la vida es despreciable y la edificación se mantiene funcionando en su totalidad.

SP-2. Daño controlado: la vida de los ocupantes no está en peligro, aunque es posible que éstos sean afectados.

SP-3. Seguridad: posible daño significativo a la estructura, pero no extendido. Peligro contra la vida de los ocupantes interiores y exteriores e incluso, puede haber afectados. Costos elevados asociados a las reparaciones estructurales.

SP-4. Seguridad limitada: estado de daño estructural con alto peligro para los ocupantes.

SP-5. Estabilidad estructural: el sistema estructural está en el límite de experimentar un colapso parcial o total. Significativa degradación de rigidez y resistencia del sistema resistente a cargas laterales. Existe un elevado peligro para ocupantes y transeúntes, así como un peligro elevado en caso de réplicas. Será necesario hacer reparaciones estructurales significativas.

SP-6. No considerado: se limita a considerar el comportamiento de los elementos no estructurales.

Nivel de comportamiento para los elementos no estructurales

Describe los posibles estados de daño de los elementos no estructurales. Para tal fin, se definen cuatro estados de daño: operacional, inmediata ocupación, seguridad, y peligro, los cuales se designan con la abreviación NP-n (“Nonstructural Performance”, donde n designa una letra).

NP-A. Operacional: después del sismo, los sistemas, equipos y elementos no estructurales permanecen sin daño y en servicio.

NP-B. Inmediata ocupación: los sistemas y elementos no estructurales permanecen en su sitio, con pequeñas interrupciones, pero funcionales. Se mantiene un estado de seguridad para los ocupantes.

NP-C. Seguridad: contempla considerable daño en sistemas y elementos no estructurales, pero sin colapso o interrupción de éstos, que pueda atentar, seriamente, contra los ocupantes. El equipamiento y las maquinarias pueden quedar fuera de servicio.

NP-D. Peligro: incluye importante daño en los sistemas y elementos no estructurales, pero sin colapso de los grandes y pesados elementos que pongan en peligro a grupos de personas. Alto peligro contra la vida.

NP-E. No considerado: se limita a considerar el comportamiento de los elementos estructurales.

Nivel de comportamiento de la edificación

Estos niveles de comportamiento se obtienen de la apropiada combinación de los niveles de comportamiento de la estructura y de los elementos no estructurales. La Tabla 2-1, muestra

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

las posibles combinaciones, donde se han destacado e identificado los cuatro niveles de comportamiento de edificaciones más comúnmente referenciados; operacional (1-A), inmediata ocupación (1-B), preservación de vidas (3-C) y estabilidad estructural (5-E), así como otros niveles de comportamiento posibles (2-A, 2-B, etc.). La designación NR corresponde a niveles de comportamiento “No Recomendables”, en el sentido que no deben ser considerados en la evaluación.

Tabla 2-1. Niveles de comportamiento de la edificación.
Fuente: (FEMA-356, 2000)

	SP-1 Inmediata Ocupación	SP-2 Daño Controlado (rango)	SP-3 Seguridad	SP-4 Seguridad limitada (rango)	SP-5 Estabilidad estructural	SP-6 No considerado
NP-A Operacional	1-A Operacional	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B Inmediata Ocupación	1-B Inmediata Ocupación	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C Seguridad	1-C	2-C	3-C Preserv. de vidas	4-C	5-C	6-C
NP-D Peligro	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E No Considerado	NR	NR	3-E	4-E	5-E Estabilidad estructural	No Aplicable

Estos niveles de comportamiento están asociados a las siguientes descripciones:

1-A. Operacional: Los daños en elementos estructurales son limitados. Los sistemas y elementos no estructurales permanecen funcionando. Se mantiene la seguridad de los ocupantes.

1-B. Inmediata ocupación: corresponde al criterio más usado para edificaciones esenciales. Los espacios de la edificación, los sistemas y los equipamientos permanecen utilizables. Se mantienen en funcionamiento los servicios primarios. Se mantiene la seguridad de los ocupantes.

3-C. Preservación de vidas: estado de daños que presenta una baja probabilidad de peligro contra la vida. Daños limitados en los elementos estructurales y el eventual fallo o colapso de los elementos no estructurales, con posibilidad incluso de fallo en algún elemento estructural y en alguno de los elementos primarios (servicios de agua, electricidad, etc.) y secundarios (acabados, fachadas, etc.).

5-E. Estabilidad estructural: no queda reserva alguna del sistema resistente a carga lateral que permita soportar una réplica, sólo se mantiene cierta capacidad del sistema resistente a cargas verticales para mantener la estabilidad de la estructura, de manera que el peligro contra la vida es muy alto. El peligro de los ocupantes y transeúntes por el colapso o fallo de elementos no estructurales requiere el desalojo de la edificación.

2.5 Peligro sísmico

Para satisfacer los márgenes de seguridad impuestos en estructuras que pueden tolerar cierto grado de daño, como podrían ser las edificaciones convencionales, se definen los siguientes terremotos característicos:

1. Terremoto de diseño asociado al nivel de servicio, durante el cual el sistema completo (suelo, cimientos, estructura y elementos no estructurales) debería permanecer sin daño alguno; es decir, en el rango elástico.
2. Terremoto de diseño asociado al nivel funcional u operacional, durante el cual el sistema completo podría sufrir algún daño no estructural e incluso estructural, pero sin interrumpir su funcionamiento u operación.
3. Terremoto de diseño asociado al nivel de seguridad o supervivencia, durante esta condición extrema, el edificio no debería sufrir daño que pueda poner en peligro las vidas humanas, ni colapsar.

En el caso de las edificaciones esenciales, estas instalaciones deberían proyectarse de manera tal que se garantizase su funcionamiento después de pequeños, moderados y grandes terremotos, de alta, ocasional y baja frecuencia, respectivamente. Ello implica que, ante los diferentes terremotos de diseño, su respuesta debería permanecer prácticamente en el llamado rango elástico. En este sentido, la tendencia actual está orientada al llamado diseño por multiobjetivo, según el cual, las edificaciones deben alcanzar determinados niveles de comportamiento esperado para diferentes niveles del movimiento sísmico (ATC-40, 1996; Freeman et al., 1984; SEAOC, 1995).

Niveles de peligro sísmico

De acuerdo a la propuesta del (FEMA-356, 2000) se pueden definir tres niveles de peligro sísmico correspondiente a movimientos sísmicos identificados como:

Sismo de Servicio (SS)

Correspondiente a movimientos de baja a moderada intensidad, de ocurrencia frecuente, generalmente asociados con un 50% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años, con un período medio de retorno de aproximadamente 72 años, de manera que puede llegar a ocurrir varias veces durante la vida útil de una edificación.

Sismo de Diseño (SD)

Correspondiente a movimientos de moderada a severa intensidad, de ocurrencia poco frecuente, generalmente asociados con un 10% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años, con un período medio de retorno de aproximadamente 475 años. Se corresponde con el nivel de movimiento, tradicionalmente especificado por la mayoría de los códigos de diseño para edificaciones convencionales.

Sismo Máximo (SM)

Correspondiente a movimientos de intensidad entre severos o muy severos, de muy rara ocurrencia, generalmente asociados con un 5% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años, con un período medio de retorno de aproximadamente 975 años. Se corresponde

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

con el nivel de movimiento tradicionalmente especificado por los códigos de diseño para edificaciones esenciales.

Solicitaciones sísmicas

Una vez que el nivel de peligro sísmico se ha seleccionado, este peligro debe expresarse en cantidades físicas que puedan traducirse en solicitaciones/cargas para el análisis de la respuesta estructural. Estas solicitaciones se suelen expresar de varias formas, dependiendo del tipo de análisis estructural deseado:

Espectro de diseño estándar

La construcción de este espectro está especificada en el código sísmico local. Usualmente se basa en el uso de mapas de aceleración sísmica máxima para diferentes períodos de retorno (o frecuencia de ocurrencia de los terremotos), y requiere además la clasificación del tipo de suelo representativo del emplazamiento de la estructura.

Espectro de diseño para un sitio específico

Este espectro se construye para un nivel de peligro sísmico específico, en casos de rehabilitación especial, y es influenciado por los siguientes factores:

- Condiciones del sitio, tipo de suelo.
- Magnitud del terremoto.
- Distancia de la falla geológica al sitio (si hay en un radio de 100 km).
- Método especial de evaluación del peligro sísmico.

Un espectro de diseño para un sitio específico requiere de la revisión independiente de un experto en evaluación de peligro sísmico.

Acelerogramas

Las historias de aceleración o acelerogramas son necesarias para análisis sísmico de estructuras de tipo dinámico. Usualmente se utiliza un mínimo de 3 acelerogramas representados en 3 componentes espaciales ortogonales (dos horizontales y uno vertical), como se ilustra en la Figura 2-1. Los acelerogramas deben haber sido registrados durante tres eventos distintos cuya magnitud, distancia a la fuente, y mecanismo focal, sean equivalentes al sismo de diseño. En caso de no disponer de acelerogramas registrados durante terremotos, se pueden usar acelerogramas a partir de simulaciones numéricas con un contenido espectral y duración equivalentes.

Si se usan solo tres acelerogramas en el análisis estructural, se adoptan los valores máximos de los parámetros que cuantifican la respuesta estructural para evaluar los márgenes de seguridad. Si se usan siete o más acelerogramas, se puede usar el valor promedio de los parámetros de respuesta estructural para evaluar los márgenes de seguridad.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

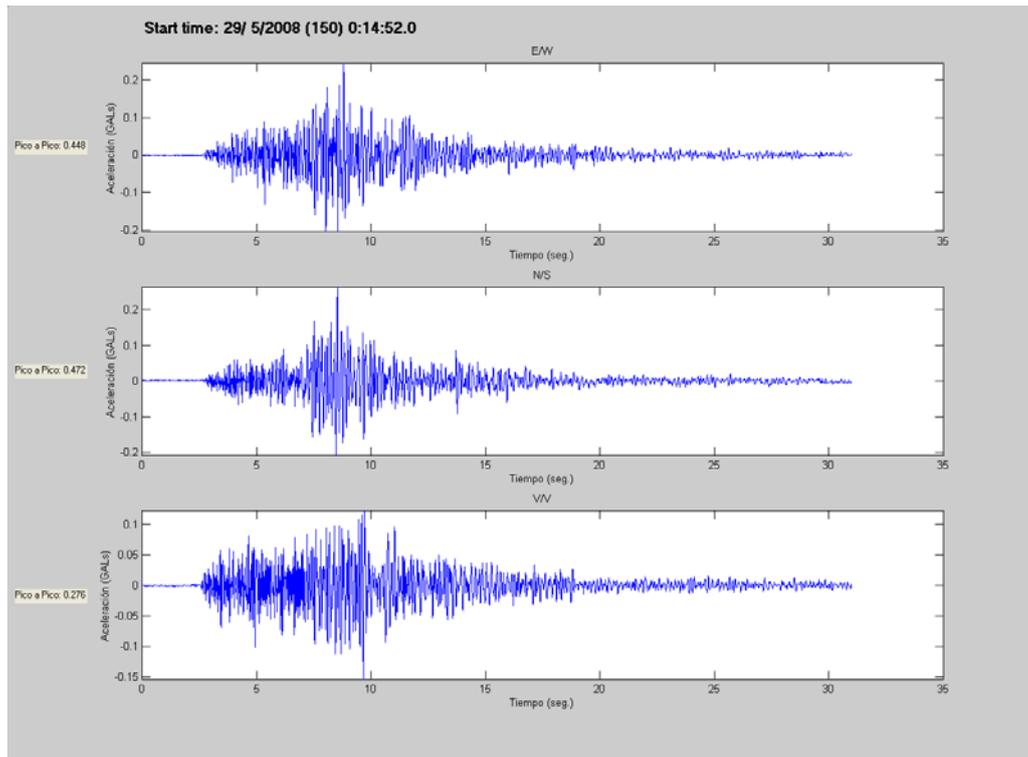


Figura 2-1. Ejemplo de acelerogramas de 3 componentes.

2.6 Objetivos de rehabilitación

El objetivo del proyecto de rehabilitación determina su costo y viabilidad, considerando en qué proporción los daños materiales se reducirán, y la interrupción del funcionamiento del edificio durante futuros terremotos. El propietario o usuario de la edificación define el objetivo del proyecto de rehabilitación. Esta selección depende básicamente de consideraciones funcionales, políticas, económicas y de preservación. Considerando que un proyecto de rehabilitación requiere mayor flexibilidad que un proyecto de edificación nueva, el objetivo del proyecto de rehabilitación puede consistir de una o varias *metas de rehabilitación*. Cada meta está compuesta a su vez, de un nivel de comportamiento (ver sección 2.4) y un nivel de peligro sísmico (ver sección 2.5). Dado que los conceptos de diseño por comportamiento no son muy conocidos, éstos deben ser bien explicados al propietario, o usuario del edificio antes de la toma de decisiones.

En (FEMA-356, 2000) se definen los siguientes objetivos de rehabilitación:

Objetivo Básico de Seguridad

Con este objetivo se espera que las edificaciones resulten poco dañadas durante sismos moderados/frecuentes, pero puede ocurrir un daño mayor y más extendido, junto con pérdidas económicas importantes, durante los sismos más severos/infrecuentes. El nivel de daño de un edificio rehabilitado con este objetivo puede ser mayor que el esperado en una estructura nueva.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

El objetivo básico de seguridad implica una rehabilitación orientada a dos metas:

- 1) Nivel de comportamiento de preservación de vidas (3-C) con un nivel de peligro sísmico SD.
- 2) Nivel de comportamiento de estabilidad estructural (5-E) con un nivel de peligro sísmico SM.

Objetivos Ampliados de Rehabilitación

Cuando el objetivo de la rehabilitación excede el objetivo básico de seguridad, se denomina Objetivo Ampliado. Los objetivos ampliados de rehabilitación se pueden definir con uno, o una combinación de los siguientes métodos:

1. Seleccionando niveles de comportamiento que exceden los del objetivo básico de seguridad para niveles de peligro SD o SM, o ambos.
2. Seleccionando niveles de comportamiento que corresponden al objetivo básico de seguridad, pero usando niveles de peligro que exceden los niveles de peligro SD o SM, o ambos.

Objetivos Limitados de Rehabilitación

Cuando el objetivo del proyecto de rehabilitación es un comportamiento inferior al objetivo básico de seguridad, se denomina Objetivo Limitado. Los objetivos limitados deben en todo caso cumplir las siguientes condiciones:

- El resultado del proyecto de rehabilitación no reduce el nivel de comportamiento actual del edificio existente.
- Las medidas de rehabilitación no aumentarán la irregularidad de la estructura.
- Los cambios en el edificio no incrementarán las fuerzas sísmicas en algún elemento, ni reducirán su capacidad para resistirlas.
- Todo elemento rehabilitado o añadido a la estructura debe cumplir los detalles de armado según los estándares adoptados para la rehabilitación.

Objetivos Reducidos de Rehabilitación

Un Proyecto de rehabilitación que incluye intervenciones en todo el Sistema estructural y no estructural, pero que adopta un peligro sísmico, o nivel de comportamiento inferior al objetivo básico de seguridad, tiene un objetivo reducido de rehabilitación. Los objetivos reducidos pueden adoptar una o más de las siguientes opciones:

- Nivel de comportamiento de preservación de vidas para demandas sísmicas inferiores a SD.
- Nivel de comportamiento de estabilidad estructural para demandas sísmicas que son inferiores a (más probables que) SM.
- Niveles de comportamiento 4-C, 4-D, 4-E, 5-C, 5-D, 5-E, 6-D, o 6-E con demanda sísmica SD o inferior (o más probable).

La Tabla 2-2 muestra posibles combinaciones para definir los objetivos de rehabilitación:

- Objetivo Básico de Seguridad: “k” y “p”.
- Objetivos Ampliados: “k” y “p” y cualquiera de “a”, “e”, “i”, “b”, “f”, “j”, “n”.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

- Objetivos Ampliados: “o”, “n” o “m”.
- Objetivos Limitados: “k”, “p”.
- Objetivos Limitados: “c”, “g”, “d”, “h”, o “l”.

Tabla 2-2. Combinaciones de metas para objetivos de rehabilitación.
Fuente: (FEMA-356, 2000)

		Niveles de comportamiento			
		Operacional (1-A)	Inmediata Ocupación (1-B)	Preservación de vidas (3-C)	Seguridad Estructural (5-E)
Nivel de Peligro Sísmico	Sismo Frecuente 50% - 50 años	a	b	c	d
	Sismo Ocasional 20% - 50 años	e	f	g	h
	Sismo Raro ~10% - 50 años	i	j	k	l
	Sismo Muy Raro ~5% - 50 años	m	n	o	p

3 DIAGNÓSTICO DEL ESTADO GENERAL DE LA ESTRUCTURA

El uso de reglamentos sísmicos es solo una parte del proceso de la evaluación sísmica de una estructura. Una evaluación completa requiere que el autor del diagnóstico recoja información que permita la descripción general del edificio. En esta etapa el objetivo es evaluar la calidad de la estructura basándose en criterios ingenieriles y en la información disponible. Al final se obtendrá una lista de verificación de puntos revisados durante la inspección del edificio, y una lista de pruebas a realizar.

3.1 Historia, uso futuro y ubicación

La historia de la estructura es una cuestión importante en la evaluación de su condición actual, pues permite identificar qué tipo de modificaciones pueden haber ocurrido durante el período de vida del edificio. Se podría construir una lista de información con los siguientes puntos:

- Planos de ejecución del edificio.
- Año de proyecto.
- Códigos o normas vigentes cuando se proyectó.
- Revisión de los cálculos del proyecto.
- Identificación del supervisor.
- Fecha de inicio y final de la construcción.
- Duración de las diferentes etapas de la construcción.
- Duración de las diferentes etapas del funcionamiento del edificio: cambio de uso privado a público y viceversa.
- Uso principal del edificio: cambio de uso residencial a escolar, cambio de uso residencial a comercial, etc.
- Modificaciones potenciales hechas, y/o por hacer, a la estructura.
- Identificación de lesiones y reparaciones hechas en elementos estructurales, no estructurales y en conexiones.
- Capacidad, en términos de ocupantes, de la estructura.
- Fenómenos naturales soportados: tormentas, inundaciones, sismos...
- Estudio geotécnico.

