Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México

Guía técnica



Escuela secundaria "General Heliodoro Charis Castro", Edificio D. Juchitán de Zaragoza, Oaxaca.

INIFED
Infraestructura Educativa
EN LIQUIDACIÓN

BANOBRAS
Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C

Directorio

Secretaría de Educación Pública

Esteban Moctezuma Barragán
Secretario de Educación Pública

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación

Jorge Javier Jiménez Alcaraz
Director General

Gabriela Quiroga García
Coordinadora Técnica

Ildefonso González Morales
Director de Infraestructura

Alberto Israel Sánchez López
Gerente de Asuntos Jurídicos

Tonatiuh Balanzario Salazar
Asesor de la Dirección General

Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica

GOBIERNO DE MÉXICO

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

INIFED
INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA
EN LIQUIDACIÓN

BANOBRAS
BANCO NACIONAL DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS S.N.C

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

BANOBRAS
BANCO NACIONAL DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS S.N.C

Se agradece la participación del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C., en su carácter de Institución Fiduciaria en el Fideicomiso Número 1936, denominado Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), por haber otorgado los recursos necesarios para realizar esta obra.

Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica

Preparada por el Instituto de Ingeniería
de la Universidad Nacional Autónoma de México
en colaboración con el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación

Autores

Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Coordinador

David Murià Vila
Co-coordinador

Jorge L. Abarca Juárez
Rubén Bautista Monroy
Germán A. Bogoya Bernate
Víctor D. Cruz Eligio
Yaneivy Martínez Padrón
Bernardo Moctezuma Gómez
Diana C. Ramírez Quintero
Gianella A. Valencia Ronquillo

Los autores agradecen a las siguientes personas la elaboración de figuras:
Andrés Ayala Ventura
Renato Berrón Alvarado
Sebastián Martínez Negrete

INIFED
INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA
EN LIQUIDACIÓN

BANOBRAS
BANCO NACIONAL DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS S.N.C

Enero 2021

Responsable de la edición: Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Coordinación de la edición: Mercedes Gallardo Gutiérrez
Corrección de estilo: Adriana Guerrero Tinoco
Diseño editorial: Tania Zaldívar Martínez
Primera edición: 25 de enero de 2021

D.R. 2021

INIFED, en Liquidación
Av. Vito Alessio Robles No. 380,
Col. Florida, Álvaro Obregón,
Ciudad de México, C.P. 01030
www.inifed.gob.mx

ISBN: En trámite

Esta edición y sus características son propiedad del Instituto Nacional
de Infraestructura Física Educativa, en Liquidación, y del Banco Nacional de Obras
y Servicios Públicos.

Cualquier copia o reproducción del material de esta publicación deberá de contar de
manera previa con las autorizaciones que para cada caso se requiera.

Impreso y hecho en México

Asesores y revisores

José Carlos Arce Riobóo
Project Management and Design

Tonatiuh Balanzario Salazar
INIFED, el Liquidación

Renato Berrón Ruiz
Instituto para la Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México

Francisco Chacón García
Asociación Mexicana de Directores Responsables de Obra y Corresponsables

Alberto Cuevas Rivas
Ingenieros Cuevas - Consorcio EXCOGE

Óscar De la Torre Rangel
Proyecto Estructural

Francisco De Pablo Galán
Consultor independiente

Marco Faradji Capón
Terracota Arquitectos - Laboratorios LANC

Francisco García Álvarez
García Jarque Ingenieros

Francisco García Jarque
García Jarque Ingenieros

Óscar M. González Cuevas
Universidad Autónoma Metropolitana- Unidad Azcapotzalco

Rodrigo Guerrero Requis
INIFED, en Liquidación

Miguel Ángel Guzmán Escudero
Consultor independiente

Raúl Jean Perrilliat
Jean Ingenieros

Jorge I. Leautaud Zamanillo
CLASA

José Luis López Rodríguez
INIFED, en Liquidación

Roberto Meli Piralla
Instituto de Ingeniería de la UNAM

Carlos Tapia Castro
CTC Ingenieros Civiles

Eduardo Vidaud Quintana
REM+E Ingeniería

Índice

Presentación 15
Prólogo 17
Notación 19
Definiciones 23

Capítulo 1
Consideraciones generales 27
1.1 Propósito, alcance y limitaciones 27
1.2 A quién va dirigida 29
1.3 Contexto de la evaluación y rehabilitación sísmicas 29
1.4 Organización de la Guía técnica 30
1.5 Cómo usar la Guía técnica 32
1.6 Breve descripción del comportamiento sísmico de la infraestructura física educativa de México 33
1.7 Rehabilitación sísmica de edificios escolares y de prototipos CAPFCE/INIFED 53

Capítulo 2
Requisitos generales de la rehabilitación 57
2.1 Alcance 57
2.2 Responsabilidades 59
2.3 Proyecto ejecutivo 60
2.4 Criterios para evaluación y diseño de la rehabilitación 61
2.5 Métodos de rehabilitación 62
2.6 Estrategias de rehabilitación 62

Capítulo 3
Cargas, factores de carga y factores de resistencia 69
3.1 Alcance 69
3.2 Factores de carga y combinaciones de carga 70
3.3 Factores de resistencia para el diseño de la rehabilitación 70
3.4 Factores de resistencia para la evaluación 71
3.5 Combinaciones de carga adicionales para estructuras rehabilitadas con sistemas externos 71

Capítulo 4
Evaluación y análisis estructural 73
4.1 Alcance 73
4.2 Investigación de las características de los edificios existentes 74
4.3 Métodos de análisis 84
4.4 Pruebas de carga 86

Capítulo 5
Diseño 87
5.1 Alcance 87
5.2 Estados límite de falla y de servicio 88
5.3 Comportamiento de sistemas rehabilitados 88
5.4 Adherencia de materiales de rehabilitación a base de cemento 88
5.5 Materiales 91
5.6 Consideraciones de diseño y detallado 91
5.7 Rehabilitación usando compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF) 95
5.8 Diafragmas 98

Capítulo 6
Técnicas de rehabilitación de edificios existentes 99
6.1 Alcance 99
6.2 Reparación local de elementos estructurales 102
6.3 Reparación de grietas mediante fluidos 107
6.4 Reemplazo de elementos estructurales dañados 114
6.5 Conexión entre elementos existentes y materiales o elementos nuevos 117
6.6 Encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado 124
6.7 Encamisados de vigas, columnas o nudos con acero 136
6.8 Encamisados de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF) 148
6.9 Encamisado de muros de mampostería 161
6.10 Adición de muros de concreto 175
6.11 Adición de contraventeos de acero 191
6.12 Adición de contraventeos metálicos a base de cables postensados 207
6.13 Sustitución o adición de muros diafragma de mampostería 210

6.14 Separación y recorte de pretiles en marcos de concreto o acero 215
6.15 Sistemas de protección pasiva 218
6.16 Rehabilitación de la cimentación 221

Capítulo 7
Durabilidad 235
7.1 Alcance general 235
7.2 Recubrimiento 236
7.3 Grietas 236
7.4 Corrosión y deterioro del refuerzo de elementos metálicos embebidos 237
7.5 Protección del refuerzo contra la corrosión 242
7.6 Tratamiento de la superficie y revestimientos 243

Capítulo 8
Construcción 245
8.1 General 245
8.2 Apuntalamiento y arriostramiento temporales 246
8.3 Condiciones temporales 248
8.4 Protección ambiental 248

Capítulo 9
Aseguramiento de la calidad 249
9.1 Alcance 249
9.2 Supervisión 250
9.3 Prueba de materiales de rehabilitación 250
9.4 Visitas del proyectista 251
9.5 Plan de aseguramiento de la calidad de la construcción 251
9.6 Requisitos de aseguramiento de la calidad de la construcción 251

Glosario **253**

Apéndice **267**

Bibliografía **277**





Presentación

En el territorio nacional existen aproximadamente 265,000 planteles escolares, en los cuales se ofrecen servicios educativos a más de 36 millones de estudiantes de los distintos niveles y donde laboran más de 2.1 millones de docentes. Del total de planteles, 22,704 fueron construidos hace 50 años o más, los cuales, por la falta de un mantenimiento adecuado y otros factores asociados al paso del tiempo, presentan un grado alto de deterioro, especialmente en el acero de refuerzo o en su estructura metálica, y que demandan recibir una atención inmediata y un tratamiento especial para mejorar su seguridad estructural ante la ocurrencia de fenómenos naturales y otros peligros.

México es un país altamente sísmico, afectado por la ocurrencia de sismos de subducción a lo largo de la costa del océano Pacífico, sismos intraplaca profundos causados por la ruptura de la placa del Pacífico ya subducida, y sismos corticales producidos por fallas locales. Dada la alta sismicidad, la probabilidad de que en el futuro ocurran fenómenos de gran magnitud, con sus consecuentes elevadas intensidades, es muy alta. En las últimas décadas, han ocurrido siete grandes sismos que, además de haber ocasionado la lamentable pérdida de vidas humanas, han provocado importantes daños materiales en edificios y en la infraestructura.

Los eventos sísmicos más recientes que generaron daños en la infraestructura física educativa ocurrieron en el año 2017: el primero el 7 de septiembre, en Tehuantepec, de magnitud 8.2 y que afectó sobre todo a los estados de Chiapas y Oaxaca, y el segundo el 19 de septiembre, de magnitud 7.1, ocurrido aproximadamente a 60 km al suroeste de Puebla y a 114 km al sureste de la Ciudad de México. En este sismo, los daños se concentraron en los estados de Puebla, Morelos, México y la Ciudad de México.

La ocurrencia de desastres por fenómenos naturales ha favorecido la implantación de mejoras en la normatividad, así como la asignación de recursos para prevenir, atender y mitigar las afectaciones provocadas por este tipo de eventos. Sin embargo, dado que la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos,* en su artículo 115, faculta al

municipio para normar el uso de suelo y otorgar las licencias y permisos de construcción de inmuebles, en México no se cuenta con un reglamento de construcciones de alcance federal, por lo que persiste la falta de normas, guías y manuales técnicos para la evaluación de la seguridad estructural de edificios de concreto, mampostería y acero para fines de rehabilitación.

En la práctica, los reglamentos de construcción y normas técnicas complementarias de la Ciudad de México, actualizados en 2017, sirven como modelo al resto del país, pero no se puede garantizar su aplicación por parte de las entidades federativas y de los municipios. Como complemento, se emplea la actualización más reciente del capítulo de Diseño por Sismo del *Manual de Diseño de Obras Civiles* de la Comisión Federal de Electricidad, en lo referente a la definición de los niveles de fuerzas sísmicas inducidas para los cuales se debe diseñar un edificio.

Es así que la Secretaría de Educación Pública, a través del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED), en Liquidación, en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se ha dado a la tarea de preparar este documento que contiene reglas técnicamente sólidas para rehabilitar edificios escolares; en él se establecen los requisitos mínimos para la evaluación y rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa pública y privada de México. Asimismo, se incluyen las especificaciones y lineamientos para rehabilitar edificios escolares existentes como resultado de un sismo y también es aplicable en programas preventivos, cuando la autoridad correspondiente así lo determine. Esta obra satisface la necesidad urgente de contar, en un solo documento, con los requisitos de análisis, diseño, construcción y supervisión de la rehabilitación de la infraestructura física educativa. Se han incorporado los avances más recientes para cada una de las técnicas de rehabilitación referidas. Más aún, estos requisitos son igualmente aplicables a la rehabilitación de estructuras destinadas para otros fines.

Agradezco a los Institutos para la Seguridad de la Construcciones de la Ciudad de México, al Instituto de Ingeniería de la UNAM, a las asociaciones y colegios de profesionales, así como a los profesionistas que han colaborado en este proyecto y que, estoy seguro, seguirán apoyando esta cruzada por la seguridad estructural de los planteles escolares de todo el país.

Ing. Jorge J. Jiménez Alcaraz.

Prólogo

Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica, fue desarrollada por la Secretaría de Educación Pública, a través del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación. El propósito de la Guía técnica es proveer a los proyectistas, constructores, directores responsables de obra, corresponsables en seguridad estructural y propietarios de edificios, reglas técnicamente sólidas y aceptadas para rehabilitar edificios escolares ante sismos.

La obra incluye requisitos mínimos para la evaluación, análisis, diseño, construcción y aseguramiento de la calidad de la rehabilitación de sistemas, componentes y elementos estructurales de edificios existentes; es aplicable a edificios escolares construidos con planos y especificaciones de prototipos del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE) o del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED).

Los requisitos establecidos en este documento también son aplicables a edificios escolares que no cumplen con ser prototipos del CAPFCE o del INIFED.

Este documento es de observancia obligatoria para la rehabilitación de escuelas del Sistema Educativo Nacional, propiedad del Estado y de particulares.

La Guía técnica es complementaria de la Norma Mexicana para la Seguridad de la Infraestructura Física Educativa (NMX-R-079-SCFI-2015), del Reglamento local y de sus Normas Técnicas Complementarias, así como del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (para los análisis de interacción suelo-estructura).

Notación

A_{ancla} *Área de la sección transversal del ancla de conector de CPRF, mm².*
$A_{abanico}$ *Área del abanico de un conector de CPRF, mm².*
A_c *Área proyectada de la superficie de falla del cono de concreto de un anclaje único, mm².*
$A_{col,\ existente}$ *Área de la sección transversal de la columna existente, mm².*
$A_{encamisado}$ *Área de la sección transversal del concreto nuevo, mm².*
A_s *Área transversal de la sección del contraventeo, mm.*
A_{s0} *Área efectiva de la sección transversal de la barra de acero roscada, o área nominal de la sección transversal de la barra de anclaje, mm².*
A_{sa} *Área de la sección transversal del conector de expansión en la interfaz del concreto, o área de la sección transversal del conector adhesivo, mm².*
A_{se} *Área mínima de la sección transversal del conector de expansión, mm².*
A_{sh} *Suma del área de la sección transversal de estribos y grapas, mm².*
A_t *Área total de la sección transversal de un miembro, mm².*
b *Ancho efectivo, no reducido, de la sección, mm.*
b_a *Ancho de la sección transversal del ángulo, mm.*
b_b *Ancho efectivo, no reducido de la viga, mm.*
b_c *Ancho efectivo, no reducido de la columna, mm.*
b_2 *Dimensión transversal de la sección de la columna perpendicular a la dirección de análisis, mm.*
CP *Cargas permanentes.*
CV *Cargas variables.*
c *Cohesión del suelo, t/m³.*
D *Diámetro o diagonal de la sección para diseño de CPRF, mm.*
d *Peralte efectivo de la sección, mm.*
d_a *Diámetro del conector, diámetro nominal de la barra de anclaje para conectores adhesivos o diámetro del fuste del conector de expansión, mm.*
d_b *Diámetro del acero de refuerzo transversal, de la barra de acero roscada, o de la barra de anclaje, mm.*
d_{bl} *Diámetro del acero de refuerzo longitudinal.*
d_0 *Diámetro del barreno para un conector de CPRF, mm.*
E *Módulo de la elasticidad del acero estructural, MPa (kg/cm²).*
E_c *Módulo de la elasticidad del concreto de peso normal, MPa (kg/cm²).*
E_f *Módulo de elasticidad del CPRF, MPa.*
E_m *Módulo de elasticidad de la mampostería para esfuerzos de compresión normales a las juntas, MPa (kg/cm²).*
E_s *Módulo de la elasticidad del acero de refuerzo, MPa (kg/cm²).*
F_m *Fricción negativa, N (kg).*
F_R *Factor de resistencia.*
F_y *Esfuerzo especificado de fluencia del acero estructural, MPa (kg/cm²).*
f_c' *Resistencia especificada del concreto a compresión, MPa (kg/cm²).*

$f'_{c\,eq}$ *Resistencia a compresión del concreto o su equivalente para revisión de un nudo encamisado, MPa (kg/cm²).*

f_{fe} *Tensión efectiva del CPRF, MPa (kg/cm²).*

f_{fu} *Resistencia última de la tensión del CPRF, MPa (kg/cm²).*

f_s *Esfuerzo máximo que puede ser desarrollado por una barra anclada o traslapada, MPa.*

f_m' *Resistencia especificada de la mampostería a compresión, referida al área bruta, MPa (kg/cm²).*

f_u *Esfuerzo último del acero de refuerzo longitudinal, MPa (kg/cm²).*

f_y *Esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo, de anclas y conectores, MPa (kg/cm²).*

f_{ya} *Esfuerzo especificado de fluencia del conector, MPa.*

$f_{yL/E}$ *Límite inferior o valor esperado del esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo, MPa (kg/cm²).*

G_m *Módulo de cortante de la mampostería, MPa (kg/cm²).*

H *Altura del muro en consideración, o también profundidad de la capa dura, mm.*

h *Peralte del elemento estructural, mm.*

h_a *Altura (peralte) de la sección transversal del ángulo, mm.*

h_c *Altura de la estructura, m.*

h_{ef} *Profundidad de empotramiento efectiva de un conector, mm.*

h_{sol} *Altura de la solera, mm.*

K *Factor de longitud efectiva.*

K_{tr} *Índice de refuerzo transversal.*

k_β *Factor de reducción para conectores de CPRF a β grados.*

L *Longitud libre de un elemento, mm.*

l_b *Longitud de desarrollo, de anclaje o de traslape disponible, mm.*

l_d *Longitud de desarrollo, de anclaje o de traslape requerida por NTC-Concreto, mm.*

l_s *Longitud de la solera, mm.*

l_v *Claro de cortante e igual a la distancia entre la sección de momento máximo y el punto de inflexión en el diagrama de momentos, mm.*

M_p *Momento plástico resistente nominal de un miembro en flexión, N mm (kg cm).*

m_y *Módulo de compresibilidad del suelo, cm²/kg.*

N_a *Esfuerzo nominal de tensión del conector, MPa (kg/cm²).*

N_{cb} *Resistencia a tensión en el conector cuando se produce una falla mixta (formación de un cono en el concreto y falla por adherencia), N (kg).*

N_{cc} *Resistencia a tensión en el conector cuando se produce la falla del concreto en forma de cono, N (kg).*

N_{fr} *Resistencia a tensión de la fibra usada en ancla de CPRF, N (kg).*

N_{sd} *Resistencia a la adherencia del abanico de un conector de CPRF, N (kg).*

n *Número de pisos arriba del nivel de banqueta, o también número de capas de CPRF.*

P *Carga axial máxima a compresión o a tensión, o también peso total del prisma de arcilla N (kg).*

p_c *Cuantía de refuerzo de confinamiento considerada equivalente a los estribos, su límite superior es de 0.012.*

p_m *Cuantía de refuerzo paralelo a la dirección de la fuerza de diseño calculada con la ecuación 7.4.4 de las NTC-Concreto.*

p_n *Cuantía de refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño calculada con la ecuación 7.4.5 de las NTC-Concreto.*

Q *Factor de comportamiento sísmico.*

Q_c *Carga de fluencia de la celda, N (kg).*

Q_f *Capacidad a fricción del pilote, N (kg).*
Q_p *Capacidad última de punta, N (kg).*
q_c *Resistencia a la penetración de cono eléctrico, kg/cm².*
R_c *Resistencia del contraventeo en compresión axial según el inciso 5.2.1 de las NTC-Acero, N (kg).*
R_d *Reacción dinámica de la capa dura, N (kg).*
R_e *Reacción estática de la capa dura, N (kg).*
R_n *Resistencia nominal del elemento usando las propiedades de los materiales determinadas en la sección 4.2.4 de esta Guía técnica.*
R_y *Cociente del esfuerzo de fluencia esperado entre el mínimo especificado, véase tabla 12.1.1 de las NTC-Acero.*
r *Radio de giro de una sección. también recubrimiento, mm.*
s_f *Separación entre los ejes de las bandas de CPRF, mm.*
s *Separación del refuerzo transversal, o separación de soleras, o también separación del refuerzo helicoidal, mm.*
T_e *Periodo efectivo del sistema suelo-estructura, s.*
t *Espesor de la placa de conexión, mm.*
t_a *Espesor del ángulo de acero, mm.*
t_f *Espesor de la capa de CPRF, mm.*
t_p *Espesor de la placa de acero, mm.*
t_s *Espesor de la solera de acero, mm.*
U_h *Presión hidrostática, MPa (kg/cm²).*
U_p *Presión piezométrica del agua, MPa (kg/cm²).*
u_D *Tiempo de recepción después de la inyección, s.*
u_S *Tiempo de recepción de referencia que se obtenga en concreto sano en el mismo elemento estructural que se está evaluando, s.*
V_a *Resistencia a fuerza cortante del conector, N (kg).*
V_s *Resistencia a fuerza cortante del acero de refuerzo, N (kg).*
V_u *Cortante rasante requerido, N (kg).*
v'_m *Resistencia de unión del ancla adherida contra la fuerza de extracción, MPa.*
v_{sb} *Resistencia a compresión diagonal para diseño de la mampostería, referida al área bruta, MPa (kg/cm²).*
v_{sb} *Esfuerzo resistente a cortante de la resina epóxica, MPa (kg/cm²).*
W_c *Carga compensada, N (kg).*
W_{ds} *Carga dinámica al suelo, N (kg).*
W_{ne} *Carga neta estática, N (kg).*
W_{se} *Carga estática transmitida al suelo, N (kg).*
W_{te} *Carga total estática, N (kg).*
w_f *Ancho de la banda de CPRF, mm.*
ΔW_s *Incremento de carga por sismo, N (kg).*
α *Ángulo del semi-abanico en conectores de CPRF, grados.*
β *Ángulo de inclinación del conector, rad.*
ε_{fe} *Deformación unitaria efectiva del CPRF.*
ε_{fu} *Deformación unitaria última del CPRF.*
ϕ *Ángulo de fricción interna del material, grados.*
γ *Peso volumétrico del suelo, t/m³.*
γ_m *Peso volumétrico de la capa dura, t/m³.*
ρ_l *Cuantía de acero de refuerzo longitudinal.*
σ_v *Esfuerzo efectivo, MPa (kg/cm²).*
τ_a *Resistencia a tensión de la unión del conector adhesivo que se resiste a la extracción, MPa (kg/cm²).*

Definiciones

Se define como:

i. Administración, al gobierno del municipio.
ii. Aseguramiento de la calidad, al plan, procedimientos, métodos, guía y especificaciones elaboradas para asegurar que la intención de diseño se ejecute adecuadamente en el proceso constructivo.
iii. Autoridad, a la Autoridad Federal Educativa.
iv. Capacidad estructural, a la resistencia, la rigidez, la ductilidad o capacidad de deformación en el intervalo inelástico de comportamiento, y a la habilidad para disipar energía de un elemento o componente.
v. Componente, al arreglo o conjunto de elementos estructurales que resisten cargas (por ejemplo, un marco resistente a momento arriostrado por muros diafragma).
vi. Concreto de baja contracción, al producto químico en polvo a base de cemento, agregados finos y gruesos y aditivos que al mezclarse con agua produce un mortero sin contracciones, de alta resistencia a la compresión.
vii. Constancia de Uso Condicionada, a la autorización para usar un edificio escolar, por un tiempo determinado, mientras se realizan las acciones identificadas según el NAP asignado.
viii. Constructor, a la persona física o moral encargada de ejecutar la obra de conformidad con el proyecto ejecutivo autorizado de acuerdo con el Reglamento.
ix. Corresponsable, al Corresponsable en Seguridad Estructural.
x. Director, al Director Responsable de Obra.
xi. Edificación o edificio, a la construcción sobre un predio.
xii. Estrategias de rehabilitación, al conjunto de técnicas de rehabilitación seleccionadas para eliminar o mitigar las deficiencias o daño de la estructura.
xiii. Estudio de mecánica de suelos, al informe escrito que contiene las características geológicas y geotécnicas del sitio donde se encuentre el edificio por rehabilitar, campaña de exploración, ensayes, determinación de las características mecánicas del material que compone el subsuelo, investigaciones geofísicas en su caso, y toda la información necesaria a fin de que el ingeniero geotécnico proponga la forma de resistir, las nuevas acciones y la solución de la cimentación de la estructura rehabilitada para las condiciones del terreno, incluyendo la recimentación, la excavación y las medidas de contención, estabilización del terreno y protección a colindancias.
xiv. Evaluación de la seguridad estructural, al proceso de identificación de daños, jerarquización del nivel de vulnerabilidad de elementos estructurales y no estructurales, y de determinación del nivel de seguridad de la edificación completa.
xv. Formato de Levantamiento Físico, al informe de levantamiento de datos en campo de la edificación para fines de evaluación de la seguridad estructural.

xvi. Inmueble, al terreno y construcciones que en él se encuentran.
xvii. Instituto, al Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación. Sinónimo de INIFED.
xviii. Mortero fluido sin contracción, al producto químico en polvo a base de cemento, agregados minerales y aditivos que al mezclarse con agua produce un mortero sin contracciones, de alta resistencia a la compresión. Sinónimo de grout.
xix. N-Rehabilitación, a las Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto Dañados por el Sismo del 19 de septiembre de 2017 de la Ciudad de México.
xx. NAP, al nivel de atención prioritaria asignado a cada edificio escolar, atendiendo su año de construcción, magnitud del daño y zona geotécnica, con objeto de jerarquizar y programar las acciones de evaluación y rehabilitación.
xxi. Nivel de desempeño, a la definición del comportamiento esperado del inmueble ante el o los sismos de diseño.
xxii. Normas, Normas Mexicanas de la Infraestructura Física Educativa, a las Normas Técnicas Complementarias y otras Normas del Reglamento vigente.
xxiii. NTC-Acciones, a las relacionadas con los criterios y acciones para el diseño estructural.
xxiv. NTC-Acero, a las relacionadas con el diseño y construcción de estructuras de acero.
xxv. NTC-Cimentaciones, a las relacionadas con el diseño y construcción de cimentaciones.
xxvi. NTC-Concreto, a las relacionadas con el diseño y construcción de estructuras de concreto.
xxvii. NTC-Mampostería, a las relacionadas con el diseño y construcción de estructuras de mampostería.
xxviii. NTC-Revisión, a las relacionadas con la revisión y dictamen de la seguridad estructural de las edificaciones.
xxix. NTC-Sismo, a las relacionadas con el diseño por sismo.
xxx. Objetivo de la Rehabilitación, a la selección del nivel de desempeño esperado para los sismos de diseño; en el caso de esta Guía técnica, es el establecido en las Normas Mexicanas de la Infraestructura Física Educativa, o, en su defecto, en las NTC-Sismo.
xxxi. Peligro sísmico, a la probabilidad de que se produzca un cierto movimiento del suelo.

xxxii. Propietario o poseedor, a la persona física o moral que tiene la propiedad o posesión jurídica de un bien inmueble.

xxxiii. Proyectista, a la persona física con cédula profesional encargada de realizar el proyecto estructural o de rehabilitación de acuerdo con el Reglamento, sus Normas y esta Guía técnica.

xxxiv. Proyecto ejecutivo de obra, al conjunto de planos, memorias descriptivas y de cálculo, catálogo de conceptos, normas y especificaciones que contiene la información y define el proceso de la rehabilitación de un inmueble.

xxxv. Recimentación, modificación de la cimentación para resistir las nuevas acciones.

xxxvi. Reforzamiento, al incremento de la capacidad para resistir cargas de una estructura, de un sistema, de un componente o de un elemento estructural.

xxxvii. Reglamento, al reglamento de construcciones local o, en su ausencia, para el Distrito Federal.

xxxviii. Rehabilitación, al proceso de intervención estructural para restablecer las condiciones originales (reparación) o para mejorar el comportamiento de elementos y sistemas estructurales para que la edificación cumpla con los requisitos de seguridad contra colapso y de limitación de daños establecidos en el Reglamento; incluye a la recimentación, reforzamiento, reparación y rigidización.

xxxix. Reparación, al reemplazo o corrección de materiales, componentes o elementos de una estructura que se encuentran dañados o deteriorados con el fin de recuperar su capacidad original.

xl. Resistencia de diseño, al producto de la resistencia nominal, calculada a partir de las Normas y de esta Guía técnica, y el factor de resistencia señalado en este documento.

xli. Resistencia requerida o última, al producto de la acción interna debida a cargas permanentes, variables y accidentales, y de sus factores de carga correspondientes.

xlii. Revisión de la seguridad estructural, a la comprobación de los estados límite de falla y de servicio de la estructura.

xliii. Rigidización, a la adición de elementos, componentes o sistemas para reducir los desplazamientos y las deformaciones.

xliv. Seguridad estructural, al nivel de cumplimiento de los estados límite de falla y de servicio de una estructura establecidos en el Reglamento y sus Normas.



Capítulo 1

Consideraciones generales

1.1 Propósito, alcance y limitaciones

México es un país sísmico, afectado por la ocurrencia de sismos de subducción (interplaca) a lo largo de la costa del Océano Pacífico, sismos intraplaca profundos causados por la ruptura de la placa del Pacífico, y sismos corticales producidos por fallas locales. Para fines de diseño por sismo, el país se encuentra dividido en cuatro zonas sísmicas, siendo la zona D la de mayor peligro (figura 1.1.1) (CFE, 2017b).

Los sismos de intensidades medias y altas (normalmente asociados a magnitudes superiores a 7 en la escala de Richter), han producido daños que van de ligeros a severos en edificaciones e infraestructura. Éste ha sido el caso de la infraestructura física educativa. Los daños, en términos generales, dependen de las características del sismo (magnitud, ubicación relativa del epicentro con respecto a las escuelas) y de las de la estructura (por ejemplo, edad de construcción, número de niveles, tipo de suelo, sistema estructural, calidad de construcción, calidad de mantenimiento y conservación). Después de un sismo, se inspeccionan los edificios para determinar, en un primer momento, si son aptos para ser usados o no (evaluación de Nivel 1). En una segunda etapa, días después, se revisan aquellos

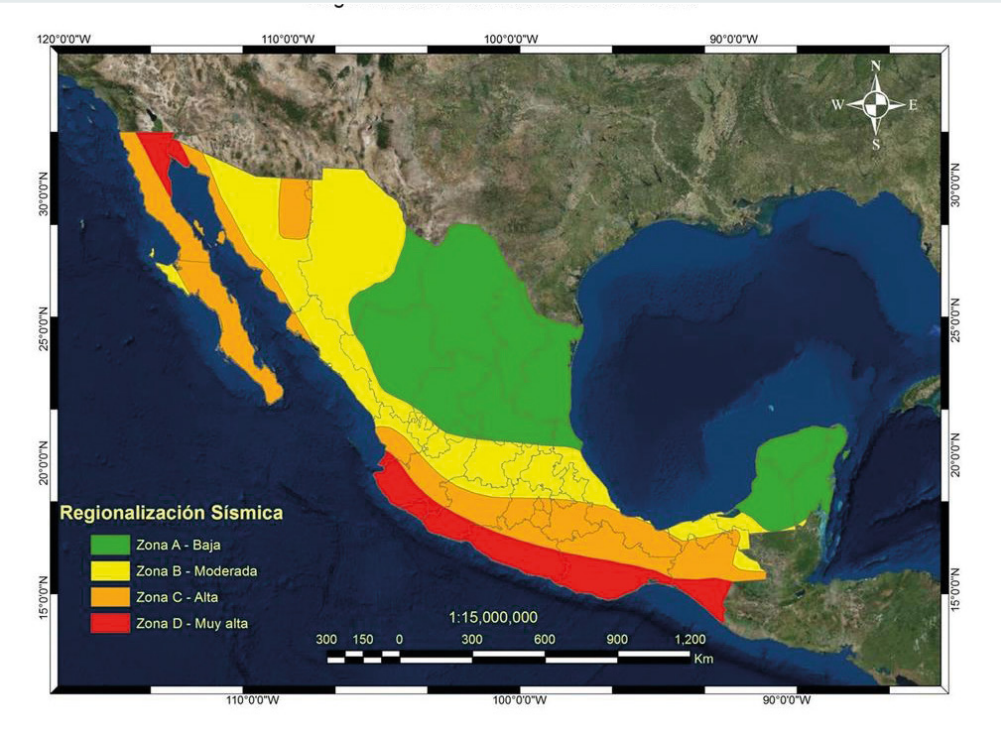


Figura 1.1.1
Regionalización sísmica de México.
Fuente: Comisión Federal de Electricidad (2017b).

edificios que resultaron en duda de la primera etapa para establecer, aunque de manera aproximada, su capacidad estructural (es decir, su resistencia, rigidez, habilidad para deformarse inelásticamente y su amortiguamiento) (evaluación de Nivel 2). Es frecuente que, como resultado de esta evaluación, se recomiende una evaluación más profunda con objeto de definir su rehabilitación, ya sea que el edificio haya experimentado daño estructural o no (Nivel 3). Los trabajos de esta etapa requieren la aplicación de requisitos normativos y de mejores prácticas con la finalidad de lograr que la edificación rehabilitada tenga el desempeño esperado.