3.2 Investigación de las condiciones del sitio

Las condiciones del sitio deben investigarse para identificar peligros potenciales durante el proceso de rehabilitación y durante el uso futuro de la estructura. Entre las condiciones que deben identificarse podemos mencionar:

- El área urbana y las coordenadas de ubicación de la estructura.
- La existencia de pendientes de terreno pronunciadas.
- La existencia de fallas geotécnicas y su distancia a la estructura. Determinar si se han producido desplazamientos de volúmenes de suelo recientes.
- La existencia de fallas geológicas cercanas a la estructura y el peligro de que ocasionen desplazamientos de terreno permanentes.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

- Peligro de licuefacción: los daños por licuefacción están entre los más frecuentemente observados durante eventos sísmicos. Ocurre cuando el suelo que soporta la estructura pierde la resistencia por corte y pasa a comportarse como un fluido, por lo que ya no puede soportar el peso de la estructura, y a veces, ni el peso propio (del suelo). Este fenómeno ocurre usualmente en áreas donde los suelos están en condiciones saturadas. La evaluación del peligro de licuefacción implica una historia de licuefacción en el área y la realización de pruebas de laboratorio con muestras de suelo.

3.3 Estado actual

Un resultado importante de esta fase es la preparación de planos arquitectónicos del edificio, bien detallados.

- Planta arquitectónica de los pisos, con detalles y particiones (tabiques y cerramientos de fachada).
- Planta de muros de carga del edificio.
- Planos de alzado en las direcciones principales del edificio, mostrando detalles arquitectónicos.
- Plano de los alrededores del edificio indicando las distancias con los edificios adyacentes.
- Planta de cubiertas detallando las pendientes y los aleros.
- Plano de ubicación de mobiliario pesado y de aparatos de instalación.

3.4 Puntos débiles y factores de riesgo del edificio

En esta parte de la evaluación se consideran diferentes aspectos, como las características globales de la estructura, y la identificación de elementos de los dos sistemas estructurales, el gravitatorio y el de fuerzas laterales. La designación de elementos estructurales que contribuyen eficazmente a la rigidez y capacidad de la estructura debe basarse en observaciones objetivas y en la revisión de planos existentes, para facilitar una rápida evaluación preliminar de la vulnerabilidad. Las características necesarias en este paso son:

Dimensiones y número de pisos

Las dimensiones indicarán si la estructura está dentro de los límites de comportamiento que se pueden predecir con los métodos de análisis disponibles. El comportamiento de edificios de gran extensión en planta o de gran altura, no es fácil de predecir con los métodos estándar de evaluación, y será necesario un modelado detallado de comportamiento estructural.

Sistema de cargas gravitatorias y de cargas laterales.

Es muy frecuente que estos dos sistemas compartan elementos constituyentes. El sistema de cargas gravitatorias se compone de todos los elementos que contribuyen a transmitir el peso de los forjados (incluyendo el peso de elementos fijos) al suelo portante. Estos elementos pueden ser vigas, losas, pilares, muros, cerchas, zapatas, losas de cimentación, etc.

El sistema de cargas laterales se compone de todos los elementos que resistirán las fuerzas que se generan cuando los cimientos de la estructura se desplazan durante un evento sísmico.

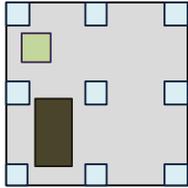
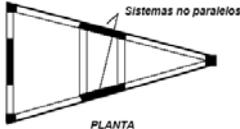
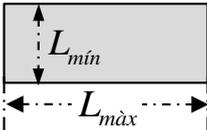
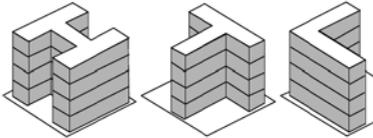
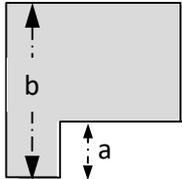
E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

En la sección 4.1 se presentan en detalle diversos sistemas de cargas frecuentes en la región POCRISC.

Irregularidad en planta

Está más relacionada con la transferencia, de un extremo a otro del edificio, de las cargas sísmicas, consideradas horizontales. Puede estar relacionada con la colindancia de elementos muy rígidos/masivos, que pueden transmitir grandes fuerzas sísmicas a elementos que no están proyectados para resistirlas.

*Tabla 3-1. Clases de irregularidad en planta, descripción de las clases y pictogramas explicativos.
Fuente: (Valcárcel et al., 2008).*

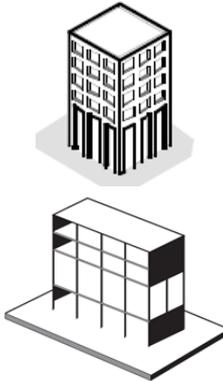
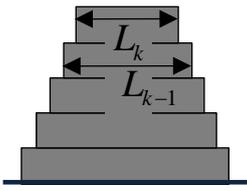
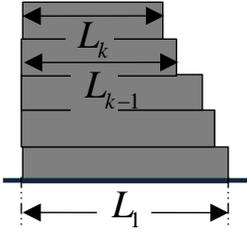
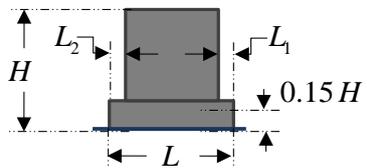
Valor	Descripción de la irregularidad	Gráfico explicativo
ALTA	La distribución en planta de los elementos estructurales y/o cargas no es simétrica respecto a ejes ortogonales.	
	La configuración arquitectónica en planta es asimétrica respecto a ejes ortogonales.	
	Cuando los edificios son muy alargados de forma que la relación entre la dimensión máxima y mínima de la planta es mayor o igual a 4. En la figura: $L_{m\grave{a}x}/L_{m\grave{m}n} \geq 4$.	
	La planta del edificio tiene forma de H, T, L o similar, y cualquiera de las partes que sobresalen supera el 20% de la dimensión total del edificio.	
MEDIANA	La irregularidad geométrica es apreciable, pero moderada. La dimensión de la parte saliente no excede el 20% de la dimensión total del edificio. En la figura: $a/b \leq 0.2$.	
BAJA	En cualquier otro caso. En estos casos, la distribución de masas y rigideces es simétrica respecto a dos ejes ortogonales y, en edificios rectangulares, el cociente entre la dimensión máxima y mínima de la planta es inferior a 4.	

Los criterios para establecer una clasificación de la irregularidad de la planta se han adaptado del código sísmico europeo (CEN, 2004), de la norma sísmica Colombiana (AIS, 1998) y de (Cardona, 1999). La Tabla 3-1 muestra las clases de irregularidad en planta según los niveles *Alto*, *Medio* y *Bajo*, así como su descripción, según Valcárcel et al., (2008).

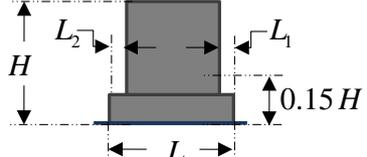
Irregularidad del edificio en altura

Está asociada con la variación de masas y rigideces entre las diferentes plantas del edificio. Los criterios para calificar la irregularidad en altura se resumen en la Tabla 3-2 y se han basado en el código sísmico europeo (CEN, 2004) y en el trabajo de (Cardona, 1999).

*Tabla 3-2.- Clases de irregularidad en altura.
Fuente: (Valcárcel et al., 2008).*

Clase	Descripción de la irregularidad	Gráficos explicativos
ALTA	La primera planta, o una planta superior, es más alta en comparación con las demás.	
	El edificio tiene discontinuidades y/o interrupciones de elementos resistentes verticales.	
MEDIANA	Hay retrocesos consecutivos, con simetría axial, cuyo ancho es igual o superior al 20 % de la longitud de la planta contigua. En la figura: $L_{k-1} - L_k \geq 0.2L_k \quad k = 2 \dots N$ N es el número de plantas del edificio.	
	Hay retrocesos que no preservan la simetría axial de forma que: a) La reducción del ancho de la planta es mayor o igual que el 10% del ancho de la planta contigua. b) La suma de todos los retrocesos es mayor o igual que el 30% del ancho de la primera. En la figura: $L_{k-1} - L_k \geq 0.1L_{k-1} \quad \text{y} \quad \sum_{K=2}^N (L_{k-1} - L_K) - L_1 \geq 0.3L_1$	
	En una altura inferior al 15% de la altura del edificio, existen retrocesos con simetría axial, cuyo ancho es mayor o igual que el 20% del ancho de la planta contigua. En la figura: $L_1 + L_2 \geq 0.2L$	

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

<p>En una altura superior al 15% de la altura del edificio, existen retrocesos con simetría axial, cuyo ancho es igual o mayor que el 50% del ancho de la planta contigua. En la figura: $L_1 + L_2 \geq 0.5 L$</p>	
<p>BAJA Todos los sistemas resistentes a cargas se distribuyen sin interrupciones desde la cimentación hasta la altura total del edificio. Tanto la rigidez lateral como las masas de cada nivel deben mantenerse constantes, sin presentarse cambios abruptos entre plantas contiguas.</p>	

Pilar corto

El efecto de pilar, o columna corta, es bien conocido en el mundo de la ingeniería sísmica, dado que es causa de daños relevantes en edificios sometidos a terremotos. Hablamos de este efecto cuando el pilar ha quedado parcialmente confinado a consecuencia de, por ejemplo, reformas para aprovechar plantas altas para crear altillos transitables. O tabiques de altura limitada, levantados para soportar ventanales, o ventanas elevadas que, eventualmente, pueden llegar hasta el techo (Figura 3-2). También se pueden producir pilares cortos como consecuencia de suelos inclinados. La Figura 3-1 muestra ejemplos de situaciones que pueden dar lugar a pilares cortos.

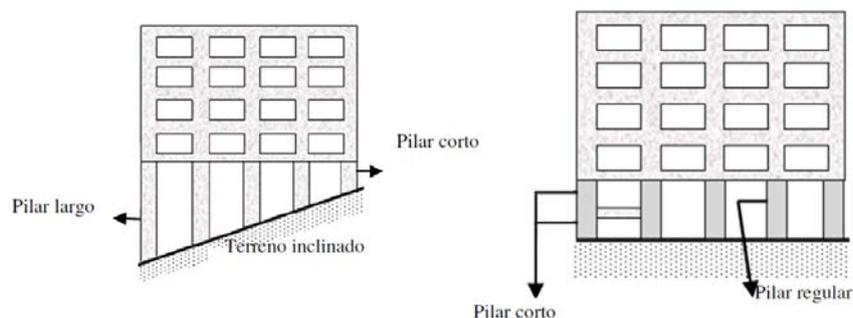


Figura 3-1. Ejemplos de situaciones que pueden producir pilares cortos y pilares largos.
Fuente: (Rojas, 2005)

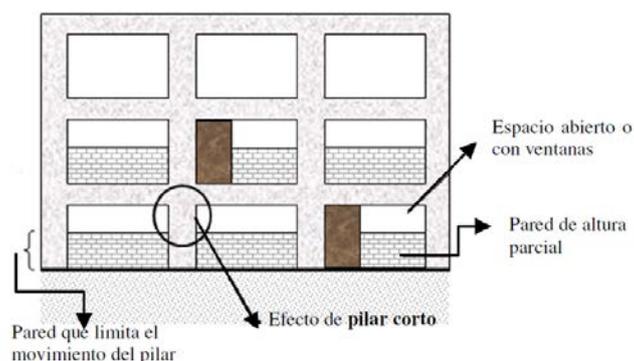


Figura 3-2. Ilustración de formación de un mecanismo típico de pilar corto.
Fuente: (Rojas, 2005)

En terremotos destructivos se observa cómo estos pilares cortos tienen la capacidad de concentrar mayores esfuerzos y son causa de daños mayores. De acuerdo con (Rojas, 2005), se considera que este efecto comienza a ser importante cuando la altura del pilar corto es inferior al 60% de la altura de la planta (Figura 3-2) y es muy relevante cuando la altura del

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

pilar es inferior al 30%, es decir, cuando la parte cautiva del pilar es superior al 70% de su altura total. La Figura 3-2 muestra un ejemplo de cómo se forma este mecanismo en un caso de ventanas elevadas.

En las figuras 3-3 y 3-4 se muestran ejemplos de daños a edificios que respondieron a movimientos sísmicos con mecanismo de pilar corto.



Figura 3-3. Daños por pilares cortos.

Fuente: https://twitter.com/mundo_hormigon/status/820991680451084288



Figura 3-4. Imágenes de daños por pilares cortos. Terremoto de Lorca. Fuente: Àlex Barbat.

Juntas y conexiones

Si el objetivo de las juntas es evitar la transferencia de cargas de una estructura a otra, debe revisarse que el espaciamiento sea el efectivo y que esté libre de obstáculos. También deben revisarse posibles conexiones no previstas con edificios adyacentes que impliquen una

respuesta estructural conjunta, que sea perjudicial y debilite las edificaciones, como se ilustra en la Figura 3-5.



Figura 3-5. Daños por falta de espaciado en la junta. Terremoto de México 1985. Fuente: http://www.johnmartin.com/earthquakes/eqshow/647003_08.htm

Localización de aberturas en forjados

Los forjados son elementos que pueden distribuir las cargas laterales durante sismos a los demás elementos (vigas o muros) del sistema estructural mediante el efecto diafragma. Grandes aberturas pueden reducir la capacidad del diafragma, teniendo como resultado la concentración de fuerzas sísmicas en elementos que no fueron proyectados para resistirlas.

Calidad de la ejecución

Una buena calidad de la ejecución de las obras es determinante para garantizar un comportamiento correcto de la estructura. Esta calidad es particularmente sensible en lo relativo a las conexiones de las construcciones de madera o metálicas, al armado de las zonas críticas de las estructuras de hormigón y a los nudos.

3.5 Características de los materiales

La evaluación de las características de los materiales que componen los elementos estructurales se hace de dos maneras:

- Inspección visual de la calidad de los materiales.
- Toma de muestras y pruebas de laboratorio.

Inspección visual de las características de los materiales

El objetivo de una inspección visual de los materiales es la evaluación inicial de la vulnerabilidad de la estructura. La inspección debe ser realizada por personal especializado en calidad de materiales de construcción, para dictaminar la presencia de posibles patologías.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Patologías en el hormigón

La degradación del hormigón puede tener diferentes orígenes:

- Depósitos salinos que han sido transportados por corrientes de agua, además de sal acumulada en poros y fisuras. Estos depósitos pueden acelerar y/o intensificar el proceso de corrosión de las armaduras.
- Errores de construcción: problemas en la colocación del hormigón pueden dar lugar a excesiva porosidad, fisuración, contaminación con otros materiales, insuficiente recubrimiento de las armaduras, etc.
- Cloruros: La presencia de cloruros degrada el recubrimiento de las armaduras, acelerando el proceso de corrosión.
- Sulfatos: los sulfatos pueden inducir cambios químicos en el cemento, debilitando la cohesión del hormigón.
- Carbonatación: se acumula carbonato de calcio en el hormigón debido al dióxido de carbono del aire. Reduce la alcalinidad del hormigón, imprescindible para proteger las armaduras de la corrosión. La carbonatación se identifica visualmente mediante el test de la fenolftaleína, pues la parte no carbonatada aparece con un color púrpura intenso, mientras que la carbonatada no cambia de color.

Patologías en el acero

En el acero el problema más importante a inspeccionar es la presencia de corrosión, y también, posibles errores de construcción.

- Corrosión: en edificaciones la corrosión se da frecuentemente por la exposición del acero al agua y la sal. Los elementos estructurales de acero interiores usualmente están protegidos de la corrosión. Los elementos expuestos a la intemperie deben revisarse, o donde hay corrientes de agua o evaporaciones. El acero en contacto con el suelo es muy susceptible a la corrosión, porque además, está expuesto a bacterias que la favorecen, especialmente en suelos arcillosos.
- Errores de construcción: las edificaciones de acero son en general muy resistentes a las sacudidas por sismos. Pero sin un riguroso control de calidad, la construcción puede conllevar a una estructura vulnerable, en particular con los problemas de alineación o desplomes. La integridad de las uniones debe revisarse, verificando que estén libres de fisuraciones y de soldaduras fracturadas.

Patologías en los materiales de fábrica

En este apartado nos referimos sobre todo a muros que están compuestos de ladrillos, bloques o elementos similares. Los daños en muros de mampostería son identificables a simple vista, por ejemplo:

- Ladrillos o bloques fracturados.
- Fisuras que atraviesan juntas y ladrillos.
- Fisuras que se propagan por las juntas.
- Muros mal alineados o con desplomes.
- Aberturas, u otros materiales, en lugar de ladrillos.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

El elemento que se considera más débil en elementos de mampostería es usualmente la junta de mortero, en especial si se usó una alta proporción de cal en el mortero, y ésta ha sido lavada por exposición a la intemperie. Los asentamientos de muros que han sido construidos con buen mortero generalmente ocasionan fisuras que se propagan por los ladrillos.

Patologías en la madera

La madera tiene una problemática específica de degradación, siendo especialmente sensible a:

- Agentes abióticos, que son los relacionados con factores ambientales, climáticos y meteorológicos. Causan deformaciones y desplazamientos (revirados, etc.), grietas (fendas), hinchamientos, etc., o su combustión en el caso del fuego.
- Agentes bióticos, que son organismos vivos, que alteran o degradan la madera, los más importantes porque se alimentan o viven en ella (xilófagos).

Toma de muestras y pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio son una fase muy importante en un proyecto de rehabilitación sísmica de estructuras. Después de la evaluación cualitativa/visual de las características del edificio, el especialista debe programar una cantidad suficiente de pruebas de laboratorio. En una estructura existente, la inspección y toma de muestras requiere actividades de perforación, y/o destrucción, en lugares que deben elegirse con cuidado para no debilitar ningún elemento de la estructura.

Las propiedades mecánicas de los materiales que se miden son: la resistencia a flexión/tracción/cortante/compresión, el módulo de elasticidad, el índice de plasticidad, la fatiga, resistencia al impacto, desgaste por fluencia, etc.

En la identificación de elementos estructurales, posiblemente deberán perforarse cimientos, pilares, nudos y vigas, para establecer las dimensiones y localización de las armaduras. Los métodos de toma de muestras pueden ser destructivos o no destructivos.

- Métodos destructivos: son métodos para medir las propiedades mecánicas de los materiales. Son más precisos que los métodos no destructivos. Estos métodos incluyen: extracción de testigos de hormigón, resistencia a tracción de armaduras, resistencia a cortante de mortero, resistencia a tracción/cortante/flexión del acero estructural y la resistencia a compresión de la fábrica.
- Métodos no destructivos: no requieren la destrucción del elemento, o ésta es muy limitada. Algunos métodos no destructivos son: líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonidos, radiografía, radiometría, “stress wave”, resistividad del hormigón, el esclerómetro (martillo Schmidt), etc.
- Pruebas de mecánica de suelos: para la caracterización mecánica del suelo portante de la estructura, se pueden realizar pruebas “in situ” y estudios geotécnicos.

3.6 Elementos no estructurales

Entre estos elementos no estructurales destacan los aparatos mecánicos y eléctricos, los elementos arquitectónicos, el propio contenido de la edificación y todos aquellos elementos que no forman parte del sistema estructural. La experiencia de sismos pasados pone en evidencia que si se considera el costo de reposición de los elementos no estructurales dañados, la seguridad de los ocupantes de la edificación y transeúntes, la pérdida que implica la suspensión de la función de algún elemento, la reducción de la capacidad de prestar el servicio, entonces, se comprenderá también, la importancia de considerar el adecuado diseño sísmico de estos elementos (Goltz, 1994).

Para las edificaciones esenciales, esta situación adquiere una relevancia especial, ya que si se reconoce que la funcionalidad de la edificación es un aspecto fundamental para la atención de las emergencias sísmicas, y ésta se vincula directamente con el mantenimiento de funciones de todos y cada uno de sus componentes, equipamientos y cualquier otro elemento que pueda atender contra ella, entonces también, debe prestarse especial atención a la protección de los elementos no estructurales, pues, su fallo puede conducir a la inutilización o colapso funcional del edificio (Bertero y Bertero, 1992).

Conviene clasificar los elementos no estructurales en función de su importancia relativa y probabilidad de fallo:

- Elementos arquitectónicos:
 - Paredes, tabiques, divisiones y muros no estructurales.
 - Antepechos, parapetos, ornamentos, cornisas, chimeneas.
 - Conexiones de elementos prefabricados, paneles de vidrio.
 - Techos, cielos rasos, plafones.
 - Subestructuras en voladizo, apéndices.
 - Repisas, letreros, anuncios.
- Elementos mecánicos y eléctricos:
 - Aparatos eléctricos de emergencia
 - Instalaciones contra incendio: detección, alarma y extinción.
 - Salas de máquinas, suspensión y guía de ascensores.
 - Sistemas de comunicación y emergencia.
 - Calderas, hornos, incineradores, calentadores.
 - Motores, transformadores, subestaciones.
 - Conductos, tuberías, bandejas eléctricas.
 - Aparatos de aire acondicionado y/o calefacción, ventiladores.
 - Depósitos a presión, depósitos de almacenamiento, redes de saneamiento.
 - Paneles de control, estantes de baterías.

4 CLASIFICACIÓN DE EDIFICIOS EXISTENTES

La clasificación de los edificios existentes se suele basar en los materiales constructivos, en el sistema básico resistente a cargas verticales y laterales, en los forjados, y en otras propiedades, entre las que destacan las características arquitectónicas y geométricas, relacionadas con su estética y con su configuración en planta y en altura. Con mayor o menor medida, todas estas características afectan a la respuesta sísmica de los edificios. En este capítulo se describen los principales sistemas resistentes, los materiales constructivos y los tipos de forjados, de uso frecuente en la construcción. Una clasificación más detallada se puede encontrar en el documento transversal dedicado a la matriz tipológica (Blázquez et al. 2022).

4.1 Sistemas resistentes a cargas

La estructura de un edificio es un conjunto de elementos que interactúan con el objetivo de distribuir y resistir las cargas internas y externas que se espera soporten durante su vida útil. El sistema resistente a cargas hace referencia al conjunto de elementos que conforman la estructura del edificio, así como a su distribución e interacción, para garantizar su estabilidad y resistencia frente a las acciones gravitatorias y eventuales fuerzas laterales. Pueden existir muchos sistemas resistentes a cargas, pero los más frecuentes cuando se habla de edificios son: los pórticos resistentes a momento, los pórticos arriostrados, los muros de carga o muros resistentes y los sistemas duales.

Muros de carga

En este sistema estructural las fuerzas laterales son soportadas por muros. Estos muros se denominan muros de carga, o muros resistentes a cortante. En una revisión visual rápida, estos edificios suelen evidenciar al menos dos muros sólidos, de pocas aberturas y de mayor grosor. La Figura 4-1 muestra un ejemplo de edificio con muros resistentes.

Muros de fábrica
M3.3: Fábrica de ladrillo
o bloque y viguetas de
acero

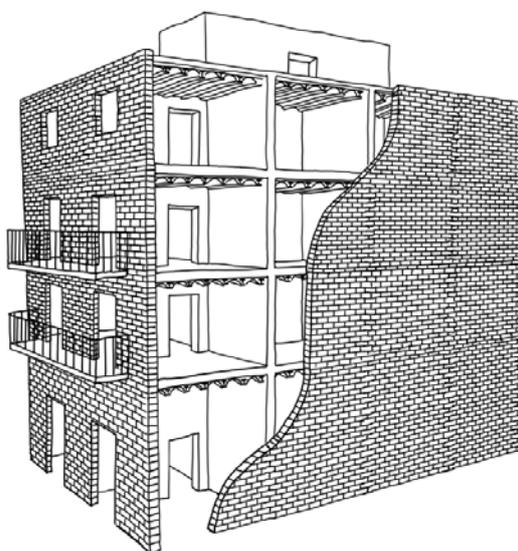


Figura 4-1. Esquema de muros de carga. Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#).

Pórticos resistentes a momento

Los elementos básicos de este sistema estructural son pilares y vigas que se conectan para formar pórticos que soportan las cargas verticales y horizontales. Los puntos de unión pilar–viga, se denominan nudos. En este tipo de edificios, los diafragmas transfieren y distribuyen las cargas entre los pórticos. En una inspección visual rápida se observan patrones de mallas rectangulares en las fachadas y/o grandes aberturas para las ventanas en todos los costados del edificio. La Figura 4-2 muestra un ejemplo de edificio de pórticos resistentes a momento. Una descripción más detallada de la estructura puede requerir identificar si los vacíos de los pórticos están llenos con tabiquería de mampostería o con otros tipos de materiales.

Hormigón armado
RC1: Pórticos resistentes
a momentos

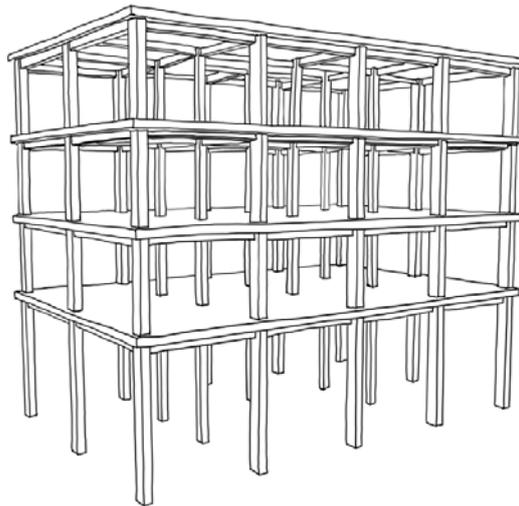


Figura 4-2. Esquema de pórticos resistentes a momento. Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#).

Pórticos arriostrados

Este sistema estructural está compuesto de pórticos de pilares y vigas, conectados con elementos de arriostramiento. La Figura 4-3 muestra un ejemplo de pórticos arriostrados. A pesar de que cualquier tipo de edificio puede incorporar sistemas de arriostramiento, estos son más frecuentes en edificios con estructura metálica.

S2: Pórticos
arriostrados con
triangulaciones

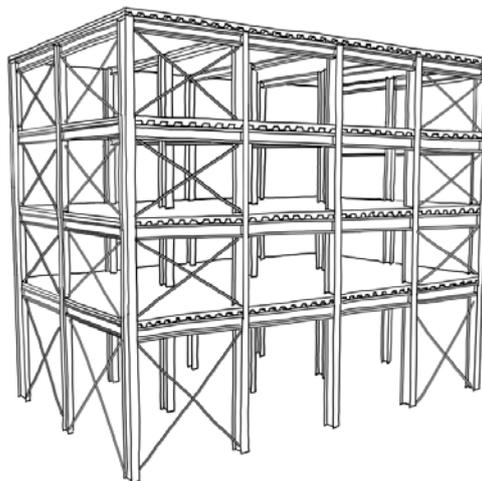


Figura 4-3. Esquema de pórticos arriostrados. Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#).

Sistemas duales

En los edificios con este sistema resistente hay pórticos y muros. En ocasiones los muros estructurales se disponen en una dirección ortogonal a los pórticos, pero a veces, pueden estar dispuestos en las dos direcciones principales de la estructura, combinados con los pórticos. La Figura 4-4 muestra un ejemplo de una estructura dual.

Hormigón armado
RC4: Sistemas duales

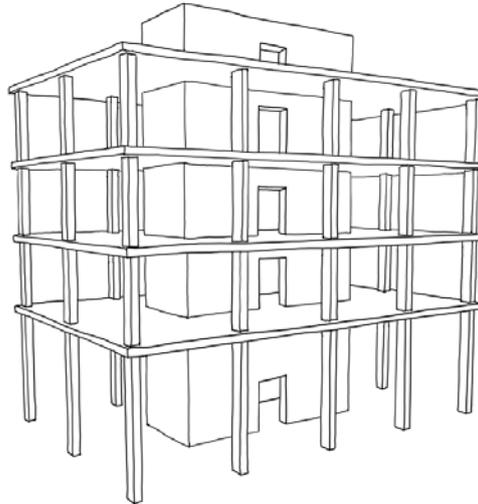


Figura 4-4. Esquema de sistema dual. Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#).

4.2 Materiales constructivos

La mayor parte de los edificios existentes en el Sur de Francia, Norte de España y Andorra (región POCRISC), han sido construidos entre finales del siglo XIX y durante el siglo XX y, las estructuras más frecuentes son de mampostería, de hormigón armado o metálicas. Se describen a continuación los diferentes subtipos de edificios de cada una de estas categorías.

Mampostería

En general, cuando hablamos de mampostería, sin especificar, nos referimos a obra hecha con ladrillos cerámicos unidos con mortero, que es típico de muchos edificios de la región POCRISC. En general el sistema resistente estructural de los edificios de mampostería es de muros o paredes de carga, pese a que puede haber sistemas duales y mixtos. Se describen a continuación los principales tipos de edificios de mampostería, atendiendo al tipo de paredes.



Figura 4-5. Ejemplo de tipos de fábrica de piedra: a) ordinaria, b) concertada y c) sillería. Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#).

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Mampostería con fábrica de piedra

En estos edificios la estructura está hecha con paredes portantes de piedras. Estas piedras suelen estar unidas con mortero de diferente calidad y con diferente tipo de piedras. La Figura 4-5 muestra ejemplos de muros de mampostería de piedra.

Mampostería de fábrica de ladrillo o bloque sin armar

En estos edificios la estructura está hecha con paredes portantes de fábrica de ladrillo de cerámica cocida, que pueden ser macizos o aligerados o de bloques de hormigón. Estas piezas están unidas por medio de mortero. El mortero puede ser de diferente calidad. La Figura 4-6 muestra ejemplos de muros de mampostería no reforzada.

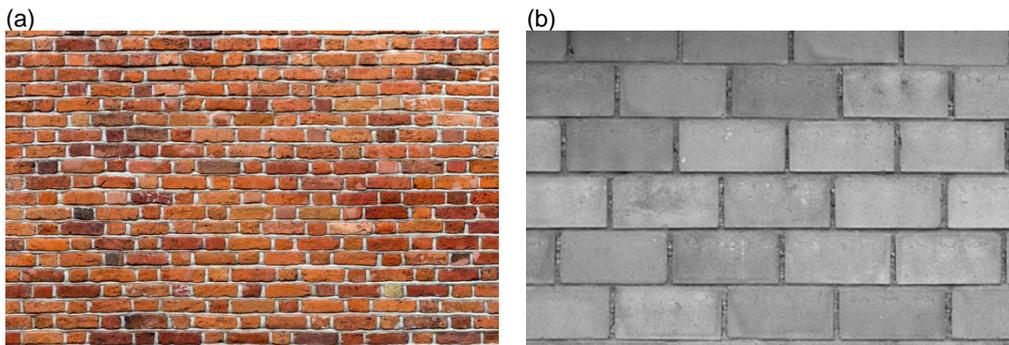


Figura 4-6. Ejemplo de muros de fábrica sin armar: a) ladrillo, b) bloque de hormigón.
Fuente: a) freepik.es y b) [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

Mampostería de fábrica armada

A diferencia de los muros de mampostería sin armar, la mampostería armada usa barras o mallas de acero, que confinan y ligan los ladrillos que la componen. Este tipo de paredes pertenecen a las denominadas *paredes de fábrica armada*. Las unidades de mampostería suelen ser piezas perforadas, como ladrillos o bloques de hormigón, y se disponen de forma que permiten la continuidad de las barras, y los cuales quedan encajados y embebidos dentro del mortero, reforzando el muro. Además de los redondos de refuerzo vertical, también puede haber mallas de refuerzo horizontal. La Figura 4-7 y la Figura 4-9 muestran ejemplos de construcción de mamposterías de fábrica armada.

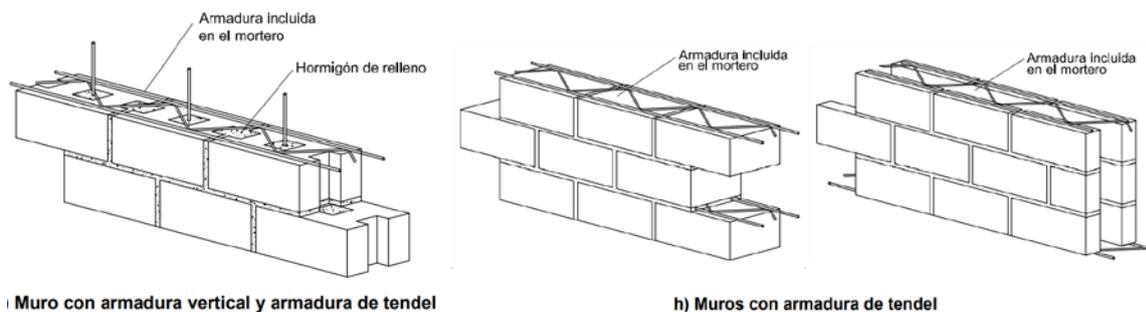


Figura 4-7. Ejemplo de muros de fábrica armada.

Fuente: Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-F, Seguridad estructural: Fábrica

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica



Figura 4-8. Imágenes de muros de fábrica armada.

Fuente: <https://www.bekaert.com/es-MX/product-catalog/construction/masonry-reinforcement/productos>

Mampostería confinada o reforzada globalmente

Muros de fábrica

M5: Muro de fábrica reforzada globalmente

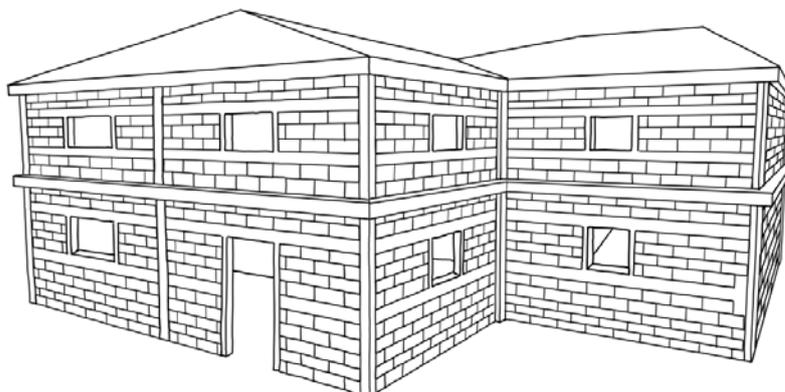


Figura 4-9. Esquema de mampostería confinada. Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 4-10. Ejemplo de muro reforzados globalmente.

Fuente: <https://eird.org/publicaciones/doc18144-contenido.pdf>

En este tipo de obra, que es poco frecuente en la región POCRISC, la mampostería está confinada, es decir, elementos rígidos de mampostería llenan los espacios definidos por sistemas de hormigón armado convencional como, por ejemplo, marcos formados por pilares

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

y vigas que, eventualmente, pueden ser estructurales. Las figuras de 4-7 a 4-10 muestran ejemplos de este tipo de elementos que conforman la mampostería confinada.

Edificios rehabilitados

Son edificios de mampostería en los cuales se han llevado a cabo obras de reforma, en general, para mejorar su capacidad portante o resistente. Estas reformas, eventualmente pueden perseguir, explícitamente, reducir la vulnerabilidad sísmica. Algunos ejemplos de estos tipos de intervenciones son:

- Inclusión de nuevos forjados de hormigón armado, con armadura continua en las vigas y losas rígidas.
- Revestimiento, con hormigón armado, de paneles o paredes de mampostería.
- Construcción de vigas y pilares de hormigón armado, en todo el espesor del muro, con el fin de confinar la mampostería, con un bastidor no resistente a momento.
- Zunchos armados.
- Inserción de elementos de acero, en todo el grueso de la pared.

Hormigón armado

El hormigón es un material de construcción que tiene características pétreas y soporta bien los esfuerzos de compresión, pero se fisura cuando se somete a tracción, flexión, torsión y cortante. El hormigón armado dispone de armaduras de acero, que le permiten resistir estos esfuerzos. La Figura 4-11 muestra un ejemplo de una estructura de hormigón armado. Los principales tipos de edificios de hormigón armado y los más frecuentes son: edificios resistentes a momento, edificios resistentes a cortante y edificios duales. Más arriba ya se han definido estos tipos de sistemas estructurales resistentes.