El propósito de esta Guía técnica es presentar los requisitos mínimos para la evaluación y rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa pública y privada de México, aplicable a una evaluación de Nivel 3. En el presente documento se incluyen las especificaciones y lineamientos para rehabilitar edificios escolares existentes como resultado de un sismo. También es aplicable cuando la autoridad educativa, local y/o federal (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, INIFED, en Liquidación) así lo requiera en programas de tipo preventivo. Para ello, es frecuente que dichos mandos publiquen lineamientos para la revisión de la seguridad estructural.

La Guía técnica es un complemento de las otras disposiciones normativas para diseño estructural del poblado en el que se encuentre el edificio escolar, específicamente del reglamento de construcciones local y sus normas técnicas complementarias. En ésta se establecen los requisitos mínimos que deben cumplirse en la evaluación

detallada, el análisis estructural, el diseño, la construcción y la supervisión de edificios escolares en rehabilitación usando las técnicas más comunes. Los requisitos de la Guía técnica son producto de la experiencia mexicana en evaluación y rehabilitación sísmica de edificios, así como de la revisión de las experiencias de otros países, como Estados Unidos de América y Japón.

Se prevé que los trabajos de ingeniería que deban desarrollarse como resultado de la aplicación de los requisitos de este documento sean cubiertos por el propietario de la escuela.

La Guía técnica fue desarrollada por la Secretaría de Educación Pública, mediante el INIFED (en Liquidación), como parte de una serie de documentos sobre evaluación y rehabilitación de la infraestructura física educativa después de sismos e inundaciones.

Esta serie incluye:

- *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 1: Metodología.*
- *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación.*
- *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa. Manual de campo.*

1.2 A quién va dirigida

La Guía técnica está dirigida a los proyectistas, constructores, directores, corresponsables y propietarios, responsables de evaluar, analizar, diseñar, construir, revisar y supervisar el proceso de rehabilitación de un edificio escolar, así como de mantener y operar el inmueble en adecuadas condiciones. En la definición del contenido y de su alcance contó con la colaboración de ingenieros de distintas entidades federativas, quienes han participado en la evaluación y rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México.

1.3 Contexto de la evaluación y rehabilitación sísmicas

Cuando ocurre un sismo, la población demanda de las autoridades locales y federales información objetiva y confiable sobre la seguridad estructural de los edificios que utilizan (INIFED, 2020a). En el caso de la infraestructura física educativa de México, el sistema de evaluación postsísmica comprende tres niveles. Una descripción resumida de cada uno de ellos se presenta a continuación:

- **Primer nivel (N1),** llamado Evaluación Rápida, está diseñado para identificar, de manera expedita y simple, las estructuras aparentemente seguras y las claramente inseguras. La Evaluación Rápida se aplica en la fase de Auxilio del ciclo de emergencias.
- **Segundo nivel (N2),** denominado Evaluación Intermedia, se realiza cuando haya dudas sobre la seguridad estructural derivadas de la Evaluación Rápida. Esta evaluación es aplicada por un ingeniero estructural. Como resultado, se clasifica a las estructuras como seguras (“Uso Permitido”), potencialmente peligrosas (lo que implica “Acceso y Uso Restringidos”), o inseguras (o de “Acceso Prohibido”). Este nivel

de evaluación se aplica en la fase de Recuperación del ciclo de emergencias/desastres.

- **Tercer nivel (N3),** denominado Evaluación Profunda, se realiza por un ingeniero estructural, contratado por el propietario de la escuela, con objeto de estudiar la estructura con detalle. La intervención del ingeniero estructural implica un levantamiento minucioso del daño estructural y no estructural, la evaluación cuantitativa de la capacidad de la estructura dañada, el análisis de distintas estrategias y técnicas de rehabilitación, así como el diseño a detalle de las técnicas seleccionadas. Frecuentemente, el trabajo implica el diseño del apuntalamiento y/o arriostramiento mientras se diseña la rehabilitación (CIEEU, 2013). La Evaluación Profunda se ejecuta en la fase de Reconstrucción (sección 4.1).

En esta Guía técnica se encuentran los requisitos que deben cumplirse en la Evaluación Profunda.

En la figura 1.3.1 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento de evaluación postsísmica de un edificio escolar, así como la jerarquía en la evaluación estructural y el aviso de su resultado.

1.4 Organización de la Guía técnica

El documento consta de nueve capítulos, un apéndice y tres secciones con notación, definiciones y glosario. La organización de la Guía técnica es consistente con el proceso de evaluación, análisis, diseño y ejecución de un proyecto de rehabilitación.

En este capítulo introductorio se explican el propósito, los alcances y las limitaciones de la Guía técnica. Se describe el contexto de este documento dentro del sistema de evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED, 2020a). Se discute la manera de aplicarlo y la relación jerárquica con respecto a las Normas Mexicanas de la Infraestructura Física Educativa, las normas técnicas complementarias y otras normas del reglamento local de construcciones. Se presentan los principales modos de comportamiento de edificios escolares ante sismos, así como las técnicas de rehabilitación generalmente empleadas en las escuelas dañadas por eventos sísmicos anteriores, incluyendo los temblores de septiembre de 2017.

En el capítulo 2 se presentan los requisitos por satisfacer durante una rehabilitación. Se establecen los requisitos de cumplimiento y obligatoriedad de esta Guía técnica. Se enlistan los documentos —y sus características— que deberán incluirse en un proyecto ejecutivo. Se especifican los criterios de evaluación y de diseño estructural que se deben satisfacer durante el proceso de rehabilitación. Se establece un criterio para decidir cuándo rehabilitar un edificio existente. Finalmente, se mencionan los distintos métodos y estrategias para llevar a cabo la rehabilitación.

En el capítulo 3 se enlistan las distintas cargas y sus combinaciones que deberán satisfacerse durante el proceso de rehabilitación, así como los factores de resistencia que se deben usar para el diseño y evaluación de elementos y componentes estructurales.

En el capítulo 4 se establecen las etapas del proceso de evaluación de una estructura por rehabilitar. Se presentan las bases para evaluar la condición del edificio existente, las cuales incluyen la configuración del edificio, la determinación de propiedades de los materiales, la identificación de la condición de los elementos estructurales, entre otras. Se definen los requisitos a considerar

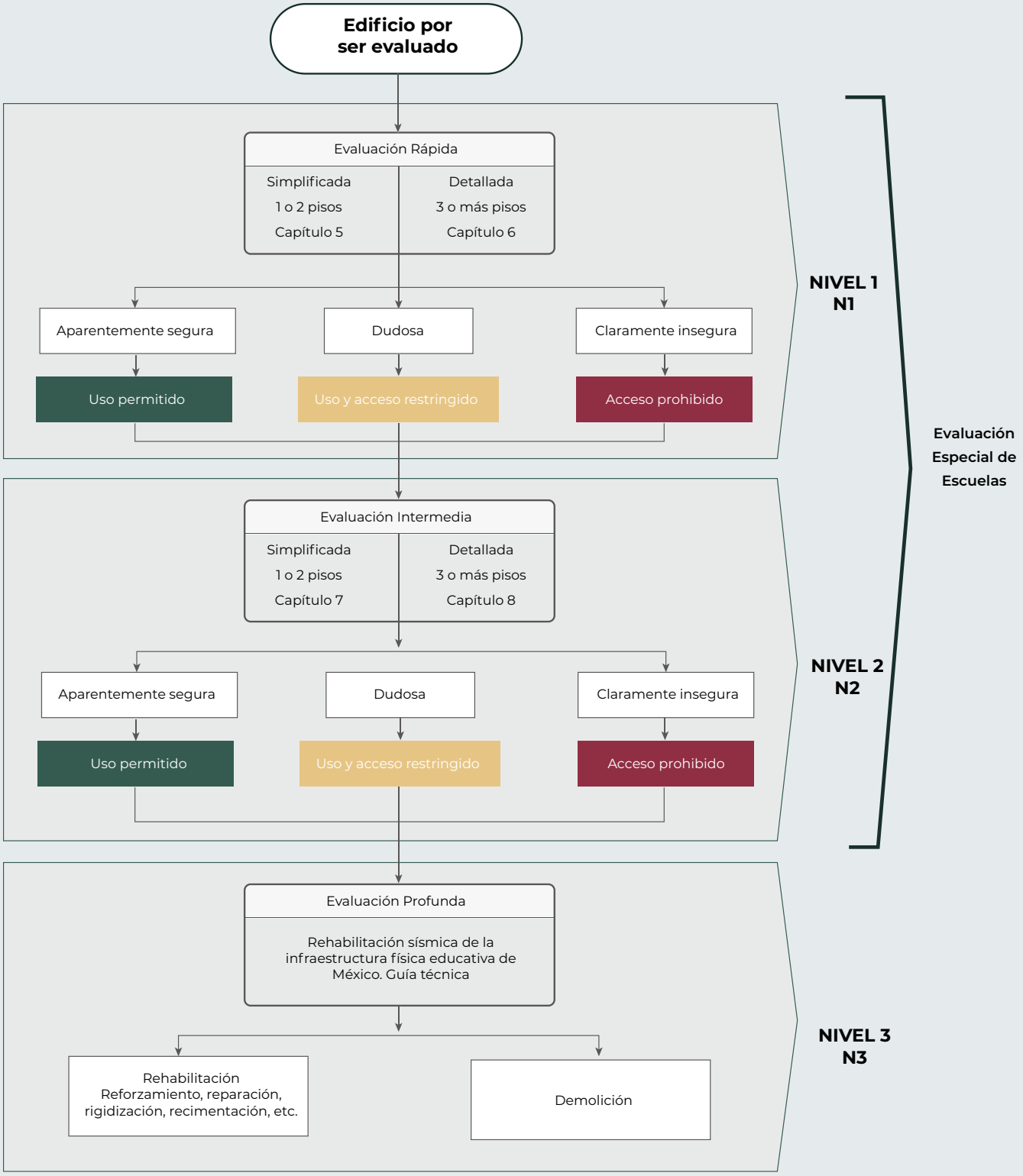


Figura 1.3.1
Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación postsísmica de un edificio escolar.
Fuente: elaboración propia (2020).

en los métodos de análisis, se delimitan los criterios para medir el periodo de vibrar, así como la revisión de los estados límite de servicio.

En el capítulo 5 se establecen los parámetros de diseño para elementos nuevos y existentes, así como la revisión para los estados límite de falla y de servicio. Se señala el comportamiento objetivo de los sistemas rehabilitados. Se incluyen los requisitos para el diseño del refuerzo en la interfaz para asegurar la adherencia de materiales de rehabilitación con los elementos existentes. Finalmente, se mencionan las consideraciones sobre los materiales de rehabilitación (concreto, acero de refuerzo, mampostería, anclas y conectores, entre otros) que se deben satisfacer.

En el capítulo 6 se describen las técnicas de rehabilitación generalmente empleadas en edificios existentes. Para cada técnica se presentan: las deficiencias por corregir, la aplicabilidad del método en distintas estructuras, los requisitos de análisis, de diseño, de construcción y de aseguramiento de la calidad, el proceso de ejecución y su uso en los edificios escolares en el pasado. Las técnicas descritas en este capítulo son: reparación local, reparación de grietas, sustitución de elementos, colocación de anclas y conectores, encamisado de elementos con concreto, acero y compuestos poliméricos reforzados con fibras, encamisado de muros de mampostería, adición de muros de concreto, adición de contraventeos metálicos y a base de cables postensados, sustitución o adición de muros diafragma de mampostería, separación o corte de pretiles en marcos de concreto y acero para eliminar el efecto de columnas cortas, sistemas de protección pasiva y rehabilitación de la cimentación.

En el capítulo 7 se mencionan los diferentes métodos para asegurar que los materiales empleados en la rehabilitación y los elementos rehabilitados tengan la durabilidad necesaria para resistir al medio ambiente. Los métodos incluidos son: recubrimiento, tratamiento de grietas, protección contra la corrosión y tratamiento de la superficie y revestimientos.

En el capítulo 8 se describen las responsabilidades y obligaciones del constructor en el proceso de rehabilitación. Se especifican las consideraciones necesarias para la colocación de apuntalamiento y/o arriostramiento temporal durante el proceso de rehabilitación.

En el capítulo 9 se presentan los aspectos por supervisar durante el proceso de rehabilitación, así como la frecuencia de revisión de éstos. Se describen las pruebas de materiales. Se explican las bases para elaborar e implantar un Plan de Aseguramiento de la Calidad de la Construcción. Se indican las responsabilidades que tienen el proyectista, el corresponsable, el supervisor, los laboratorios de materiales, el director en el aseguramiento de la calidad y el constructor.

En el apéndice A se incluyen consideraciones y recomendaciones para lograr una inspección en campo eficaz que permita entender los principales modos de comportamiento que rigen el desempeño de la estructura, así como los tipos e intensidad de daños causados por el sismo u otras acciones.

1.5 Cómo usar la Guía técnica

Como se especifica en la sección 2.1, la aplicación de esta Guía técnica es obligatoria y es complementaria a las especificaciones de la Norma Mexicana para la Seguridad de la Infraestructura Física Educativa (específicamente de la norma NMX-R-079-SCFI-2015), del reglamento de construcciones local y de sus normas técnicas complementarias (NTC), si existen. Se establece que

en caso de que las normas técnicas complementarias locales sean anteriores a 2017, o bien, cuando sus requisitos sean menos estrictos que los establecidos en la normatividad de la Ciudad de México (véase tablas 2.1.1 y 2.1.2), se deberá utilizar la versión 2017 de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Con objeto de referir a un conjunto de normas técnicas complementarias en el país, en la Guía técnica se hace referencia a diversas secciones e incisos de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. En caso de aplicarse las normas técnicas complementarias locales, se deberán aplicar las secciones e incisos correspondientes. Se entiende como sección e inciso a los requisitos numerados con dos (2.3, por ejemplo) y tres o más numerales (3.4.2 o 3.5.6.7, por ejemplo), respectivamente.

1.6 Breve descripción del comportamiento sísmico de la infraestructura física educativa de México

En esta sección se describen los principales modos de comportamiento y tipos de daño de edificios escolares en México. La información proviene de la evaluación postsísmica de escuelas tras los sismos de 2017 (Alcocer et al., 2018). Dicha descripción se refiere a los modos más comunes y no debe interpretarse como exhaustiva. En el inciso 1.6.1 se explican los sistemas estructurales característicos en las escuelas de México; en el 1.6.2 se describen los daños por golpeteo entre edificios adyacentes y por irregularidades; en los incisos 1.6.3 a 1.6.8 se describen los modos de comportamiento y tipo de daño más comunes en los elementos estructurales: vigas, columnas, uniones viga-columna, muros, losas y cimentaciones, respectivamente. Se explica el modo de comportamiento deseable ante el sismo asociado al estado límite de falla. Cuando ha sido posible, se ilustran los modos de falla con ejemplos de escuelas dañadas. En el apartado 1.6.9 se han incluido ejemplos de los efectos del deterioro de los materiales en la respuesta sísmica. En el inciso 1.6.10 se resumen los modos de comportamiento que se han observado con mayor frecuencia en los prototipos de escuelas del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE) y del INIFED, en Liquidación. En el inciso 1.7 se presentan las técnicas de rehabilitación más usadas en escuelas y se detallan algunas consideraciones a partir de la experiencia en la rehabilitación sísmica de edificios escolares de México.

Se recomienda al lector complementar el estudio de esta sección con el documento *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Volumen 2: Introducción al comportamiento sísmico de estructuras para fines de evaluación* (INIFED, 2020b). En él se discuten los atributos de una estructura que son determinantes en su respuesta ante un sismo. Se ilustran las diferencias entre resistencia, rigidez, capacidad de deformación inelástica y amortiguamiento. Se abordan los efectos adversos de malas prácticas de proyecto arquitectónico, diseño y construcción. Asimismo, se describen los principales impactos del deterioro de los materiales. Se explican los modos de comportamiento y de falla más frecuentes en estructuras de mampostería, concreto y acero. Además, se describe el daño observable para cada nivel de daño (ligero, moderado y severo) para cada componente estructural según el material de construcción. Finalmente, se incluyen factores reductivos de rigidez, resistencia y capacidad de deformación para cada componente según el material de construcción.







Figura 1.6.1
Ejemplos de escuelas de mampostería en México.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

1.6.1 Sistemas estructurales característicos en los edificios escolares en México

Los edificios escolares en México constan de sistemas estructurales resistentes a cargas gravitacionales hechos a base de muros (de mampostería o concreto) y marcos resistentes a momentos (de concreto o de acero). Los sistemas estructurales resistentes a fuerzas laterales están compuestos, a su vez, por muros (de mampostería o concreto), marcos o contraventeos de acero. Una descripción detallada de los sistemas estructurales se puede consultar en INIFED (2020b).

En el caso de las cimentaciones, éstas pueden ser superficiales o profundas. Las primeras son más frecuentes en edificios de pocos pisos y son usuales zapatas aisladas (ligadas o no), zapatas continuas y losas de cimentación. En el caso de edificios de mediana altura o en zonas de suelos blandos, se encuentran cimentaciones a base de cajones de cimentación apoyados en pilotes o pilas.

Según el material de construcción, los edificios escolares en México tienen las siguientes características.

1.6.1.1 De mampostería

Son estructuras a base de muros de carga. La mampostería puede ser simple (sin refuerzo y sin confinamiento), confinada (con castillos y dalas), o reforzada interiormente (a base de piezas huecas con refuerzo en el interior, vertical y horizontal). Edificios escolares de mampostería son muy comunes en zonas urbanas, semiurbanas y rurales del país, por lo regular tienen uno o dos pisos. En la figura 1.6.1 se muestran ejemplos de escuelas de mampostería.

1.6.1.2 De concreto

Son principalmente estructuras a base de marcos resistentes a momento. Por lo regular, han sido de concreto colocado en sitio. En versiones más recientes, se han incorporado muros de concreto, convirtiendo a la estructura en un sistema dual

muro-marco. Las estructuras de concreto también son a base de columnas unidas por losas planas, ya sea prismáticas o aligeradas. En general, los edificios de concreto predominan en zonas urbanas y semiurbanas. Algunos casos de escuelas de concreto se muestran en la figura 1.6.2.

1.6.1.3 De acero

Son edificios de marcos de acero resistentes a momento, sin o con contraventeos. En zonas rurales o semiurbanas, se han construido con perfiles de acero de pared delgada, los cuales forman secciones compuestas. Sus contraventeos son usualmente barras de acero redondo. En zonas urbanas y semiurbanas, las escuelas están hechas con perfiles laminados en caliente unidos mediante tornillos o pernos, o bien, con soldadura. En la figura 1.6.3 se ejemplifican escuelas de acero en México.

1.6.2 Interacción de cuerpos adyacentes y problemas asociados a irregularidades

Durante sismos pasados se ha observado el daño producido por el golpeteo entre cuerpos adyacentes. Esta interacción ocurre cuando la separación entre ellos es demasiado pequeña para permitir que los cuerpos se desplacen lateralmente sin tocarse, o bien, cuando existe algún elemento que los une (figura 1.6.4). Este último es el caso de escaleras, pasillos o barandales continuos entre ambos cuerpos.

También se han registrado daños debido a irregularidades en planta y en elevación. Destaca la ubicación de depósitos de agua (tinacos) en la azotea del edificio. Esta masa concentrada provoca torsiones significativas en el edificio que, a su vez, causan concentración de desplazamientos y/o fuerzas, con sus consecuentes daños. En la figura 1.6.5 se muestran dos depósitos de agua sobre el techo de un edificio y la solución idónea de colocarlos en una estructura independiente del edificio escolar.

1.6.3 Comportamiento sísmico observado en vigas

1.6.3.1 Modo de comportamiento sísmico deseable

El modo de comportamiento deseable de una viga ante el sismo de diseño es de flexión. En el caso de marcos de concreto, se caracteriza por el agrietamiento del concreto (vertical e inclinado) y la fluencia del refuerzo longitudinal concentrados en la zona de la articulación plástica. Esta zona ocurre, normalmente, adyacente a la cara de la columna. En marcos de acero, la articulación plástica conlleva la fluencia de los patines y el posible pandeo local de ellos y del alma. Se recomienda consultar INIFED (2020b) para examinar los modos de comportamiento de estructuras a base de marcos de concreto y de acero.

1.6.3.2 Modos de comportamiento observados

El comportamiento observado en vigas de concreto ha estado controlado por cargas gravitacionales altas o por la combinación de cargas gravitacionales y fuerzas inducidas por el sismo. Se han presentado los siguientes tipos de comportamiento:

a. Flexión-tensión diagonal: inicia con la formación de grietas de flexión en la cara de la columna y la posterior aparición de grietas por tensión diagonal (con inclinaciones del orden de 45 grados). El nivel de daño severo incluye el desconchamiento del concreto y el pandeo del refuerzo longitudinal de la viga (figura 1.6.6).
b. Tensión diagonal pura: caracterizado por agrietamiento inclinado cerca de la conexión viga-columna, exacerbado por falta de estribos o separaciones grandes de ellos (figura 1.6.7). El nivel de daño severo incluye el desconchamiento del concreto y el pandeo del refuerzo longitudinal de la viga.
c. Flexión-compresión diagonal: ocurre agrietamiento inclinado y aplastamiento del concreto cerca de la conexión debido a las grandes demandas de flexión inducidas por el sismo.



Figura 1.6.2
Ejemplos de escuelas de concreto en México.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).















Figura 1.6.3
Ejemplos de escuelas de acero en México.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



Figura 1.6.4
Edificios en contacto vulnerables a golpeteo.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

Figura 1.6.5
Concentración de masa en techos de edificios escolares y depósito de agua en una estructura independiente.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).









Figura 1.6.6
Falla por flexión y agrietamiento por tensión diagonal de una viga de concreto, con pandeo del refuerzo longitudinal.
Fuente: CENAPRED (2019).

Figura 1.6.7
Falla por tensión diagonal pura en viga de concreto.
Fuente: Instituto Valenciano de la Edificación (2019).



Figura 1.6.8
Comportamiento observado en la mayoría de las vigas de acero en escuelas de México. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



Figura 1.6.9
Falla de la soldadura de conexión de la viga con la columna y pandeo local del perfil de acero. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

En el caso de vigas de acero, no se han observado daños o comportamiento indeseable. Por lo regular se supone que han permanecido en el intervalo elástico (figura 1.6.8). En la figura 1.6.9 se muestran vigas de acero con falla de soldadura y pandeo local de las placas de los perfiles.

1.6.4 Comportamiento sísmico observado en columnas

1.6.4.1 Modo de comportamiento sísmico deseable

El modo de comportamiento deseable de una columna de un marco resistente a momento ante el sismo de diseño es de flexión, aunque debe ocurrir después de la plastificación de las vigas. En el caso de marcos de concreto, se caracteriza por agrietamiento del concreto (horizontal y algo inclinado) y la fluencia incipiente del refuerzo longitudinal en algunas columnas (normalmente en el tercio inferior del edificio y en la base de éste). En marcos de acero se espera la fluencia incipiente en los patines de las columnas del tercio inferior del edificio y en su base. Se recomienda consultar INIFED (2020b) para examinar los modos de comportamiento de estructuras a base de marcos de concreto y de acero.

1.6.4. Modos de comportamiento observados

El comportamiento observado en columnas de concreto ha estado controlado por cargas gravitacionales altas o por la combinación de cargas



Figura 1.6.10
Falla por flexión-tensión diagonal y posterior aplastamiento del concreto en columna.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).



Figura 1.6.11
Agrietamiento por tensión diagonal en columna de concreto.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

gravitacionales y fuerzas inducidas por el sismo. Se han presentado los siguientes tipos de comportamiento:

a. Flexión-tensión diagonal: inicia con agrietamiento por flexión y es controlado por la aparición de grietas por tensión diagonal (con inclinaciones cercanas a 45 grados). La falta de estribos en los extremos de la columna facilita la formación de grandes grietas diagonales (figura 1.6.10).
b. Tensión diagonal pura: ocurre sin o prácticamente con ausencia de agrietamiento por flexión. Se caracteriza por presentar grietas inclinadas hacia la mitad de la altura de la columna, a menudo formando un patrón en forma de letra X (figura 1.6.11).
c. Tensión diagonal en “columnas cortas”: la contribución de los muros no estructurales a la rigidez lateral del edificio ha sido perjudicial en los casos donde el muro se extendió parcialmente en la altura del entrepiso, ya que redujo la longitud libre de la columna, incrementó su rigidez lateral y, por tanto, atrajo más fuerza cortante, para lo cual la columna no había sido diseñada. Es un caso particular del comportamiento por tensión diagonal pura, en el cual el daño se ha exacerbado por la gran separación de estribos, así como por un detallado inadecuado del remate de los estribos que exhiben dobleces de 90 grados (figura 1.6.12).
d. Flexión y falla de compresión en el extremo: tras la formación de la articulación plástica en el extremo de la columna, se produce un deterioro severo en el concreto, su aplastamiento y desconchamiento. Este deterioro, sumado al pandeo del refuerzo longitudinal, es evidencia de pérdida de capacidad de carga vertical (figura 1.6.13).
e. Flexión y fallas en traslapes: ocurre cuando no tienen la longitud insuficiente. La falla se hace evidente por medio de grietas verticales y el desconchamiento del concreto a la altura de los traslapes.









Figura 1.6.12
Falla por tensión diagonal en columnas cortas de marcos de concreto.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



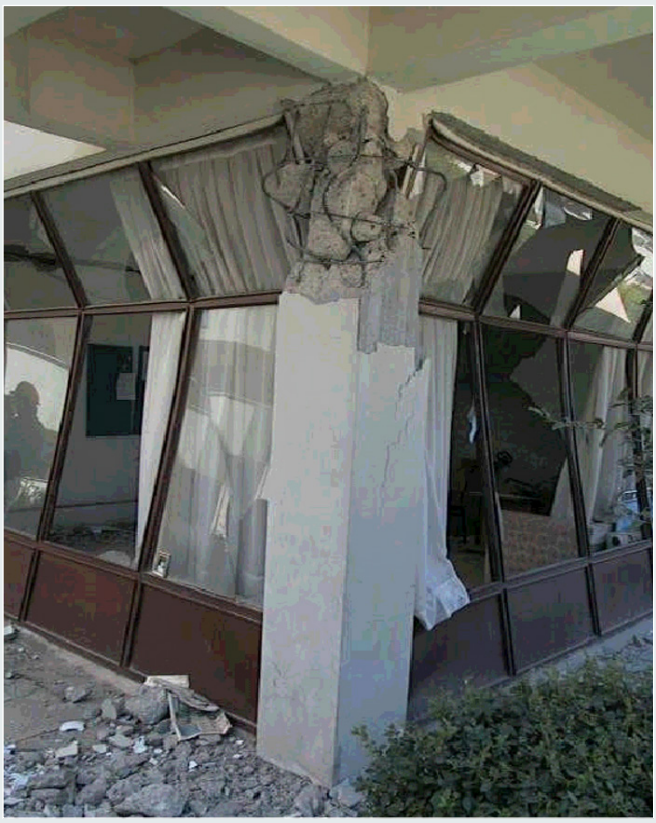


Figura 1.6.13
Falla por flexión-tensión diagonal y compresión en el extremo superior de columnas de marcos de concreto.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1999).

En columnas metálicas, se han observado fallas por aplastamiento debidas al efecto de columna corta. En ellas, es claro el pandeo de patines y alma, así como la rotura de la soldadura de filete hecha para fabricar la sección compuesta (figura 1.6.14).

1.6.5 Comportamiento sísmico observado en uniones viga-columna

1.6.5.1 Modo de comportamiento sísmico deseable

El modo de comportamiento deseable de una unión viga-columna de un marco resistente a momento de concreto ante el sismo de diseño es mediante la formación de grietas inclinadas apenas visibles. En el caso de marcos de acero, se espera la fluencia incipiente en la zona de panel. En ambos casos, el incipiente comportamiento inelástico se espera en el tercio inferior del edificio.

1.6.5.2 Modos de comportamiento observados

El comportamiento observado en uniones de vigas y columnas de concreto ha estado controlado por la combinación de cargas gravitacionales y fuerzas inducidas por el sismo. Se ha presentado el siguiente tipo de comportamiento:

a. Cortante: caracterizado por el agrietamiento inclinado y desconchamiento del concreto en uniones donde no existía refuerzo transversal o su cuantía era escasa (figura 1.6.15).Un inadecuado confinamiento en las uniones, agravado



Figura 1.6.14
Falla por aplastamiento, con pandeo local de placas y rotura de soldaduras en columnas de acero por el efecto de "columna corta".
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

por la práctica de utilizar paquetes formados de tres o más barras longitudinales en las esquinas de la columna, incrementó el desconchamiento del concreto del nudo.

En estructuras de acero, el desempeño de las uniones viga-columna ha estado controlado por la combinación de cargas gravitacionales y fuerzas inducidas por el sismo. Se ha presentado el siguiente tipo de comportamiento:

a. Falla de conexiones atornilladas o con pernos: caracterizada por la deformación por tensión y acción de palanca de los ángulos, superior e inferior (figura 1.6.16). Véase la figura 1.6.9 que ilustra una falla de soldadura en la conexión viga-columna.

1.6.6 Comportamiento sísmico observado en muros

1.6.6.1 Modo de comportamiento sísmico deseable

El modo de comportamiento deseable de un muro de mampostería, aunque casi nunca es observado en el campo, es de flexión, cabeceo o deslizamiento del muro. En el caso de muros de concreto, el modo deseable es de flexión. Este modo de falla se observa en edificios con muros



Figura 1.6.15
Agrietamiento por cortante en uniones viga-columna en marcos de concreto con muros diafragma. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



Figura 1.6.16
Falla por cortante en uniones viga-columna de marcos de acero.
Fuente: Ismael Vázquez, SMIS (2009).





Figura 1.6.17
Falla por tensión diagonal en muros de mampostería.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

esbeltos y detallados para retrasar el deterioro de las fuerzas cortantes cíclicas.

Se recomienda consultar INIFED (2020b) para examinar los modos de comportamiento de estructuras a base de muros de mampostería y de concreto.

1.6.6.2 Modos de comportamiento observados

El comportamiento observado en muros ha estado controlado por la combinación de cargas gravitacionales y fuerzas inducidas por el sismo.

En caso de muros de mampostería, se han observado los siguientes tipos de comportamiento:

a. Tensión diagonal: puede ser pura o posterior al agrietamiento por flexión. Se caracteriza por grietas inclinadas (en forma de letra X) a través de mortero y piezas cuando el mortero es resistente, las piezas son de baja resistencia y los esfuerzos axiales son altos, en términos relativos. Otra forma de agrietamiento por tensión diagonal es siguiendo las juntas de mortero en forma de escalera; éste ocurre en mamposterías con morteros de baja resistencia, piezas resistentes y esfuerzos axiales bajos, en términos relativos.
   Este modo de falla es frágil y puede conducir a pérdida de la capacidad de carga vertical. Las grietas usualmente penetran la punta del muro (castillos, si existen), lo que provoca que los triángulos superior e inferior, delimitados por la grieta inclinada, se separen. Es, probablemente, el modo de falla más usual en muros de mampostería (figuras 1.6.17 y 1.6.18). Es muy recurrente en muros de mampostería simple o mal confinada.
b. Agrietamiento vertical en las esquinas: ocurre en la intersección de muros con el techo. Es muy común en estructuras de mampostería simple, como el adobe (figura 1.6.19).
c. Flexión fuera del plano: puede ocurrir porque el diafragma del techo o piso se desprende del muro, facilitando que su coceo empuje al



Figura 1.6.18
Falla por tensión diagonal en muros diafragma de mampostería.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

muro fuera de plano. Normalmente, la falla se caracteriza por agrietamiento horizontal en la base del muro y la caída de éste (figura 1.6.20). En ocasiones, se han observado grietas horizontales en los extremos superior e inferior del muro y a la mitad de la altura. Las fallas de plano son comunes en muros de mampostería simple.

Las fallas fuera de plano han sido muy usuales en bardas perimetrales de planteles escolares. Su inclinación o colapso total han sido exacerbados por la corrosión del acero de refuerzo vertical en castillos o como refuerzo interior de la barda (figura 1.6.21). También se observó la falta de adherencia entre la última hilada y la dala superior, lo que impidió que la dala restringiera el desplazamiento fuera del plano del muro.