*Figura 4-11. Ejemplo de edificios de hormigón armado en construcción.
Fuente [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)*

Estructuras metálicas y de madera

La tecnología actual permite emplear un amplio abanico de nuevos materiales en la construcción, pero, por lo que respecta a elementos estructurales, los más frecuentes son, además de la mampostería y el hormigón armado, el acero y la madera. La madera fue uno de los primeros materiales empleados por el hombre en la construcción de viviendas, pero su uso en vigas y columnas de estructuras portantes fue decreciendo con la progresiva introducción del acero y el hormigón. En Cataluña muchos edificios construidos entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX tienen muros de carga de mampostería de ladrillo macizo y vigas de madera.

El acero también es conocido como un material desde la antigüedad, pero su uso intensivo en estructuras de edificios data de finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. En los edificios con estructura metálica los pilares y las vigas son de hierro o de acero. Los sistemas resistentes en las estructuras metálicas suelen ser pórticos resistentes a momento y pórticos arriostrados. Las figuras 4-12 y 4-13 muestra ejemplos de construcción de edificios de estructura metálica y de madera, respectivamente.



*Figura 4-12. Ejemplo de edificio con estructura metálica.
Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)*

Las estructuras de madera convencionales consisten en entramados de barras, sin embargo, en la región POCRISC las estructuras de madera, a base de barras, se suelen restringir a las cubiertas, como se puede ver en la Figura 4-13. Recientemente se están imponiendo los sistemas formados por láminas de madera contrachapa, como se puede ver en la Figura 4-14, que permiten la construcción de edificios de varias plantas.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica



*Figura 4-13. Ejemplo de edificio con cubierta de madera.
Fuente: J.R. González-Drigo (UPC).*



*Figura 4-14. Ejemplo de edificio con estructura de láminas de madera.
Fuente [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)*

4.3 Forjados

Los forjados son elementos estructurales que reciben las cargas directamente y las distribuyen entre los demás elementos de la estructura. Se pueden clasificar en unidireccionales, bidireccionales o reticulares y multidireccionales. La Figura 4-15 muestra las direcciones de transmisión de fuerzas en los forjados bidireccionales o reticulares (a la izquierda) y en los unidireccionales. A continuación, se describen brevemente los tipos de techos forjados más frecuentes.

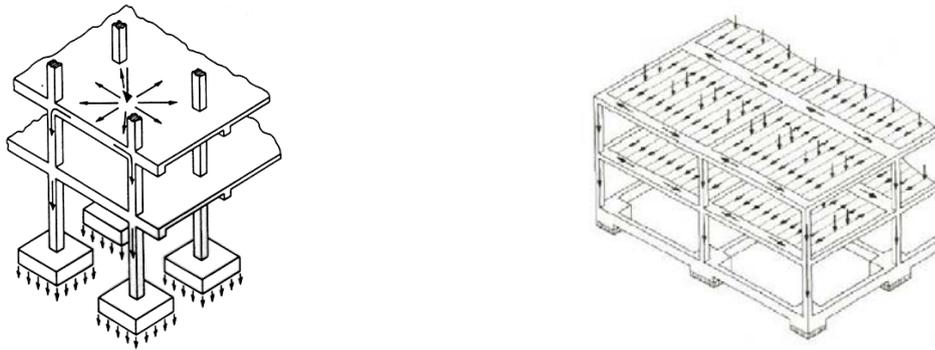


Figura 4-15. Diagramas de transmisión de cargas desde los forjados hasta el terreno.
Izquierda: forjados reticulares, Derecha: forjados unidireccionales.
Fuente: (Valcárcel et al., 2008).

Forjados unidireccionales

Los forjados unidireccionales están formados por vigas paralelas, con los espacios entre ellas rellenos con diferentes técnicas (ver Figuras 4-16, 4-17 y 4-18). Las viguetas pueden ser de madera, acero u hormigón prefabricado. Hay diferentes sistemas para cubrir los espacios entre viguetas, incluyendo bovedillas de cerámica, hormigón, poliestireno y sistemas mixtos.

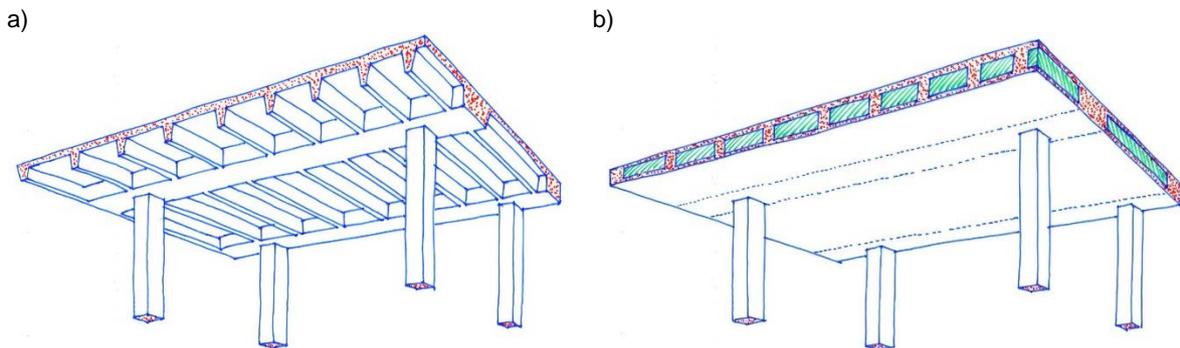


Figura 4-16. Ejemplo de forjados unidireccionales.
Fuente [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

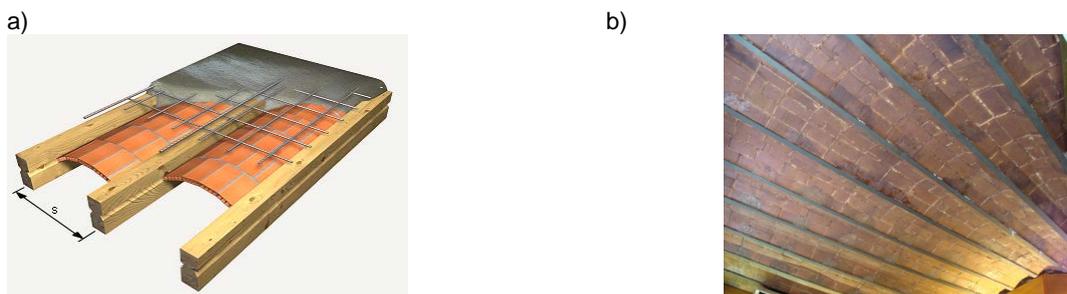


Figura 4-17. Ejemplo de forjados unidireccionales.
Fuente: a) Programa Generador de Precios ([Cype Ingenieros, S.A.](#)), b) J.R. González-Drigo (UPC)

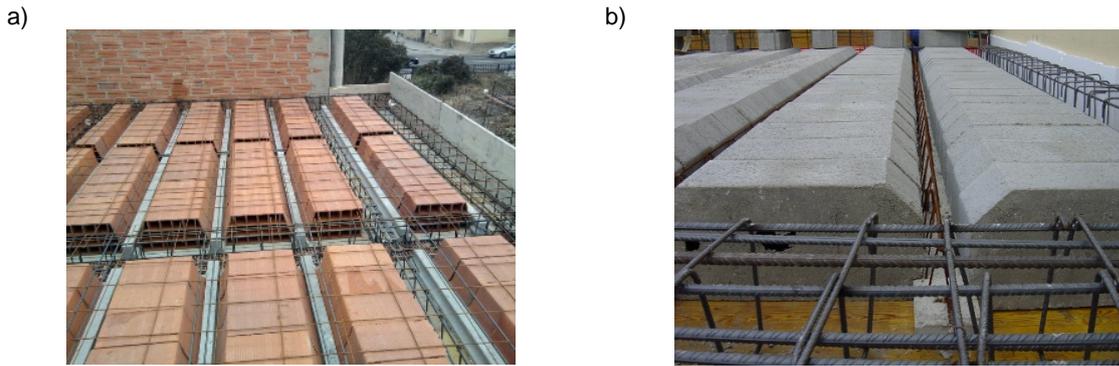


Figura 4-18. Ejemplo de forjados unidireccionales.
a) viguetas de hormigón pretensado y bovedillas de cerámica, b) viguetas de hormigón armado y bovedillas de hormigón. Fuente a) [forjat02.jpg \(1200x900\) \(qero10.cat\)](#) b) [forjados05.jpg \(2048x1536\) \(arpape.com\)](#)

Forjados bidireccionales

Hay diferentes tipos de *forjados* bidireccionales: pueden ser macizos, con aligeramientos inferiores y nervios en T (reticulares) o con aligeramientos interiores y nervios en doble T (sándwich). La Figura 4-19 muestra ejemplos de forjados bidireccionales de hormigón armado y la Figura 4-20 los tipos de forjado reticular. Estos forjados transmiten las cargas a los elementos resistentes básicamente en dos direcciones ortogonales.

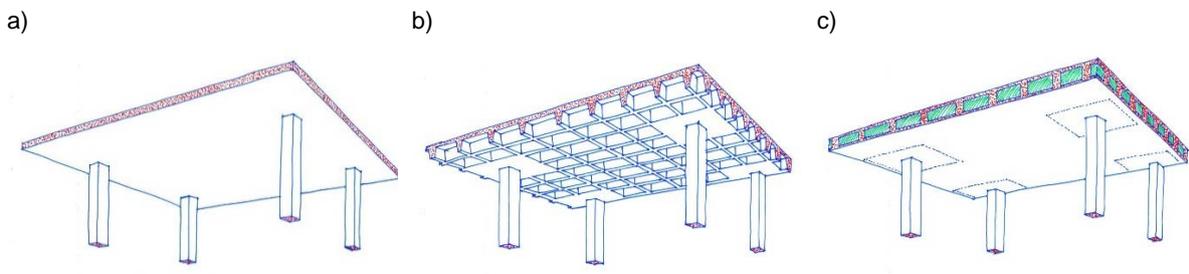


Figura 4-19. Ejemplos de forjados bidireccionales:
a) losa maciza, b) forjado reticular y c) losa aligerada (sándwich). Fuente [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

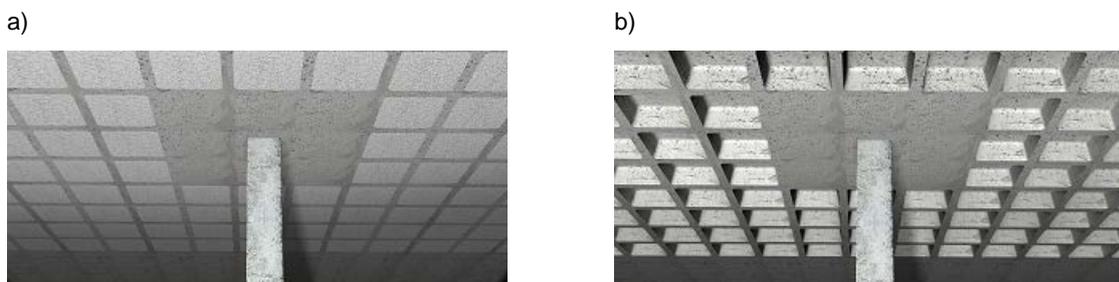


Figura 4-19. Ejemplos de forjados reticulares:
a) casetones de hormigón o poliestireno, b) cubetas recuperables. Fuente: Programa Generador de precios ([Cype Ingenieros SA](#)).

4.4 Cimientos

Los cimientos constituyen la parte del edificio que transmite las fuerzas de los pilares o muros al suelo portante. Muchas veces estos elementos no están a la vista, pero como deben resistir y transferir las cargas del edificio en todo momento, su protección contra fallos es fundamental. La profundidad, longitud y ancho de las cimentaciones depende del peso del edificio, del número de pisos y el tipo de suelo del emplazamiento.

Cimentaciones superficiales

Este tipo de cimentaciones suele tener poca profundidad, con una relación profundidad/ancho usualmente menor a 3 (ejemplos in Figura 4-20). Pueden estar construidas de piedra, hormigón ciclópeo (mezcla de hormigón con piedras), en masa o armado.

- Zapatas aisladas: Estos cimientos transmiten la carga de un pilar al suelo de manera independiente. Se pueden conectar varias zapatas aisladas mediante riostras. Sin embargo, para prevenir desplazamientos laterales diferenciales bajo cargas sísmicas se recomienda disponer riostras.
- Zapatas combinadas: zapatas comunes a dos o más pilares.
- Zapatas corridas: Es una franja continua de hormigón que soporta muros de fábrica o de hormigón. También pueden soportar una serie de pilares alineados.
- Emparrillados: Cuando mediante zapatas corridas no es suficiente para transmitir las cargas al terreno, se pueden disponer en dos direcciones perpendiculares, constituyendo un entramado de zapatas corridas.
- Losa de cimentación: es una losa de hormigón armado que se extiende por toda la base del edificio. Se usa con frecuencia cuando la superficie ocupada por zapatas resulta excesiva. La losa de cimentación es una solución eficaz para cimentar un edificio expuesto a movimientos sísmicos, pues con ella se evitan los movimientos diferenciales entre las bases de los pilares.

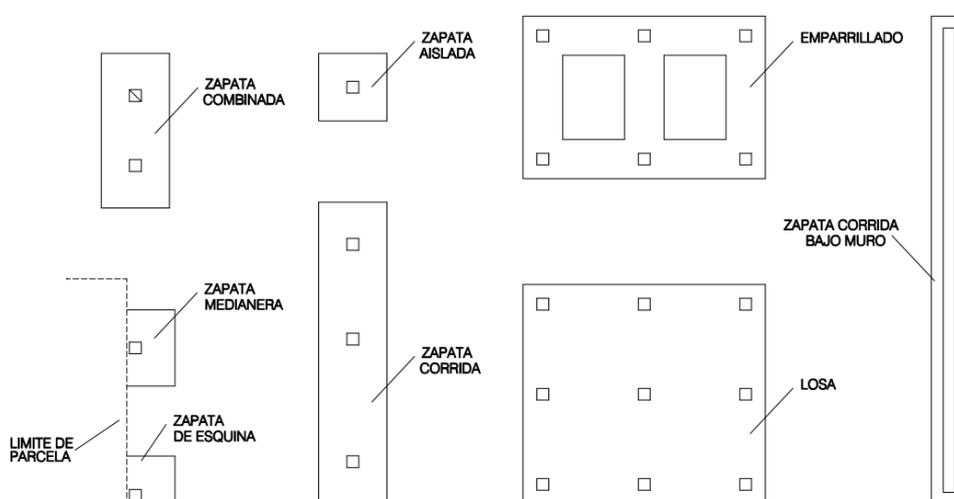


Figura 4-20. Tipología de cimentaciones superficiales.

Fuente: Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones.

Cimentaciones profundas

La cimentación profunda más común es la compuesta por pilotes. Los pilotes son elementos largos y esbeltos, hechos usualmente de acero u hormigón armado y, a veces de madera. Se utilizan para transferir las cargas de la estructura a través de estratos débiles, saturados o compresibles, hacia suelo más rígido o roca (como se ilustra en la Figura 4-21). Son la solución frecuente para estructuras de gran tamaño, o en situaciones donde el suelo es susceptible a asentamientos excesivos.

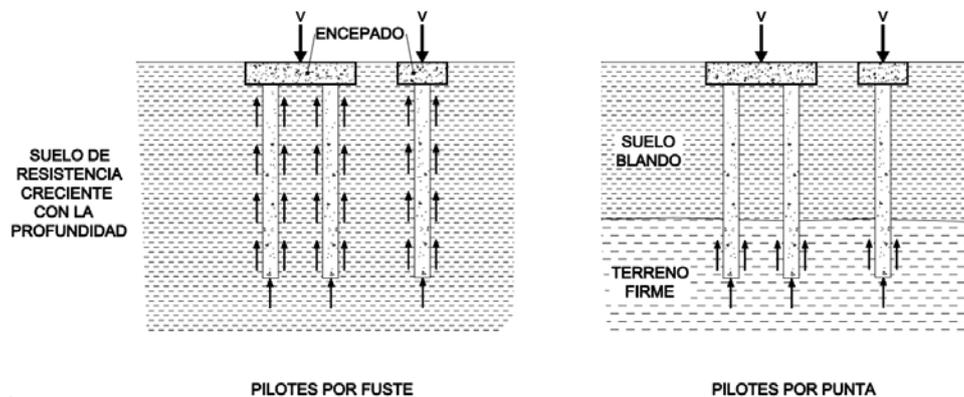


Figura 4-21. Esquemas de cimentaciones profundas con pilotes.
Fuente: Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones.

5 EVALUACIÓN SÍSMICA DE LA ESTRUCTURA

Una vez establecidos los niveles de daño tolerables en la edificación para cada nivel de peligrosidad, la evaluación sísmica de una edificación requiere establecer su capacidad para satisfacer el nivel de comportamiento esperado, de acuerdo con la sismicidad local, propia o característica de su emplazamiento.

La evaluación sísmica involucra una gran cantidad de factores que van desde la apropiada definición de la excitación, la definición realista de un modelo estructural representativo de la edificación, una caracterización apropiada de materiales y una definición coherente de los estados de carga. Además, todos estos factores están limitados por la información disponible de la edificación y las limitaciones implícitas de los modelos de análisis, sobre todo, los de naturaleza no lineal.

Un objetivo primordial de la evaluación es la identificación de deficiencias estructurales. A continuación, se listan las deficiencias estructurales más frecuentes según (FEMA 547, 2006).

5.1 Tipos de deficiencias estructurales más frecuentes

Capacidad global

Deficiencia en la capacidad global se refiere a la capacidad bajo cargas laterales del sistema de elementos verticales. Esta deficiencia es frecuente en edificios antiguos, proyectados en ausencia de códigos sísmicos. A veces, también está relacionada con deformaciones inelásticas que sobrepasan los límites de las reglamentaciones actuales.

Rigidez global

Esta deficiencia es consecuencia de demandas y desplazamientos horizontales excesivos, debidos a elementos estructurales con detallados mal resueltos. La rigidez global se refiere a la rigidez del sistema completo frente a cargas laterales, aunque, en algunos pisos la rigidez lateral no sea un problema. En muchos casos los desplazamientos horizontales son excesivos en los niveles más bajos del edificio.

Irregularidades en planta y en altura

Las irregularidades en planta y en altura, descritas en las secciones 3.4.3 y 3.4.4, están relacionadas con concentraciones excesivas de fuerzas en elementos no proyectados para resistirlas. Las irregularidades en planta usualmente conducen a un movimiento de torsión que impone enormes demandas en elementos de los extremos del edificio. Las irregularidades en altura también conllevan a una concentración de desplazamientos, o fuerzas, en conexiones/elementos sin la ductilidad/capacidad para resistirlas. En la evaluación de tales elementos, se debe por tanto, considerar comportamiento inelástico.