1.6.7 Comportamiento sísmico observado en losas

1.6.7.1 Modo de comportamiento sísmico deseable

Las losas son elementos que transmiten las cargas verticales al sistema estructural resistente a cargas gravitacionales. Para una adecuada respuesta ante sismo, las losas deben tener la suficiente rigidez y resistencia para trabajar como diafragma horizontal, a fin de distribuir las fuerzas inducidas por el sismo entre los elementos verticales del sistema estructural resistente a fuerzas laterales. Por tanto, su comportamiento deseable es de flexión.

1.6.7.2 Modos de comportamiento observados

El comportamiento sísmico de las losas de concreto en edificios a base de muros de mampostería









Figura 1.6.19
Agrietamiento vertical en la intersección de muros de mampostería simple (adobe).
Fuentes: cortesía del INIFED (2019b) y archivo personal de Sergio Alcocer (1995).











Figura 1.6.20
Falla por flexión fuera de plano de muros de mampostería.
Fuentes: cortesía del INIFED (2019b) y archivo personal de Sergio Alcocer (1995).





Figura 1.6.21
Falla por flexión fuera de plano de bardas de mampostería.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

y marcos, de concreto y de acero, ha sido adecuado. Sin embargo, se han observado flechas excesivas producto de espesores insuficientes y/o cargas elevadas.

En estructuras de columnas de concreto unidas por losas planas, se han observado los siguientes tipos de comportamiento:

a. Cortante: se caracteriza por agrietamiento en la cara superior de la losa, paralelo a las caras de la columna y separado de la columna (o de la zona maciza de la losa, si existe) entre 1 y 1.5 veces el peralte de la losa (incluido el ábaco) o de la zona maciza (si existe) (figura 1.6.22). En la foto de la izquierda se observa el agrietamiento desde la cara inferior de la losa. En la de la derecha se muestra el colapso casi total de un edificio.
b. Punzonamiento: es un tipo de falla por cortante en la cual se forma un agrietamiento alrededor de la columna en forma de pirámide invertida. Si la losa carece de refuerzo en el lecho inferior y que sea continuo (sin traslapes) sobre la columna, se puede producir la penetración de la columna en la losa, lo que conlleva generalmente el colapso del entrepiso o de todo el edificio (figura 1.6.23). En la foto de la izquierda se muestra un punzonamiento incipiente; en la derecha es claro el punzonamiento de la losa por las columnas verticales. La falla por punzonamiento es un caso particular de falla por cortante cuando la cuantía de refuerzo en las losas es muy baja.

1.6.8 Comportamiento sísmico observado en cimentaciones

1.6.8.1 Modo de comportamiento sísmico deseable

Las cimentaciones deben ser capaces de transmitir al suelo las cargas gravitacionales y las fuerzas laterales inducidas por sismo sin provocar asentamientos totales y diferenciales mayores que los establecidos en los reglamentos de construcción locales. Su comportamiento deseable es consistente con los estados límite de falla y de servicio para los cuales son diseñados sus elementos.





Figura 1.6.22
Falla por cortante en conexiones de losas planas con columnas de concreto.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1985 y 1999).





Figura 1.6.23
Falla por punzonamiento en losas planas unidas con columnas de concreto.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1985).



Figura 1.6.24
Agrietamiento de la losa de piso debido al asentamiento del edificio.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



Figura 1.6.25
Agrietamiento de dados de concreto de la cimentación de un edificio escolar.
Fuente: archivo personal de David Murià (2018).

1.6.8.2 Modos de comportamiento observados

Se observó el asentamiento del edificio desplantado en suelos mal compactados, el cual provocó el agrietamiento en la cara superior de la losa de piso (figura 1.6.24). También se han registrado daños en elementos estructurales de la cimentación de escuelas (figura 1.6.25). Éste ha sido el caso de los afectados por el agrietamiento del suelo.

1.6.9 Efecto del deterioro de los elementos estructurales en la respuesta ante sismos

El deterioro en los materiales de una estructura puede afectar negativamente el desempeño del edificio durante sismos intensos (FEMA, 1992). Usualmente, el deterioro se debe a la combinación de una mala calidad de la construcción (pobre calidad de los materiales y/o procesos constructivos ejecutados deficientemente) y de un mantenimiento inadecuado. En el documento de INIFED (2020b) se pueden revisar los problemas más comunes asociados al deterioro.

En el caso de la infraestructura física educativa de México, el deterioro de los elementos estructurales ha afectado negativamente la respuesta sísmica debido a:

a. Corrosión del refuerzo debido a una combinación de mantenimiento deficiente, concreto de baja resistencia, alta porosidad y poco recubrimiento (figuras 1.6.26 y 1.6.27).
b. Juntas entre columnas y muros que no respetan la separación marcada en los planos.
c. Fractura de barras de refuerzo de columnas de concreto soldadas a cubiertas metálicas.
d. Exposición del acero de refuerzo por falta de silletas con dimensiones adecuadas.
e. Juntas constructivas con basura o residuos.



Figura 1.6.26
Desprendimiento de concreto en losas debido a corrosión del acero de refuerzo. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



Figura 1.6.27
Corrosión del acero de refuerzo vertical en bardas perimetrales. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

1.6.10 Daños en prototipos CAPFCE/ INIFED durante los sismos de 2017

En las tablas 1.6.1 a 1.6.3 se presenta un resumen de los modos de comportamiento, por prototipo, tras los sismos de 2017 (Alcocer et al., 2018) en escuelas de mampostería, concreto y acero, respectivamente. En las tablas se incluyen fotos ilustrativas de los prototipos (sin daño) para facilitar la referencia.

Como se aprecia en las tablas, el desempeño de los prototipos de CAPFCE/INIFED es consistente, en sus modos de falla y tipos de daño, con la descripción general del comportamiento y de los tipos de falla y de daños presentados en los incisos 1.6.3 a 1.6.9 e ilustrados en las figuras correspondientes.

Tabla 1.6.1
Modos de comportamiento en prototipos de mampostería tras los sismos de septiembre de 2017

Fotografía de prototipos CAPFCE/INIFED (Alcocer et al., 2018)	**Modo de comportamiento**
 	• Tensión diagonal en muros. • Tensión diagonal en muros con penetración de agrietamiento en elementos de confinamiento (castillos), con su consecuente desconchamiento. • Falla por flexocompresión en muros.
	Prototipos de mampostería
	• Con y sin contrafuerte.

Tabla 1.6.2
Modos de comportamiento en prototipos de concreto tras los sismos de septiembre de 2017

Fotografía de prototipos CAPFCE/INIFED (Alcocer et al., 2018)	**Modo de comportamiento**
	· Tensión diagonal en vigas. · Tensión diagonal en columnas, en especial por efecto de "columna corta". · Tensión diagonal en muros diafragma de mampostería. · Flexión fuera del plano de muros y pretiles.
	Prototipos de acero
	· Urbanas de concreto: U1C, U2C y U3C.

Tabla 1.6.3
Modos de comportamiento en prototipos de acero tras los sismos de septiembre de 2017

Fotografía de prototipos CAPFCE/INIFED (Alcocer et al., 2018)	**Modo de comportamiento**
	· Falla por aplastamiento en columnas, con pandeo local de placas y falla de soldaduras, por efecto de "columna corta". · Tensión diagonal en muros diafragma de mampostería (muros divisorios).
	Prototipos de acero
	· Acero: A70, A85.

1.7 Rehabilitación sísmica de edificios escolares y de prototipos CAPFCE/INIFED

1.7.1 Comportamiento sísmico de edificios escolares rehabilitados

En sismos pasados, incluyendo a las escuelas dañadas en 2017, los edificios escolares se han rehabilitado principalmente mediante las técnicas siguientes (Alcocer et al., 2018):

a. Reparación de elementos de concreto dañados, con desprendimiento de recubrimiento o desconchamiento, mediante concreto o mortero nuevo.
b. Sustitución de elementos de acero severamente dañados, como el caso de columnas con pandeo local.

c. Reparación de grietas mediante inyección de resinas.
d. Encamisado de columnas y vigas con concreto, acero o compuestos de polímeros reforzados con fibras.
e. Encamisado de muros con malla y mortero (también llamado “aplanado estructural” o “recubrimiento estructural”).
f. Colocación de largueros y de canales en el techo.
g. Adición de muros de concreto.
h. Adición de contraventeos metálicos a base de perfiles laminados en caliente.
i. Adición de contraventeos metálicos a base de cables postensados.
j. Adición de muros diafragma.
k. Modificación de la cimentación.

Si bien la información disponible del comportamiento ante sismos de los edificios escolares rehabilitados es todavía limitada para analizar el detalle de cada técnica de rehabilitación y comparar la respuesta entre varias de ellas, en general, las escuelas rehabilitadas, siguiendo reglas similares a las presentadas en esta Guía técnica (capítulos 2 a 9), han exhibido un desempeño adecuado.

En el capítulo 6 de este documento se presentan los requisitos para el análisis estructural, diseño, construcción y supervisión de las técnicas más comunes, como las referidas con anterioridad.

1.7.2 Recomendaciones sobre la rehabilitación sísmica de edificios escolares

La rehabilitación sísmica de edificios escolares en México se ha diseñado para resolver una o las dos deficiencias estructurales siguientes:

- Deficiencia tipo A: Edificios con insuficiente resistencia lateral, de conformidad con un nuevo reglamento local.
- Deficiencia tipo B: Estructuras con rigidez lateral inadecuada para controlar los desplazamientos laterales (distorsiones) por debajo de los máximos valores para los estados límite de falla y de servicio prescritos por los reglamentos locales.

La rehabilitación se ha ejecutado en edificios con o sin daño que, una vez revisados en campo y evaluada su seguridad estructural en gabinete, presentan las deficiencias anteriores.

Para eliminar o mitigar una o las dos deficiencias en los proyectos de rehabilitación de edificios escolares se ha optado por (véase capítulo 2):

a) Reforzar globalmente la estructura, cuando la resistencia del edificio existente sea baja y conduzca a comportamiento inelástico ante movimientos pequeños (Deficiencia tipo A).
b) Rigidizar globalmente la estructura, cuando las distorsiones de diseño son superiores a los límites reglamentarios. También se ha rigidizado la escuela cuando los elementos y componentes no tienen la capacidad de deformación inelástica demandada por los sismos, de modo que grandes desplazamientos inducidos por sismo pueden causar severos daños en los elementos e, incluso, su falla (Deficiencia B).
c) Reparar localmente los elementos dañados (mediante la inyección de resinas, por ejemplo) o sustituir partes o tramos de ellos (como el reemplazo de partes o el total de una columna de acero aplastada, por ejemplo).

Para iniciar el proceso de evaluación y diseño de la rehabilitación es necesario verificar si el edificio en estudio corresponde a un prototipo de CAPFCE o INIFED (en Liquidación). Para ello, el catálogo de proyectos de prototipos del INIFED (en Liquidación) es una fuente indispensable de consulta. Si corresponde a algún prototipo, es recomendable confirmar en campo las dimensiones y las propiedades de los elementos (véase capítulo 4).

Durante el diseño de la rehabilitación ha sido usual atender las irregularidades o discontinuidades que las estructuras pudieran tener. Para ello,

se ha puesto cuidado en colocar los nuevos elementos estructurales o en modificar los existentes, con el propósito de eliminar concentraciones de fuerzas y/o desplazamientos en los edificios.

Con base en la experiencia reseñada, se recomienda que en la definición de la(s) estrategia(s) y técnica(s) de rehabilitación, se considere lo siguiente, de manera individual o en combinación (véase capítulo 6):

a. En edificios de mampostería:
- Añadir muros (de mampostería o de concreto) para eliminar o mitigar las deficiencias tipo A y B.
- Encamisar muros de mampostería existentes (con mallas de alambre soldado y concreto o mortero) para eliminar la deficiencia A.
- Añadir contrafuertes externos de concreto para eliminar las deficiencias A y B.

b. En edificios de concreto:
- Encamisar los elementos de los marcos resistentes a momento (con concreto, acero o compuestos poliméricos reforzados con fibras) para mitigar o eliminar las deficiencias A y B.
- Añadir muros de concreto (en ocasiones, en combinación con encamisados) para eliminar o mitigar las deficiencias A y B.
- Sustituir, añadir o encamisar muros diafragma de mampostería existentes para eliminar la deficiencia A.
- Añadir contraventeos metálicos (de perfiles laminados en caliente o a base de cables postensados) para eliminar las deficiencias A y B (en lugar de añadir muros de concreto).
- Separar y recortar pretiles de mampostería adyacentes al marco para evitar el fenómeno de “columna corta”. Esta intervención, además de alguna otra, se hace para incrementar la resistencia y/o rigidez lateral.
- Añadir sistemas de protección pasiva cuando las soluciones anteriores no eliminan las deficiencias estructurales.

c. En edificios de acero:
- Añadir muros de concreto (en combinación con encamisados de concreto) para eliminar o mitigar las deficiencias A y B.
- Sustituir, añadir o encamisar muros diafragma de mampostería existentes para eliminar la deficiencia A.
- Añadir contraventeos metálicos (de perfiles laminados en caliente o a base de cables postensados) para eliminar las deficiencias A y B (en lugar de añadir muros de concreto).
- Separar y recortar pretiles de mampostería adyacentes al marco. Esta intervención, además de alguna otra, se hace para incrementar la resistencia y/o rigidez lateral.
- Añadir sistemas de protección pasiva cuando las soluciones anteriores no eliminan las deficiencias estructurales.

En todos los casos, se deberá revisar la cimentación, de modo que pueda transmitir las cargas al suelo y que satisfaga los requisitos para los estados límite de falla y de servicio.

Cuando las estructuras están dañadas, además de lo anotado antes, se debe considerar la reparación del daño local (mediante rellenos de material desconchado y/o inyección de grietas), incluyendo la sustitución de partes de elementos dañados.



Capítulo 2

Requisitos generales de la rehabilitación

2.1 Alcance

2.1.1 Esta Guía técnica es aplicable a edificios escolares existentes. Es aplicable a edificios escolares construidos con planos y especificaciones de prototipos del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE) o del Instituto Nacional para la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación (INIFED).

2.1.2 Los requisitos establecidos en esta Guía técnica son aplicables a edificios escolares que no cumplen con ser prototipos del CAPFCE o del INIFED.

2.1.3 La aplicación de esta Guía técnica será obligatoria para la evaluación y rehabilitación de escuelas cuando el Instituto (en el caso de escuelas púbicas) o la Administración (en el caso de escuelas privadas), en uso de sus facultades, así lo determine.

2.1.4 Si el propietario de una escuela decide voluntariamente evaluar y rehabilitar los edificios, deberá cumplir con el Reglamento, sus Normas y esta Guía técnica.

2.1.5 Esta Guía técnica es complementaria de la Norma Mexicana para la Seguridad de la Infraestructura Física Educativa (NMX-R-079-SCFI-2015), del Reglamento local y de sus Normas Técnicas Complementarias.

2.1.6 Cuando no exista un Reglamento local o cuando sus Normas Técnicas Complementarias (o sus equivalentes) sean anteriores a 2017 o cuando sus requisitos sean menos estrictos que los establecidos en la normatividad de la Ciudad de México, se deberá aplicar el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y/o sus Normas Técnicas Complementarias.

2.1.7 La normatividad aplicable de acuerdo con las acciones de diseño será la especificada en la tabla 2.1.1.

2.1.8 La normatividad aplicable de acuerdo con el material de construcción será la requerida en la tabla 2.1.2.

2.1.9 Cuando explícitamente se señale en esta Guía técnica un requisito distinto a lo estipulado en las otras Normas, se deberá cumplir con lo establecido aquí.

Tabla 2.1.1
Normatividad aplicable según las acciones de diseño

Acción de diseño	En entidades federativas distintas de la Ciudad de México	En la Ciudad de México
Sismo	NMX-R-079-SCFI-2015	NTC-Sismo 2017
Otras (cargas permanentes, variables, viento)	NTC-Acciones local*	NTC-Acciones 2017

*A menos que sean anteriores a 2017 o cuando sus requisitos sean menos estrictos que los establecidos en la normatividad de la Ciudad de México, en cuyo caso se usarán las NTC-Acciones 2017 de la Ciudad de México.

Tabla 2.1.2
Normatividad aplicable según el material de construcción

Material de construcción	En entidades federativas distintas de la Ciudad de México	En la Ciudad de México
Acero	NTC-Acero local*	NTC-Acero 2017
Concreto	NTC-Concreto local*	NTC-Concreto 2017
Mampostería	NTC-Mampostería local*	NTC-Mampostería 2017

*A menos que sean anteriores a 2017 o cuando sus requisitos sean menos estrictos que los establecidos en la normatividad de la Ciudad de México, en cuyo caso se usarán las NTC-Acero, NTC-Concreto y NTC-Mampostería 2017 de la Ciudad de México.

2.1.10 Esta Guía técnica se aplica para a y/o b:

a. Evaluar la necesidad de rehabilitar una escuela por sismo.
b. Diseñar la rehabilitación por sismo.

2.1.11 Las reglas aquí descritas están dirigidas a elementos o miembros, componentes y sistemas estructurales resistentes a cargas gravitacionales y/o fuerzas inducidas por sismo.

2.1.12 Cuando ocurra un sismo, el proyectista deberá recopilar los datos generales de la estructura mediante un Formato de Levantamiento Físico. El Formato de Levantamiento Físico podrá ser firmado por un corresponsable o por un director. También se aceptará la firma de un Perito en Seguridad Estructural o un Especialista en Diseño Estructural, del colegio de ingenieros civiles local.

2.1.13 El Instituto o la Administración analizarán la información del Formato de Levantamiento Físico con el fin de determinar un Nivel de Atención Prioritaria (NAP) de los planteles educativos. El NAP se determinará en función del año de construcción, nivel de daño por el sismo y la zona geotécnica.

2.1.14 El Instituto o la Administración expedirán la Constancia de Uso Condicionada del edificio educativo, la cual señalará: el NAP, la vigencia, las acciones obligatorias (evaluación y rehabilitación sísmica) a realizar por parte del propietario, año límite para finalizar el proyecto de rehabilitación y año límite de la terminación de la ejecución del proyecto estructural.

2.1.15 Para desarrollar un proyecto de rehabilitación eficiente, se requiere contar con información de las condiciones del edificio, tales como configuración, características estructurales y deficiencias sísmicas. Es posible que buena parte de esta información esté disponible tras haber evaluado el edificio. En caso necesario, se tendrá que ampliar la investigación y la evaluación del edificio para contar con información suficiente para poder analizar, diseñar y construir la rehabilitación.

2.1.16 El proceso de diseño de la rehabilitación de un edificio es un proceso iterativo en el cual se suponen modificaciones a la estructura existente para fines de un diseño preliminar y del análisis estructural. Los resultados del análisis son verificados como aceptables a nivel de un elemento o componente. Si los componentes nuevos o existentes no son aceptados como adecuados, se ajustarán las modificaciones estructurales y, si es necesario, se ejecutará un nuevo ciclo de análisis y verificación.

2.1.17 Si el Reglamento lo señala, en la rehabilitación sísmica de escuelas se deberá cumplir con el proceso de revisión del proyecto estructural por un corresponsable, de acuerdo con lo señalado en las NTC-Revisión aplicables.

2.2 Responsabilidades

2.2.1 Los propietarios están obligados a proveer un mantenimiento adecuado de las estructuras existentes para evitar situaciones inseguras y rehabilitar la estructura cuando existan condiciones inseguras que afecten su seguridad, redundancia e integridad.

2.2.2 El propietario y el proyectista acordarán los Objetivos de la Rehabilitación. Serán requisitos mínimos los establecidos en el Reglamento, en sus Normas y en esta Guía técnica. El director y el corresponsable autorizarán los Objetivos de la Rehabilitación.

2.2.3 El proyectista deberá preparar un informe de la estructura que incluya los puntos a a k:

a. Descripción de la estructura original y de sus modificaciones.
b. Historia de reparaciones y/o reforzamientos anteriores, si es el caso.
c. Descripción y documentación del daño y su clasificación, según las N-Rehabilitación (véase inciso 4.2.3).
d. Descripción y documentación de las condiciones potencialmente peligrosas.
e. Criterios de evaluación y resultados.
f. Condiciones y detalles de la rehabilitación propuesta.
g. Requisitos de materiales usados en la rehabilitación.
h. Identificación de elementos o partes de la estructura por ser apuntalados y/o arriostrados.
i. Plan, procedimientos, métodos, guías y especificaciones para el aseguramiento y control de la calidad de materiales y de la ejecución de la rehabilitación.
j. Características de la inspección de la rehabilitación durante su vida útil esperada, tales como periodicidad, tipo y nivel de revisión.
k. Instrucciones para el mantenimiento de la estructura existente y de los nuevos materiales, elementos, componentes y sistemas estructurales.

2.2.4 El informe requerido en el inciso 2.2.3 será entregado al propietario, al Instituto y a la Administración, con el visto bueno del director, del corresponsable y de la autoridad local educativa, si es el caso. En lo que toca al corresponsable, este informe será parte de la documentación requerida en las NTC-Revisión de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) que, entregada al Instituto y a la Administración, les permita a éstos emitir la constancia de registro de la revisión o su equivalente.

2.3 Proyecto ejecutivo

2.3.1 Los planos y memorias descriptivas de cálculo, normas y especificaciones deberán tener suficiente detalle y claridad para comunicar el lugar, naturaleza y alcance del trabajo de rehabilitación.

2.3.2 Los planos deberán incluir, al menos, lo indicado en los conceptos a a i siguientes:

a) Hipótesis de diseño y requisitos de construcción, así como propiedades de materiales existentes (sin daño) y nuevos.
b) Detalles, ubicación y notas sobre el tamaño, configuración, refuerzo, recubrimientos, anclajes, materiales de reparación y reforzamiento, así como requisitos de preparación de la estructura existente, incluyendo a la cimentación.
c) Magnitud y ubicación de fuerzas de presfuerzo, si aplica.
d) Anclaje y longitud de desarrollo del refuerzo.
e) Tipo y ubicación de anclas y conectores.
f) Número, tamaño, refuerzo y detalles de pilotes, pilas o micropilotes adicionales, si es el caso.
g) Conexiones a escala entre elementos y componentes existentes con los nuevos o rehabilitados, con sus correspondientes elementos de refuerzo, anclas y conectores.
h) Criterios y detallado de apuntalamiento y arriostramiento, antes, durante y para completar la rehabilitación.
i) Procedimiento constructivo por etapas claro y preciso.

2.4 Criterios para evaluación y diseño de la rehabilitación

2.4.1 Criterios para la evaluación

2.4.1.1 Se deberán considerar el daño y/o deterioro de los elementos y componentes estructurales y su impacto en el desempeño local y global de la estructura.

2.4.1.2 Se considerarán posibles cambios normativos que hubiesen ocurrido entre la fecha de diseño y la fecha de construcción del edificio original.

2.4.1.3 Si el edificio por rehabilitar fue construido por etapas, se identificará la versión del Reglamento que se usó en cada una de ellas con el fin de reconocer el criterio de diseño empleado en la construcción.

2.4.1.4 Se evaluará cada cuerpo o edificio de un plantel escolar por separado. Se considerará la interacción que exista entre cuerpos vecinos.

2.4.2 Criterios de diseño

2.4.2.1 Con objeto de identificar los elementos, componentes y/o sistemas deficientes, se calcularán los cocientes demanda/capacidad. Los valores de la demanda y de la capacidad se calcularán con las Normas vigentes aplicables (véase tablas 2.1.1 y 2.1.2). Si el cociente es mayor que 1.0, será necesario considerar la rehabilitación de dicho elemento, componente o sistema estructural.

2.4.2.2 En el caso de acciones internas (fuerzas y momentos), la capacidad estará dada por la resistencia de diseño y la demanda será determinada por las acciones más desfavorables obtenidas del análisis. En el caso de acciones sísmicas, la demanda se calculará de acuerdo con la Norma Mexicana para la Seguridad de la Infraestructura Física Educativa (NMX-R-079-SCFI-2015). Para los otros tipos de acciones se usará la NTC-Acciones aplicable. Se deberá cumplir con las tablas 2.1.1 y 2.1.2.

2.4.2.3 En el caso de desplazamientos laterales, la capacidad de desplazamiento será igual a la distorsión permisible, según el sistema estructural, y la demanda será la distorsión más desfavorable obtenida del análisis estructural.

2.4.2.4 En el diseño de la rehabilitación, se tomarán en consideración los aspectos a a f siguientes:

a. Condiciones de la estructura potencialmente peligrosas, incluyendo la interacción con cuerpos vecinos.
b. Daño estructural.
c. Deterioro de concreto y del refuerzo.
d. Construcción defectuosa.
e. Situaciones que afectan las condiciones de servicio.
f. Durabilidad de los materiales de construcción.

2.4.2.5 Se usarán las Normas para evaluar la capacidad del inmueble, en particular, los requisitos de las N-Rehabilitación.

2.4.2.6 El Reglamento y sus Normas aplicarán para el diseño de nuevos elementos o componentes, así como de conexiones entre nuevos elementos y la estructura existente. En esta Guía técnica se señalan requisitos del Reglamento y de sus Normas que son aplicables a estructuras rehabilitadas, así como aquellos que no lo son. Cuando se señale en esta Guía técnica un requisito distinto a lo estipulado en las otras Normas, se deberá cumplir con lo establecido aquí.

2.4.2.7 En la definición del peligro sísmico para el diseño de la rehabilitación de un edificio existente se cumplirá con lo requerido en la Norma Mexicana NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, en las NTC-Sismo (véase tabla 2.1.1), para estructuras del Grupo A, definidas en el Reglamento.

2.4.2.8 Se aceptará rehabilitar una estructura de un edificio existente cuando se cumplan las condiciones a y b siguientes:

a. Los cocientes demanda/capacidad para acciones y/o desplazamientos laterales son iguales o mayores que 1.0 para los elementos, componentes y sistemas estructurales resistentes a cargas gravitacionales y/o resistentes a fuerzas laterales inducidas por sismo.
b. La estructura mantiene sensiblemente su geometría original; es decir, no requiere de ser renivelada, deformada o desplazada para recuperarla.

2.4.2.9 El propietario, con ayuda del proyectista, realizará los estudios costo-beneficio y demás análisis económico-financieros para decidir la conveniencia y viabilidad de rehabilitar el edificio, o bien, de demolerlo y reconstruirlo.

2.5 Métodos de rehabilitación

2.5.1 Proyectos de rehabilitación de edificios existentes

2.5.1.1 Para rehabilitar edificios existentes, se deberá proceder como sigue:

a. La estructura se deberá analizar para determinar si cumple con los Objetivos de la Rehabilitación y, si no es adecuada, para identificar las deficiencias sísmicas.
b. Se estudiarán y desarrollarán una o más estrategias de rehabilitación (véase sección 2.6) para resolver las deficiencias identificadas.
c. Se analizará la estructura con las modificaciones preliminares de rehabilitación a fin de determinar si la estructura satisface los Objetivos de la Rehabilitación.
d. El proceso se repetirá hasta que la solución obtenida cumpla con los Objetivos de la Rehabilitación.

2.5.1.2 Para esta Guía técnica, se entiende como "Objetivo de la Rehabilitación" al establecido en el capítulo 9 de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, en la sección 1.1 de las NTC-Sismo de la Ciudad de México. Todo edificio escolar se clasifica dentro de las estructuras del Grupo A.

2.6 Estrategias de rehabilitación

2.6.1 Generalidades

La rehabilitación de un edificio existente se puede lograr mediante una o varias de las estrategias aquí identificadas. En el desarrollo de los diseños de la rehabilitación se debe considerar el nivel de redundancia, de modo que una falla localizada en uno o varios elementos no resulten en colapso local, parcial o en inestabilidad del inmueble. En los incisos 2.6.2 a 2.6.7 se describen las distintas estrategias de rehabilitación. Todas ellas requieren la revisión y la posible rehabilitación de la cimentación.

Una estrategia eficiente de rehabilitación debe cumplir con las especificaciones a a f:

a) Corregir las deficiencias conocidas (especialmente ante sismos) de todo el sistema y de los componentes o elementos vulnerables.
b) Ser compatible estructuralmente con el sistema existente.
c) Ser compatible funcionalmente y, si se puede, estéticamente.

d) Lograr los Objetivos de la Rehabilitación acordados entre el propietario y el proyectista, los cuales fueron aprobados por el director y el corresponsable.
e) Minimizar las afectaciones a los ocupantes.
f) Ser costo-efectiva y utilizar materiales y equipos disponibles.

2.6.2 Modificación de componentes estructurales

Se debe considerar la modificación local de componentes sin alterar la configuración básica del sistema estructural resistente a carga lateral. Esto implica mejorar las conexiones, la resistencia y/o capacidad de deformación de los componentes. El encamisado de elementos de marcos (con concreto, acero o compuestos poliméricos reforzados con fibras) es una técnica que permite incrementar la resistencia y/o la capacidad de deformación, sin alterar la respuesta global de la estructura. Otra medida es reducir la sección transversal de ciertos componentes para aumentar su flexibilidad y dotarlos de mayor capacidad de deformación lateral.

2.6.3 Eliminación o mitigación de irregularidades o discontinuidades existentes

Se debe considerar la eliminación o mitigación de las irregularidades de rigidez, resistencia y masa que causan un desempeño sísmico inadecuado (figura 2.6.1). Los efectos de las irregularidades y discontinuidades se manifiestan en la distribución de desplazamientos, así como en los cocientes de demanda a capacidad. La eliminación de las irregularidades puede ser una solución; sin embargo, se deberá revisar que no genere concentraciones de desplazamiento en algunos puntos de la estructura.

La eliminación de entrepisos débiles o suaves incluye la adición de muros o contraventeos. En el caso de irregularidades que causan torsión, se debe considerar la adición de marcos, muros o contraventeos que equilibren la distribución de rigidez y masa en un piso.

Otra estrategia de rehabilitación por considerar es la demolición de porciones de la estructura que causan la irregularidad, como entrantes y apéndices. También se debe considerar la elaboración de juntas constructivas para dividir el edificio irregular en varios cuerpos regulares separados entre sí. Las juntas constructivas deben tener la dimensión necesaria que cumpla con los requisitos normativos y evite el golpeteo entre estructuras.

2.6.4 Rigidización global de la estructura

Se debe rigidizar la estructura cuando los desplazamientos calculados son superiores a los límites máximos establecidos en el Reglamento, también, cuando los elementos y componentes no tengan la capacidad de deformación inelástica demandada por los sismos. Éste es el caso de marcos con columnas con refuerzo insuficiente a cortante y sin detallado dúctil. Para contrarrestar esta deficiencia, la construcción de nuevos muros o contraventeos es una medida efectiva para incrementar la rigidez lateral (figura 2.6.2). Es frecuente que esta técnica lleve asociado el encamisado de columnas para dotarlas de una mayor capacidad de deformación lateral inelástica. Es importante tomar en cuenta las nuevas acciones a la cimentación.

2.6.5 Reforzamiento global de la estructura

Se considerará el reforzamiento global de la estructura cuando la resistencia del inmueble existente sea baja y conduzca a comportamiento inelástico ante movimientos pequeños. La adición de muros y/o contraventeos es una solución adecuada para ello. Dependiendo de la estructura existente, es posible que la alta rigidez lateral de muros y contraventeos obligue a diseñarlos para resistir gran parte de la demanda sísmica. Otra opción es reforzar los marcos resistentes a momento (figura 2.6.3).

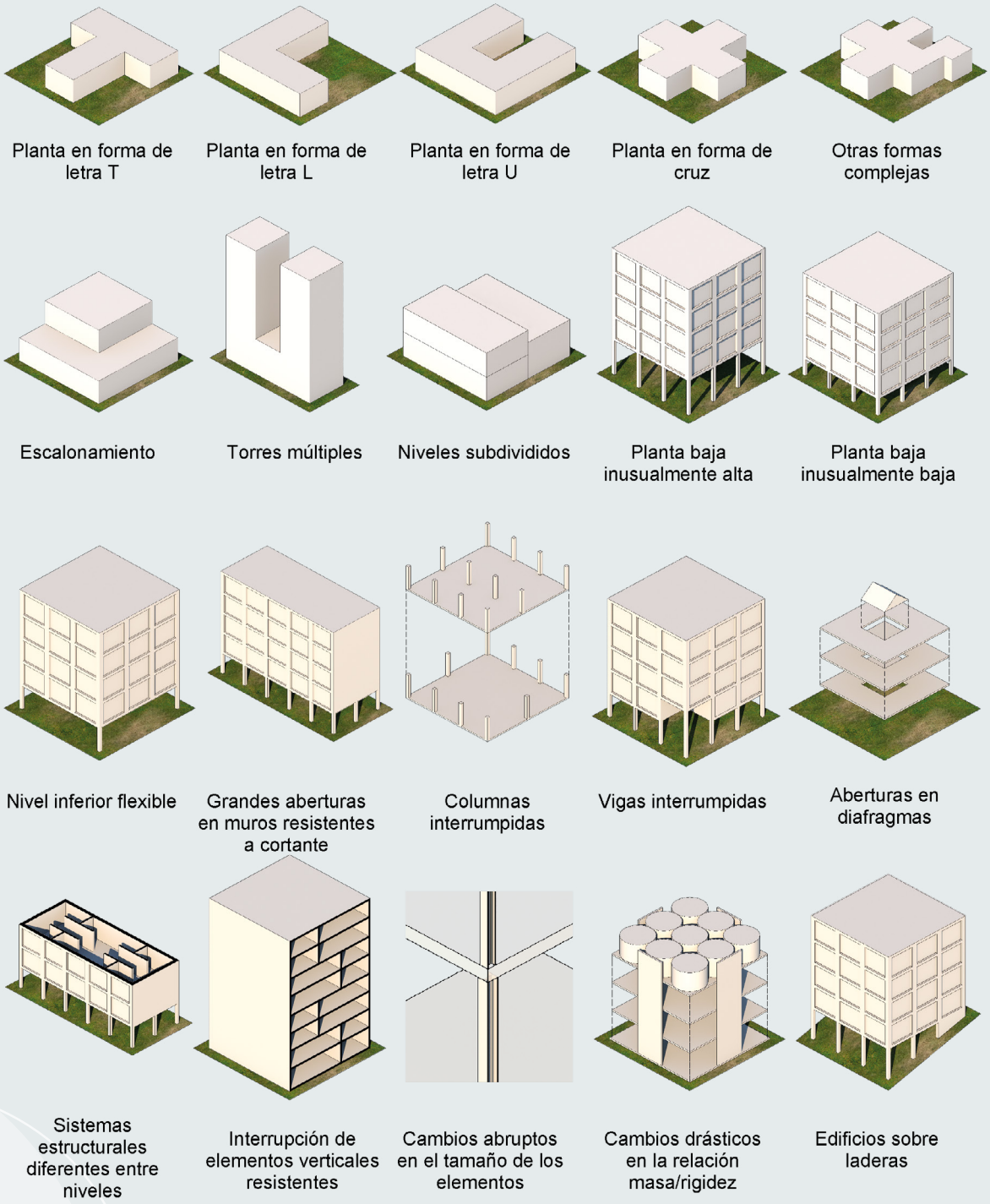


Figura 2.6.1
Estructuras irregulares.
Fuente: elaboración propia con base en Arnold y Reitherman (1991).





Figura 2.6.2
Rigidización de una estructura mediante nuevos muros.
Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).

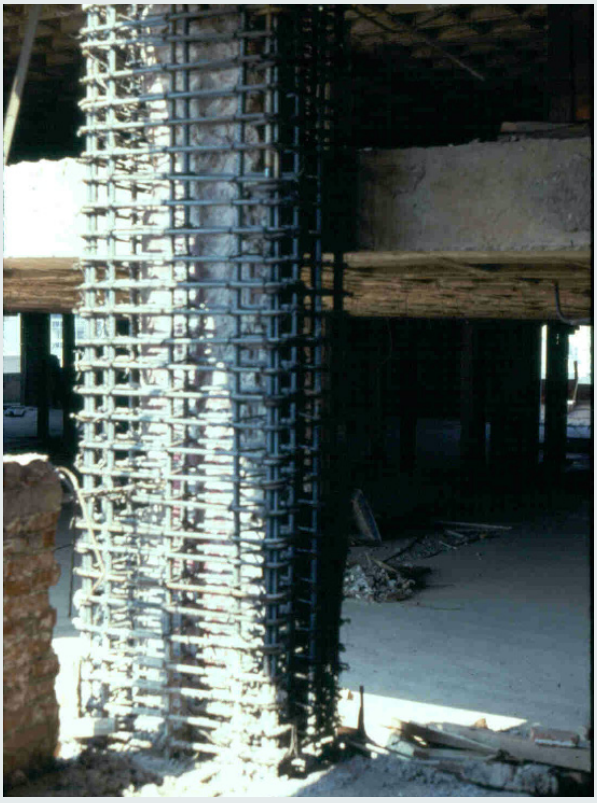




Figura 2.6.3
Reforzamiento de una estructura mediante encamisado del marco existente.
Fuente: archivos personales de Víctor Cruz (2019) y de Sergio Alcocer (1985).



Figura 2.6.4
Detalle esquemático de una junta con tope de neopreno entre edificios con separaciones menores que las requeridas.
Fuente: www.emac.es/

2.6.6 Eliminación o corrección de problemas causados por la interacción entre edificios

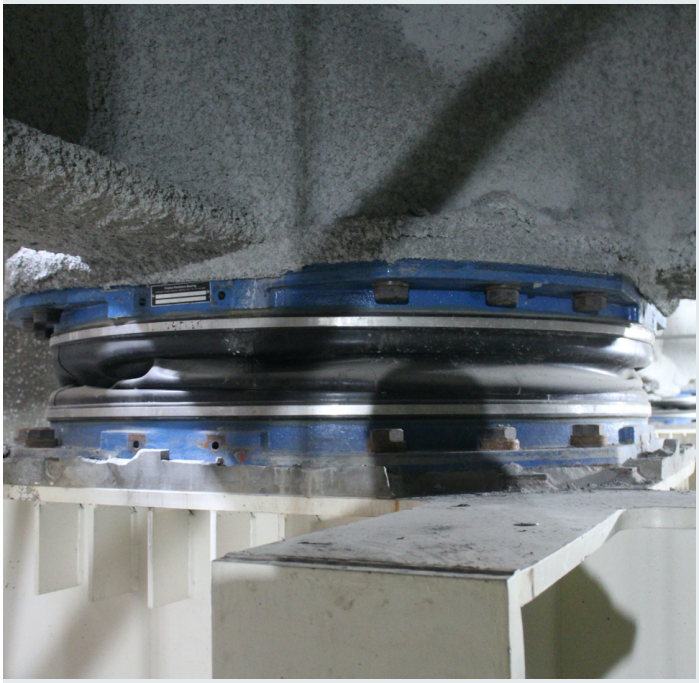
Se considerará la rigidización de la estructura para evitar el golpeteo con las estructuras adyacentes. Si la separación entre los edificios contiguos es muy pequeña, se evaluará la posibilidad de unirlos, de modo que respondan como una unidad estructural. Otra posibilidad es diseñar y construir elementos que sean capaces de resistir y transmitir el impacto del edificio vecino, sin afectar los elementos resistentes a cargas verticales. Una posibilidad es usar elementos de neopreno diseñados para resistir el posible impacto (figura 2.6.4); ello requiere un reforzamiento local de ambas estructuras.

2.6.7 Reducción de la masa reactiva

Se deberá considerar la reducción de la masa reactiva de una estructura a fin de reducir la demanda de fuerza y deformación producida por el sismo. La masa se puede reducir mediante el retiro de tanques de agua, la demolición de apéndices, el reemplazo de fachadas y muros divisorios pesados, así como el retiro de equipo y bodegas, especialmente en la parte superior del edificio.

2.6.8 Adición de elementos de control de la respuesta

El aislamiento de base es una técnica idónea para edificios rígidos y masivos en suelo firme o roca, pero no así en suelos blandos. Es recomendable



a) Aislador de base



b) Disipadores de energía

Figura 2.6.5
Adición de elementos de control de la respuesta:
a) aislador de base; b) disipadores de energía.
Fuente: archivos personales de Sergio Alcocer (1985) y de César Viramontes (2020).

considerar dicha técnica para este tipo de estructuras. De igual forma, se debe tener en mente la inclusión de elementos disipadores de energía mediante fricción, comportamiento histerético o viscoelástico. Estos elementos son idóneos para edificios relativamente flexibles y que posean capacidad de deformación inelástica. Tales sistemas están frecuentemente acoplados a contraventeos. Si bien en varios casos los desplazamientos se reducen, las fuerzas transmitidas a la estructura aumentan. Para más detalles, revisar el Apéndice B de las NTC-Sismo de la Ciudad de México.



Capítulo 3

Cargas, factores de carga y factores de resistencia

3.1 Alcance

3.1.1 La rehabilitación se diseñará para que cumpla con los requisitos de los estados límite de falla y de servicio, así como de durabilidad.

3.1.2 No se permite el uso de combinaciones de factores de carga y de resistencia del Reglamento vigente con los de versiones anteriores.

3.1.3 La resistencia de diseño de los elementos y componentes estructurales, así como de sus conexiones, será al menos igual a la resistencia requerida (o última). Se entiende por resistencia de diseño a la resistencia nominal afectada por el factor de resistencia según el tipo de acción interna. La resistencia requerida es el valor más desfavorable de la acción demandada, obtenido mediante un análisis estructural, multiplicándolo por la correspondiente combinación de factores de carga.

3.2 Factores de carga y combinaciones de carga

3.2.1 Se cumplirán los requisitos de las secciones 2.3 y 3.4 de las NTC-Acciones de la Ciudad de México (o sus equivalentes en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), salvo lo indicado en el inciso 3.4.a, para el que los factores de carga se tomarán iguales a 1.1 y 1.3 para cargas permanentes y variables, respectivamente, previo levantamiento geométrico de la estructura existente.

3.2.2 Las cargas permanentes, definidas en el inciso 2.1.a de las NTC-Acciones de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), serán estimadas por el proyectista mediante un levantamiento de las dimensiones, tipos de material, deformaciones y desplazamientos impuestos (como asentamientos diferenciales), movimientos relativos de los apoyos y presfuerzo cargas en la estructura existente.

3.2.3 Se considerará, adicionalmente, lo señalado en los incisos a, b y c:

a. Efectos del daño, deterioro o retiro de la carga en la redistribución de fuerzas.
b. Secuencia en la aplicación de las cargas, incluyendo cargas de construcción y las debidas al apuntalamiento y/o arriostramiento.
c. Cargas y acciones internas durante el proceso de rehabilitación.

3.3 Factores de resistencia para el diseño de la rehabilitación

3.3.1 En la rehabilitación de edificios existentes de concreto, se usarán los factores de resistencia F_R de la tabla 3.3.1.

3.3.2 No se afectará el cálculo de la longitud de desarrollo (sección 6.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o su equivalente) por el factor de resistencia.

3.3.3 Para concreto simple, el factor de resistencia será de 0.6.

3.3.4 En la rehabilitación de edificios de mampostería confinada o reforzada interiormente, se usarán los factores de resistencia de la tabla 3.3.2. Para mampostería simple a compresión y cortante, el factor de resistencia será de 0.3 y 0.4, respectivamente.

3.3.5 En la rehabilitación de edificios de acero, se usarán los factores de resistencia mencionados en las NTC-Acero para modos de falla dúctil. Para modos de falla frágil, se multiplicarán por 0.85.

Tabla 3.3.1
Factores de resistencia para estructuras de concreto ante distintas acciones internas

Acción de diseño	F_R
Flexión	0.9
Cortante y torsión	0.6
Flexocompresión, si el núcleo está confinado o si la falla es de tensión	0.7
Flexocompresión, si el núcleo no está confinado o si la falla es de compresión	0.6

Tabla 3.3.2
Factores de resistencia para estructuras de mampostería confinada o reforzada interiormente ante distintas acciones internas

Acción interna	F_R
Flexocompresión, si $P_u \leq P_R/3$	0.7
Flexocompresión, si $P_u > P_R/3$	0.5
Cortante	0.6

3.4 Factores de resistencia para la evaluación

3.4.1 En estructuras sin daño o con daño ligero por sismo (según las N-Rehabilitación), si se determinan las dimensiones, cuantía y ubicación del acero de refuerzo del elemento estructural según el capítulo 4 de esta Guía técnica, y se obtienen las propiedades de los materiales a partir de los ensayes requeridos en el inciso 4.2.4 de este documento, se aceptará que, con el visto bueno del corresponsable, se puedan usar factores de resistencias iguales a los requeridos en el diseño de estructuras nuevas correspondientes con el material de construcción.

3.5 Combinaciones de carga adicionales para estructuras rehabilitadas con sistemas externos

3.5.1 Si se rehabilita la estructura mediante sistemas externos de reforzamiento y que pueden estar sujetos a vandalismo, incendio o impacto, se revisará que, a pesar del vandalismo, pueda soportar las acciones de diseño o se incorporen elementos anti-vandalismo. En el primer caso, la resistencia de diseño de la estructura, sin rehabilitación, debe exceder la resistencia requerida en la ecuación 3.5.1.

$$F_R R_n \geq 1.2CP + 0.75CV$$

(Ecuación 3.5.1)

donde:

- R_n Es la resistencia nominal del elemento, usando las propiedades de los materiales determinadas en la sección 4.2.4 de esta Guía técnica.
- CP Son las cargas permanentes.
- CV Son las cargas variables.



Capítulo 4

Evaluación y análisis estructural

4.1 Alcance

4.1.1 La evaluación de la estructura, incluyendo su cimentación, comprende tres etapas:

a) Investigación de las características y condición de la estructura.
b) Evaluación que permita determinar las causas del daño, deterioro y/o deficiencias, así como los criterios para la selección de las soluciones de rehabilitación.
c) Desarrollo de las estrategias de rehabilitación apropiadas.

4.1.2 La evaluación estructural deberá incluir, al menos, los aspectos a a f siguientes:

a. Efecto de la degradación de los materiales.
b. Pérdida de área de las barras de refuerzo por corrosión o por otras causas.
c. Refuerzo ausente o mal colocado.
d. Efecto de eventos dañinos, como sismos o incendios.
e. Asentamientos diferenciales y/o inclinaciones.
f. Zonas afectadas por grietas en el subsuelo.

4.2 Investigación de las características de los edificios existentes

4.2.1 Condiciones del edificio existente

4.2.1.1 Se investigarán las características y la condición del edificio, y se evaluará la seguridad estructural cuando existan razones para dudar de la capacidad de la estructura y cuando no se tenga suficiente información para determinar si la estructura existente es capaz de resistir las demandas de diseño.

4.2.1.2 Se deberán determinar la configuración, así como el tipo, detallado, resistencia de materiales y la condición de los elementos estructurales, incluida la cimentación y las conexiones entre ellos, de conformidad con las secciones 2.2 y 2.3 de las N-Rehabilitación de la Ciudad de México. Los cálculos para la elaboración del proyecto ejecutivo deben basarse en documentos que avalen las características del edificio en estudio (véase inciso 2.2.3 de esta Guía técnica).

4.2.1.3 Se deberán realizar visitas al inmueble para obtener o corroborar información detallada sobre sus características, el sitio y las condiciones geotécnicas, así como sobre cualquier interacción con edificaciones adyacentes. Se deberán identificar y documentar las ampliaciones o modificaciones que haya experimentado el edificio original.

4.2.1.4 Se deberán documentar los conceptos a a g siguientes:

a. Condición física, extensión y ubicación del daño y deterioro.
b. Idoneidad del mecanismo de transmisión de carga entre elementos estructurales para proporcionar seguridad e integridad.
c. Características de los elementos estructurales: orientación, desviaciones, desplazamientos y dimensiones.
d. Material y sistema constructivo a fin de determinar el factor de resistencia del capítulo 3 de esta Guía técnica.
e. Propiedades de los materiales y componentes a partir de planos, memorias, especificaciones u otros, o bien, mediante ensayes.
f. Otras consideraciones: edificios adyacentes, elementos no estructurales, por ejemplo.
g. Información para evaluar los sistemas estructurales resistentes a fuerzas laterales y cargas gravitacionales, como son las longitudes de claros, características de apoyos, tipo de uso, entre otros.

Esta información deberá incluirse en la memoria de cálculo por ser entregada, en forma electrónica, al propietario y al Instituto, con el visto bueno del director y del corresponsable.

4.2.2 Configuración del edificio

4.2.2.1 Se deberán identificar los elementos y componentes de sistemas estructurales resistentes a cargas gravitacionales y a fuerzas laterales. Se identificarán aquellos elementos que, no obstante que no fueron diseñados para contribuir a la rigidez y resistencia laterales (como son los muros divisorios en contacto con el marco), en la realidad sí contribuyen y, por tanto, deben ser considerados explícitamente como parte del sistema de resistencia a cargas laterales.

4.2.3 Extensión y ubicación del daño y deterioro

4.2.3.1 Se hará un levantamiento del daño y/o deterioro de cada elemento estructural de cada entrepiso. Si es necesario, se retirarán acabados (como yeso) y elementos no estructurales (como plafones). Se recomienda consultar el Apéndice A de esta Guía técnica.

4.2.3.2 Para cada elemento estructural se registrarán, al menos, los conceptos a y e siguientes:

a. El espesor máximo y tipo de grieta (figura 4.2.1).
b. Ubicación y extensión de aplastamientos, desconchamientos y desprendimientos.
c. Ubicación, posición y extensión de barras de refuerzo pandeado.
d. Ubicación y extensión de fracturas de soldaduras.
e. Ubicación y extensión del pandeo local o global de elementos.

4.2.3.3 Se clasificará el nivel o magnitud de daño de cada elemento de entrepiso de conformidad con las N-Rehabilitación.

4.2.3.4 El registro anterior irá acompañado de fotografías y se entregará en el informe requerido en el inciso 2.2.3 de esta Guía técnica.

4.2.4 Propiedades de elementos y componentes

4.2.4.1 La eficiencia y eficacia de una rehabilitación depende de una adecuada caracterización de la capacidad resistente y de deformación de los elementos y componentes existentes.

4.2.4.2 La resistencia se calculará con base en las Normas de los materiales aplicables y en los capítulos 5 y 6 de esta Guía técnica. La resistencia se calculará para identificar la habilidad para transmitir carga a otros elementos y componentes, así como para determinar la capacidad de resistir fuerzas y deformaciones.

4.2.4.3 La capacidad de deformación se calculará con base en las Normas de los materiales aplicables y en los capítulos 5 y 6 de esta Guía técnica. La capacidad de deformación se calculará para determinar la aceptación del elemento y del edificio en su conjunto de acuerdo con las distorsiones límite de las NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las de NTC-Sismo aplicables (véase tabla 2.1.1).

4.2.4.4 Para elementos existentes cuyos modos de falla sean dúctiles (flexión, flexocompresión con bajas cargas axiales), se podrán calcular las resistencias a partir de valores esperados, es decir, valores medios de resistencia de los materiales. Si el modo de comportamiento es frágil (por cortante, aplastamiento, flexocompresión con cargas axiales elevadas, adherencia), la resistencia se deberá calcular con valores de límite inferior. Se aceptarán como valores de límite inferior los obtenidos de pruebas de materiales en el edificio existente (corazones de concreto, por ejemplo), o bien, los especificados en planos de construcción del edificio existente. Para la revisión de desplazamientos laterales, se adoptarán valores de límite inferior para el módulo de elasticidad del concreto.

4.2.4.5 Si se requiere la evaluación de la estructura, se deberá determinar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del concreto, y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo. Estas propiedades se obtienen, como se especifica más adelante, a partir de a, b o c:

a) Planos y memorias disponibles.
b) Datos históricos que incluyen valores especificados en el Reglamento vigente al momento del diseño y construcción de la estructura existente.
c) Ensayos físicos.

4.2.4.6 Se aceptará determinar la clase de concreto a partir de medir el peso volumétrico en corazones.

4.2.4.7 Si se requiere, se deberán evaluar otros factores y características, tales como:

a. Presencia de corrosión del acero de refuerzo dentro del concreto, incluyendo carbonatación, inclusión de cloruros y desconchamiento causado por la corrosión.
b. Presencia de otro tipo de deterioro, como reacción álcali-agregado, ataques de sulfatos u otros ataques químicos.
c. Deterioro de la resistencia y la rigidez por pérdida de adherencia y deslizamiento del





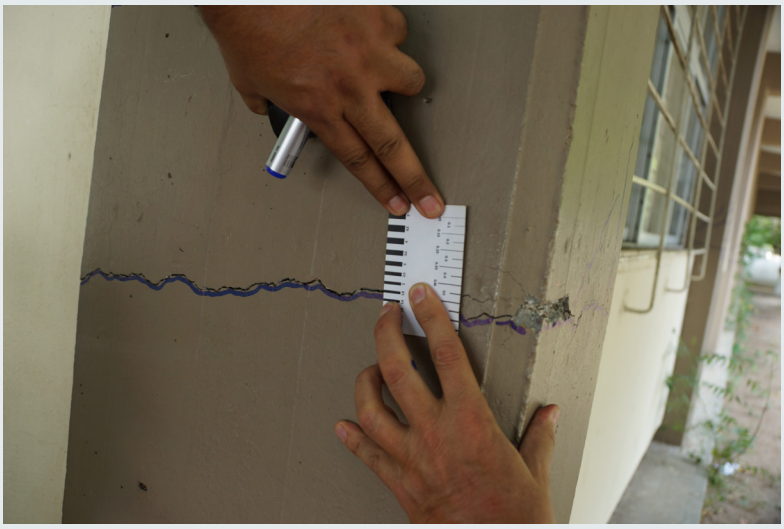






Figura 4.2.1
Medición de grietas.
Fuente: archivo personal de David Murià (2018).

refuerzo en secciones agrietadas y en uniones causados por sismos.

4.2.4.8 Si los planos, memorias, especificaciones u otros documentos disponibles no proveen suficiente información para determinar o caracterizar las propiedades de los materiales, se podrán usar los valores de las tablas 4.2.1 a 4.2.3 en función de la versión de reglamento empleado a la fecha de diseño, sin necesidad de realizar pruebas en sitio. Dichos valores históricos son aplicables a menos de que se estime que el deterioro de los materiales pueda o haya afectado el desempeño estructural.

Tabla 4.2.1
Resistencia a compresión del concreto, f_c^1, en MPa (kg/cm^2)

Época	Cimentaciones	Vigas	Losas	Columnas	Muros
1900-1987	20 (200)	20 (200)	20 (200)	20 (200)	20 (200)
1987-fecha	25 (250)	25 (250)	25 (250)	25 (250)	25 (250)

Tabla 4.2.2
Módulo de elasticidad del concreto, E_c, en MPa (kg/cm^2)

Época	E_c
1900-1976	$2\,500\sqrt{f_c'}\ \left(8\,000\sqrt{f_c'}\right)$
1977-1987	$2\,500\sqrt{f_c'}\ \left(8\,000\sqrt{f_c'}\right)$
1987-fecha	$4\,400\sqrt{f'_c}\ \left(14\,000\sqrt{f_c'}\right)$ clase 1, agregado grueso calizo
	$2\,500\sqrt{f_c'}\ \left(8\,000\sqrt{f_c'}\right)$ clase 2

Tabla 4.2.3
Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, f_y, en MPa (kg/cm^2)

Época	f_y
1900-1964	280 (2 800)
1965-fecha	420 (4 200)

4.2.4.9 Se podrán determinar las propiedades de los materiales mediante los ensayes establecidos en el inciso 4.2.5.

4.2.5 Ensayes para determinar las propiedades de los materiales

4.2.5.1 General

4.2.5.1.1 Los métodos de ensayes destructivos y no destructivos empleados para obtener las propiedades en sitio de los materiales y las propiedades del elemento cumplirán con lo establecido en este inciso.

4.2.5.1.2 El proyectista especificará el tipo, número y ubicación de los ensayes destructivos y no destructivos. Señalará el o los edificios o cuerpos, así como los elementos estructurales que serán sujeto de ensayes destructivos y no destructivos.

4.2.5.1.3 El laboratorio contratado deberá presentar el informe de resultados de los ensayes correspondientes con los requeridos por el proyectista.

4.2.5.1.4 El director revisará que lo solicitado por el proyectista cumpla con los requisitos mínimos de este inciso y que el laboratorio haya realizado los ensayes e informe los resultados en correspondencia con lo especificado por el proyectista.

4.2.5.2 Concreto

4.2.5.2.1 La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del concreto se establecerán mediante la extracción y ensayes de corazones de concreto, o mediante la combinación de corazones (figura 4.2.2) y ensayes no destructivos como el esclerómetro y/o ultrasonido (figura 4.2.3).



Figura 4.2.2
Extracción de corazones de una columna de concreto.
Fuente: www.contecon.net/ y cortesía Juan L. Cottier (2020).



a) Esclerómetro

b) Equipo de ultrasonido

Figura 4.2.3
Uso de: a) esclerómetro; b) equipo de ultrasonido.
Fuente: www.tecnoconengenharia.com.br/ y www.cotca.com/

4.2.5.2.2 Los corazones se obtendrán de elementos de concreto sano (no dañado). El número de corazones depende de la información de la construcción original, de la exactitud deseada, así como de la calidad y condición de materiales existentes.

4.2.5.2.3 Los corazones se deberán seleccionar, extraer y ensayar de acuerdo con NMX-C-169-ONNCCE. El lugar de extracción será al tercio medio de la altura del elemento, en donde se afecte lo menos posible su resistencia. Se deberá localizar el acero de refuerzo antes de seleccionar la ubicación de los corazones. Se deberá rellenar la oquedad con concreto o mortero sin contracción y de resistencia comparable a la obtenida mediante el núcleo para evitar el desprendimiento del material de reparación con respecto al concreto original.

4.2.5.2.4 Se podrán utilizar métodos no destructivos para evaluar la resistencia del concreto en sitio si se establece una correlación válida entre los resultados de la compresión de corazones y las mediciones no destructivas. No se permitirá la determinación de la resistencia a compresión ni del módulo de elasticidad mediante métodos no destructivos solamente.

4.2.5.2.5 Deberán desecharse los corazones dudosos o de mala calidad. No serán aceptables los resultados del ensaye de corazones dañados durante su extracción, ni de corazones con tramos de barras de acero ahogadas.

4.2.5.2.6 Si se conoce la resistencia especificada de diseño del concreto a partir de planos y/o memorias originales, ésta deberá verificarse en la edificación mediante, al menos, dos corazones extraídos de los elementos estructurales que resisten las fuerzas inducidas por el sismo. La resistencia así obtenida se calibrará con algún método no destructivo, como el esclerómetro o ultrasonido. Con este método calibrado se verificará la resistencia en al menos tres elementos estructurales distintos que sean parte del sistema estructural resistente a fuerzas laterales en cada entrepiso.

4.2.5.2.7 Si no se conoce la resistencia especificada de diseño del concreto, se deberá determinar, junto con el módulo de elasticidad, mediante la obtención y ensaye de lo que resulte en el mayor número de ensayes entre a o b:

a. Tres corazones en cada uno de los entrepisos más dañados y en cada elemento representativo del sistema estructural resistente a fuerzas laterales.
b. Un corazón por cada 200 m² de superficie construida de cada entrepiso, en cada uno de los entrepisos más dañados y en cada elemento representativo del sistema estructural resistente a fuerzas laterales.

4.2.5.2.8 Será válido el resultado del ensaye de un núcleo de concreto si cumple con la NMX-C-169-ONNCCE.

4.2.5.2.9 Los corazones que se hayan extraído de un elemento cuyas condiciones de servicio sean las de un ambiente superficialmente seco, deben permanecer durante 7 días, a menos de que se acuerde otro lapso, en un ambiente cuya temperatura sea de 288 K – 299 K (15°C – 25°C) y con una humedad relativa no mayor de 60% antes de probarse a la compresión.

4.2.5.2.10 Los corazones que se han extraído de un elemento que estará sujeto durante su servicio a una completa saturación, deben curarse de acuerdo con lo siguiente: sumérjanse los especímenes de prueba en agua saturada de cal, cuya temperatura debe ser de 296 K +/- 2 K (23°C +/- 2°C), por lo menos 40 horas inmediatamente antes de probarse a la compresión.

4.2.5.2.11 La obtención y ensaye de corazones de concreto se hará por parte de laboratorios acreditados y reconocidos por un organismo nacional de certificación para los métodos de prueba correspondientes.

4.2.5.3 Acero

4.2.5.3.1 Si se conoce el esfuerzo especificado de fluencia del acero en barras o del acero estructural para diseño señalado en los planos o memorias de cálculo de la estructura original, se podrá usar este valor para fines de evaluación.

4.2.5.3.2 Se podrá determinar el esfuerzo especificado de fluencia de barras de acero de refuerzo de la identificación detallada en el material, o bien, de los valores históricos incluidos en la tabla 4.2.3.

4.2.5.3.3 Si no se conoce el esfuerzo especificado de fluencia para diseño, se podrán obtener y ensayar dos probetas elaboradas a partir de segmentos de acero provenientes de zonas sujetas a bajos niveles de esfuerzo de dos elementos distintos de cada tipo de elemento resistente a sismo. Los elementos serán seleccionados por el corresponsable.

4.2.5.3.4 La determinación del esfuerzo de fluencia y la resistencia última del acero se hará mediante probetas fabricadas a partir de segmentos de barras de refuerzo. Los segmentos de barras de refuerzo se retirarán de zonas con bajos niveles de esfuerzo del elemento por evaluar. A fin de mantener la continuidad en el flujo de fuerzas, se reemplazará el segmento con barras que se traslapen con el refuerzo existente, a menos de que el proyectista demuestre, a satisfacción del corresponsable, que no es necesario el reemplazo. Se permite elaborar probetas hasta obtener una barra de sección circular tal que su área transversal no sea menor que 70% del área de la barra de refuerzo por evaluar. El ensaye se hará de conformidad con NMX-B-172-CANACERO.

4.2.5.3.5 Para la obtención de las propiedades del acero de refuerzo, se tomará en cuenta el posible uso de los distintos grados de acero en barras de diferentes diámetros.

4.2.5.3.6 En el caso de anclas y conectores (ahogados en concreto o instalados *a posteriori*), se deberán clasificar según su tipo, tamaño, geometría y función estructural. Si su tipo de falla está controlada por tensión o cortante y, de presentarse, le impediría a la estructura cumplir con el nivel de desempeño, se debe ensayar en sitio 5% a tensión. Al menos, se deben ensayar tres anclas o conectores por cada clasificación. Se acepta que la resistencia de diseño sea 2/3 de la media de la carga máxima.

4.2.5.3.7 Alternativamente a los ensayes en sitio, se podrá determinar la resistencia de anclas y conectores a partir de la documentación contenida en el proyecto ejecutivo original, de la identificación detallada en el material, o de valores históricos, como los incluidos en la tabla 4.2.3.

4.2.5.3.8 En el caso de perfiles de acero, laminados en caliente o en frío, se muestrearán tramos del patín y/o del alma con el fin de fabricar dos probetas de elementos estructurales distintos. Los elementos serán seleccionados a juicio del corresponsable. El ensaye se hará según NMX-B-172-CANACERO.

4.2.5.3.9 Si se requiere soldar la estructura existente a nuevos elementos, componentes o sistemas estructurales, se determinará el carbono o su equivalente con NMX-B-457-CANACERO.

4.2.5.3.10 La obtención y ensaye de probetas de barras de acero de refuerzo, cables de presfuerzo y perfiles de acero estructural lo harán laboratorios acreditados y reconocidos por un organismo nacional de certificación para los métodos de prueba correspondientes.

4.2.5.4 Mampostería

4.2.5.4.1 En el caso de muros de mampostería, las propiedades de la mampostería se podrán obtener a partir de a o b:

a. Planos y memorias disponibles.
b. Como se indica en el inciso 4.2.5.4.2.

4.2.5.4.2 Para fines de evaluación de la mampostería existente, se aceptará usar los valores siguientes:

a. Resistencia a compresión, f_m', igual a 1.5 MPa (15 kg/cm^2).
b. Resistencia a compresión diagonal, v'_m igual a 0.2 MPa (2 kg/cm^2).
c. Resistencia al aplastamiento igual a 1.2 MPa (12 kg/cm^2).
d. Módulo de elasticidad, E_m según el inciso 2.8.5.2 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
e. Módulo de cortante, G_m según el inciso 2.8.6 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

4.2.5.4.3 Se podrán usar valores más altos que los señalados en el inciso anterior si se justifican ante el corresponsable. En ningún caso podrán

ser más altos que los especificados en la normatividad vigente al momento de diseño de la estructura original.

4.2.6 Caracterización del sitio e información geotécnica

Para diseñar la rehabilitación, se deberá recabar información de las condiciones del suelo del sitio y de la configuración de la cimentación. Si la información disponible no es suficiente para caracterizar el sitio y la cimentación, se deberá planear y ejecutar un programa de exploración geotécnica.

Se deberán realizar visitas al sitio a fin de identificar, entre otros elementos, variaciones entre el diseño original y la construcción, así como modificaciones en la cimentación. Se deberán identificar indicadores de un pobre desempeño de la cimentación, como asentamiento, daño a banquetas, además de inclinaciones, hundimientos o emersiones del edificio.

En la sección 6.16 se detallan los requisitos para caracterizar el sitio y obtener la información geotécnica necesaria para revisar la cimentación y, en su caso, diseñar la recimentación.