Trayectoria de transmisión cargas

Esta deficiencia se refiere a la interrupción de la transmisión directa de cargas, gravitacionales y/o laterales, de los elementos de la estructura al suelo. La interrupción se puede encontrar debido a conexiones que no son adecuadas, o a elementos verticales que no son continuos

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

hasta los cimientos, lo que comporta la necesidad de vigas de apeo. Debe ser una consideración importante en la evaluación sísmica, pues tal interrupción impacta en la efectividad del sistema de cargas, implicando el riesgo de colapsos parciales o globales. También debe ser una consideración importante si se añaden elementos como parte del proyecto de rehabilitación, pues, estos deben estar bien conectados al sistema de cargas si pasaran a formar parte de la trayectoria de cargas.

Detallado de elementos

El detallado de los elementos está relacionado con el concepto de ductilidad, que puede entenderse como la capacidad de los elementos de sostener deformaciones más allá del límite de elasticidad. Uno ejemplo común de mal detallado es el confinamiento inadecuado de los pilares de hormigón armado, pues los estribos se colocan con una separación excesiva. Aunque estos pilares tengan suficiente capacidad para resistir las cargas gravitatorias, no podrán resistir las demandas de deformaciones inelásticas, permaneciendo en una sola pieza, impuestas por los terremotos. Otro ejemplo son los muros de carga, que se dimensionan para resistir las cargas verticales, pero no están armados para resistir tracciones y poder responder con un modo de flexión, ante sollicitaciones sísmicas. En estructuras de acero, el mal detallado está usualmente asociado a uniones frágiles, que al fracturarse, no permiten que se alcance la capacidad de los elementos del sistema de cargas laterales.

La identificación de deficiencias en el detallado es un paso clave en la selección de las soluciones de rehabilitación, pues en muchos casos, el mejoramiento del detallado es suficiente para lograr los objetivos de comportamiento estructural, y así se puede evitar la adición de nuevos elementos estructurales. En el caso de pilares con ductilidad reducida, es más eficiente aumentar su capacidad de deformación inelástica, mejorando el confinamiento, que tratar de limitar sus deformaciones con nuevos elementos que aumenten la rigidez lateral.

Forjados

El objetivo principal de los forjados del sistema de cargas laterales es el de transferir las cargas horizontales, entre los diferentes elementos que las resisten y transmiten al suelo. Las deficiencias que impiden lograr este objetivo son: capacidad reducida a cortante o a flexión, insuficiente rigidez, o falta de armado alrededor de huecos o esquinas. La incapacidad de transferir cargas de cortante a los elementos estructurales se considera como una deficiencia en la trayectoria de cargas.

Cimientos

Las deficiencias de los cimientos pueden estar relacionadas con el cimiento mismo, o con una transferencia ineficaz de cargas al suelo portante. Entre las deficiencias del cimiento mismo se encuentran: la capacidad insuficiente a flexión o cortante de zapatas aisladas o continuas, la insuficiente capacidad axial de pilotes, uniones frágiles entre pilares, encepados y pilotes.

La transferencia ineficaz puede ser causada por asentamientos excesivos, insuficiente capacidad portante, rotación excesiva, insuficiente capacidad a tracción de cimientos profundos, y pérdida de capacidad portante debido a licuefacción.

La mitigación de deficiencias en los cimientos es un tema delicado, pues usualmente tiene un alto costo económico, por lo que estas deficiencias deben evaluarse cuidadosamente.

Otras deficiencias

En algunos casos, la causa de la vulnerabilidad está fuera del edificio y, a veces, fuera del alcance para proponer medidas de mitigación.

Peligros geológicos

- El peligro de licuefacción en el emplazamiento de la estructura es una deficiencia de la cimentación y puede ser mitigada si se considera necesario. Sin embargo, el riesgo de desplazamiento lateral de toda la estructura siempre estará presente si el peligro de licuefacción se extiende a las cercanías de la estructura.
- Peligros de deslizamientos, fallas geológicas, fallas de represas e inundaciones pueden identificarse durante los estudios geológicos. Si este tipo de peligros es identificado, se debe analizar si los daños potenciales por estos peligros justifican el costo de las medidas de rehabilitación sísmica.

Edificios adyacentes

Cuando el espacio entre edificios adyacentes no es suficiente para evitar el impacto entre las dos estructuras durante una sacudida sísmica, conocido como efecto golpeteo, ambos edificios pueden resultar con daños estructurales. Esta situación es más severa cuando la elevación de los entrepisos de los edificios no coincide, y los pisos altamente rígidos de un edificio impactan muros y pilares del otro edificio, que son relativamente más flexibles. Si la elevación de los entrepisos coincide, aún puede haber problemas si los sistemas de cargas laterales tienen diferente capacidad, debido a la transferencia de cargas.

5.2 Métodos de Análisis Estructural

Existe una gran variedad de procedimientos analíticos para la evaluación sísmica de edificaciones existentes (FEMA-356, 2000), algunos basados en comportamiento elástico-lineal y otros en un comportamiento inelástico, no lineal. En los primeros, se definen estados de fuerzas laterales estáticas o dinámicas y comportamientos elásticos, para determinar la relación demanda-capacidad de los elementos; proporcionan una buena aproximación de la capacidad elástica y la primera cedencia, pero no pueden predecir mecanismos de fallo, ni tener en cuenta la redistribución de fuerzas durante el progreso de la cedencia.

Los métodos de análisis lineal son aceptables cuando el grado esperado de inelasticidad de la estructura es bajo, lo que se considera ocurre cuando la relación demanda/capacidad es menor de 2.

Métodos de análisis lineal

En el análisis lineal se cumple el principio de superposición: si se duplica la magnitud de la carga se obtiene el doble de la deformación. Los métodos de análisis lineal deben incorporar ajustes de los parámetros de repuesta estructural para considerar la posible respuesta no lineal de la estructura. Estos métodos pueden dar resultados poco realistas en el caso de sistemas estructurales con irregularidades importantes (en planta y altura, torsión), a menos que se demuestre que la estructura permanece en el rango de respuesta elástica bajo el sismo de diseño.

Análisis estático equivalente

La respuesta de una estructura ante solicitaciones sísmicas es normalmente un problema *dinámico*, originado cuando la masa de la estructura opone su inercia al movimiento de los cimientos durante un sismo. Estas fuerzas *inerciales* varían rápidamente con el tiempo y provocan a su vez vibraciones, fundamentalmente horizontales, en los diferentes elementos de la estructura. Si bien actualmente se dispone de métodos fiables para la descripción matemática de las vibraciones sísmicas y su impacto en los elementos estructurales, la solución del problema dinámico es costosa, en términos de tiempo e información necesaria para realizarla. En consecuencia, en ingeniería sísmica a veces se adopta la sustitución del problema dinámico por problemas estáticos equivalentes, que son más accesibles al analista, y donde las fuerzas de inercia son consideradas de forma indirecta. Por tanto, en el método lineal estático equivalente, las cargas aplicadas a la estructura no varían con el tiempo.

Con este método las fuerzas sísmicas estáticas que actúan sobre la estructura se proporcionan de manera que el cortante en la base sea el especificado por el nivel de riesgo sísmico. Si bajo estas cargas las fuerzas internas de la estructura sobrepasan el rango elástico, estas son corregidas antes de evaluar el margen de seguridad.

Los métodos de análisis estáticos son aceptables cuando los efectos de modos de respuesta superiores no sean importantes. Este es el caso para edificios de baja altura y regulares. Por el contrario, para edificios altos, con irregularidades de torsión o con sistemas no ortogonales, los métodos dinámicos son necesarios.

Análisis modal

En este análisis, la relación fuerza-deformación se sigue considerando lineal. Esta linealidad del comportamiento permite separar la respuesta de la estructura en sus diferentes modos básicos de respuesta, lo que reduce considerablemente el tamaño del problema dinámico a resolver. Como la respuesta máxima de cada modo de vibración es proporcional a las cargas sísmicas, por ejemplo, al cortante de la base, no es necesario aplicar cargas que varían con el tiempo. Las respuestas modales obtenidas entonces deben combinarse para obtener la respuesta total del elemento estructural. Usualmente se usa un mínimo de 3 modos de vibración, o un número de modos tal que la masa efectiva de participación, al combinar esos modos, sea al menos del 90%.

Historias de carga

Con este método se resuelve en su integridad el problema dinámico, es decir, las cargas sísmicas varían rápidamente con el tiempo, y la variación de su intensidad se especifica entonces en pequeños intervalos de tiempo. Sin embargo, la relación fuerza-deformación para la estructura sigue siendo lineal y, si la respuesta excede el rango lineal, las fuerzas internas deben ser corregidas, antes de evaluar el margen de seguridad. Las cargas sísmicas se obtienen a partir de historias de aceleraciones o acelerogramas. En la sección 2.5 se especifica el número adecuado de acelerogramas a usar.

Métodos de análisis no lineal

Con los métodos de análisis no lineal es posible aproximarse a lo que realmente sucede en la edificación, identificar modos de fallo y el potencial de un colapso progresivo. Sin embargo, estos análisis requieren tiempo y un conocimiento detallado de la condición actual de la

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

estructura. Consecuentemente, los métodos no lineales deben usarse en los casos en que los métodos lineales no son permitidos.

Análisis no lineal estático

Con este método se describe cómo, las propiedades mecánicas (rigidez, disipación de energía) de los elementos de la estructura cambian cuando se excede el punto de cedencia. Aunque la intensidad de las cargas sísmicas varía con el tiempo, la variación es unidireccional, gradual y lenta, con lo que se evita la consideración de los efectos inerciales y las vibraciones. Como consecuencia, para cada intervalo de tiempo, el problema a resolver es estático.

Este método es, en general, considerado más fiable que los métodos lineales. Sin embargo, debe tenerse en cuenta, que implica simplificaciones importantes del problema real, pues no considera la respuesta de los materiales a cargas cíclicas, que cambian de dirección, como por ejemplo, la degradación de la rigidez, ni la contribución de modos superiores. Cuando el método estático no lineal se usa en una estructura en cuya respuesta hay una importante contribución de modos superiores, los resultados del diseño deben ser verificados con un análisis lineal dinámico. Este es el caso si la masa de participación del primer modo es baja.

Análisis no lineal dinámico

En este método se modela, no solamente la no linealidad en la relación fuerza-deformación de la estructura y cómo ésta se degrada con la acción de cargas cíclicas, sino también, la no linealidad geométrica de la estructura. La rigidez y la disipación de energía pueden cambiar de un intervalo de tiempo a otro. Los efectos de las fuerzas inerciales, y de las consecuentes vibraciones, son tenidos en cuenta de forma explícita, y el problema dinámico se resuelve solamente con sofisticados métodos numéricos. Entre esos métodos numéricos, de discretización, es popular el Método de Elementos Finitos. Durante décadas en la ingeniería práctica se ha valorado la utilidad del método de elementos finitos, pero también ha habido renuencia a usarlo debido a su complejidad. Hoy en día, su uso se ha vuelto popular pues existe software basado en elementos finitos con entornos que facilitan al usuario el proceso de modelado.

Se permite el método de análisis no lineal dinámico para analizar todo tipo de estructuras. Sin embargo, todo análisis de este tipo debe ser revisado y aprobado *por un experto independiente*.

5.3 Criterios de aceptación

Clasificación de elementos

En los estándares de FEMA-356 (2000), los elementos del sistema estructural se clasifican primero como primarios y secundarios. Los elementos primarios son los que proporcionan la capacidad a la estructura para *resistir el colapso* bajo la acción de las cargas sísmicas. Todos los demás elementos son considerados secundarios. Luego, las acciones en los elementos se clasifican como controladas por fuerzas, o controladas por deformaciones. Esta clasificación se basa en las curvas de la Figura 5-1.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

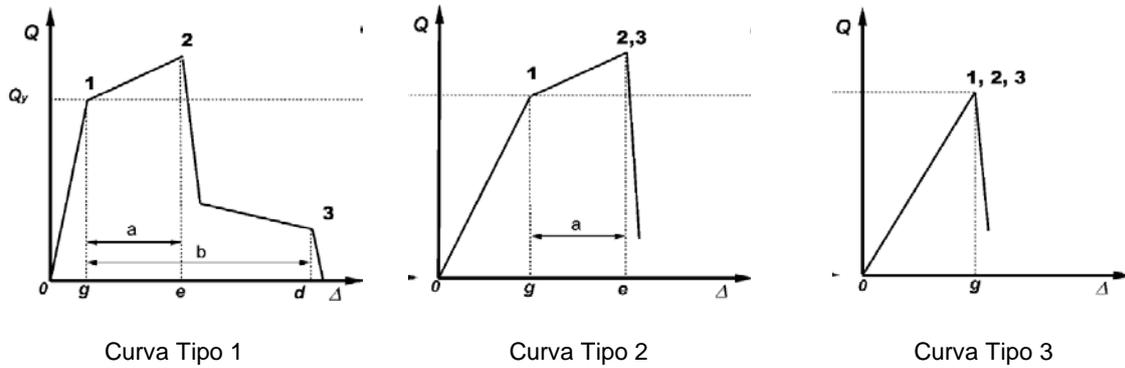


Figura 5-1. Curvas Fuerza-Deformación para elementos.
Fuente: (FEMA-356, 2000).

La curva Tipo 1 es representativa de comportamiento dúctil, cuando hay un rango elástico, del punto 0 al punto 1 en la curva, seguido por un rango plástico, puntos del 1 al 3, con capacidad residual importante, y con capacidad para soportar cargas gravitatorias en el punto 3. El rango plástico incluye un rango de endurecimiento o ablandamiento, puntos 1 y 2, y otro rango de degradación de la capacidad, puntos 2 y 3.

Cuando los elementos primarios muestran el comportamiento de la curva Tipo 1, se clasifican como *controlados por deformaciones*, si el rango de endurecimiento o ablandamiento, e , es tal que $e > 2g$. Si este no es el caso, se clasifican como *controlados por fuerzas*. Por otro lado, los elementos secundarios que muestran el comportamiento Tipo 1, se clasifican como controlados por fuerzas para cualquier valor de la relación e/g .

La curva Tipo 2 representa comportamiento dúctil cuando hay un rango elástico, del punto 0 al punto 1, y un rango plástico, seguido de pérdida de la capacidad a cargas laterales y pérdida de la capacidad a cargas gravitatorias, más allá del punto 2. Los elementos primarios y secundarios con este tipo de comportamiento, deben clasificarse como controlados por deformaciones, si el rango plástico es tal que $e > 2g$. De lo contrario, se clasifican como controlados por fuerzas.

La curva Tipo 3 representa comportamiento frágil o no dúctil, donde hay un rango elástico, del punto 0 al punto 1, seguido de una pérdida de capacidad a cargas laterales y gravitacionales, más allá del punto 1. Los elementos primarios y secundarios, con comportamiento del Tipo 3, se deben clasificar como controlados por fuerzas.

Criterios para Análisis Lineal

Elementos controlados por deformaciones

Los elementos controlados por deformaciones deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$m\kappa Q_{CE} \geq Q_{UD} \quad (1)$$

donde m , es el modificador de capacidad que toma en cuenta la ductilidad esperada, Q_{CE} es la capacidad esperada del elemento, y κ es el factor de conocimiento. La capacidad esperada, Q_{CE} , se debe obtener considerando todas las acciones coexistentes en el elemento, bajo las cargas de diseño. La acción controlada por desplazamientos Q_{UD} se obtiene de la relación:

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

$$Q_{UD} = Q_G \pm Q_E \quad (2)$$

donde Q_E es la acción debida a las cargas sísmicas, y Q_G es la acción debida a las cargas gravitatorias.

Debido a la posible respuesta no lineal de la estructura, las acciones Q_{UD} , pueden sobrepasar la capacidad del elemento. Esta sobrecarga es tomada en cuenta por el factor m , que es una medida indirecta de la capacidad de deformación no lineal del elemento.

Elementos controlados por fuerzas

Los elementos controlados por fuerzas deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$\kappa Q_{CL} \geq Q_{UF} \quad (3)$$

donde Q_{CL} es el límite inferior de la capacidad del elemento, que se debe determinar considerando todas las acciones coexistentes en el elemento bajo cargas de diseño. Q_{UF} denota las acciones controladas por fuerzas, que se obtiene con uno de los siguientes métodos:

- Q_{UF} se toma como la acción máxima que puede desarrollarse en el elemento, basándose en un análisis de estado límite, y considerando la capacidad de los elementos que transmiten las cargas al elemento analizado. Alternativamente, Q_{UF} se toma como la acción máxima desarrollada en el elemento, limitada por la respuesta no lineal del edificio.
- Q_{UF} se obtiene con la ecuación:

$$Q_{UF} = Q_G \pm \frac{Q_E}{C_1 C_2 C_3 J} \quad (4)$$

donde J es el factor de reducción de carga, que usualmente se toma como la menor relación demanda/capacidad en la trayectoria de las cargas que se transfieren al elemento analizado. Se toma igual a 1 para el nivel de comportamiento de Ocupación Inmediata. También se toma igual a 1 cuando las fuerzas que se transfieren al elemento, permanecen en el rango elástico. Los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 son factores de amplificación, introducidos para mejorar las estimaciones de los desplazamientos esperados en edificios que entran en el rango inelástico.

Cimientos

- Hipótesis de base rígida: si la base de la estructura se considera completamente rígida, los elementos geotécnicos deben considerarse como controlados por desplazamientos. El factor m , para elementos geotécnicos, no debe ser mayor de 3, y el límite superior de la capacidad de los elementos puede ser usado. La hipótesis de una base rígida no debe ser usada en edificios rehabilitados para un nivel de comportamiento de Ocupación Inmediata, si su base es sensible a rotaciones, o a otros tipos de movimientos de las cimentaciones.
- Hipótesis de base flexible: si la base de la estructura se supone flexible, los elementos geotécnicos se clasifican como controlados por deformaciones. La capacidad del suelo

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

no necesita ser evaluada. La aceptación de las deformaciones del suelo debe basarse en la habilidad de la estructura de acomodar estas deformaciones, dentro de los criterios de aceptación del objetivo de rehabilitación.