4.2.6.1 Edificaciones adyacentes

Se deberá recolectar la mayor información posible de las estructuras adyacentes que tienen el potencial de influir en el comportamiento sísmico del edificio rehabilitado. Se identificará el sistema estructural y el tipo de cimentación a fin de evaluar, al menos cualitativamente, su impacto en la respuesta del edificio de interés.

4.2.6.2 Golpeteo de edificios

Se recolectará información cuando la menor separación entre edificios sea menor o igual que 0.6% de la altura sobre banqueta del edificio por rehabilitar. Se hará énfasis en la identificación de posibles zonas de impacto en relación con posible daño extremo en elementos, frecuentemente en columnas (figura 4.2.4).



Figura 4.2.4
Golpeteo de edificios. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1985).

4.2.6.3 Edificios con elementos o componentes en común

Se recolectará información de los edificios que compartan elementos o componentes con el edificio sujeto a proyecto. Éste es el caso de muros compartidos, puentes y escaleras que unen cuerpos, entre otros (figura 4.2.5).

4.2.6.4 Peligros de edificios adyacentes

Se deberá recolectar información de las estructuras que representen un peligro para el edificio por rehabilitar, debido a caída de bardas, pretiles, anuncios, entre otros, o bien, porque pueden producir otras amenazas físicas, como fugas de sustancias químicas agresivas, incendios o explosiones (figura 4.2.6).

4.2.6.5 Edificios modificados o ampliados

Se deberá recolectar información de las modificaciones de los elementos estructurales y no estructurales. Sobre las ampliaciones, deberá verificarse si fueron construidas cumpliendo las normas vigentes en el momento y recabar toda la información necesaria y posible para la evaluación estructural.



Figura 4.2.5
Elementos en común entre cuerpos de edificios.
Fuente: www.arquine.com/



Figura 4.2.6
Ejemplo de peligro de un edificio adyacente.
Fuente: Archundia et al. (2018).

4.3 Métodos de análisis

4.3.1 Requisitos generales

4.3.1.1 Se analizarán los sistemas estructurales resistentes a cargas gravitacionales y a fuerzas laterales bajo las combinaciones de carga establecidas en NTC-Acciones, que produzcan los efectos máximos en los elementos existentes evaluados. Se deberán emplear los factores de carga señalados en el capítulo 3 de esta Guía técnica.

4.3.1.2 El análisis estructural se hará usando métodos aceptados que satisfagan el equilibrio de fuerzas y principios de compatibilidad de deformaciones y desplazamientos. El análisis estructural se hará en modelos numéricos tridimensionales de la estructura.

4.3.1.3 Se cumplirán los requisitos generales de análisis de las NTC-Acero, NTC-Concreto, NTC-Mampostería y NTC-Sismo o NMX-R-079-SCFI-2015, según aplique.

4.3.1.4 Adicionalmente, en el análisis estructural se deberán considerar los aspectos a a e siguientes:

a. Propiedades de los materiales, geometría, deformaciones y desplazamientos de la estructura, duración de las cargas, contracción y flujo plástico, y la interacción con la cimentación.
b. Efectos de segundo orden.
c. Efectos de deterioro y daño, pérdida de adherencia del acero de refuerzo y la redistribución de fuerzas en los elementos y en la estructura completa.
d. El flujo de fuerzas hasta la cimentación, mediante modelos numéricos tridimensionales.
e. El efecto de reparaciones y reforzamientos previos en el comportamiento local (a nivel del elemento) y de toda estructura.

4.3.1.5 El análisis sísmico de la estructura existente con las modificaciones planteadas para su rehabilitación se hará de conformidad con el capítulo 10 de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, con la sección 2.1 de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). En el análisis se hará especial énfasis en calcular la relación entre demanda y capacidad en los elementos a a c:

a) Elementos esenciales para la estabilidad lateral de la estructura.
b) Elementos clave para la integridad de la capacidad a carga gravitacional de la estructura.
c) Elementos que son críticos para cumplir con los Objetivos de la Rehabilitación y que pueden resultar o que hayan resultado con daño durante la respuesta sísmica.

4.3.2 Estados límite de servicio

4.3.2.1 Si en la inspección del edificio se identifican problemas de servicio, el proyectista deberá evaluar las condiciones de servicio a partir de la geometría y propiedades de la estructura a fin de determinar su efecto en los desplazamientos, vibración y deformaciones.

4.3.3 Análisis para diseño de la rehabilitación

4.3.3.1 El análisis para fines de diseño de la rehabilitación debe considerar los efectos de la secuencia de aplicación de las cargas y retiro del material en las fases previstas de evaluación y rehabilitación. Se incluyen las cargas adicionales, fuerzas de presfuerzo, vibración, efectos de apuntalamiento y arriostramiento, así como deformación de apoyos.

4.3.3.2 Se deben considerar las variaciones de las propiedades de los materiales a lo largo de un elemento, en especial si se construyó por etapas. Una vez calibrados los métodos de evaluación no destructiva con los valores medidos de resistencia

y módulo de elasticidad, se verificará la variación de las propiedades de los materiales en la longitud del elemento.

4.3.3.3 En el análisis de secciones, se usarán principios de mecánica. Se supondrá un comportamiento monolítico total, sin deslizamiento entre los materiales existentes y los usados en la rehabilitación. Para lograrlo, se deberán satisfacer las secciones 5.3, 5.4, 5.6.6 y 6.4 de esta Guía técnica, según corresponda.

4.3.3.4 En el análisis se incluirá la interacción entre los elementos estructurales y los componentes no estructurales que puedan afectar la respuesta durante un sismo.

4.3.3.5 Se aceptará que los elementos estructurales, reparados o añadidos, no contribuyan a resistir el sismo, si esta consideración no afecta desfavorablemente al sistema estructural resistente a fuerzas laterales.

4.3.3.6 Para fines de evaluación, cuando la estructura tenga daños nulos o ligeros (según la N-Rehabilitación), bastará con realizar un análisis estático o dinámico de acuerdo con la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, con las NTC-Sismo, usando un valor del factor de comportamiento sísmico Q=2. La estructura será afectada por el factor de irregularidad que corresponda.

4.3.3.7 Cuando la estructura tenga daños moderados o severos (según la N-Rehabilitación), se podrá seguir lo indicado en el inciso 4.3.3.6.

4.3.3.8 Para fines de rehabilitación, se usará un valor del factor de comportamiento sísmico Q=2, a menos de que en esta Guía técnica se requiera un valor menor de Q.

4.3.3.9 No se aceptará el uso de Q=3 o Q=4 para el diseño de la rehabilitación de una estructura de un edificio existente.

4.3.3.10 Se cumplirán las consideraciones de análisis para la técnica o la combinación de técnicas de rehabilitación propuestas que se señalan en el capítulo 6 de esta Guía técnica.

4.3.3.11 Si el periodo fundamental de vibración de la estructura existente se encuentra entre 0.80 y 1.15 veces el periodo fundamental del suelo obtenido, será necesario realizar la medición experimental del periodo de la estructura.

4.3.3.12 Se aceptará obtener una primera estimación del periodo efectivo del sistema suelo-estructura, $\tilde{T}_e$, con las ecuaciones 4.3.1 y 4.3.2 en función del número de pisos, n, para edificios a base de marcos y muros en terrenos firme y blando (tipos II y III), y en terreno duro (tipo I), respectivamente:

$$\tilde{T}_e = (0.085\ a\ 0.095)n \qquad \textit{(Ecuación 4.3.1)}$$

$$\tilde{T}_e = (0.040\ a\ 0.063)n \qquad \textit{(Ecuación 4.3.2)}$$

En el caso de estructuras en terreno firme (tipo II), con suelos cuyas velocidades de ondas de cortante (V_s) son mayores que 100 m/s, los periodos se podrán considerar entre $\tilde{T}_e$, =(0.075 a 0.090)n.

4.3.3.13 En la Ciudad de México será obligatorio el uso del SASID.

4.3.3.14 Interacción suelo-estructura

4.3.3.14.1 Para estructuras desplantadas en suelo blando (tipo III), se considerará explícitamente la interacción suelo-estructura en el análisis. Se deberá cumplir lo establecido en el Manual de Diseño por Sismo de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2017b).

4.3.4 Criterios de aceptación

4.3.4.1 Los criterios de aceptación para la estructura rehabilitada serán la resistencia y la capacidad de deformación.

4.3.4.2 El criterio de aceptación de resistencia será el cumplimiento de los requisitos de las NTC-Acero, NTC-Concreto, NTC-Mampostería, según corresponda, y que sean aplicables de conformidad con esta Guía técnica.

4.3.4.3 Sobre el criterio de aceptación de capacidad de deformación, se deberán cumplir las distorsiones permisibles señaladas en el capítulo 9 de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, en el capítulo 4 de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), según el sistema estructural de la edificación rehabilitada.

4.4 Pruebas de carga

4.4.1 Se permitirá la ejecución de pruebas de carga en adición al análisis o para demostrar la resistencia de la estructura original o rehabilitada.

4.4.2 Las pruebas de carga cumplirán lo establecido en el Reglamento y en el capítulo 16 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).



Capítulo 5

Diseño

5.1 Alcance

5.1.1 La resistencia de diseño de todas las secciones de los elementos rehabilitados, nuevos elementos y elementos existentes sin rehabilitar, será al menos igual que la resistencia requerida (o última) obtenida a partir de fuerzas y momentos internos del análisis de conformidad con lo señalado en los capítulos 3 y 4 de esta Guía técnica.

5.1.2 La resistencia de diseño ante una fuerza y momento interno se obtendrá multiplicando la resistencia nominal por el factor de resistencia señalado en la sección 3.3 de esta Guía técnica.

5.2 Estados límite de falla y de servicio

5.2.1 En la revisión de los estados límite, se deben considerar las cargas, fuerzas y momentos internos y las deformaciones de la estructura existente y de la estructura rehabilitada durante el proceso de rehabilitación.

5.2.2 En el diseño se debe considerar que los esfuerzos y deformaciones existentes en la estructura no se pueden eliminar, como ocurre con las cargas axiales en columnas y muros existentes.

5.3 Comportamiento de sistemas rehabilitados

5.3.1 La rehabilitación de elementos, componentes y sistemas estructurales debe conducir a un sistema capaz de resistir las cargas de diseño mediante la compartición y transmisión de carga entre elementos existentes y la rehabilitación. Para un adecuado desempeño, la rehabilitación puede requerir conexiones. En las secciones 5.4, 5.6.6 y 6.4 de esta Guía técnica se establecen los requisitos para el diseño de las conexiones.

5.3.2 La rehabilitación debe considerar la transmisión de fuerzas en la interfaz del elemento resistente y del material o sistema de reparación y/o reforzamiento. Se deberá diseñar el mecanismo de transmisión de carga entre concreto nuevo y existente de conformidad con el inciso 5.3.3.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) y entre acero y concreto existente según el capítulo 9 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

5.4 Adherencia de materiales de rehabilitación a base de cemento

5.4.1 Se deberán revisar los esfuerzos de cortante y de tensión en la interfaz entre los materiales de rehabilitación a base de cemento y el sustrato existente. En este análisis, a las fuerzas y momentos internos obtenidos del análisis se sumarán, si corresponde, los producidos por los cambios volumétricos restringidos.

5.4.2 La fuerza cortante rasante requerida, $V_{u'}$ será menor o igual que la fuerza cortante rasante de diseño, siendo ésta igual al esfuerzo nominal de cortante rasante, afectado por el factor de resistencia establecido en la sección 3.3 de esta Guía técnica.

5.4.3 El esfuerzo nominal, la necesidad de refuerzo en la interfaz y el tipo de ensaye por adherencia se establecen en la tabla 5.4.1.

5.4.4 No se requerirá refuerzo en la interfaz si el sustrato se prepara retirando el concreto deteriorado, dañado o contaminado. En el capítulo 6 de esta Guía técnica se presentan consideraciones adicionales para lograr una rugosidad adecuada.

5.4.5 El ensaye de integridad señalado en la tabla 5.4.1 se puede ejecutar mediante métodos no destructivos de tipo cualitativo como son el radar de penetración o el método de impacto-eco, descritos en ACI 228.2R.

5.4.6 El ensaye de adherencia consistirá en el ensaye a tensión directa, establecido en la ASTM C1583/C1583M (figura 5.4.1). El número mínimo de pruebas en un proyecto será de tres. Se recomienda consultar la Guía Técnica ICRI 210.3 para definir el mínimo de ensayes y los criterios de aceptación.

Tabla 5.4.1
Esfuerzo nominal de cortante rasante, necesidad de refuerzo en la interfaz y tipos de ensaye requeridos

Vu MPa (kg/cm²)	Necesidad de refuerzo en la interfaz	Requisitos de ensaye de adherencia
V_u ≤ 0.20 (2.0)	No	Ensaye de integridad
0.20 (2.0) < V_u ≤ 0.40 (4.0)	No	Ensaye de adherencia, a menos de que se cumpla 5.4.8
V_u > 0.40 (4.0)	Sí	No se requiere

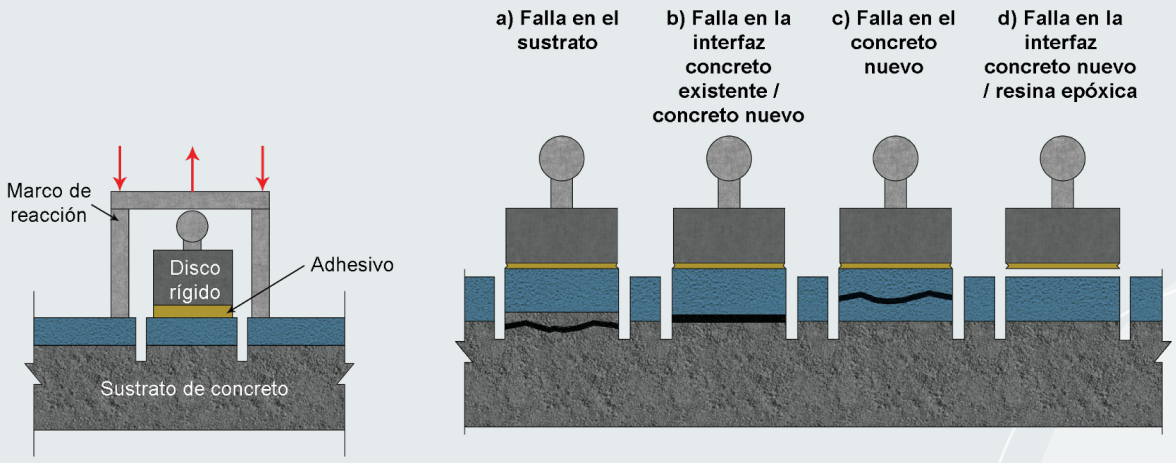


Figura 5.4.1
Ensaye de adherencia:
a) preparación del espécimen; b) tipos de falla.
Fuente: elaboración propia con base en ICRI 210.3R (2013) y ASTM C1583 (2013).

5.4.7 Si durante la prueba a tensión directa la falla ocurre en la línea de adherencia, ello puede indicar una preparación inadecuada de la superficie del concreto base o que la superficie base fue dañada por el método de preparación de la superficie.

5.4.8 Si V_u es resistido completamente por el refuerzo en la interfaz, no será requerido el ensaye de adherencia por tensión directa o similar.

5.4.9 Si V_u está entre 0.40 y 2.5 MPa (4.0 y 25 kg/cm²), se deberá colocar refuerzo perpendicular a la interfaz cuya área A_v, en mm² (cm²) sea la mayor de (a) y (b):

$$\text{a)}\ 0.062\frac{\sqrt{f'_c}\,bs}{f_y}\left(0.2\frac{\sqrt{f'_c}\,bs}{f_y}\right)\quad \text{b)}\ 0.35\frac{bs}{f_y}\left(3.5\frac{bs}{f_y}\right)$$

donde:

b y d ancho y peralte efectivo, no reducidos, de la sección, respectivamente, mm (cm).

s separación del refuerzo transversal, mm (cm).

En la figura 5.4.2 se muestra un ejemplo de acero de refuerzo anclado en el elemento existente por medio de resinas epóxicas, diseñado para resistir las fuerzas cortantes rasantes entre los concretos existente y nuevo.





Figura 5.4.2
Ejemplo de acero refuerzo para resistir la fuerza cortante rasante.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (2019).

5.5 Materiales

5.5.1 En el diseño de la rehabilitación se deben considerar las propiedades de los materiales y sistemas de reparación y reforzamiento. Éstas incluyen, entre otras, el tipo de aplicación, adhesión, estabilidad volumétrica, movimientos térmicos, durabilidad, resistencia a la corrosión, métodos de instalación, requisitos de curado y condiciones ambientales.

5.5.2 Las propiedades requeridas de los materiales de rehabilitación serán especificadas en el proyecto ejecutivo (en planos, memoria y especificaciones).

5.6 Consideraciones de diseño y detallado

5.6.1 General

5.6.1.1 Las consideraciones de esta sección se complementan con aquellas aplicables de las NTC-Acero, NTC-Concreto, NTC-Mampostería y del capítulo 6 de esta Guía técnica.

5.6.2 Concreto

5.6.2.1 Se usarán las propiedades del concreto determinadas de conformidad con lo establecido en el capítulo 4 de esta Guía técnica.

5.6.2.2 De acuerdo con el inciso 4.2.4.3 de esta Guía técnica, se considerará que el valor esperado de las propiedades del concreto será igual a 1.20 veces el valor del límite inferior.

5.6.2.3 En la rehabilitación de escuelas sólo se aceptará el uso de concreto clase 1. En ninguna circunstancia se podrá emplear concreto clase 2.

5.6.2.4 Se verificará en sitio el cumplimiento de la sección 5.6.2.3 mediante la medición del peso volumétrico del concreto en estado fresco. Se cumplirán los requisitos del inciso 15.3.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

5.6.2.5 Si el concreto se fabrica en obra, el proyectista especificará la dosificación de éste, con objeto de lograr la resistencia a compresión especificada y el peso volumétrico correspondiente a un concreto clase 1.

5.6.3 Acero de refuerzo

5.6.3.1 Se usarán las propiedades del acero determinadas según el capítulo 4 de esta Guía técnica.

5.6.3.2 De acuerdo con el inciso 4.2.4.3 de esta Guía técnica, el valor esperado del esfuerzo de fluencia será 1.25 veces el valor del límite inferior.

5.6.3.3 Se aceptará dejar el acero dañado o corroído si se toman en cuenta el diámetro y área remanentes, así como la pérdida de corrugación en el cálculo de resistencias. En este caso, se deberán tomar las medidas necesarias para que se detenga el proceso de corrosión. Si la estructura sufrió daño por incendio, se deberá evaluar su efecto en el esfuerzo de fluencia del refuerzo.

5.6.3.4 El diseño del refuerzo y del detallado debe hacerse considerando la posición (horizontal y vertical), la orientación, geometría de refuerzo, anclaje del refuerzo y ubicación de ganchos de remate y grapas.

5.6.3.5 Se revisará que el esfuerzo existente y el nuevo cumplan con la longitud de desarrollo y anclaje del capítulo 6 de las NTC-Concreto (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

5.6.3.6 Cuando las barras existentes corrugadas (rectas, con doblez o traslapadas) no cumplan con el inciso 5.6.3.5, la resistencia del anclaje o traslape del refuerzo existente se calculará como

$$f_s = \left(\frac{l_b}{l_d}\right)^{\frac{2}{3}} f_y \leq f_{y_{L/E}} \qquad \textit{(Ecuación 5.6.1)}$$

donde:

- f_s esfuerzo máximo que puede ser desarrollado por una barra anclada o traslapada, MPa (kg/cm^2)
- l_b longitud de desarrollo, de anclaje o de traslape disponible, mm
- l_d longitud de desarrollo, de anclaje o de traslape requerida por NTC-Concreto, mm
- f_y esfuerzo especificado de fluencia considerando su valor de límite inferior, MPa (kg/cm^2)
- $f_{yL/E}$ límite inferior o valor esperado del esfuerzo especificado de fluencia del refuerzo, MPa (kg/cm^2).

Si el esfuerzo máximo de adherencia es mayor que f_s calculado con la ecuación 5.6.1, se considerará que el comportamiento del elemento está controlado por una longitud de desarrollo o de traslape inadecuada.

5.6.4 Mampostería

5.6.4.1 Para fines de diseño de la rehabilitación, se usarán las propiedades de la mampostería determinadas según el capítulo 4 de esta Guía técnica. Se podrán usar valores superiores si los aprueba el corresponsable.

5.6.4.2 De acuerdo con el inciso 4.2.4.3 de esta Guía técnica, el valor esperado de las propiedades de la mampostería será 1.25 veces el valor del límite inferior.

5.6.5 Estructuras presforzadas y postensadas

5.6.5.1 Se considerarán los efectos del presfuerzo en el diseño de la rehabilitación.

5.6.5.2 Los documentos ACI 423.4R, ACI 222.2R, ICRI 210.2, PTI DC80.2-10, PTI DC 80.3 contienen guías para el análisis, métodos de evaluación y técnicas de reparación para estructuras con cables postensados no adheridos.

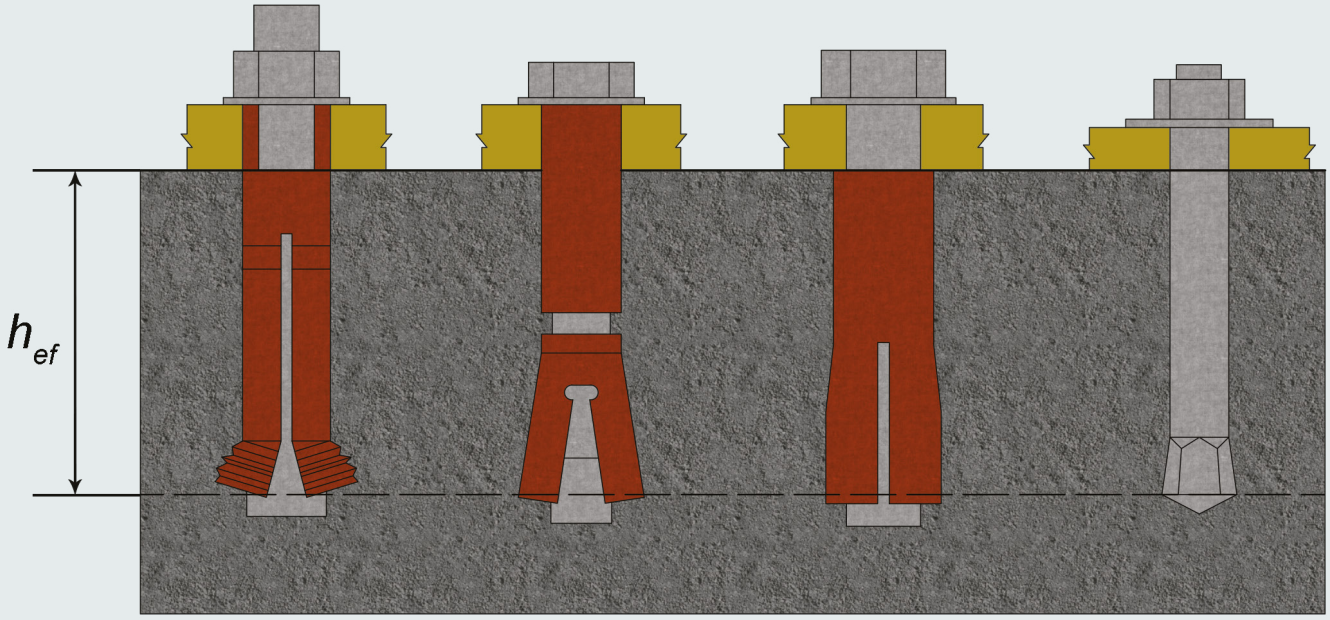
5.6.6 Anclas y conectores post-instalados

5.6.6.1 Las anclas y conectores post-instalados se diseñarán de acuerdo con el capítulo 17 del ACI 318-19 (figura 5.6.1). Se considerarán todos los modos de falla aplicables y si el sustrato está agrietado o no. En caso de duda, se supondrá el sustrato agrietado.

5.6.6.2 Se aceptará usar valores de resistencia para los distintos modos de falla propuestos por fabricantes certificados de conectores y/o resinas, previa aprobación del corresponsable.

5.6.6.3 Si se usan conectores de expansión, se seguirán las especificaciones del fabricante sobre barrenado, limpieza del agujero, magnitud del torque y procedimientos para lograr que trabaje el conector. El fabricante y el proveedor deben ser certificados por un organismo nacional de certificación.

5.6.6.4 Si se usan conectores adheridos o anclas, la limpieza del agujero y las condiciones de humedad son críticas. Se deberán seguir las especificaciones de fabricantes certificados para el barrenado, limpieza del agujero, instalación y cuidado hasta que la resina haya curado. El fabricante y el proveedor deben ser certificados por un organismo nacional de certificación.





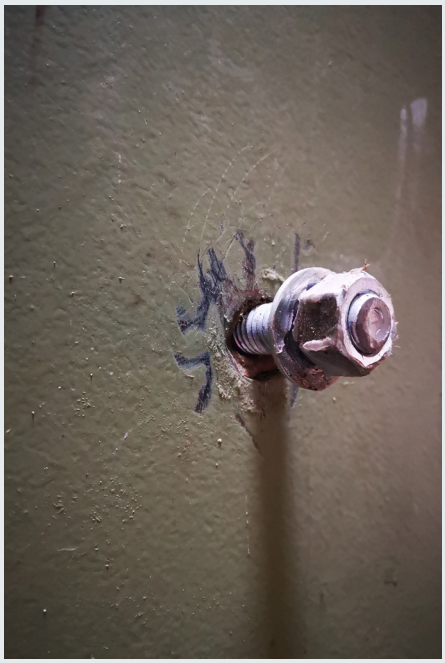




Figura 5.6.1
Tipos de anclas y conectores post-instalados. Fuente: elaboración propia con base en ACI 355.3R, 2011 y archivo personal de Rubén Bautista (2018).

5.6.6.5 El ensaye e inspección de conectores y anclas post-instaladas se deberá especificar en el proyecto ejecutivo y en el Programa del Aseguramiento de la Calidad.

5.6.7 Geometría de la reparación

5.6.7.1 La configuración de la reparación de un elemento de concreto o mampostería dañado debe ser tal que se evite la concentración de esfuerzos que provoquen agrietamientos en concreto y mampostería. Se recomienda que la reparación cumpla con lo indicado en los incisos a a e (figura 5.6.2):

a. Tenga una profundidad uniforme en el elemento.
b. Posea una geometría regular, con lados paralelos y una relación entre lado largo a corto de tres o menos.
c. Cuente con una superficie preparada tal que la amplitud de la rugosidad, entre valle y cresta, sea de al menos 6 mm (1/4 pulg).
d. Descubra completamente el acero de refuerzo en la zona dañada.
e. No se aplique en bordes de espesor pequeño que fácilmente se dañan o rompan.

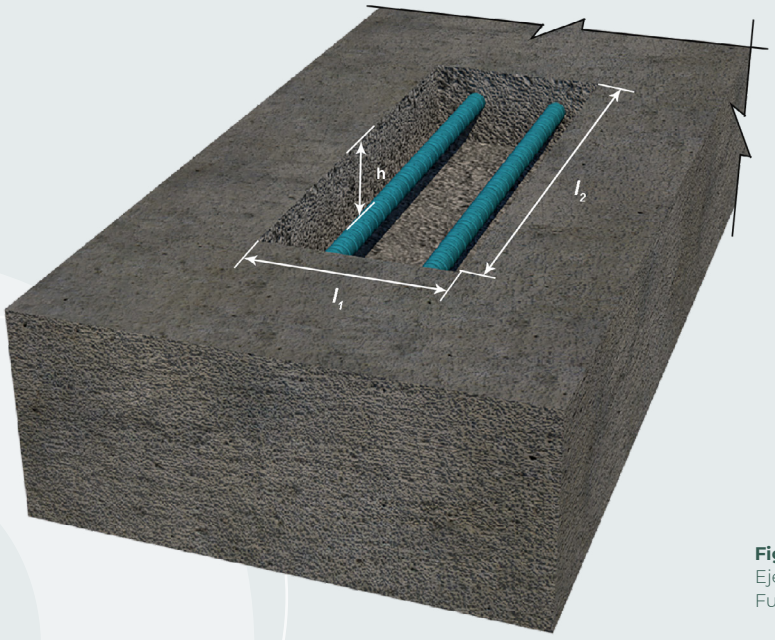
5.6.8 Rehabilitación usando postensado adicional

5.6.8.1 Se podrá utilizar postensado adicional, externo o interno, para rehabilitar una estructura (figura 5.6.3).

5.6.8.2 Se deberán considerar en el diseño y detallado de la rehabilitación las fuerzas y momentos internos que produzca el postensado.

5.6.8.3 Los esfuerzos producidos por el postensado se añadirán a los existentes y se verificará que no se excedan los límites del capítulo 11 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

5.6.8.4 Se diseñarán las zonas de anclaje de postensado de conformidad con el capítulo 11 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su



a) h: uniforme
b) $\frac{l_2}{l_1} \leq 3$
c) Superficie rugosa
d) Acero descubierto
e) Lejos de bordes

Figura 5.6.2
Ejemplo de geometría de una reparación.
Fuente: elaboración propia.

equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) o con los capítulos 5, 7 y 10 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), según corresponda, de modo que las fuerzas de postensado se puedan transferir a la estructura existente. Se aceptará el uso del Método de Puntales y Tensores para diseño y detallado (Apéndice B de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Las secciones y apéndice señalados corresponden a las normas de la Ciudad de México; se deberán usar las secciones equivalentes para las normas de otras poblaciones.

5.6.8.5 En el diseño del sistema de postensado se incluirán las pérdidas del postensado, así como los efectos del flujo plástico y contracción del concreto original debidos al postensado adicional, los efectos del flujo plástico y contracción del material de rehabilitación. Se incluirán las pérdidas por anclaje, puesto que éstas dependen del tipo de anclaje a utilizar, de modo que se deberán revisar con el constructor.

5.6.8.6 En el diseño se considerarán las deformaciones a corto y largo plazos, deflexiones, cambios de longitud y rotaciones causadas por el postensado.

5.6.8.7 En el proyecto ejecutivo (planos, memorias y especificaciones) se describirá la secuencia de rehabilitación, incluyendo la colocación de tendones, anclajes y del tensado del sistema de postensado.



Figura 5.6.3
Ejemplo de un contraventeo con cables postensados.
Fuente: cortesía de Grupo Riobóo (2020).

5.6.8.8 Se verificará que la estructura posea la suficiente resistencia a cargas gravitacionales en caso de que fallen los elementos estructurales rehabilitados por postensado y no protegidos a incendio y vandalismo. Se deberá satisfacer la sección 3.5 de esta Guía técnica.

5.7 Rehabilitación usando compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF)

5.7.1 Se podrá rehabilitar estructuras con compuestos de polímeros reforzados con fibras que cumplan con ACI 440.6 y ACI 440.8 (figura 5.7.1).

5.7.2 El diseño y detallado de los CPRF debe satisfacer los requisitos del ACI 440.2R.

5.7.3 Los sistemas a base de CPRF se deberán instalar sobre concreto en buen estado. El daño y deterioro del concreto y la corrosión del acero de refuerzo deberán repararse antes de colocar el sistema de CPRF.





Figura 5.7.1
Ejemplos del uso de CPRF en vigas y columnas.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2020) y cortesía de KL Structures.

5.7.4 Dependiendo de la función del sistema CPRF, se clasificarán como aplicaciones dependientes de la adherencia del compuesto al concreto o mamposterías existentes o como aplicaciones dependientes del contacto entre el concreto o mampostería existente y el sistema CPRF.

5.7.5 En aplicaciones dependientes de la adherencia, como el reforzamiento a flexión y cortante de elementos estructurales, el material existente deberá tener una superficie resistente a tensión y cortante para que el sistema CPRF pueda desarrollar su resistencia (figura 5.7.2). La resistencia del sustrato de concreto, determinada con una prueba directa, deberá ser de al menos 1.4 MPa (14 kg/cm^2) y una resistencia a compresión mínima de 20 MPa (200 kg/cm^2). Si es necesario, se aceptará el uso de conectores de CPRF.

5.7.6 En aplicaciones dependientes del contacto no es necesario cumplir con la resistencia mínima a tensión del sustrato, ya que las fuerzas de diseño se logran por la deformación o expansión de la sección del elemento por rehabilitar (figura 5.7.3).