Criterios para Análisis No Lineal

Elementos controlados por deformaciones

Los elementos primarios y secundarios deben tener la capacidad de deformación esperada, no menor que las demandas de deformación máximas correspondientes al desplazamiento objetivo. La capacidad de deformación esperada se calcula considerando todas las fuerzas y deformaciones coexistentes en el elemento.

El cortante de base correspondiente al desplazamiento objetivo no debe ser menor al 80% de la carga de cedencia efectiva de la estructura.

Elementos controlados por fuerzas

Los elementos primarios y secundarios deben tener límites inferiores de capacidad no menores que las cargas máximas de diseño. Estos límites inferiores se deben determinar considerando todas las fuerzas y deformaciones coexistentes en el elemento.

Cimientos

- Hipótesis de base fija: en este caso, las reacciones de los elementos geotécnicos deben considerarse como controladas por fuerzas, y no deben exceder los límites superiores de las capacidades. Esta hipótesis no debe ser usada para edificios rehabilitados con un nivel de comportamiento de ocupación inmediata si son susceptibles a rotaciones en la base, o a otro tipo de movimiento de sus cimientos.
- Hipótesis de base flexible: en este caso, los elementos geotécnicos se clasifican como controlados por deformaciones. Para los niveles de comportamiento de Preservación de vidas y de Estabilidad Estructural, la aceptación de las deformaciones del suelo debe basarse en la habilidad de la estructura de acomodar estas deformaciones, dentro de los criterios de aceptación del objetivo de rehabilitación. Para el nivel de comportamiento de Ocupación Inmediata, el desplazamiento permanente de los elementos geotécnicos se debe calcular con un método que se base en el desplazamiento total máximo, el tipo de cimiento y de suelo, y en el espesor de las capas de suelo. La aceptación de las deformaciones del suelo debe basarse en la habilidad de la estructura de acomodar estas deformaciones, dentro de los criterios de aceptación del nivel de comportamiento de Ocupación Inmediata.

6 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN

El objetivo del proyecto de rehabilitación se obtiene implementando técnicas de rehabilitación según una estrategia definida, basada en las deficiencias identificadas durante el proceso de evaluación. Cada técnica de rehabilitación debe estar en coherencia con las otras decisiones adoptadas para asegurarse que, el conjunto de técnicas, conducirá a alcanzar los niveles de comportamiento establecidos por el objetivo de rehabilitación.

Debe desarrollarse un modelo de estructura que incorpore los efectos de la rehabilitación en la rigidez y la capacidad de la estructura. La compatibilidad de los elementos nuevos y existentes debe ser consistente con las demandas impuestas por el nivel de riesgo sísmico seleccionado. También es deseable que el sistema de cargas lateral final tenga suficiente redundancia para evitar cualquier inestabilidad o colapso global, cuando falle algún elemento.

6.1 Estrategias de rehabilitación

Modificación local de elementos

Aunque algunas estructuras puedan presentar capacidad y rigidez global suficientes frente a las solicitaciones sísmicas, algunos de sus elementos pueden tener insuficiente resistencia, o ductilidad, para satisfacer el objetivo del proyecto de rehabilitación. En este caso, una estrategia adecuada consiste en la modificación local de los elementos deficientes, manteniendo la configuración básica del sistema de estabilización horizontal. Esta estrategia suele ser la más económica, cuando sólo unos cuantos elementos de la estructura son deficientes.

Entre las modificaciones locales podemos mencionar:

- Para mejorar resistencia: reforzar con pletinas de acero las vigas, pilares o forjados metálicos (Figuras 6-1 y 6-2); reforzar con compuestos de fibras de carbono o vidrio los elementos de hormigón armado (Figuras 6-3); reforzar los pilares con hormigón armado (Figura 6-4); reforzar con láminas de madera contrachapada las losas de madera, etc.

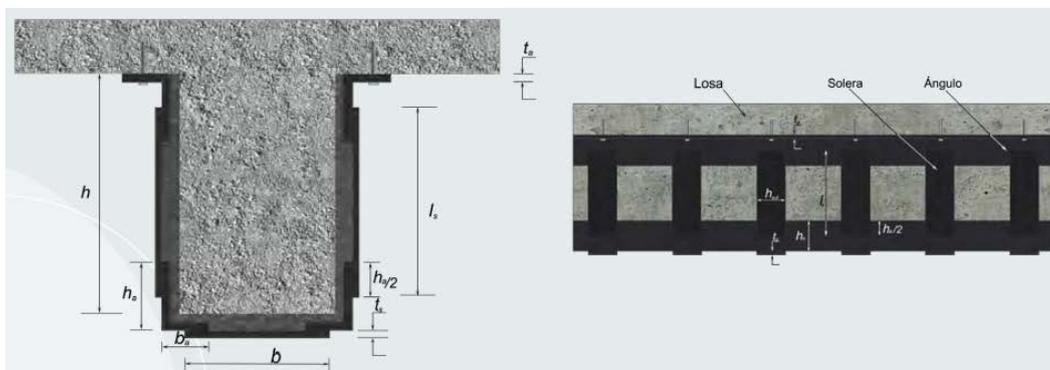


Figura 6-1. Encamisado de viga, mediante angulares y pletinas de acero: izquierda, sección transversal; derecha, sección longitudinal.

Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

- Para mejorar la ductilidad: confinar, con una camisa de acero o fibras sintéticas, los extremos de los pilares de hormigón, para que puedan deformarse sin desprendimientos del recubrimiento ni pandeo de las armaduras (Figura 6-3). Otra

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

medida sería la reducción de la sección transversal de elementos, para aumentar su flexibilidad.

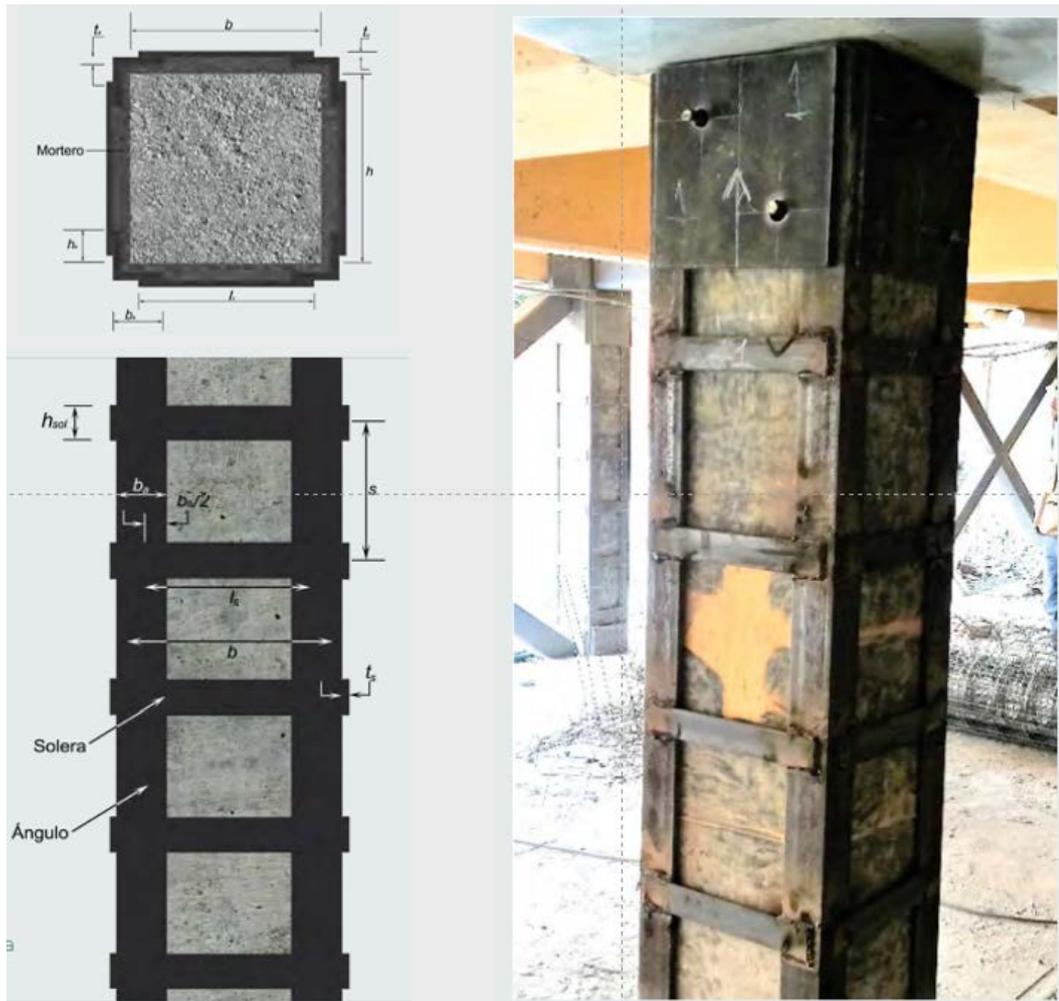


Figura 6-2. Encasamiento de pilar de hormigón armado, mediante angulares y pletinas de acero. Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).



Figura 6-3. Refuerzos con tejidos de polímero reforzado con fibra (FRP): a) a flexión y cortante, b) a flexión, cortante y confinamiento a compresión. Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

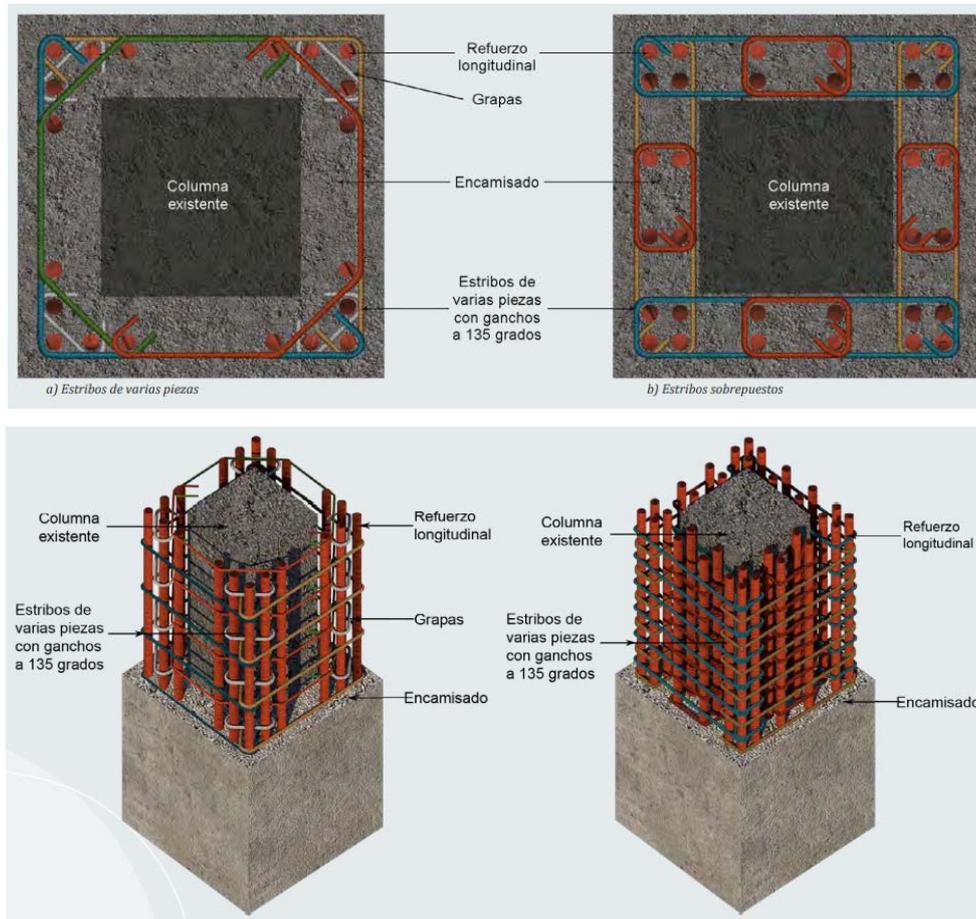


Figura 6-4. Encamisado de pilares con hormigón armado.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

Reducción o eliminación de irregularidades estructurales

La reducción o eliminación de irregularidades estructurales puede ser una estrategia efectiva de rehabilitación, si la evaluación indica que el nivel de comportamiento seleccionado no puede alcanzarse debido a las irregularidades. Las irregularidades de rigidez, masa y capacidad pueden ser detectadas a partir de un análisis lineal de la estructura, examinando la distribución de las deformaciones y de las relaciones demanda/capacidad. También se pueden detectar a partir de un análisis no lineal, examinando la distribución de las deformaciones y de las demandas de deformaciones inelásticas. Se dice que una irregularidad existe si la distribución de las deformaciones, las relaciones demanda/capacidad o de las demandas de deformaciones inelásticas, no son uniformes, es decir, con valores extremadamente altos en un piso, en relación con otro piso adyacente, o a un lado del edificio, en relación con otro.

Muchas veces, la simple eliminación de las irregularidades puede ser suficiente para que el comportamiento de la estructura sea aceptable. Otras veces, esta opción no es posible, en particular para edificios históricos. Algunas medidas correctivas de esta deficiencia son:

- Añadiendo elementos diagonales, o muros de cortante para reforzar un piso blando.
- Las irregularidades de torsión se pueden corregir añadiendo pórticos rígidos, con elementos diagonales, o con muros de cortante, para corregir la distribución de rigidez y masa en un piso.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

- A elementos verticales, como pilares o muros apeados, se les puede dar continuidad hasta la cimentación.
- Algunas veces, es posible la demolición de partes del edificio que crean irregularidades, como torres o alas.
- La creación de juntas de dilatación, para transformar el edificio irregular en varios edificios regulares, teniendo cuidado de evitar el impacto entre estructuras colindantes.

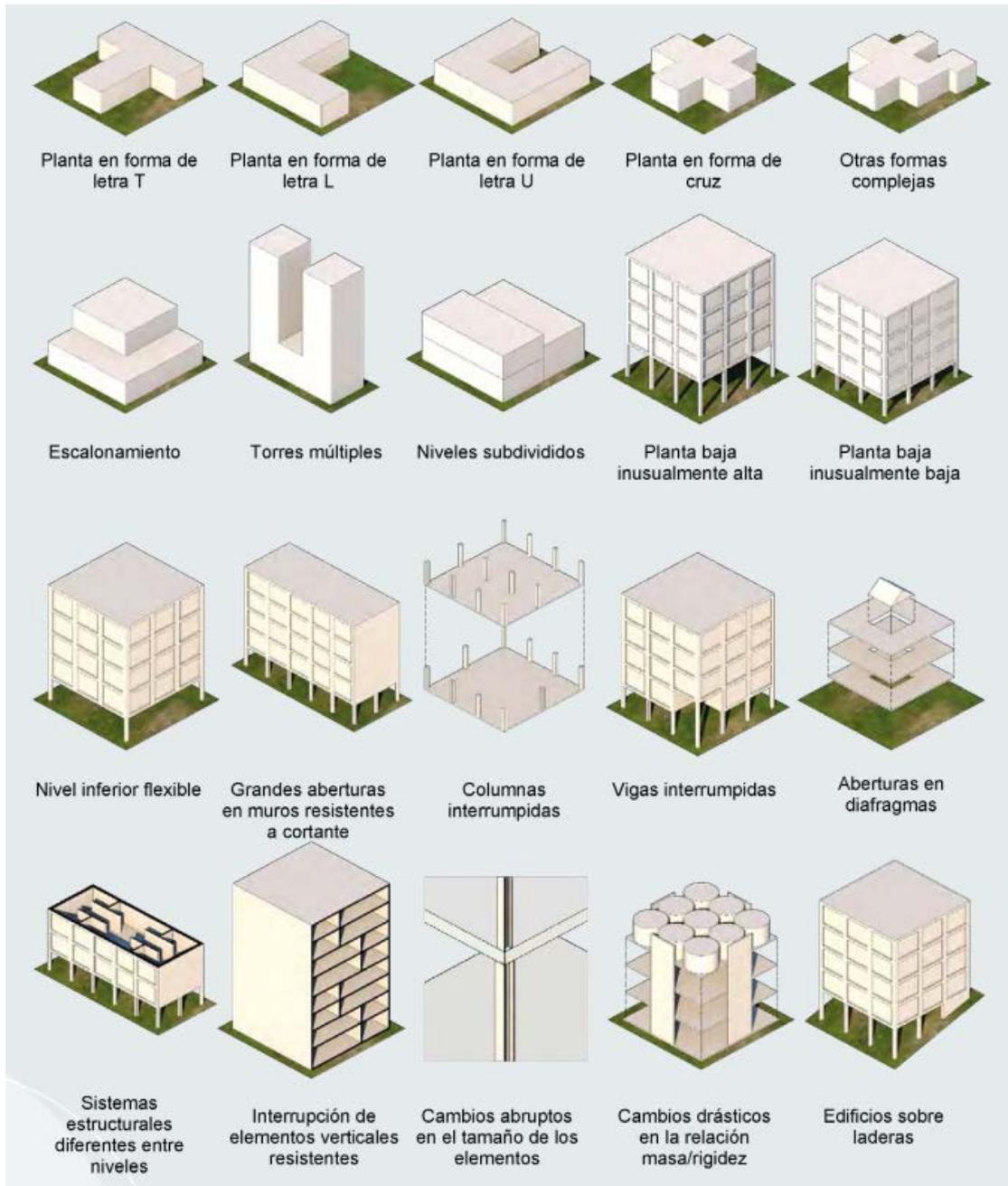


Figura 6-5. Estructuras irregulares.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

Aumento de la Rigidez Global

Si la evaluación de la estructura indica que los desplazamientos laterales son excesivos, imponiendo grandes demandas de ductilidad en elementos críticos, la rigidización global de la estructura puede ser una solución de rehabilitación. La construcción de pórticos con diagonales (Figura 6-6), o muros de cortante (Figura 6-7), son medidas efectivas para rigidizar una estructura.