5.7.7 En aplicaciones dependientes de la adherencia se deberá preparar la superficie con una rugosidad mínima de 1/4 pulg (6 mm) o el valor de rugosidad que señalen los fabricantes o instaladores de CPRF certificados por un organismo nacional de certificación. Este requisito no es necesario en aplicaciones dependientes del contacto entre el CPRF y el sustrato. Para estos casos, sólo será necesario limpiar la superficie con un cepillo de cerdas rígidas con el objeto de retirar la lechada superficial y el material suelto.

5.7.8 Los sistemas CPRF no deberán aplicarse en condiciones húmedas a menos de que la resina epóxica haya sido formulada por el fabricante para este tipo de condición. Se requerirá la aprobación del corresponsable en tal caso.

5.7.9 Se verificará que la estructura posea la suficiente resistencia a cargas gravitacionales en caso de que falle el sistema CPRF no protegido



a) Reforzamiento a flexión de una viga



a) Columna corta



b) Conectores de CPRF para anclar las fibras



b) Columna circular

Figura 5.7.2
Ejemplos de reforzamiento con CPRF dependientes de la adherencia entre la hoja de fibra y el sustrato de concreto: a) reforzamiento a flexión de una viga; b) conectores de CPRF para anclar las fibras de un muro. Fuente: cortesía de KL Structures.

Figura 5.7.3
Ejemplo de reforzamiento con CPRF dependiente del contacto entre la hoja de fibra y el sustrato de concreto: a) columna corta b) columna circular; Fuente: cortesía de KL Structures.

de incendios y vandalismo. Se deberá satisfacer la sección 3.5 de esta Guía técnica.

5.8 Diafragmas

5.8.1 Se revisará que los sistemas de piso y techo tengan la rigidez y resistencia en su plano para transmitir las fuerzas laterales, como las inducidas por sismo, a elementos resistentes a fuerzas laterales, ya sean originales, rehabilitados o nuevos.

5.8.2 Si el diafragma es de concreto, se cumplirá con lo requerido en la sección 7.8 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

5.8.3 Se podrán rehabilitar los diafragmas mediante la reducción de las dimensiones de aberturas, la construcción de elementos de refuerzo en los extremos, el reforzamiento de los extremos con compuestos de polímeros reforzados con fibra, la adición de diagonales a compresión en el plano, entre otros. En el capítulo 22 de FEMA-547 (2006) se discuten las consideraciones de diseño, construcción y costo de distintas técnicas de rehabilitación de diafragmas de diversos materiales.



Capítulo 6

Técnicas de rehabilitación de edificios existentes

6.1 Alcance

En este capítulo se presentan las técnicas de rehabilitación más comunes para ser aplicadas en edificios existentes. En cada una se indica la deficiencia estructural que se puede corregir con su uso y se describe en qué consiste, en lo general, y sus variaciones, cuando corresponda. Se incluyen requisitos de análisis, diseño, construcción y aseguramiento de la calidad. Cuando se requiere, se señalan los requisitos de las Normas en cuyo cumplimiento debe prestarse especial atención. De igual forma, se indican los requisitos que no se deben cumplir, dado que no son aplicables a la rehabilitación de edificios existentes.

6.1.1 Proceso de rehabilitación

En la figura 6.1.1 se presenta un diagrama de flujo que representa de manera gráfica el proceso que se debe realizar para aplicar cualquier técnica de rehabilitación descrita en esta Guía técnica.

El proceso inicia con la obtención de la mayor información posible del edificio por rehabilitar. Posteriormente, se selecciona el Objetivo de la Rehabilitación de manera conjunta entre el proyectista, el director, el corresponsable y el propietario de la escuela. Después se identifican, en campo y en gabinete, las deficiencias estructurales del edificio. A partir de ellas, el proyectista desarrolla, conceptualmente, las posibles técnicas de rehabilitación consistentes con las estrategias de rehabilitación que permitan mitigar o eliminar las deficiencias identificadas. En seguida, con el apoyo de un modelo numérico del edificio, se verifica que la(s) técnica(s) de rehabilitación seleccionadas permiten: a) satisfacer el Objetivo de la Rehabilitación y b) mitigar o eliminar las deficiencias. En caso de que no se cumpla lo anterior, se debe(n) ajustar o cambiar la(s) técnica(s) de rehabilitación seleccionadas y/o el Objetivo de la Rehabilitación. Una vez cumplido el Objetivo de la Rehabilitación, se procede a elaborar el proyecto ejecutivo, haciendo énfasis en los planos constructivos y en la memoria de cálculo, en los detalles de conexiones, en el tipo y uso de nuevos materiales, en la secuencia de construcción y demás consideraciones de construcción y supervisión incluidas en este apartado y en los capítulos 8 y 9 de la presente obra.

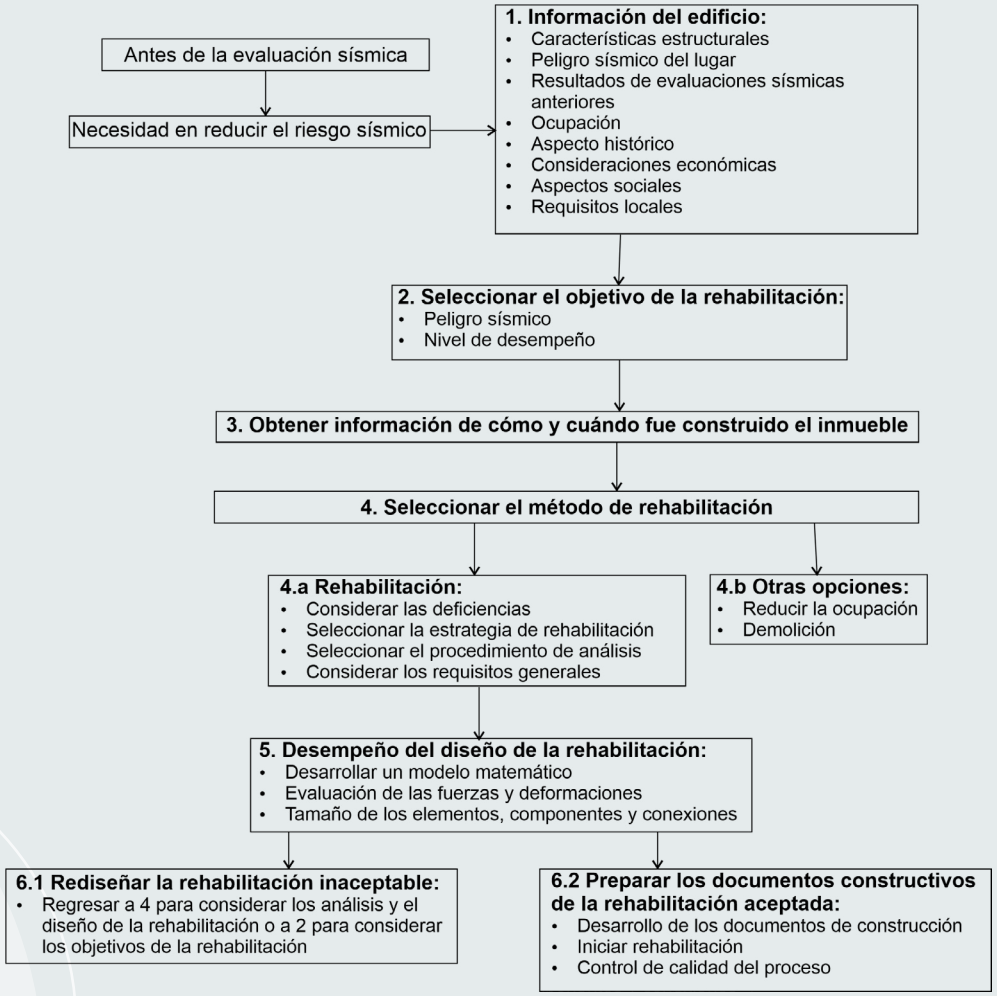


Figura 6.1.1
Diagrama de flujo del proceso de rehabilitación.
Fuente: elaboración propia con base en FEMA-273 (1997).

En la tabla 6.1.1 se muestran las técnicas de rehabilitación descritas en este capítulo y el Objetivo de Rehabilitación de cada una de ellas. Se excluyen de la tabla las técnicas de rehabilitación complementaria, *i.e.,* reparación local, reparación de grietas, sustitución de elementos dañados y adición de anclas y conectores. Las técnicas de rehabilitación complementaria no modifican sensiblemente la capacidad estructural del edificio. Se recomienda que se apliquen como complemento de las técnicas indicadas en la tabla a fin de mejorar la respuesta local y global de la estructura ante sismo. Las técnicas de rehabilitación complementaria se describen en las secciones 6.2 a 6.5.

Tabla 6.1.1

Objetivos de rehabilitación en correspondencia con cada técnica de rehabilitación

Técnica	Rehabilitación complementaria	Incrementar resistencia global	Aumentar rigidez	Incrementar la capacidad de deformación inelástica	Controlar la respuesta	Mejorar la configuración estructural
Encamisado de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado	a y/o b	x*	x	x		
Encamisado de vigas, columnas o nudos con acero	a y/o b	x		x		
Encamisado de vigas, columnas o nudos con CPRF	a y/o b	x		x		
Encamisado de muros de mampostería	a y/o b	x	x	x		
Adición de muros de concreto	a y/o b	x	x	x		x
Adición de contraventeos de acero	a y/o b	x	x	x		x
Adición de contraventeos metálicos a base de cables postensados	a y/o b	x	x	x		x
Sustitución o adición de muros diafragma de mampostería	a y/o b	x	x	x		x
Separación y recorte de pretiles en marcos de concreto o acero				x		x
Sistemas de protección pasiva	a y/o b		x	x	x	
Rehabilitación de la cimentación	a y/o b	x	x			x

Notas:
a: Reparación local, inyección de grietas, sustitución de elementos dañados.
b: Colocación de anclas y conectores en estructuras de concreto y de conectores en elementos metálicos.
* El encamisado de elementos con concreto reforzado incrementará la resistencia de forma global en la estructura siempre que los componentes que conforman el sistema estructural se hayan rehabilitado con esta técnica, sin embargo, cuando la técnica se emplea en ciertos componentes del sistema estructural, se incrementará la resistencia de forma local, particularmente en el elemento rehabilitado.

6.2 Reparación local de elementos estructurales

6.2.1 Deficiencia por corregir

La reparación local de un elemento estructural de concreto o mampostería se practica cuando se requiere recuperar la capacidad original. Aquellos elementos dañados que adicionalmente serán reforzados deberán ser reparados antes.

Un caso particular de reparación es la de grietas mediante fluidos. Debido a su uso tan extendido, se trata de manera separada en la sección 6.3 de esta Guía técnica.

6.2.2 Descripción de la técnica

La reparación de un elemento de concreto consiste en la colocación de material compatible con el concreto desconchado y aplastado. Usualmente, este material está hecho a base de morteros hidráulicos o de resina epóxica. En la guía ICRI 320.3R se pueden consultar las propiedades de los materiales de reparación más usuales.
En el caso de mampostería, la reparación local implica la sustitución de las piezas desconchadas y aplastadas.

El desempeño de la reparación depende, entre otros factores, de la magnitud del daño y de la calidad de la ejecución. Por tanto, en la evaluación y en el análisis estructural se debe considerar el nivel de restitución de la capacidad estructural que sea factible alcanzar con la reparación para el modo de comportamiento, magnitud de daño y calidad de ejecución de la edificación. Esta consideración se vuelve más relevante si se usan materiales, técnicas y sistemas poco comunes.

Tras los sismos de septiembre de 2017, el INIFED desarrolló un *Catálogo general de detalles para rehabilitación de estructuras con daños ligeros* (2017b). Este documento es el resultado de compilar las mejores prácticas elaboradas por el propio INIFED a lo largo de los años.

En los incisos 6.2.3 a 6.2.5 se describen los procedimientos de reparación local para elementos de concreto, elementos de mampostería y losas, respectivamente. El procedimiento de ejecución está escrito de modo que pueda servir de base para una especificación de construcción. El material de esta sección fue complementado con las recomendaciones de Alcocer (2003), Soto (2008) e INIFED (2017a).

6.2.3 Reparación de elementos de concreto

6.2.3.1 Reparación de elementos de concreto con desprendimiento de recubrimiento o desconchamiento

6.2.3.1.1 Procedimiento

1. Retirar, por medios manuales, las partes flojas o mal adheridas, cuidando de no dañar el acero de refuerzo.
2. Picar la superficie de concreto endurecido y preparar una “caja” con ángulos rectos, limpiando el concreto y barras dentro de la caja. En la figura 6.2.1 se muestra una “caja” con el detalle del armado longitudinal de algún elemento de concreto (columna, trabe), lo que se observa en el centro son las barras.
3. Limpiar la superficie que deberá quedar perfectamente libre de polvo, grasa, óxido o cualquier otro elemento que pueda afectar la unión entre el concreto endurecido y el nuevo concreto. El acero de refuerzo deberá limpiarse con cepillo de cerdas metálicas, si la oxidación produce desprendimiento de la corrugación, éste deberá sustituirse.
4. Si la barra está fracturada o pandeada, unir la barra existente y la nueva con soldadura (figura 6.2.2) o mediante traslape (recomendado).
5. Limpiar y humedecer la superficie del concreto endurecido cada 6 h, un día antes de aplicar un concreto nuevo o mortero cemento-arena en proporción 1:3, con llana o cuña hasta dejar

un acabado parejo. Para oquedades mayores que 2.5 cm de profundidad, agregar gravilla limpia y seca, cuya cantidad máxima será de 25% de la mezcla cemento-arena.

6. Curado. Transcurridas tres horas posteriores al resane, se deberá iniciar el curado, humedeciendo con agua limpia la superficie reparada, lo cual deberá hacerse cada hora durante un periodo de tres días como mínimo.

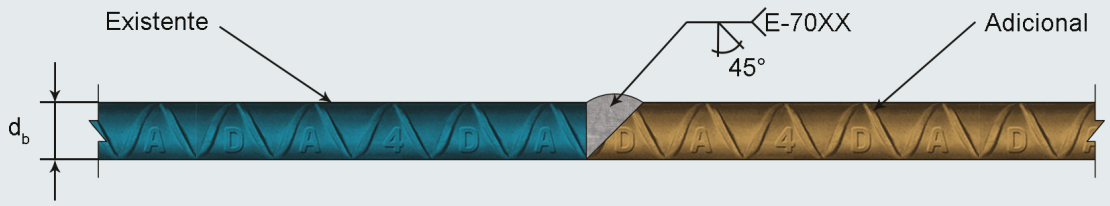


Figura 6.2.1
Unión de barras mediante soldadura.
Fuente: elaboración propia con base en INIFED (2017b).

6.2.4 Reparación de daños ligeros en muros de mampostería

6.2.4.1 Reemplazo de piezas aplastadas y/o desconchadas

6.2.4.1.1 Procedimiento

1. Retirar el material aplastado, suelto, mal adherido; lavar toda la superficie de contacto con un chorro abundante y presión suficiente de agua.
2. Colocar la nueva pieza con mortero cemento-arena en proporción 1:3 (mortero tipo I). La nueva pieza será del mismo material y con resistencia similar al de la pieza dañada.
3. Una vez concluido el proceso de sustitución de la pieza dañada, se reparará el mortero de las juntas adyacentes.

6.2.4.2 Reparación local de agrietamiento en muros de tabique con aplanado

6.2.4.2.1 Procedimiento

1. Retirar parcialmente el aplanado a lo largo de la grieta, en un ancho de 20 cm a cada lado.
2. Retirar el material suelto, mal adherido; lavar toda la superficie de la grieta con un chorro abundante y presión suficiente de agua.
3. Colocar mortero cemento-arena en proporción 1:3 ($f´j$=120 kg/cm^2) sobre la grieta, cuyo espesor y profundidad deberán ser ligeramente menores que el de las rajuelas por colocar, si es que las grietas facilitan la colocación de rajuelas. En caso contrario, rellenar la grieta con lechada de cemento (véase sección 6.3).
4. Las zonas de grietas u oquedades mayores que 5 cm o con piezas desprendidas se deberán rellenar con el mortero anteriormente especificado y pedacería de tabique.
5. Colocar material desplegado o malla de gallinero.
6. Si se opta por colocar metal desplegado, será de calibre 20, rombo 6 x 25 mm, siguiendo la trayectoria de la grieta, fijándola al muro con grapas galvanizadas en tresbolillo (figura 6.2.3). Restituir el aplanado con mortero cemento-arena tipo I, previniendo humedecer la superficie del muro para evitar contracciones importantes entre el aplanado existente y el nuevo.
7. Si se usa malla de gallinero (hexagonal), primero se coloca una capa de mortero de 10 mm; luego, se fija la malla con grapas y, finalmente, se recubre la malla con otros 10 mm de mortero.
8. Curar el mortero manteniendo un ambiente húmedo durante tres días, por lo menos.

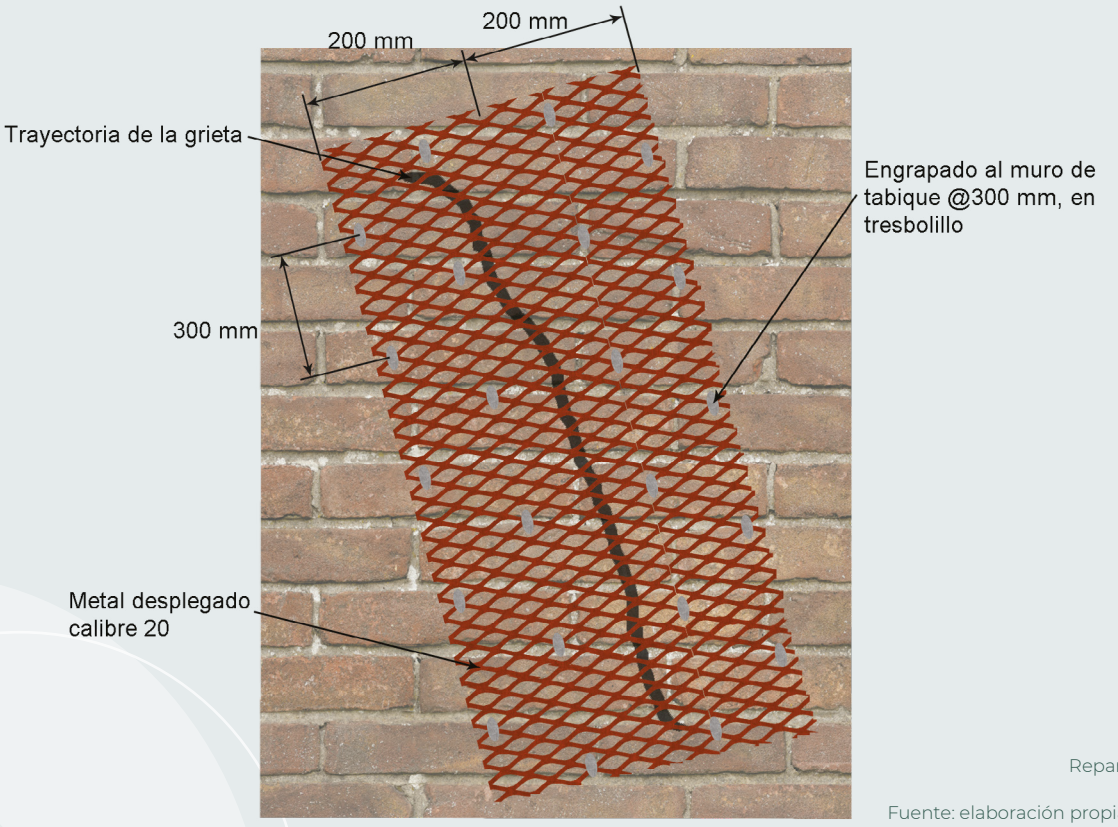


Figura 6.2.2
Reparación local de una grieta con metal desplegado calibre 20.
Fuente: elaboración propia con base en INIFED (2017b).

6.2.4.3 Reparación de muros con problemas de salitre

Los problemas de salitre en muros deberán erradicarse para evitar deterioro del muro.

6.2.4.3.1 Procedimiento

1. Demoler, a cada lado del muro, una franja de 300 mm de firme y piso.
2. Excavar el terreno bajo las zonas de piso demolidas hasta encontrar la base del enrase del cimiento.
3. Retirar el aplanado de muro hasta una altura mínima de 500 mm con respecto al piso terminando o hasta la altura correspondiente a la zona salitrosa.
4. Limpiar la superficie del muro dejándola libre de polvo y de materiales sueltos o mal adheridos.
5. Lavar las superficies descubiertas con hipoclorito de sodio diluido en agua al 25 o 30% aplicado con escobilla plástica, y enjuagar con abundante agua.
6. Secar la superficie del muro por medio de ventilación y calor.
7. En caso de existir fisuras u oquedades por falta de material del junteo, repararlas con mortero cemento-arena y piedra laja.
8. Una vez que esté seca la reparación de grietas, se debe preparar la superficie hasta lograr una amplitud de rugosidades de 6 mm (1/4 pulg) (entre valle y cresta) según la sección 6.5.
9. Finalmente, se repondrá el aplanado y se aplicará el acabado final de muros.

6.2.5 Reparación de daños ligeros en losas

6.2.5.1 Reparaciones de *losacero* en azoteas intermedias de entrepiso y/o azotea

6.2.5.1.1 Procedimiento (véase figura 6.2.3):

1. Previo a cualquier demolición, apuntalar las azoteas afectadas de forma adecuada para garantizar que no se inducirá daño al resto del edificio.
2. Demoler con cincel y martillo, cuidando de no dañar el material suave.
3. Preparar las superficies de concreto endurecido que reciban concreto fresco, con rugosidades de 6 mm (1/4 pulg); saturar con agua previo al colado.
4. Realizar los engargolados, traslapes o fijaciones de láminas según las especificaciones del proveedor.
5. Colocar un armado adicional y colocar el concreto con aditivo estabilizador de volumen (siempre atendiendo las especificaciones del proveedor), con el mismo espesor del existente.

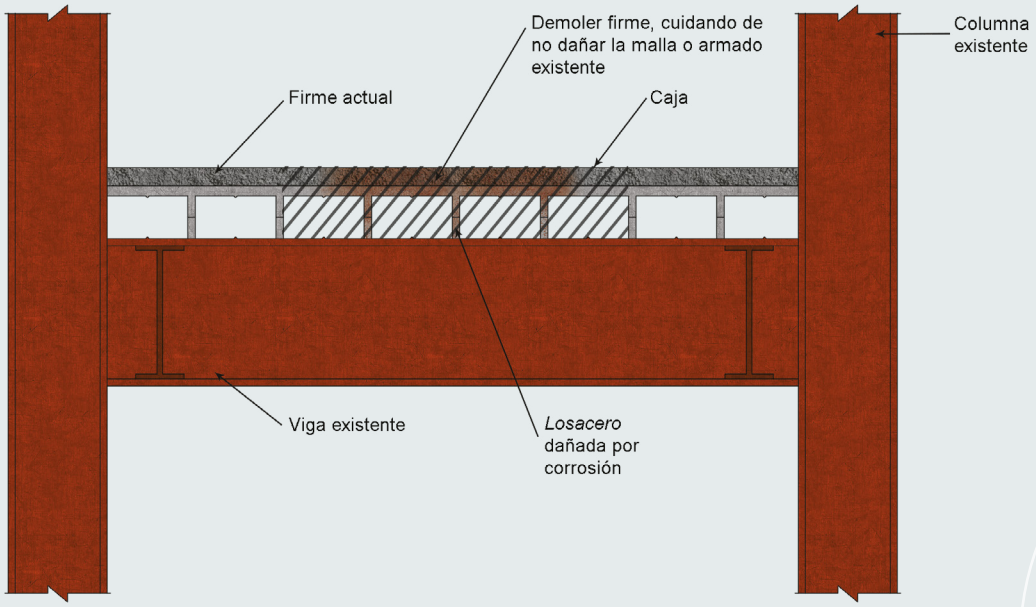


Figura 6.2.3
Reparación de losacero. Fuente: elaboración propia con base en INIFED (2017b).

6.2.5.2 Restitución del aplanado en losa

6.2.5.2.1 Procedimiento (figura 6.2.4)

1. Examinar el aplanado por medio de golpeteo directo, mediante un cincel.
2. Retirar el aplanado mal adherido o que presente algún deterioro con medios mecánicos.
3. Picar con cincel y martillo la superficie de la losa descubierta, dejando una rugosidad mínima de 5 mm (1/4 pulg).
4. Limpiar la superficie de la losa, dejándola libre de polvo, grasa, pintura y/o de materiales sueltos o mal adheridos.
5. Colocar metal desplegado, fijando por medio de clavos para concreto.
6. Preparar la superficie con una rugosidad de 6 mm (1/4 pulg) de amplitud.
7. Aplicar una capa de aplanado, máximo de 10 mm y esperar a que reviente para aplicar la capa final.
8. Curar las fisuras de la última capa de aplanado, por medio de arena cernida y cemento.
9. Aplicar el acabado firme una vez que esté bien seco el aplanado.

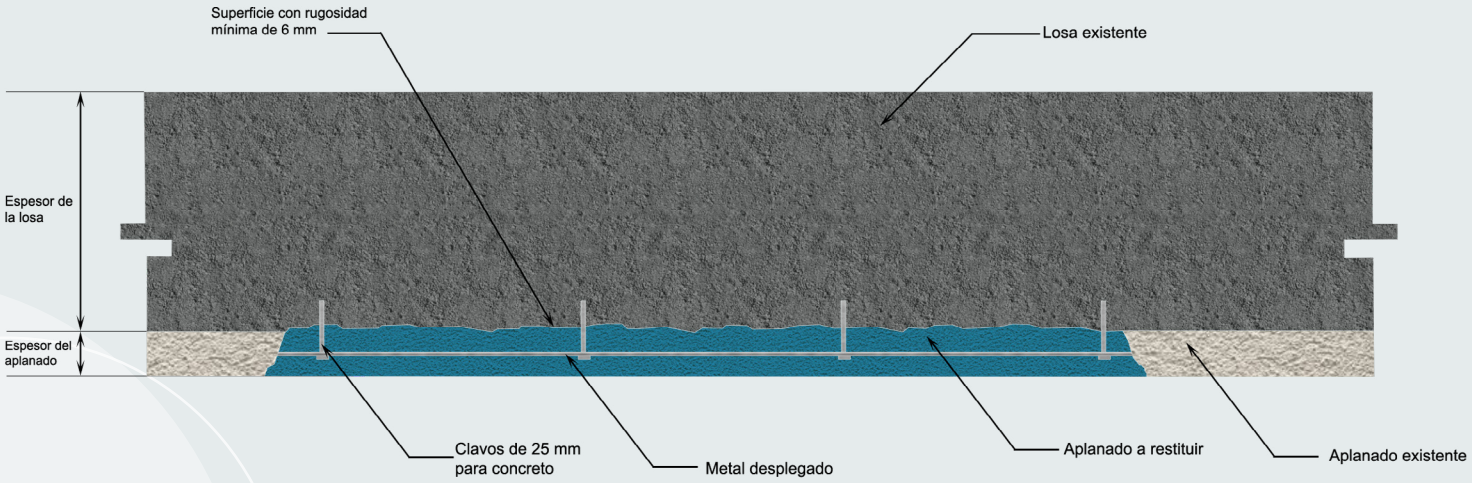


Figura 6.2.4
Restitución de aplanado de losa. Fuente: elaboración propia con base en INIFED (2017b).

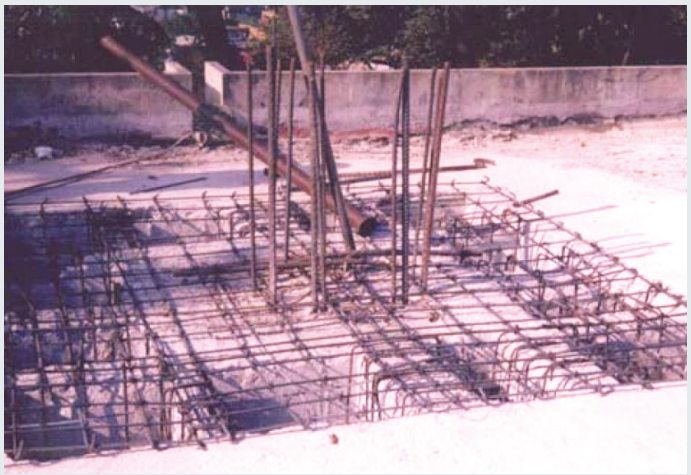


Figura 6.2.5
Reforzamiento de una losa plana mediante la construcción de una zona maciza alrededor de las columnas. Fuente: cortesía de Jorge Aguilar (2020).

6.2.6 Reparación de daños ligeros y moderados en losas planas

Si las losas planas exhiben agrietamiento por cortante en dos direcciones o por punzonamiento, se podrán reparar localmente mediante la demolición del concreto dañado y la sustitución con nuevo concreto. Esta intervención normalmente implica la construcción de una zona maciza alrededor de la columna que conduzca a un incremento del perímetro crítico por cortante y, por tanto, a un aumento en la resistencia a cortante de la conexión.

Esta reparación debe ir acompañada de una rehabilitación global de la estructura, cuyo objetivo sea reducir las demandas de deformación en la conexión losa-columna a mantenerse en el intervalo elástico.

6.2.6.1 Procedimiento (véase figura 6.2.5):

1. Previo a cualquier demolición, apuntalar las azoteas afectadas de forma adecuada para garantizar que no se inducirá daño al resto del edificio.

2. Demoler con cincel y martillo o rotomartillo hasta definir el área de la nueva zona maciza.
3. Preparar las superficies de concreto endurecido que reciban concreto fresco, con rugosidades de 5 mm (1/4 pulg); saturar con agua previo al colado.
4. Habilitar la cimbra.
5. Colocar el acero de refuerzo longitudinal y transversal de la zona maciza. Anclar el acero longitudinal en el eje del "marco" en la columna.
6. Colocar el concreto con aditivo estabilizador de volumen (siempre atendiendo las especificaciones del proveedor).

6.3 Reparación de grietas mediante fluidos

6.3.1 Deficiencia por corregir

La inyección de fluidos (resinas, lechadas, morteros) se emplea para reparar elementos estructurales de concreto agrietados debido a las acciones sísmicas. Sólo en algunos casos es económicamente viable usarla para reparar muros de mampostería; éste es el caso de muros de mampostería con piezas macizas y con un número reducido de grietas. Con la inyección sólo se puede obtener:

a) La restitución de parte de la capacidad estructural con la que contaba el elemento en su estado original.
b) La unión del concreto entre sí, con lo cual le regresa a su estado monolítico.
c) La protección del acero de refuerzo del elemento de concreto.

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

6.3.2 Descripción de la técnica

Esta técnica de rehabilitación consiste en inyectar una resina sintética a base de polímeros epoxi (o epoxy) en las grietas causadas por sismos. Se aplica cuando el grado de deterioro del elemento es bajo y no se tienen desprendimientos de concreto significativos.

También se pueden reparar las grietas mediante la colocación por gravedad de lechadas a base de cemento con aditivos que aceleren el fraguado, incrementen la resistencia y estabilicen el volumen. Asimismo, las grietas se pueden reparar mediante el relleno de morteros.

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

6.3.2.1 Previo a la inyección

Antes de efectuar la inyección, se deben realizar las siguientes acciones:

a. Retirar todos los acabados en una distancia no menor que 300 mm de la localización de la grieta, como se muestra en la figura 6.3.1.
b. Limpiar la grieta de polvo, ya sea por medios mecánicos (compresoras, bombas de aire o aspiradoras de tipo industrial) o manuales (brochas de cerdas finas, cepillos). Se debe evitar el uso de compresores de aire operados por motores de combustión interna, ya que se pueden introducir partículas de aceite durante el proceso, a menos de que se cerciore que no haya expulsión de partículas de aceite. Una técnica para corroborar que no hay partículas de aceite en la línea de aire comprimido es dirigir el aire contra una hoja de papel. Se prefiere el uso de aspiradoras industriales para retirar el polvo y partículas de concreto o mampostería dentro de la grieta.
c. En caso de existencia de humedad y si el material de reparación es resina epóxica, secar la

grieta por medio de aire caliente y asegurarse de que la fuente de la humedad sea detenida.

d. Si el material de reparación es una lechada a base de cemento, se puede limpiar la grieta con agua limpia.
e. Ejecutar una pequeña perforación con un taladro en los lugares donde se colocarán las boquillas (figura 6.3.2). Una vez concluidas las perforaciones, se deben retirar y limpiar todas las impurezas.
f. Colocar las boquillas simultáneamente con la aplicación del material sellador de la grieta que sirve para fijarlas. Usualmente, las boquillas son de 10 mm de diámetro, tienen una profundidad de 60 mm y están separadas 500 mm entre sí. En la figura 6.3.3 se muestra un ejemplo de boquilla disponible en el mercado. Este tipo de boquillas es recomendable porque tiene una válvula que evita la salida de la resina una vez inyectada. Las boquillas también pueden ser hechas con tubos o mangueras.
g. Dejar secar el sellador para que alcance su resistencia; se recomienda que transcurra un plazo de 24 horas.



Figura 6.3.1
Identificación y descubrimiento de la grieta de acabados adyacentes.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

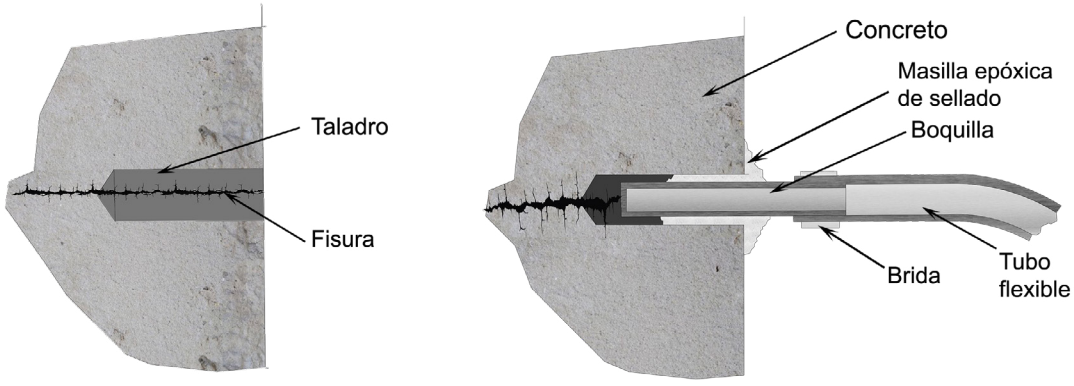
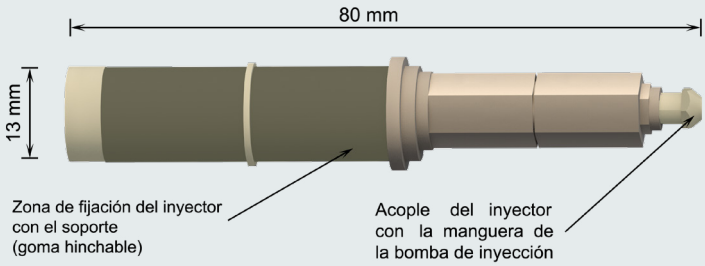


Figura 6.3.2
Diagrama de perforación de la grieta.
Fuente: elaboración propia con base en Fernández (1981).



a) Boquilla utilizada en la inyección de resinas epóxicas



b) Colocación de boquillas para inyección

Figura 6.3.3
Ejemplos de: a) boquilla utilizada en la inyección de resinas epóxicas y b) colocación de boquillas para inyección.
Fuentes: elaboración propia y cortesía de Juan Luis Cottier (2020).

6.3.2.2 Proceso de inyección

Una vez que ha endurecido el sellador de la grieta, se prepara la resina. Ésta debe tener una viscosidad baja, así como una velocidad y temperatura de endurecimiento adecuadas para el elemento por inyectar. La inyección se realiza introduciendo a presión la formulación epóxica de baja viscosidad mediante jeringas de baja presión (método japonés), pistolas, gatos, bombas mecánicas o por vacío (figura 6.3.4). Esta última técnica no es confiable y, por tanto, no se debe usar. En la figura 6.3.5 se muestra el uso de una bomba mecánica usada para inyectar la resina.

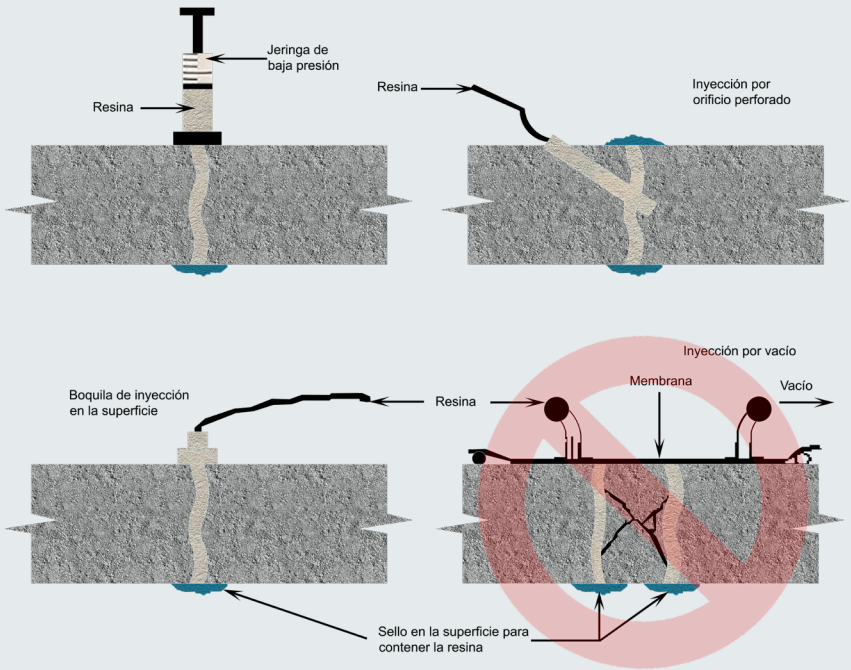


Figura 6.3.4
Métodos de inyección de resina.
Fuente: elaboración propia con base en Alcocer (2019).



a)



b)



c)

Figura 6.3.5
Inyección de resinas con bombas eléctricas: a) bomba de inyección; b) inyección con bomba eléctrica; c) equipo de inyección.
Fuentes: Fernández (1981); cortesía de Juan Luis Cottier (2020) y www.inl.cl/

Cuando se reparan grietas verticales o inclinadas, se inyecta la resina por la boquilla más baja y se continúa hasta que ésta comienza a salir por la boquilla inmediata superior, como se muestra en la figura 6.3.6. Una vez que la resina comienza a salir por la boquilla siguiente, se retira la bomba de la boquilla de inyección, se sella la boquilla y se conecta la bomba a la boquilla inmediata superior. Este proceso se repite a lo largo de toda la grieta. Una vez terminada la inyección, se deja que la resina alcance su resistencia, la cual dependerá de la formulación del fabricante. Por lo regular, la resistencia se alcanza a las 24 horas.

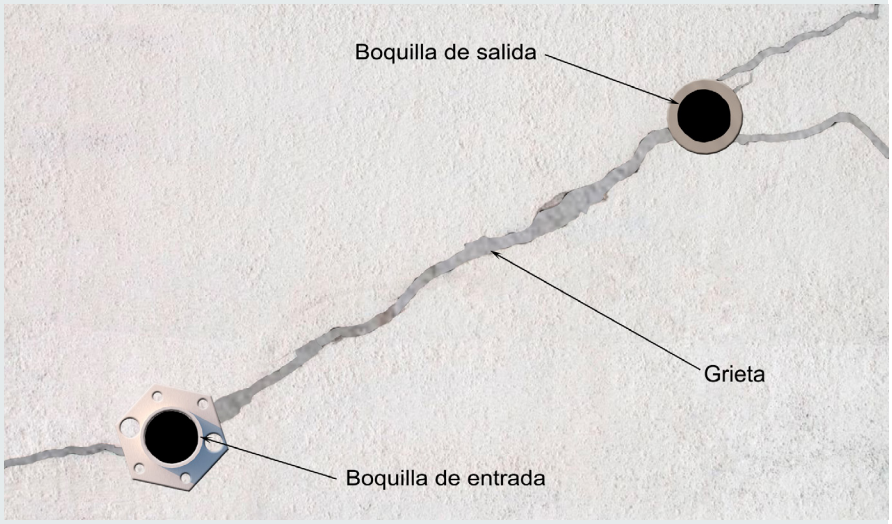


Figura 6.3.6
Esquema de una correcta inyección.
Fuente: elaboración propia con base en Fernández (1981).

6.3.2.3 Acciones posteriores a la inyección

Una vez que la resina haya endurecido y alcanzado su resistencia, se retira la capa de sellado de la grieta. El sellador se puede retirar por medios mecánicos (desbastando con una herramienta eléctrica) o con calor. Sin embargo, no se recomienda usar calor para retirar la capa de sellado, ya que puede afectar irreversiblemente a la resina ya inyectada. La apariencia final de un elemento inyectado es como la mostrada en la figura 6.3.7.

Para asegurar que la inyección de la resina, lechada o mortero haya resultado exitosa, se debe realizar una prueba no destructiva de ultrasonido sobre el concreto (ICRI 210.1R). En este caso, se coloca una fuente emisora de vibraciones que haga pasar un conjunto de ondas por el concreto (o mampostería) y que lleguen a una fuente de captura. Si el llenado de resina fue exitoso, el tiempo de recepción de las ondas emitidas antes de la rehabilitación será mayor que el tiempo de recepción medido después de la rehabilitación (Alcocer, 2019).

Con la aprobación del director y el visto bueno del corresponsable, se aplicará la prueba de ultrasonido en al menos 10% de los elementos estructurales inyectados con resina, lechada o mortero en cada entrepiso. Se medirán los tiempos de recepción antes y después de la inyección. Se aceptará el elemento inyectado si la diferencia entre los tiempos es, cuando mucho, de 20%. Alternativamente, se medirá el tiempo de recepción después de la inyección (u_D), y se comparará con el tiempo de recepción de referencia que se obtenga en concreto (o mampostería) sano en el mismo elemento estructural que se está evaluando (u_S). Para este caso, la diferencia entre u_S y u_D no deberá ser mayor a 20%.

En el caso de la zona de daño inyectada, los transductores se colocarán equidistantemente a ambos lados de la grieta, de manera tal que la onda circule perpendicularmente al daño; según sea el caso, la distancia del daño a la ubicación del transductor (emisor o receptor) deberá oscilar entre 100 y 150 mm. En la zona sana, se usará la misma separación entre el emisor y el receptor empleada en la zona con daño. En la figura 6.3.8 se ilustra gráficamente la recomendación anterior.



Figura 6.3.7
Columna de concreto después de la inyección.
Fuente: archivo personal de Jorge Abarca (2019).

6.3.3 Requisitos de diseño

La reparación de grietas en elementos de concreto y mampostería contribuye a la recuperación parcial de la resistencia, la rigidez y capacidad de deformación inelástica. Para fines de diseño, se podrán usar los valores de la tabla 6.3.1, dependiendo del tamaño de la grieta y del material usado en la reparación.

Figura 6.3.8
Colocación de transductores emisor y receptor para prueba de ultrasonido.
Fuente: elaboración propia con base en Vidaud (2019).

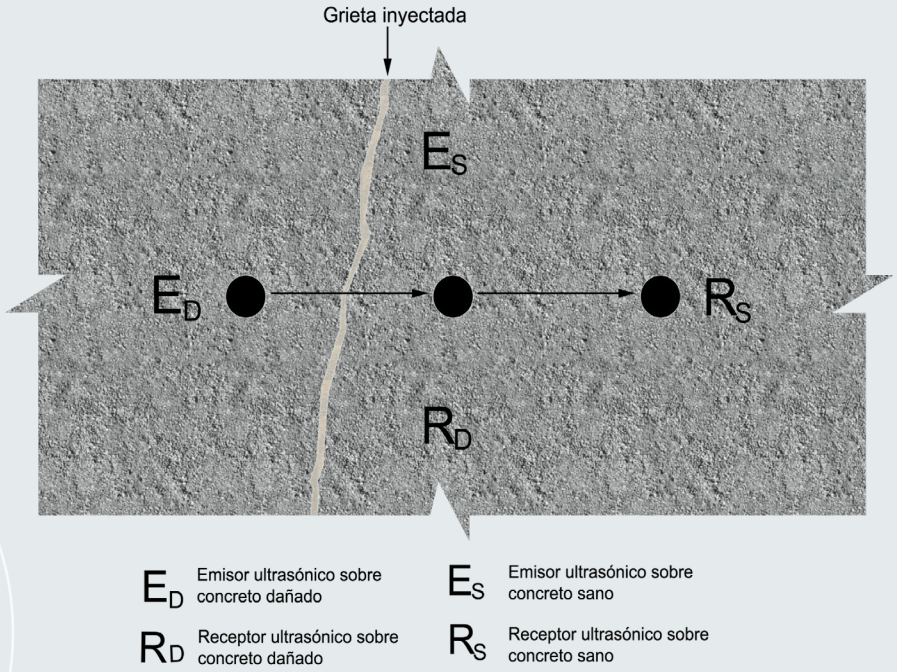


Tabla 6.3.1
Niveles de recuperación de la capacidad estructural de un elemento reparado con resina epóxica, mortero epóxico o mortero de cemento (Soto, 2008)

Material	Ancho de grieta	Nivel de recuperación %		
		Resistencia	Rigidez	Ductilidad
a. Resina epóxica	0.02- 0.5 mm	70-90	30-80	75-90
b. Mortero epóxico	0.3-0.5 mm	70-90	30-80	75-90
c. Mortero cemento	> 0.5 mm	80	50	80

En el diseño de la rehabilitación de edificios se deberá suponer los valores más bajos de la tabla 6.3.1, a menos de que el corresponsable autorice el valor del límite superior.

6.3.4 Requisitos de construcción

a. De acuerdo con el ACI 224, los espesores de grietas aceptables bajo cargas de servicio se pueden resumir dependiendo su exposición, como se muestra en la tabla 6.3.2.

Tabla 6.3.2
Espesor de grieta aceptable según el ACI 224

Condición de exposición	Ancho de grieta	
	pulg	mm
Aire seco o membrana protectora	0.016	0.40
Humedad, aire húmedo, suelo	0.012	0.30
Productos químicos descongelantes	0.007	0.20
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0.006	0.15
Estructuras para retención de agua	0.004	0.10

b. De acuerdo con la N-Rehabilitación y NTC-Concreto de la Ciudad de México, las grietas pueden ser inyectadas con resinas epóxicas a partir de 0.2 y hasta 5 mm. Para grietas de mayor espesor que 5 mm, se recomienda utilizar lechadas o morteros a base de cemento hidráulico o cementantes epóxicos, los cuales tendrán una formulación específica. Se preferirán los morteros hidráulicos de alta resistencia sin contracción.
c. La limpieza de la grieta debe realizarse con extremo cuidado debido a que el polvo en ésta evitará la adherencia de la resina a su superficie.
d. La formulación de la resina debe tener una baja viscosidad (aproximadamente de 500 cP) que permita trabajar a presiones reducidas, logrando así una velocidad de inyección adecuada, una temperatura de endurecimiento aceptable y una resistencia similar o superior a la del concreto original. Se debe consultar al fabricante de la resina sobre la viscosidad y curado recomendados para la aplicación en obra.
e. El sellado de grietas de 0.02 hasta 5 mm se realizará con la misma resina, mientras que si la grieta es mayor se recomienda la utilización de un mortero epóxico. El tiempo de endurecimiento del sellador es de 24 horas.
f. Las boquillas por utilizar podrán ser metálicas, regularmente son de 10 mm de diámetro. Se podrán utilizar boquillas plásticas si el corresponsable lo aprueba. Las boquillas se colocarán dependiendo el espesor de la grieta, a una separación máxima de 500 mm entre ellas. La separación se reducirá mientras la grieta sea más profunda.
g. Si es necesario realizar un pequeño orificio que sirva como soporte de la boquilla, se debe limpiar de todo residuo de concreto o mampostería.
h. La profundidad de la boquilla debe ser mayor que el recubrimiento del elemento de concreto; se recomienda que sea de al menos 60 mm.
i. La inyección se realizará principalmente con bombas a presiones de entre 0.5 MPa hasta 2 MPa (5 kg/cm² hasta 20 kg/cm²), dependiendo de la viscosidad. Lo más común es usar una presión de 0.5 MPa (5 kg/cm²). Se ha encontrado que la inyección se puede lograr incluso con presiones de 0.2 MPa (2 kg/cm²).
j. No se aceptará la inyección de resinas por medio del método de vacío. En éste, se coloca una membrana sobre las grietas selladas y se aplica vacío mediante las boquillas. Una vez alcanzada la presión (negativa), se permite la entrada de la resina de manera controlada por las boquillas.
k. En caso de que la superficie permanezca húmeda y no se pueda secar, es necesario contemplarlo al momento de solicitar al fabricante la formulación de la resina epóxica.

6.3.5 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

En la inyección de grietas con resina epóxica, mortero epóxico o lechadas a base de cemento, la supervisión es un factor determinante para que el procedimiento tenga éxito. Por ello, se deberán cuidar los siguientes aspectos:

a) Que el proveedor proporcione la resina o mortero epóxicos con las características requeridas para el proyecto y el diseño, como es la viscosidad, la resistencia, el porcentaje de retracción, la temperatura de reacción, entre otros elementos.
b) Que no se exceda el tiempo en el cual se puede inyectar la resina. Por lo regular, este tiempo está controlado por el reactivo utilizado en su formulación y debe ser especificado por el fabricante de la resina.
c) Verificar el correcto sellado de las grietas; éste tiene que cubrir completamente la longitud total de la grieta, además de que debe ser uniforme en toda su extensión. Se revisará que las boquillas queden bien sujetas al elemento y que estén rodeadas en su base por el sellador.
d) Limpiar la grieta para retirar el polvo, humedad o restos del material originados por el orificio taladrado para sostener las boquillas. Esta limpieza se puede realizar por medios manuales como son brochas y cepillos, o por

medios mecánicos como bombas de aire. Se debe evitar el uso de aire comprimido operado por motores de combustión interna, ya que se pueden introducir partículas de aceite durante el proceso, a menos de que se cerciore que no haya expulsión de partículas de aceite (mediante dirigir el aire contra una hoja de papel y verificar que no hay partículas de aceite en la línea de aire comprimido). Se recomienda enfáticamente el uso de aspiradoras industriales.

e) Si se observa que la grieta presenta humedad o agua, se debe secar y verificar que no se trate de una filtración que pueda afectar la inyección en un futuro. En caso de que la grieta no se pueda secar totalmente, se debe notificar al proveedor de la resina, ya que es posible agregar un aditivo que disminuya el efecto negativo del agua en la resina.

f) Que se cumpla el tiempo mínimo de secado del sellado. Una vez comenzada la inyección, se debe poner atención de que no haya ninguna fuga por el sellado. Si es así, se suspenderá de inmediato la inyección y se repetirá el sellado.

g) Que la inyección se realice en la dirección adecuada (de abajo hacia arriba), de esta manera se garantiza que no quede aire atrapado en la grieta al momento de la inyección.

h) Que se cumpla el tiempo de endurecimiento de la resina una vez inyectada la grieta antes de retirar el sellado.

i) Para verificar que el procedimiento de inyección se llevó a cabo de manera exitosa, se deben realizar pruebas de ultrasonido, como las requeridas en el inciso 6.3.2.3 de esta Guía técnica y el 16.7.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.4 Reemplazo de elementos estructurales dañados

6.4.1 Deficiencia por corregir

En elementos con daño severo y muy grave, puede ser necesario reemplazar el elemento dañado por uno nuevo, previo apuntalamiento del elemento por sustituir.

Con el reemplazo de elementos estructurales dañados se puede obtener:

a) La restitución de la capacidad estructural con la que contaba el elemento en su estado original.

Esta técnica se combina con otras si es necesario incrementar la capacidad de la estructura.

6.4.2 Descripción de la técnica

En el caso de estructuras de concreto, la sustitución de un elemento con daño severo o muy grave requiere la demolición del concreto dañado y la colocación de nuevo concreto, usualmente con características similares a las del concreto original. Para lograr un adecuado comportamiento, se deberá promover una buena adherencia entre los materiales existentes y los nuevos. Se deberán considerar los pequeños cambios volumétricos debidos a la contracción por fraguado. Se usarán materiales del mismo tipo y con una resistencia al menos igual que la del material original. La eficiencia de esta técnica depende, entre otros factores, de la calidad de su ejecución. En el diseño de la cimbra se cuidará que el aire atrapado en el concreto nuevo pueda escapar como resultado de la vibración para compactarlo.

Ejemplos de reemplazo de elementos de concreto son las vigas y columnas de marcos resistentes a momento (figura 6.4.1).

En el caso de mampostería, el procedimiento implica el reemplazo de un muro (figura 6.4.2) o viga. Si bien es conceptualmente factible, no es muy frecuente que se practique.



Figura 6.4.1
Columna demolida y reemplazada por un nuevo elemento.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).



Figura 6.4.2
Muro de mampostería dañado y reemplazado por un nuevo muro.
Fuente: cortesía de Rafael Martín del Campo (2018).

El reemplazo de elementos metálicos es más común en edificios de acero. Ejemplos de ello son la sustitución de una columna dañada por cortante y aplastamiento y de un larguero dañado por corrosión.

En los incisos 6.4.3 y 6.4.4 se describen los procedimientos para el reemplazo de una losa en volado con problemas de flecha y/o agrietamiento excesivo y para el reemplazo de largueros de un techo. Éstos son de los ejemplos de sustitución de elementos estructurales más comunes en escuelas.

6.4.3 Losas en volado con problemas de flecha y/o agrietamiento excesivo

6.4.3.1 Procedimiento (figura 6.4.3)

1. Acordonar el área de trabajo; se recomienda utilizar señalamientos para evitar la circulación de los usuarios en dicha obra.
2. Apuntalar la zona antes de iniciar los trabajos de demolición.
3. Demoler por medios manuales con cincel y martillo, cuidando de no dañar el acero de refuerzo ni el concreto sano.
4. Limpiar la zona demolida para que quede libre de polvo, óxido, grasa o de cualquier elemento que pueda afectar la liga entre concreto fresco y concreto endurecido. Usar aire a presión, sólo si el compresor de aire cuenta con filtro de aceite y se verifica que no hay partículas de aceite en la línea de aire comprimido.
5. Limpiar el acero de refuerzo con cepillo de cerdas metálicas. Si la oxidación es tal que, al efectuar la limpieza, se desprende la corrugación de la barra, se deberá sustituir el tramo de barra dañada. La unión entre la barra existente y la nueva se hará mediante un traslape (recomendable) o con soldadura y una junta a tope.
6. Limpiar la superficie que reciba el concreto nuevo con chorro de agua y lograr una superficie rugosa de 6 mm (1/4 pulg) de amplitud.
7. Habilitar la cimbra y colocar el concreto nuevo de la losa.
8. Curar el concreto de la losa mediante un ambiente húmedo, al menos durante tres días después de su colocación.

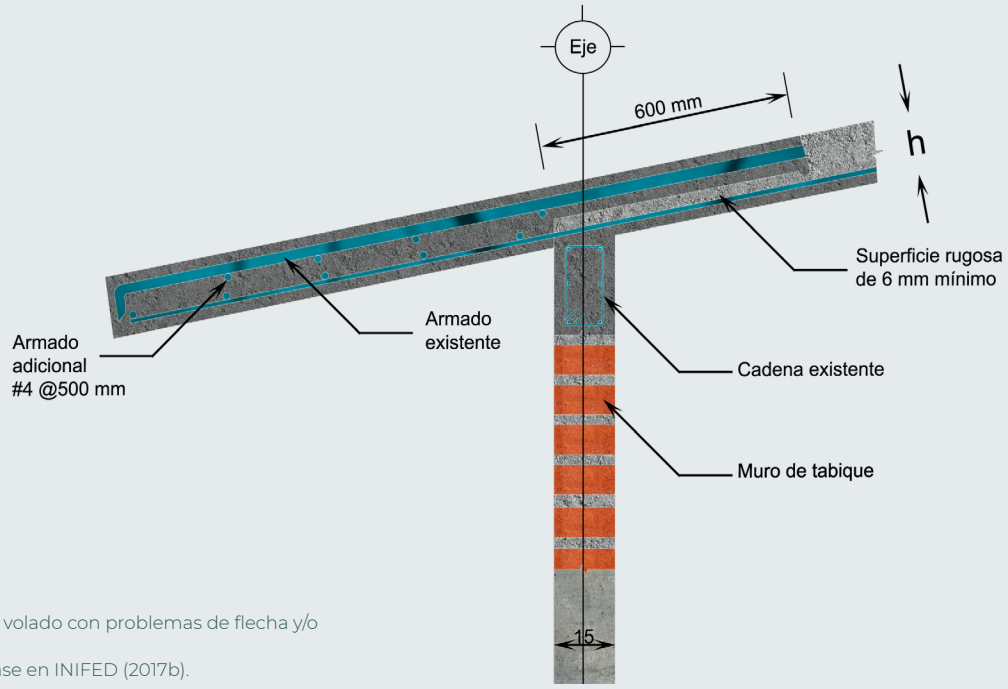


Figura 6.4.3
Ejemplo de sustitución de losa en volado con problemas de flecha y/o agrietamiento excesivo.
Fuente: elaboración propia con base en INIFED (2017b).

6.4.4 Colocación de largueros adicionales o sustitución de largueros dañados

6.4.4.1 Procedimiento

1. Trazar en obra la ubicación de los largueros (si son adicionales), procurando que la separación entre ellos no exceda la recomendada en el manual del fabricante del sistema de cubierta o 2 metros.
2. Quitar de la cubierta cualquier elemento que interfiera con la colocación de los largueros adicionales.
3. Preparar las superficies que recibirán la placa de unión de larguero adicional.
4. Soldar las placas de soporte de largueros adicionales a la estructura existente. Esta acción deberá ser ejecutada por un soldador calificado y supervisada por el residente de obra y el director.
5. Montar los largueros adicionales, procurando que éstos se coloquen a presión por medio de puntales, rastras y cuñas que permitan corregir lentamente la deformación. Es recomendable que sean cuando menos tres puntales por cada larguero, uno en cada extremo y otro al centro.
6. Fijar la lámina de la cubierta a los largueros adicionales por medio de pijas.
7. Terminados los pasos anteriores, aplicar la soldadura entre las placas de soporte y los largueros.
8. Una vez aplicada la soldadura, retirar el apuntalamiento de los largueros, procurando iniciar desde el centro.
9. Dar el acabado final a los largueros y a sus placas de unión y corregir los detalles de la estructura existente, tanto los originados por el proceso como los ajenos a éste.

6.5 Conexión entre elementos existentes y materiales o elementos nuevos

6.5.1 Deficiencia por corregir

Cuando se colocan nuevos elementos en contacto con los existentes, es necesario asegurar la adecuada transmisión de fuerzas. Para ello, la conexión debe tener la suficiente resistencia y rigidez para que el comportamiento entre los materiales nuevos y existentes sea monolítico. Esto implica que las deformaciones unitarias de los dos materiales a lo largo de la junta sean iguales. La colocación de morteros o concreto nuevos sobre concreto existente requiere la preparación de la superficie de modo de asegurar el mecanismo de transmisión señalado.

Adicionalmente, es frecuente el uso de anclas (barras corrugadas ahogadas en resina epóxica) o conectores en elementos de concreto o de acero para conectar los nuevos elementos materiales a los existentes. Su aplicación dependerá del tipo de técnica de rehabilitación. Ésta, a su vez, será seleccionada en función del modo de comportamiento de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismos, así como del Objetivo de la Rehabilitación establecido (véase figura 6.1.1).
Las técnicas de rehabilitación que requieren la colocación de anclas o conectores en estructuras de concreto son:

a. Encamisados de concreto (sección 6.6 de esta Guía técnica).
b. Encamisados de acero (sección 6.7 de esta Guía técnica).
c. Encamisados de compuestos de polímeros reforzados con fibra (sección 6.8 de esta Guía técnica).
d. Adición de muros de concreto (sección 6.10 de esta Guía técnica).
e. Adición de contraventeos metálicos (sección 6.11 de esta Guía técnica).

f. Sustitución o adición de muros diafragma de mampostería (sección 6.13 de esta Guía técnica).

En estructuras de mampostería, los conectores se usan en el encamisado de muros de mampostería (sección 6.9 de esta Guía técnica).

Mediante el diseño y colocación de las anclas de acuerdo con esta sección, se pretende lograr el comportamiento monolítico supuesto en el inciso 4.3.3.3, así como establecer un mecanismo de transferencia de fuerzas entre la estructura existente y el nuevo material o elemento.

6.5.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

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

6.5.3 Preparación de la superficie de concreto

En ICRI 310.2R se presentan lineamientos para la selección de los métodos de preparación de la superficie de concreto. Estos métodos son capaces de producir una variedad de perfiles en la superficie de concreto que se identifican por su amplitud o aspereza. Para las aplicaciones de esta Guía técnica de conectar una nueva capa de concreto (o mortero) a la existente de concreto, se debe preparar la superficie para lograr perfiles con amplitud igual o mayor que 6 mm (1/4 pulg).

El perfil requerido se puede lograr mediante alguno de los siguientes métodos de preparación de la superficie:

a. Escarificación.
b. Rotofresado.
c. Desbastado.
d. Martillos rompedores de concreto.

Los métodos de preparación pueden dañar localmente el sustrato preparado. Los estudios de campo han demostrado que las resistencias a la adhesión de superficies preparadas con métodos mecánicos de alto impacto (como los incisos a a d anteriores) pueden ser menores que las correspondientes a superficies preparadas usando métodos menos agresivos. El microagrietamiento (normalmente a 45 grados del plano de la superficie) de la pasta de cemento y del agregado debilita el sustrato.

De los cuatro métodos de preparación indicados con anterioridad, la escarificación tiene un riesgo intermedio de producir microagrietamiento, mientras que el rotofresado, el desbastado y el uso de martillos rompedores representan un riesgo alto.

Se recomienda revisar la calidad e idoneidad de la preparación de la superficie mediante inspecciones visuales o métodos de evaluación no destructiva. Para ello se puede consular el apéndice B de ICRI 310.2R.

En seguida se presenta un resumen de cada uno de los métodos disponibles para lograr el perfil requerido en esta Guía técnica. Estos resúmenes fueron tomados de ICRI 310.2R.

6.5.3.1 Escarificación

La escarificación se utiliza principalmente en superficies horizontales para la remoción de concreto y recubrimientos frágiles de hasta 3 mm (1/8 pulg) de espesor (figura 6.5.1). Pueden realizarse varias pasadas para una remoción más profunda. También pueden utilizarse para perfilar superficies de concreto. Puede quitar adhesivos ajustando los espaciadores y seleccionando cortadores adecuados. Las unidades portátiles están disponibles para las aplicaciones verticales y elevadas. La escarificación puede usarse en casi cualquier sustrato de concreto y es adecuada para aplicaciones en interiores y exteriores. Este método también se conoce como nivelación de concreto. Se aceptará preparar la superficie con herramientas manuales (martelina).

6.5.3.2 Rotofresado

El rotofresado se utiliza en superficies horizontales para quitar concreto en mal estado, recubrimientos de alto espesor y materiales asfálticos (figura 6.5.2). También puede utilizarse para perfilar sustratos de concreto. Es un método adecuado para usarse en aplicaciones en interiores y exteriores, principalmente en superficies horizontales. Los accesorios de fresado montados en las excavadoras se utilizan para fresar superficies y esquinas verticales.

6.5.3.3 Desbastado

El desbastado se utiliza principalmente en superficies horizontales para quitar concreto o recubrimientos frágiles tales como epoxy, poliuretano o sistemas de metil metacrilato de hasta 1/4 pulg (6 mm) de espesor como preparación para revestimientos (figura 6.5.3). También se pueden usar para perfilar superficies de concreto. Las unidades portátiles (bujarda) están disponibles para las superficies verticales y elevadas. Este método es adecuado para usarse en aplicaciones en interiores y exteriores.

6.5.3.4 Martillos rompedores de concreto

Los martillos rompedores de concreto portátiles se clasifican por su peso. Los más grandes (martillo mecánico) en la clase de 30 lb (14 kg) y mayores suelen utilizarse en superficies horizontales. Los martillos rompedores más pequeños (martillos cinceladores), que pesan 20 lb (9 kg) o menos, pueden utilizarse en superficies horizontales, verticales y elevadas para quitar el concreto a una profundidad predeterminada. Una aplicación característica para un martillo cincelador es la remoción de concreto deteriorado y/o contaminado de cloruro alrededor de acero reforzado. Los martillos rompedores de concreto portátiles también pueden utilizarse como un paso en la preparación de revestimientos. Es un método adecuado para usarse en aplicaciones interiores y exteriores (véase figuras 6.5.4 y 6.5.5).



Figura 6.5.1
Superficie escarificada con máquina que muestra marcas de dientes. Fuente: ICRI 310.2R (2013).



Figura 6.5.2
Superficie de concreto preparada con rotofresado. Fuente: ICRI 310.2R (2013).



Figura 6.5.3
Retiro de recubrimiento. Fuente: ICRI 310.2R (2013).