*Figura 6-6. Arriostramientos externos con diagonales.
Fuente: V. Davidovici (AFPS)*



*Figura 6-7. Rigidización mediante nuevos muros de cortante.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).*

Aumento de la Capacidad Global

El refuerzo de la capacidad global de una estructura puede ser una medida de rehabilitación efectiva, si en la evaluación sísmica se identifica que el punto de cedencia de la estructura global se excede con solicitaciones sísmicas, que son muy inferiores al nivel del peligro sísmico seleccionado. Otra forma de identificar esta deficiencia, se produce cuando las relaciones capacidad/demanda son elevadas, prácticamente para todos los elementos de la

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

estructura. Añadir muros de cortante (Figura 6-7), o pórticos con diagonales (Figura 6-6), son medidas efectivas para aumentar la capacidad global de la estructura, pero también pueden aumentar, de forma significativa, la rigidez de la estructura.

Reducción de la masa

La reducción de la masa de la estructura puede ocasionar disminuciones importantes en las demandas de fuerzas y deformaciones bajo cargas sísmicas, evitando de esta manera, tener que incrementar la rigidez y capacidad estructural. La masa del edificio puede ser reducida demoliendo pisos superiores, remplazando paredes pesadas, o eliminando el almacenamiento de material y equipo pesado.

Aislamiento sísmico de base

Cuando se aísla sísmicamente una estructura, la cimentación queda separada de la estructura, mediante la inserción de aisladores sísmicos. En consecuencia, la estructura se comporta como un sistema de cuerpo rígido, con nulas o escasas deformaciones. La mayor parte de los desplazamientos, debidos a sismos, se concentran y son disipados por los aisladores, sin ser transferidos a la estructura (Figura 6-8 y 6-9). En consecuencia, las demandas en los elementos estructurales, y no estructurales, se reducen de manera significativa. Por esta razón, el aislamiento sísmico es una estrategia efectiva para proteger edificaciones que alberguen material histórico o de valor, o equipo para operaciones importantes. Esta técnica es efectiva, sobre todo, para edificios rígidos, masivos y de baja altura.

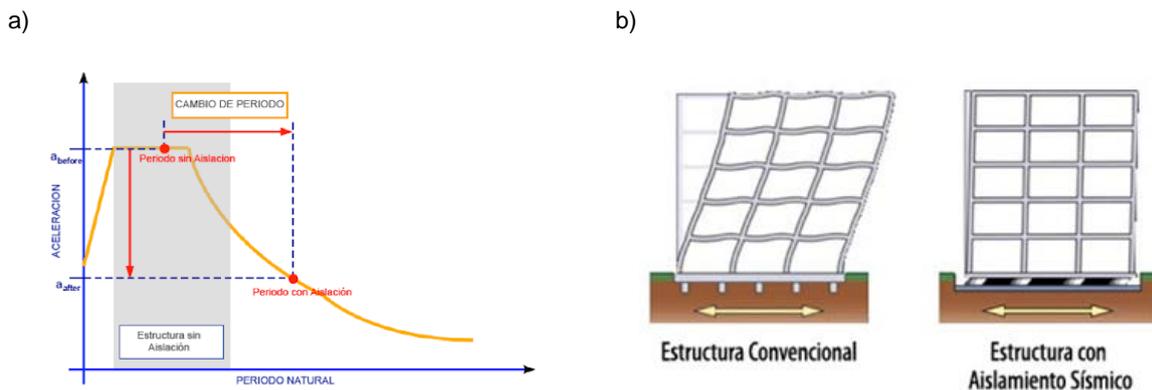


Figura 6-8. Aislamiento de base: a) reducción de la aceleración, gracias al amortiguamiento de la base, b) reducción de los desplazamientos y esfuerzos en la estructura.

Fuente: a) <https://estructurando.net/2014/10/14/aisladores-y-disipadores-sismicos/>

b) <https://www.ingecivil.net/2018/08/13/funcionan-los-aisladores-sismicos/>

Sistemas suplementarios de disipación de energía

La disposición de disipadores de energía es una estrategia de rehabilitación apropiada, cuando la evaluación sísmica indica excesivas deformaciones, debidas a una estructura muy flexible. Existe gran variedad de técnicas para la disipación controlada de la energía inducida por movimientos sísmicos, como pueden ser, amortiguadores hidráulicos, placas de cedencia, o cojines de fricción. Estas unidades usualmente necesitan experimentar deformaciones significativas para poder disipar suficiente energía y reducir los desplazamientos laterales, por

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

lo que, estas técnicas son más efectivas en estructuras flexibles y con suficiente ductilidad. Los disipadores de energía, comúnmente se instalan en pórticos con diagonales, y también añaden a la estructura cierta rigidez estática o dinámica. En consecuencia, las fuerzas que la estructura debe resistir se pueden incrementar con la disposición de disipadores (Figura 6-9 y 6-10).



*Figura 6-9. Aislador de base.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).*

a)



b)

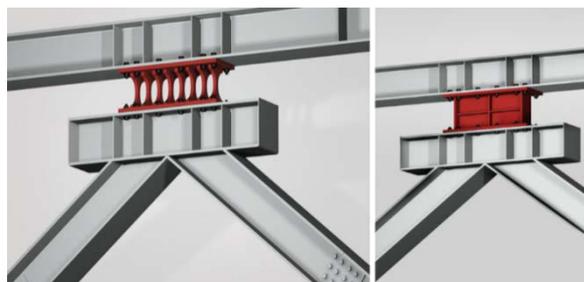


Figura 6-10. Disipadores de energía.

Fuente: a) <https://www.cdvperu.com/disipadores-sismicos-taylor/>, b) <https://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/tag/dispositivos-de-amortiguamiento/>

6.2 Técnicas comunes de rehabilitación

Adición de elementos

Esta es la medida más usada en proyectos de rehabilitación. En muchos casos se añaden muros de cortante, ver Figura 6-11, pórticos con o sin diagonales, a una estructura con deficiencias de capacidad global, rigidez global, o con diafragmas defectuosos. También se pueden añadir elementos para mitigar deficiencias en la trayectoria de las cargas, ver Figura 6-12. Por criterios de costos, usualmente la adición de nuevos elementos se equilibra con el refuerzo de elementos existentes. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que este tipo de solución puede ocasionar problemas en la trayectoria de las cargas y, que el proyectista debe asegurarse que los nuevos elementos realmente recibirán las cargas asumidas.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

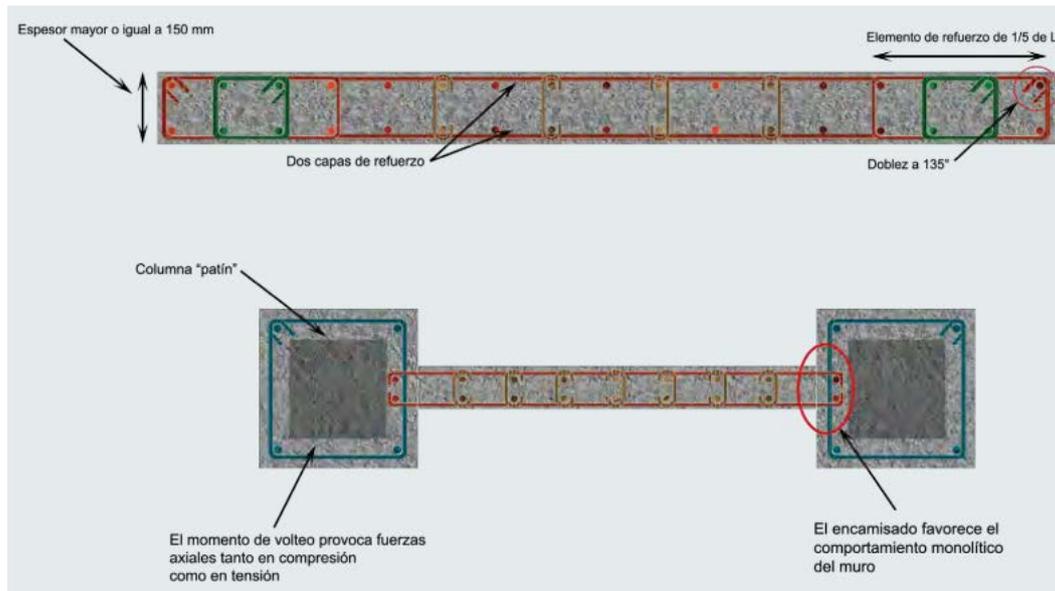


Figura 6-11. Refuerzo de extremos o adición de muro entre pilares.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

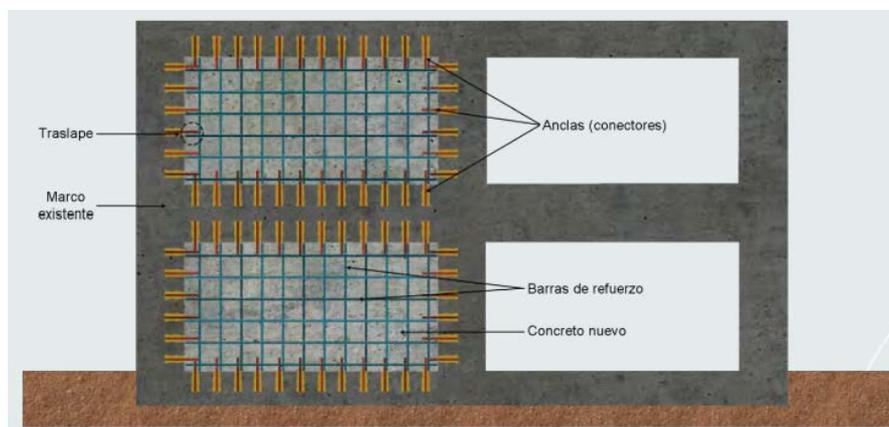


Figura 6-12. Adición de muro en pórtico.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

Una medida de rehabilitación no enfocada en la estructura global, es el refuerzo a cortante, o a flexión, de elementos aislados, o la mejora de su ductilidad, sin reducir su capacidad a cargas gravitatorias. Es importante comprobar que la secuencia en la cedencia de los elementos siga un cierto orden: las vigas antes que los pilares, las diagonales antes que las uniones, cedencia a flexión antes de fallo a cortante en pilares y muros. Para este último caso, la capacidad a cortante de pilares y muros debe ser mayor que la de cortante asociada con la capacidad a flexión.

Los pilares de hormigón pueden ser reforzados con pletinas de acero, recubrimientos de hormigón u otros materiales, para mejorar el confinamiento y la capacidad a cortante, por ejemplo, compuestos de fibra de carbono o vidrio (Figuras 6-1, 6-2, 6-3 y 6-4). Los muros de hormigón y mampostería pueden ser reforzados con capas de hormigón, placas de acero y compuestos de fibras (Figura 6-13 y Figura 6-14).

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

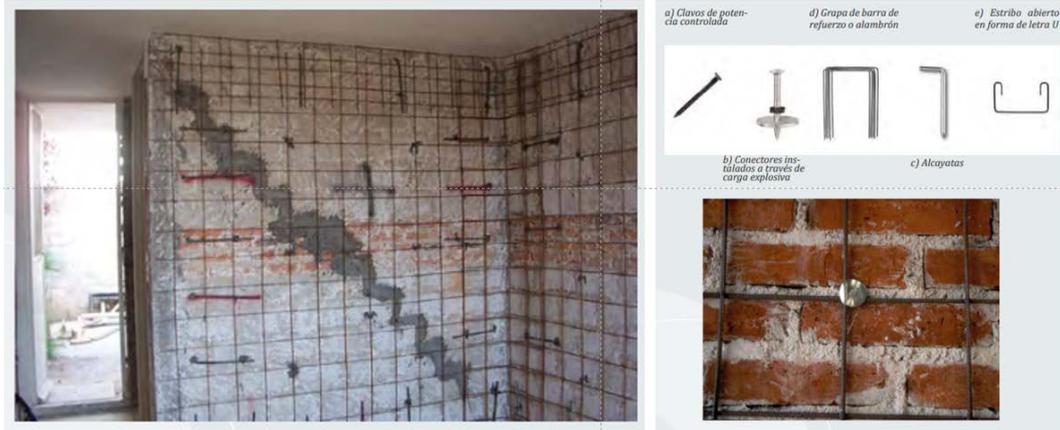
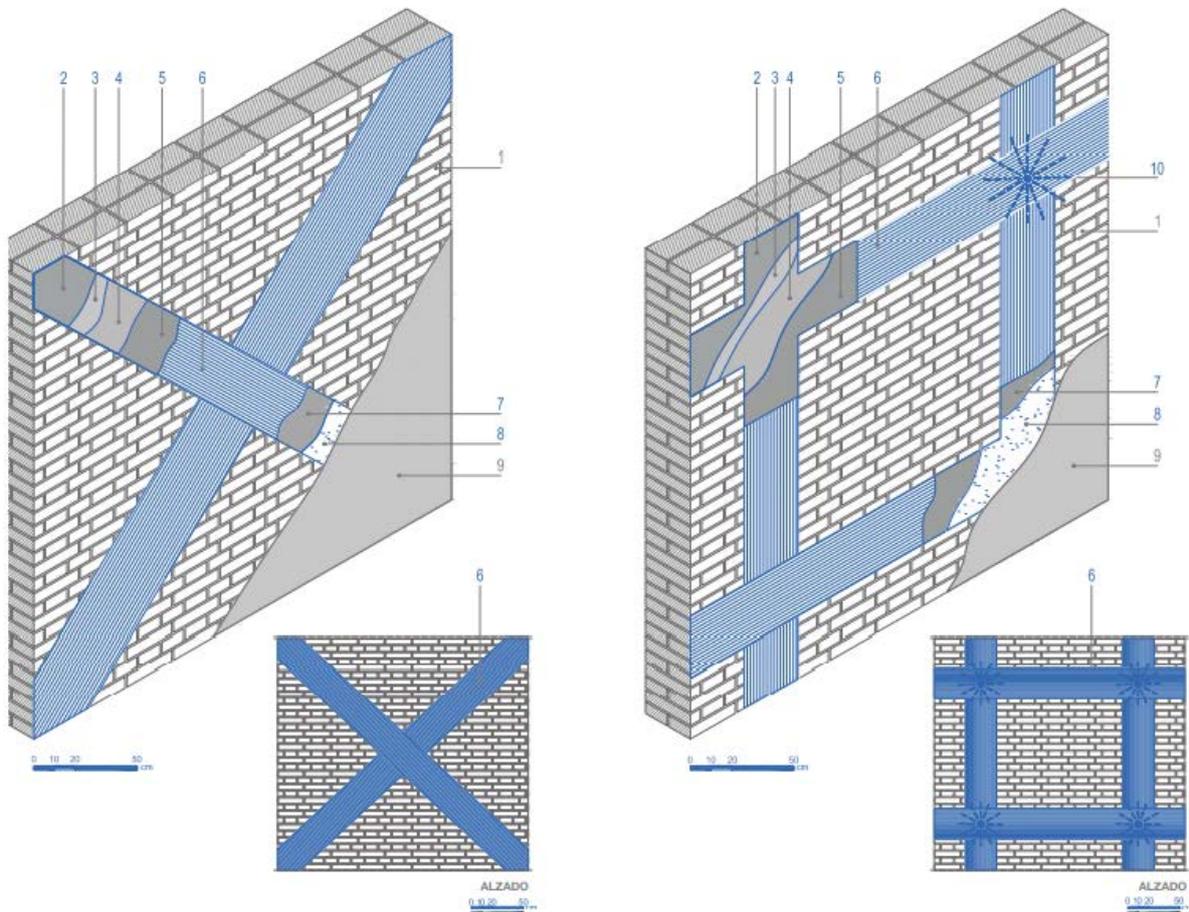


Figura 6-13. Encamisado de muros de carga.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).



1. Muro existente, 2. Reparador de mortero, 3. Imprimación epoxídica, 4. Estuco epoxídico, 5. Adhesivo epoxídico, 6. Tejido unidireccional de fibra de vidrio, 7. Adhesivo epoxídico, 8. Arena de cuarzo, 9. Acabado.

Figura 6-14. Refuerzo de muros de carga frente a acciones fuera del plano y en el plano con FRP.
Fuente: <https://www.mapei.com/es/es/noticias-y-eventos/noticias-y-eventos/news/2020/02/25/nuevo-manual-de-refuerzo-estructural-de-mapei>

Refuerzo de uniones entre elementos

Esta técnica de rehabilitación se usa, normalmente, para mitigar deficiencias en la trayectoria de carga. Este tipo de deficiencia es causada con frecuencia por una unión débil. A veces, las uniones débiles se identifican en trayectorias de carga no asociadas con el sistema de cargas primario, pero siempre deben reforzarse, para asegurar la estabilidad a cargas gravitatorias durante movimientos sísmicos fuertes (Figura 6-15).

a)



b)



Figura 6-15. Refuerzo de un nudo mediante encamisado de (a) fibras de carbono (b) de hormigón armado.

Fuente: a) <https://empaquestemperatura.blogspot.com/2018/08/reforzamiento-con-fibra-de-carbono.html>, b) (Alcocer and Murià, 2021).

Eliminación de elementos estructurales

La capacidad de deformación se puede mejorar separando elementos frágiles de la estructura, o eliminándolos completamente. También se pueden hacer aberturas verticales estrechas en muros de mampostería no reforzada para cambiar su modo principal de fallo de cortante a volteo. Otro ejemplo es crear separaciones entre parapetos y pilares, para protegerlos de rotura a cortante debido al efecto de “columna corta” (Figura 6-16). Otra opción para evitar la restricción que imponen los cerramientos, consiste en separarlos de los elementos estructurales (Figura 6-17).

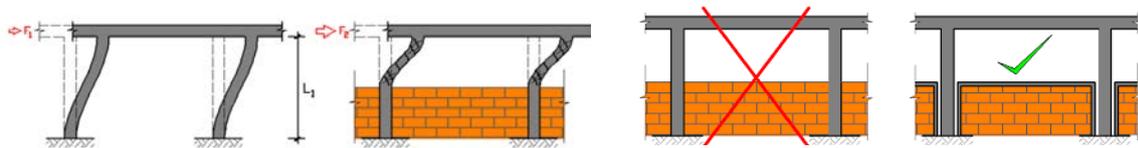


Figura 6-16. Mitigación del efecto de columna corta.

Fuente:

https://www.construccionnacero.com/sites/construccionnacero.com/files/u11/ci27_el_efecto_de_columna_corta_casos_de_estudios.pdf

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

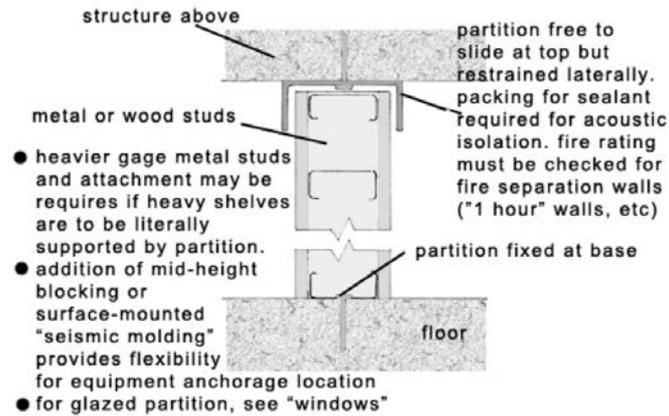


Figura 6-17. Separación de los cerramientos de la estructura.

Fuente: Manual on "Retrofitting of Existing Vulnerable School Buildings-Assessment to Retrofitting". Mission of Save the Children.

Rehabilitación de la cimentación

Existen diversas técnicas para reforzar el suelo, y por consiguiente, los cimientos de las estructuras. El objetivo es movilizar una mayor masa de suelo para mejorar el equilibrio de fuerzas (inyección de resinas o cemento, micropilotes, anclajes) y, sobre todo, mejorar el drenaje del suelo para evitar el fenómeno de la licuefacción durante eventos sísmicos. Algunas técnicas se ilustran a continuación; sin embargo, debemos enfatizar que los territorios de la región POCRISC no están muy afectados por el fenómeno de la licuefacción. Además, estos métodos de rehabilitación de cimientos requieren técnicas de intervención que son no-conventionales, y frecuentemente, también de costos muy elevados. No presentamos en esta guía detalles exhaustivos de estos métodos, ya que son muy específicos del contexto (suelo, edificio, peligro sísmico), y requieren investigaciones geotécnicas excepcionales.

La rehabilitación de la cimentación se determinará a partir del modo de comportamiento de la estructura existente que se haya identificado durante la evaluación estructural.

Los edificios que deben ser rehabilitados en su cimentación son:

- Edificios cuya rehabilitación de la estructura requerirá mayores acciones, fuerzas y momentos, internas que las que pueden resistir los elementos estructurales de la cimentación, ante los estados límite de servicio y último.
- Edificios que experimentaron daños moderados o severos en los elementos estructurales de la cimentación.
- Edificios cuya inclinación es superior al límite establecido en las Normas y que requieren refuerzos de la cimentación y/o nivelados de nuevo.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

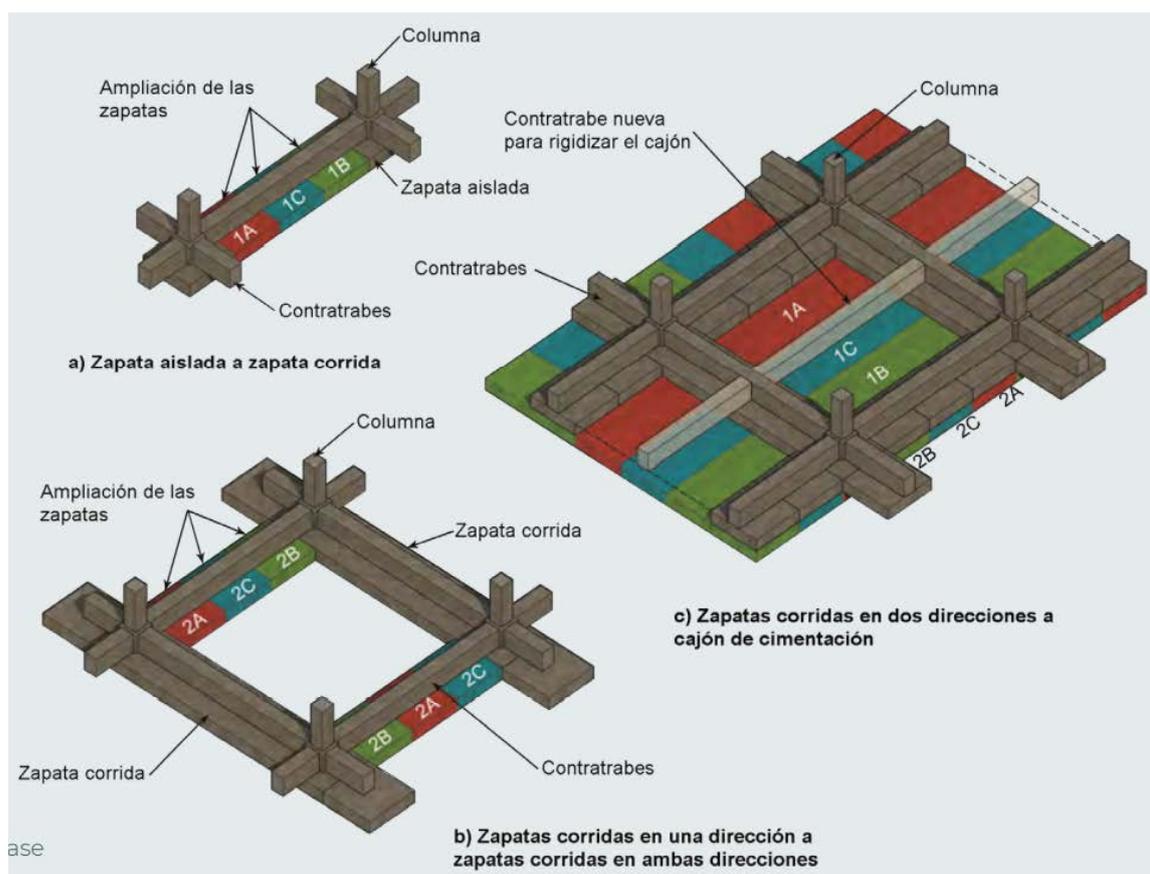


Figura 6-18. Tipos de refuerzos a cimentaciones superficiales.
Fuente: (Alcocer and Murià, 2021).

Las opciones de refuerzo de la cimentación son:

- Recalzar las zapatas aisladas aumentando la superficie.
- Modificar las zapatas aisladas para convertirlas en zapatas corridas (Figura 6-18).
- Colocar zapatas corridas transversales a las existentes (Figura 6-18).
- Convertir la cimentación superficial en losa (Figura 6-18).
- En cimentaciones de zapatas corridas bajo muros de carga, una posibilidad es realizar inyecciones de cemento o de resinas sintéticas de gran expansividad, e incluso, la colocación de minipilotes metálicos de muy pequeño diámetro (Figura 6-19).
- Si con los recalces superficiales no es suficiente, habrá que realizar recalces profundos mediante pilotes o micropilotes (Figura 6-20).

a)



b)



Figura 6-19. Recalce de zapatas corridas mediante: a) inyecciones de resinas expansivas y b) minipilotes metálicos de pequeño diámetro (aprox. 50 mm) combinados con inyecciones de resinas expansivas.

Fuente: a) <https://studylib.es/doc/6222471/patolog%C3%A1das-%E2%86%92-soluci%C3%B3n-uretek-fecha-y-lugar> y b) <http://elmaestrodecasas.blogspot.com/2012/09/uso-de-las-resinas-expansivas.html>

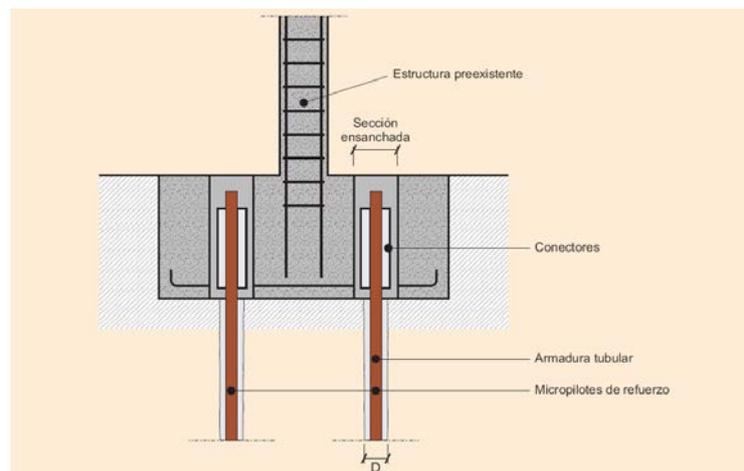


Figura 6-20. Recalces profundos mediante micropilotes.

Fuente: Guía de cimentaciones en obras de carretera de la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras (Madrid 2002)

6.3 Otras consideraciones

La selección de la mejor solución para el proyecto de rehabilitación está siempre condicionada por criterios relacionados con los usuarios de la edificación, y no tanto por la satisfacción de requisitos técnicos.

Costos

Los costos de construcción son sin duda muy importantes, y siempre se contraponen a otros criterios. Sin embargo, a veces, éstos son mucho menores que las pérdidas por la interrupción del funcionamiento del edificio, o el valor de los materiales dentro del edificio. Cuando se evalúa el costo del proyecto de rehabilitación, se debe considerar también:

- Costos de sustitución de todo el edificio.
- Edad de servicio restante del edificio.
- Antigüedad del edificio.

Para edificios no históricos, usualmente no se considera el valor residual de sus materiales. Para edificios históricos, o protegidos culturalmente, el valor residual del edificio se obtiene por el costo de sustitución, que disminuye con su antigüedad relativa a su edad restante de servicio.

Interrupción temporal de la ocupación

Cuando el edificio es ocupado total o parcialmente durante el proceso de rehabilitación, esta condición es la que domina el diseño. Para minimizar las interrupciones, se conciben soluciones que requieren intervenciones en el exterior del edificio, como muros de corte de hormigón, marcos vigas-columna y marcos de acero con diagonales, que se colocan adyacentes a muros exteriores. La conexión de esos nuevos elementos con los diafragmas debe diseñarse con especial atención.

Aunque hay una diversidad de soluciones exteriores que se pueden adoptar en caso de ocupación continua del edificio, siempre debe planificarse con cuidado el efecto del ruido, el polvo, las vibraciones, y las interrupciones de acceso, asociadas con la construcción.

Funcionamiento del edificio

La adición de un muro de carga o de un marco rígido en el interior de un edificio, forzosamente cambia la configuración de su funcionamiento. Además, debe tenerse en cuenta que los nuevos elementos reducirán la posibilidad de cambios futuros en la configuración del uso del espacio. Esta condición es en particular importante en edificios comerciales que requieren espacios de estacionamiento y de venta amplios.

Aspectos arquitectónicos

En edificios históricos la preservación del tejido histórico controla el diseño con frecuencia, e incluso, los niveles de comportamiento. En edificios considerados no históricos, la estética es considerada, pero muchas veces termina sacrificada, para reducir los costos de construcción.

6.4 Elementos no estructurales

La rehabilitación sísmica de elementos no estructurales se hace según los niveles de comportamiento seleccionados. Este es un tema de importancia pues muchos de los daños a las personas que pueden darse durante un sismo, provienen de objetos que caen o que se desplazan bruscamente. Las medidas para mitigar el riesgo por daños asociados a elementos

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

no estructurales son numerosas, y por limitaciones de espacio no podemos cubrirlas integralmente en esta guía. A continuación, se proporciona solamente una lista de medidas comunes de rehabilitación (FEMA 547, 2006):

- Substitución de elementos: requiere la eliminación completa del elemento junto con sus uniones. Por ejemplo, la sustitución del revestimiento o parapetos en fachadas. Los nuevos elementos deben proyectarse siguiendo la normativa para construcciones nuevas.
- Refuerzo de elementos: requiere refuerzos de los elementos para mejorar su capacidad, por ejemplo, la soldadura de elementos para reducir el pandeo.
- Reparación de elementos: requiere la reparación de partes dañadas de elementos, por ejemplo, uniones con corrosión en elementos de fachada.
- Arriostramiento: se trata de añadir elementos y uniones que arriostren el elemento mismo, o lo conecten a la estructura. Por ejemplo, un cielo raso puede ser rehabilitado añadiendo cables de arriostramiento o, en el caso de petos de cubierta, éstos pueden arriostrarse a la estructura del forjado (Figura 6-21).

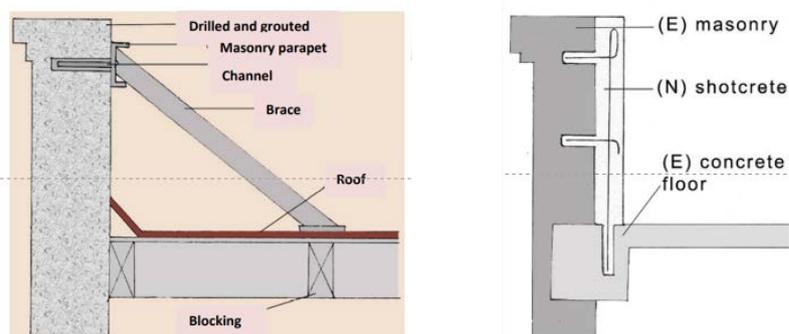


Figura 6-21. Arriostramiento de petos de cubierta con la estructura del forjado.
Fuente: Manual on "Retrofitting of Existing Vulnerable School Buildings-Assessment to Retrofitting". Mission of Save the Children.

- Fijación: se hace primordialmente con métodos mecánicos, como el atornillado a soportes. Apoyos y fijaciones de aparatos mecánicos y eléctricos se deben proyectar según las normativas vigentes (Figura 6-22). Aquí se dan algunas recomendaciones:
 - Los apoyos y fijaciones deben revisarse para la transmisión efectiva de cargas sísmicas.
 - Las fijaciones embebidas en hormigón deben resistir cargas cíclicas.
 - Los ganchos en armaduras se pueden usar si no trabajan a flexión.
 - Los anclajes que son taladrados e inyectados con lechada para aplicaciones de tracción, deben ser de cemento de alta calidad o epoxi.
 - Diseño cuidadoso de apoyos en elementos estructurales de acero.
 - Los elementos montados en sistemas de aislamiento sísmico deben tener elementos de restricción de desplazamientos en cada dirección horizontal.
 - Los elementos de iluminación suspendidos del cielo raso pueden ser rehabilitados con cables que los fijan directamente al techo o piso superior.

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

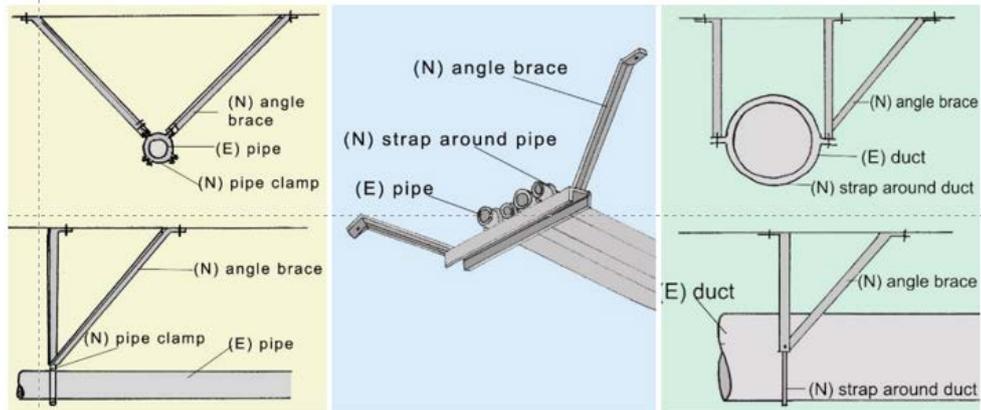


Figura 6-22. Fijación mecánica de instalaciones.
Fuente: Manual on "Retrofitting of Existing Vulnerable School Buildings-Assessment to Retrofitting". Mission of Save the Children.

7 BIBLIOGRAFÍA

- AIS. (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente – NSR 98. Bogotá.
- Alcocer, S. M., Muria, D. (2021). Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica. Mexico.
- ASCE/SEI 41-06. (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Reston, Virginia. Retrieved from www.pubs.asce.org
- ATC-3-06. (1978). Tentative provisions for the development of seismic regulations for building. California.
- ATC-40. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete building. Volume 1 and 2. Report No. SSC 96-01. Redwood City.
- Bertero, R., Bertero, V. (1992). Tall reinforced concrete building: Conceptual earthquake-resistance design methodology. Report No. UCB/EERC-92/16. Berkeley.
- Blázquez, A., Lantada, N., González-Drigo, R., Pujades, L.G., Meza K. (2022). Matriz Tipológica de Edificios de la zona POCRISC. Documento transversal de soporte los entregables de la Acción 4. ACE, UPC, BRGM. 59 pp.
- Cardona, O. (1999). Vulnerabilidad sísmica de hospitales – Fundamentos para ingenieros y arquitectos. Monografías de Ingeniería Sísmica.
- CEN. (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels.
- FEMA-356. (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Reston, Virginia.
- FEMA 547. (2006). Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Fema 547, 571. <https://doi.org/10.1061/9780784408841>
- Freeman, S., Nicoletti, J., Mataumura, G. (1984). Seismic design guidelines for essential building. In Proceedings of the 8th WCEE, Tokyo. Japan (pp. 715–722).
- Goltz, J. (1994). The Northridge, California earthquake of January 17, 1994: General reconnaissance report NCEER-94-05. California.
- Rojas, N. (2005). Consideración de las columnas cortas en la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. Tesis de Maestría.
- SEAOC. (1995). Performance based seismic engineering of buildings. Sacramento.
- Valcárcel, J., Barbat, A., Pujades, L. (2008). Documento de soporte para rellenar los formularios para el análisis de la vulnerabilidad sísmica física de hospitales. Anexo Técnico. Barcelona.
- Paricio, A. (2017). La casa de cós al Maresme. Habitatge, arquitectura i construcció. Canet de Mar (Barcelona).
- Paricio, A. (2001). Secrets d'un sistema constructiu L'Eixample. Barcelona.
- Alcocer, S.M., Murià, (2021) D. Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía Técnica. México.
- Darshan, H., Pribadi, K.S., Kusumastuti, D., Lim, E. Manual on “Retrofitting of existing vulnerable school buildings – assessment to retrofitting” part I Missions of Save the Children.
- Mapei (2020). Manual de refuerzo estructural. [Nuevo manual de Refuerzo Estructural de Mapei | Mapei](#). 180 páginas
- Ministerio de Fomento (2019). Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C

E4.2.3 Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica

Cimentaciones. Madrid.