Figura 6.5.4
Superficie rugosa usando martillo rompedor de concreto portátil antes de una preparación adicional. Fuente: ICRI 310.2R (2013).



Figura 6.5.5
Superficie rugosa seguida de chorro abrasivo para quitar el sustrato fracturado. Fuente: ICRI 310.2R (2013).



Figura 6.5.6
Anclas y conectores para unir elementos existentes y materiales o elementos nuevos. Fuente: elaboración propia.

6.5.4 Colocación de anclas y conectores

En el caso de estructuras existentes de concreto y mampostería, se pueden instalar anclas y conectores (figura 6.5.6), así como clavos y pernos:

a. Anclas para unir elementos de concreto. Consiste en la perforación del concreto existente, la limpieza del agujero, el llenado con resina epóxica y la colocación de una barra corrugada de acero dentro del agujero (figura 6.5.7).
b. Conectores roscados para unir elementos metálicos con componentes de concreto existentes. En lugar de colocar anclas, se instalan conectores roscados ahogados en resina (conectores adheridos), o bien, conectores de tipo expansivo.
c. Clavos para concreto, alcayatas o grapas de alambrón. Usualmente se usan para fijar las mallas de alambre soldado a las caras del muro de mampostería (véase sección 6.9).





Figura 6.5.7
Barras corrugadas de acero colocadas dentro de un agujero con resina epóxica.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).





Figura 6.5.8
Algunos ejemplos de clavos para concreto y alcayatas.
Fuente: elaboración propia.

En el caso de elementos nuevos de acero para conectarse a nuevos elementos de concreto, como en el caso de contraventeos con marco de acero, se pueden instalar pernos tipo Nelson (figura 6.5.9), o bien, barras con una tuerca en el extremo.

En la figura 6.5.10 se ilustra la aplicación de anclas para añadir muros diafragma nuevos a columnas y vigas de concreto existentes.



Figura 6.5.9
Conectores tipo Nelson para unir elementos nuevos de acero a elementos nuevos de concreto. Fuente: elaboración propia.

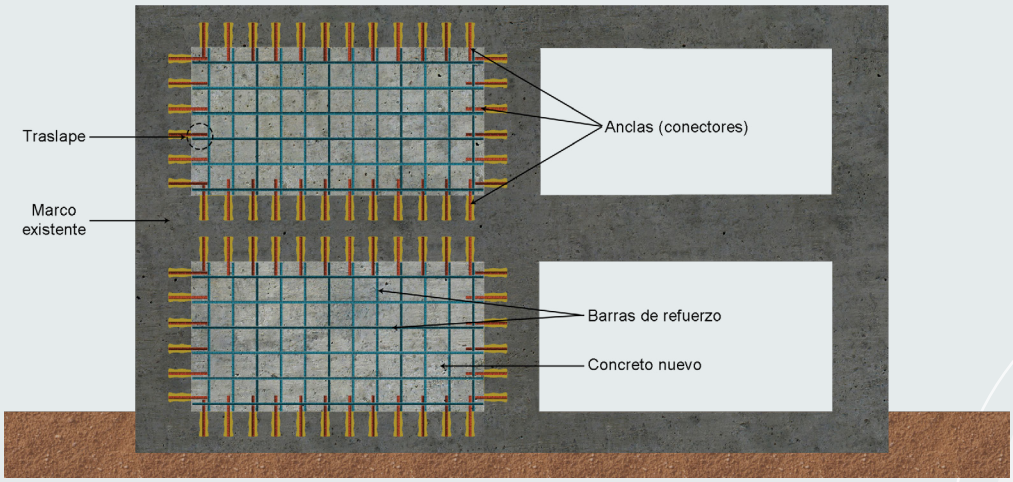


Figura 6.5.10
Anclas para unir elementos de concreto.
Fuente: elaboración propia con base en Terán (2009).

6.5.5 Requisitos de análisis

Las fuerzas de diseño se obtendrán del análisis del edificio con la(s) técnica(s) de rehabilitación seleccionadas.

6.5.6 Requisitos de diseño de anclas y conectores

6.5.6.1 Requisitos geométricos

6.5.6.1.1 Anclas

a. Se podrán emplear barras corrugadas ahogadas en resina epóxica para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia. La profundidad del ancla dentro de la resina epóxica no será menor que $7d_b$, donde d_b es el diámetro nominal de la barra por anclar.
b. Las anclas y conectores deberán cumplir con lo siguiente:
   i. Diámetro – entre 9.5 (número 3) y 19 mm (número 6).
   ii. Separación longitudinal, centro a centro–no será menor que $7.5d_b$, ni mayor que 300 mm.
   iii. Si se colocan las anclas en dos filas o al tresbolillo, la separación transversal, medida centro a centro, será mayor o igual que $5.5d_b$ o $4d_b$, respectivamente.

iv. La distancia entre el centro del ancla y la cara del muro será mayor o igual que $2.5d_b$.

c. La longitud de anclaje de la barra dentro del nuevo concreto será mayor o igual que $30d_b$. Este valor se podrá reducir a $20d_b$ si se termina con un gancho a 90 grados o con una tuerca con diámetro externo igual a $2d_b$.

d. Se aceptará usar valores distintos a los anteriores si el proveedor de las anclas y/o de la resina demuestra, a satisfacción del corresponsable, que se logra un comportamiento (resistencia y rigidez) al menos similar al obtenido con los valores requeridos anteriormente.

6.5.6.1.2 Conectores

a) Se podrán emplear conectores post-instalados en concreto. La profundidad de empotramiento efectiva, h_{ef}, no será menor que $5d_a$ ni mayor que $10d_a$, donde d_a es el diámetro del conector. En ningún caso será menor que 40 mm.

b) La distancia crítica al borde será $1.5h_{ef}$ (figura 6.5.11).

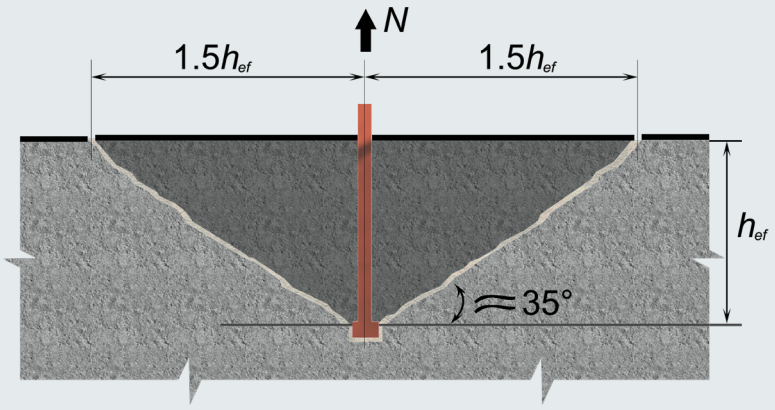


Figura 6.5.11
Sección a través de un cono de falla.
Fuente: elaboración propia con base en ACI 318-19 (2019).

6.5.6.1.3 Conectores para encamisados de mampostería

a) Los requisitos geométricos de conectores para fijar la malla se especifican en la sección 6.9.

6.5.7 Procedimientos de diseño de anclas y conectores

a. Previa autorización del corresponsable, se diseñarán las anclas y conectores por colocarse en elementos de concreto o de acero, mediante cualquiera de los procedimientos i a iii siguientes:
   i. Anclas y conectores adheridos a elementos de concreto, de acuerdo con las tablas, valores y ecuaciones de fabricantes de resina epóxica y conectores certificados por un organismo nacional de certificación.
   ii. Conectores post-instalados en concreto, de acuerdo con el capítulo 17 del ACI 318-19, en complemento con el ACI 355.2.
   iii. Con las expresiones del inciso c siguiente.

b. Si se emplean valores sugeridos por fabricantes, se verificará que corresponden a valores de diseño tales que incluyan el factor de resistencia correspondiente.

c. Expresiones de diseño:
   i. Resistencia a fuerza cortante: la resistencia a fuerza cortante, V_a, se define como la capacidad resistida por un único anclaje en la interfaz de concreto. La resistencia a fuerza cortante será el menor valor entre V_{a1} y V_{a2}, los cuales están determinados por la resistencia del acero y la resistencia del concreto, respectivamente.

1. Conectores expansivos

a. Cuando $4\ d_a \leq h_{ef} < 7\ d_a$

$$V_a = min[V_{a1}, V_{a2}] \quad 6.3.1$$

$$V_{a1} = 0.7 f_{ya} A_{sa} \quad 6.3.2$$

$$V_{a2} = 0.3\sqrt{E_c f_c'} A_{sa} \quad 6.3.3$$

Siendo $v = V_a / A_{sa}$ no mayor que 250 MPa (2 500 kg/cm^2)

b. Cuando $h_{ef} \geq 7\ d_a$

$$V_a = min[V_{a1}, V_{a2}] \quad 6.3.4$$

$$V_{a1} = 0.7 f_{ya} A_{sa} \quad 6.3.5$$

$$V_{a2} = 0.4\sqrt{E_c f_c'} A_{sa} \quad 6.3.6$$

Siendo $v = V_a / A_{sa}$ no mayor a 294 MPa (2940 kg/cm^2)

2. Conectores adheridos

a. Cuando $h_{ef} \geq 7\ d_a$

$$V_a = min[V_{a1}, V_{a2}] \quad 6.3.7$$

$$V_{a1} = 0.7 f_{ya} A_{sa} \quad 6.3.8$$

$$V_{a2} = 0.4\sqrt{E_c f_c'} A_{sa} \quad 6.3.9$$

Siendo $v = V_a / A_{sa}$ no mayor que 300 MPa (3 000 kg/cm^2)

donde:

- d_a diámetro nominal de la barra de anclaje para conectores adhesivos o diámetro del fuste del conector de expansión, mm.
- h_{ef} profundidad de empotramiento efectiva del conector, se aceptará como mínimo 40 mm.
- f_{ya} esfuerzo de fluencia del conector, MPa.
- A_{sa} área de la sección transversal del conector de expansión en la interfaz del concreto, o área de la sección transversal del conector adhesivo, mm².
- f_c' esfuerzo especificado de compresión del concreto, MPa.
- E_c módulo de elasticidad del concreto, MPa.

ii. Resistencia a tensión: la resistencia a tensión, N_a, se define como la capacidad resistida por un único anclaje en la interfaz del concreto. La resistencia a tensión será el menor valor entre N_{a1}, determinado por la resistencia del acero, N_{a2}, definido por la falla del cono del concreto, y N_{a3}, controlado por la resistencia de la unión en el conector adhesivo.

1) Conectores expansivos

$$N_a = min[N_{a1}, N_{a2}] \quad 6.3.10$$

$$N_{a1} = min[f_{ya} A_{se}, f_y A_{s0}] \quad 6.3.11$$

$$N_{a2} = 0.23\sqrt{f_c'} A_c \quad 6.3.12$$

2) Conectores adheridos

$$N_a = min[N_{a1}, N_{a2}, N_{a3}] \quad 6.3.13$$

$$N_{a1} = f_y A_{s0}` \quad 6.3.14$$

$$N_{a2} = 0.23\sqrt{f_c'} A_c \quad 6.3.15$$

$$N_{a3} = v_a \pi d_a l_e \quad 6.3.16$$

$$v_a = 10\sqrt{(f_c'/21)} \quad 6.3.17$$

donde:

- A_{se} área mínima de la sección transversal del conector de expansión, mm².
- f_y esfuerzo especificado de fluencia del acero, MPa.
- A_{s0} área efectiva de la sección transversal de la barra de acero roscada (sin rosca), o área nominal de la sección transversal de la barra de anclaje, mm².
- A_c área proyectada de la superficie de falla del cono de concreto de un anclaje único, que se calcula por medio de la expresión $A_c = l_{ef}^2$ (tomada del capítulo 17 del ACI 318-19), mm².
- v_a resistencia de unión del ancla adherida contra la fuerza de extracción, MPa.

6.5.8 Requisitos de construcción

a. Se seguirán las recomendaciones de instalación de los fabricantes de resina epóxica y conectores. Se usarán productos certificados por un organismo nacional de certificación.
b. Antes de realizar la perforación, se identificará la colocación del acero de refuerzo del elemento de concreto existente y se preparará la superficie del concreto que estará en contacto con el nuevo concreto, mediante una rugosidad de 6 mm (1/4 pulg).
c. Se hará el agujero usando un taladro de impacto para promover la rugosidad en su cara lateral. Una vez hecho el agujero, con la profundidad y diámetro de diseño, se limpiará por medio de un cepillo para biberones o mediante aspiradora industrial. No se permite limpiar el agujero con aire a presión si éste proviene de un compresor de combustión interna, a menos de que se dirija el aire contra una hoja de papel y se verifique que no haya expulsión de partículas de aceite.
d. Se rellena el agujero con resina epóxica hasta dos terceras partes de la profundidad del agujero. Posteriormente, se inserta la barra corrugada o el conector, girando sobre su eje conforme avanza su colocación con lentitud.
e. Se retira el exceso de resina.
f. Se acepta colocar anclas con barrenos inclinados a 45 grados con respecto a la superficie de concreto, con la misma profundidad que los barrenos perpendiculares a la superficie. En este caso, se dejarán pasar 24 h para doblar en frío la barra para que quede ortogonal a la cara de concreto.

6.5.9 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se debe supervisar que:

a) La profundidad y diámetro del agujero cumplan con lo señalado en los planos.
b) Se limpie el agujero de polvo o cualquier sustancia que impida la adhesión de la resina con el concreto y que no se use aire comprimido proveniente de equipos de combustión interna.
c) Si se opta por usar anclas con barrenos inclinados a 45 grados con respecto a la superficie de concreto, se dejen pasar 24 h para que la resina endurezca antes de doblar la barra en frío.
d) Se prohíbe la remoción y reinstalación de anclas y conectores.

6.6 Encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado

6.6.1 Deficiencia por corregir

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

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

a. Edificios con columnas cuyo modo de comportamiento está controlado por fuerza cortante y cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio.
b. Edificios a base de marcos resistentes a momento que posean una resistencia y/o rigidez lateral insuficiente ante las demandas sísmicas de diseño.
c. Edificios con vigas y/o columnas cuyos traslapes del refuerzo existente son escasos.

d. Edificios con pisos suaves/débiles, usualmente en la planta baja.

Edificios construidos antes de 1986 usualmente caen en alguna o varias de las categorías anteriores. En edificaciones posteriores es posible encontrar deficiencias como las señaladas.

El encamisado de vigas, columnas o nudos se emplea para incrementar una o la combinación de la resistencia a flexión, flexocompresión y fuerza cortante, así como la capacidad de deformación, sin cambiar el sistema estructural global. Específicamente, con el encamisado de las columnas se puede lograr a o b; dependiendo de las dimensiones del encamisado usado en b, se puede lograr c:

a. Incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante.
b. Incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante, la capacidad de deformación inelástica y el confinamiento en zonas de traslapes con longitudes deficientes.
c. Aumentar la rigidez de elementos y del sistema estructural.

6.6.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

6.6.3 Descripción de la técnica

El encamisado de vigas, columnas o nudos consiste en añadir una capa de concreto (más comúnmente) o mortero alrededor de los elementos existentes. El encamisado puede ser total, si rodea al elemento en todas sus caras, o parcial, si cubre a dos o tres caras contiguas. En el caso de columnas, es preferible que el encamisado sea total. Esta capa de concreto o mortero debe estar reforzada con barras corrugadas longitudinales y transversales, o con malla de alambre soldado. El encamisado puede ser hecho de ferrocemento, pero su uso ha sido menos frecuente.

6.6.3.1 Encamisado de vigas

a) Encamisado de vigas para incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante. El refuerzo longitudinal no debe ser continuo a través de los nudos. El encamisado estará separado del nudo por una junta con un espesor mínimo de 30 mm. El refuerzo transversal adicional está compuesto por estribos hechos de dos piezas. En la figura 6.6.1 se muestra el armado de una viga encamisada cuyo acero termina en la columna. Nótese que el doblez del lecho inferior se ha orientado hacia abajo, de manera errónea.



Figura 6.6.1
Viga encamisada con refuerzo longitudinal no continuo a través del nudo con la columna.
Fuente: coreandcut.com/



Figura 6.6.2
Viga encamisada con refuerzo longitudinal continuo a través del nudo con la columna. Fuente: Bournas (2019).

b) Encamisado de vigas para incrementar la resistencia a flexión, cortante y la capacidad de deformación inelástica. El refuerzo longitudinal de las vigas encamisadas debe ser continuo a través de los nudos y debe anclarse en las columnas exteriores (de fachada), hasta la cara posterior de la columna (cara más alejada de la zona crítica para calcular la longitud de desarrollo o de anclaje) (figura 6.6.2). El refuerzo longitudinal de la viga se podrá doblar en un plano horizontal para rodear la columna y anclar el refuerzo; en este caso, se deberá diseñar refuerzo transversal en la viga encamisada que resista la componente de la fuerza generada por las barras dobladas considerando 1.25 f_y, que corresponde al valor esperado del esfuerzo de fluencia.

En la figura 6.6.3 se presentan, de manera conceptual, posibles configuraciones de encamisado en vigas de concreto. La configuración a es poco empleada, ya que obliga a incrementar el espesor de la losa, o bien, a incluir un piso falso para ajustar el aumento de peralte de la viga sobre la losa. La opción b es la más usual; requiere ranurar la losa para colocar los estribos y el concreto. En la configuración c, también poco usada, se requiere perforar la viga transversalmente para colocar la grapa del estribo. La colocación del concreto se hace igualmente a través de ranuras que se practican en la losa.

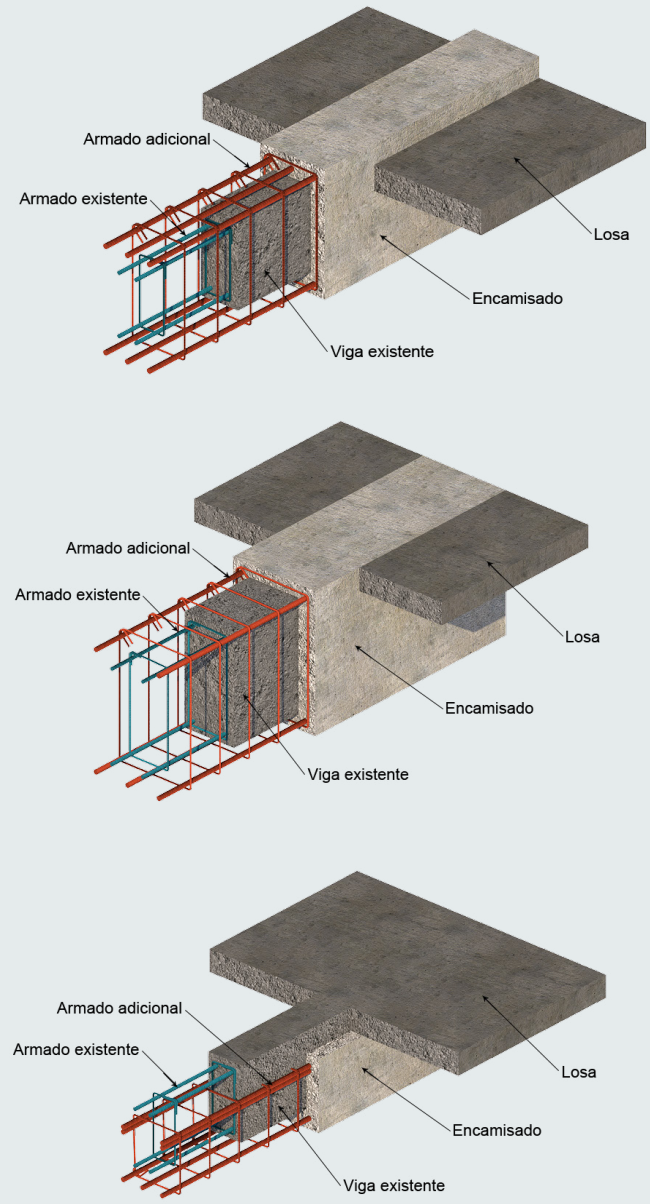


Figura 6.6.3
Posibles configuraciones de encamisado de vigas con concreto: a) encamisado sobre nivel superior de losa; b) encamisado al nivel del piso; c) encamisado por debajo de la losa. Fuente: elaboración propia con base en Terán (2009).

6.6.3.2 Encamisado de columnas

a. Encamisado de columnas para incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante. El refuerzo longitudinal no debe ser continuo en la altura del edificio (figura 6.6.4). El encamisado deberá estar separado del piso y del techo de cada entrepiso por medio de una junta con espesor mínimo de 30 milímetros.
b. Encamisado de columnas para incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica. El refuerzo longitudinal de las columnas encamisadas debe ser continuo, desde la cimentación hasta el piso que requiera la rehabilitación (usualmente, todo el edificio).
c. Si un muro está en contacto con la columna existente, se deberá demoler parcialmente el muro para permitir el encamisado de la columna.

En la figura 6.6.6 se presentan posibles configuraciones de encamisado en columnas de concreto. Como se aprecia en el dibujo, los estribos del encamisado están hechos a base de varias piezas, reconociendo que no pueden construirse de una sola (como ocurre en estructuras nuevas). Así, por ejemplo, el estribo octagonal de la figura 6.6.6.a comprende dos piezas cuyos dobleces terminales, a 135 grados, se traslapan alrededor de barras longitudinales de la columna en lados opuestos de ella. En la figura 6.6.6.b, los estribos están hechos a base de estribos sobrepuestos. En la figura 6.6.7 se muestran las perspectivas de los arreglos del refuerzo transversal de la figura 6.6.6.

En la figura 6.6.8 se muestra un ejemplo del uso de estribos cuadrados hechos de dos piezas, cada una en forma de letra L, cuyos dobleces se traslapan alrededor de barras longitudinales. En la figura se aprecia el acomodo de los estribos antes de colocar el refuerzo longitudinal, así como la columna armada una vez que se suben los juegos de medios estribos y se amarran con alambre.



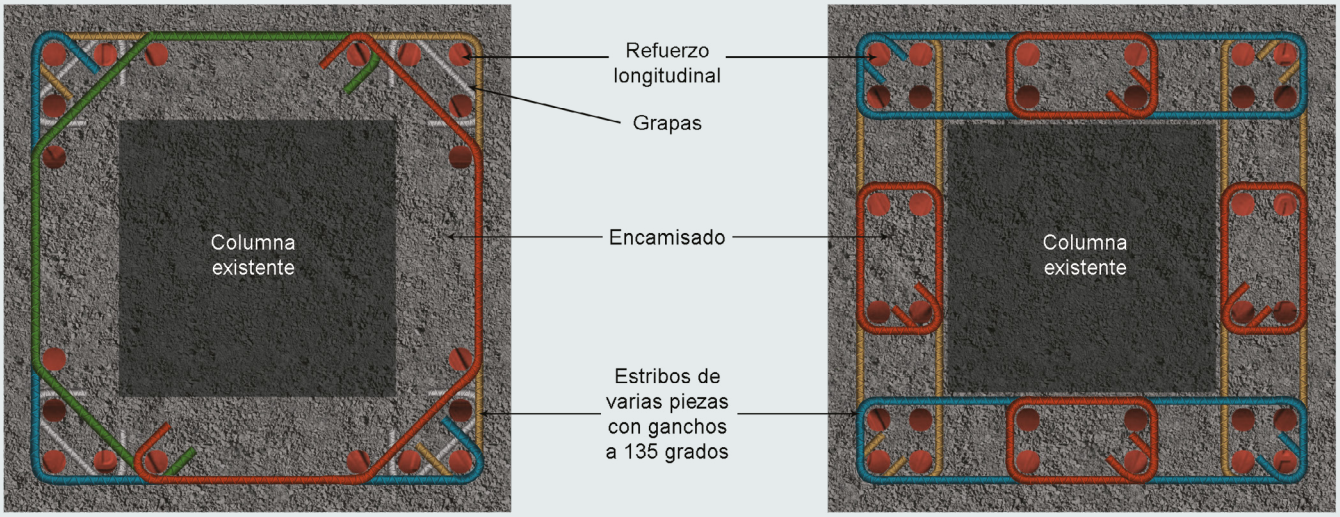


Figura 6.6.4
Columna encamisada con refuerzo longitudinal discontinuo en la altura del edificio. Nótese que la cuantía de estribos no es muy alta. Fuente: https://esemag.com/



Figura 6.6.5
Columna encamisada con concreto de forma continua a través de las losas. Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).

Figura 6.6.6
Posibles configuraciones de acero transversal en columnas encamisadas: a) estribos de varias piezas; b) estribos sobrepuestos. Fuente: elaboración propia con base en Terán (2009).



a) Estribos de varias piezas

b) Estribos sobrepuestos

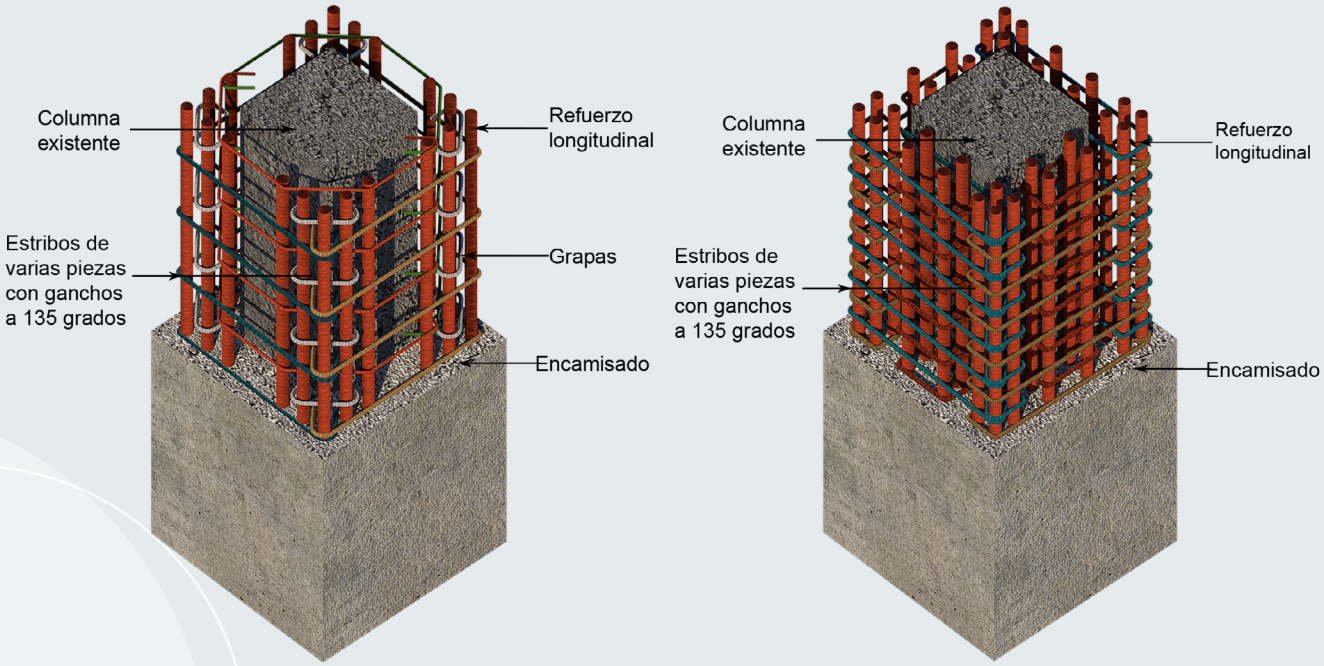


Figura 6.6.7
Perspectiva de columnas encamisadas según las configuraciones de la figura 6.6.6. Fuente: elaboración propia (2020).



Figura 6.6.8
Ejemplo del uso de estribos en forma de letra L en encamisados de columnas. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1991).

6.6.3.3 Encamisado de nudos

a) En el caso de encamisar la columna para incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica (inciso 6.6.3.2.b), la unión viga-columna deberá ser encamisada también. El concreto del nudo debe ser confinado con estribos nuevos hechos por piezas o, preferentemente, por medio de una armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas (figura 6.6.9). En la figura 6.6.10 se muestra el armado del encamisado de columnas y vigas, con la armadura de confinamiento en el nudo. Nótese que en la zona adyacente a la columna, el refuerzo transversal de las vigas está hecho con dos piezas en forma de letra U que se traslapan en el refuerzo longitudinal del lecho superior del encamisado.

6.6.4 Consideraciones de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se deberá cumplir con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica.



Figura 6.6.9
Armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y de soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1991).

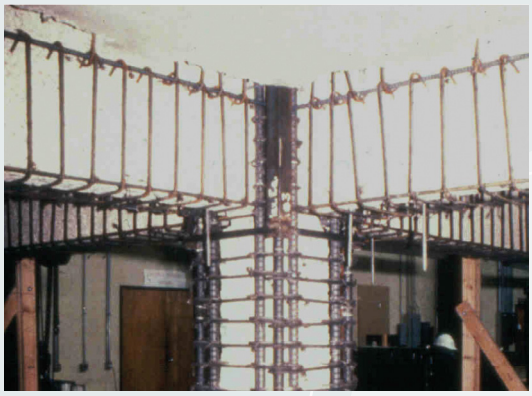


Figura 6.6.10
Encamisado de nudo, de columna y de viga. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1991).

c. Comportamiento monolítico. Para fines de análisis, se deberá suponer un comportamiento monolítico de la estructura existente con las capas de concreto o mortero del encamisado. Ello implica que existe una adherencia perfecta entre el concreto/mortero nuevo y el existente. Se deberá cumplir con el inciso 4.3.3.3 de esta Guía técnica.
d. Momento de inercia. Se podrá calcular un momento de inercia equivalente considerando los distintos módulos de elasticidad de los concretos existente y nuevo. Para determinar el módulo de elasticidad del concreto existente, se deberá aplicar el inciso 4.2.4 de esta Guía técnica.
e. Carga axial. Se supondrá que la carga axial es resistida por la columna existente y que la camisa nueva de concreto o mortero no resiste carga axial, a menos de que se estime que las cargas gravitacionales aumenten significativamente durante la operación del edificio rehabilitado.
f. Factor de rigidez efectiva para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para la sección encamisada según el inciso 3.2.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Si el elemento original tiene daño moderado o severo según la N-Rehabilitación, se debe ignorar la aportación de la rigidez del elemento original. Si el elemento fue inyectado con resina epóxica de acuerdo con la sección 6.2, se podrá suponer el menor valor de la rigidez recuperada señalado en la tabla 6.3.1.

6.6.5 Requisitos de diseño

6.6.5.1 Materiales

1. La resistencia mínima especificada del concreto de la camisa será de 25 MPa (250 kg/cm²) o 5 MPa (50 kg/cm²) mayor que la resistencia del concreto de la estructura existente, la que sea mayor.
2. Se usará concreto clase 1 (con peso volumétrico de 21.6 kN/m³ o 2 200 kg/m³). No se permitirá el uso de concreto clase 2 en ningún caso.

6.6.5.2 Vigas

6.6.5.2.1 Requisitos geométricos

a) El claro libre no debe ser menor que cuatro veces el peralte efectivo de la viga encamisada.
b) El ancho de la viga encamisada b_w debe ser menor o igual que el ancho de la columna b_c.
c) El espesor mínimo de la capa de concreto de la camisa será de 80 milímetros.
d) El recubrimiento mínimo será de 20 mm, según la sección 4.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
e) Se revisará que la distancia libre entre barras longitudinales y la superficie de concreto existente no sea menor que una vez el diámetro nominal de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo de agregado, ni que 25 milímetros.
f) La separación entre barras no será menor que el diámetro nominal de la barra, ni que 1.5 veces el tamaño máximo de agregado del concreto.

6.6.5.2.2 Refuerzo longitudinal

a. Las barras longitudinales tendrán un diámetro mínimo de 12.7 mm (número 4).
b. La cuantía de refuerzo longitudinal de la viga, considerando la suma de las cuantías del refuerzo existente y del nuevo, no excederá de 0.025.
c. Se cumplirá con los incisos 9.2.2.b a 9.2.2.e de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

Para calcular la cuantía de refuerzo longitudinal de la camisa, se aceptará incluir la contribución del refuerzo longitudinal existente a la resistencia a flexión, siempre y cuando esté bien anclado, no haya perdido su sección transversal por corrosión y no esté fracturado o pandeado.

En el cálculo de la resistencia a flexión se aplicarán las hipótesis de la sección 4.3 de esta Guía técnica. Para determinar la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos, se aceptará suponer, en

un primer intento, que la profundidad del bloque queda dentro del espesor de la camisa. En caso de no cumplirse el equilibrio entre las fuerzas de compresión y tensión en la sección, aplicando la hipótesis de secciones planas, se variará la profundidad del bloque dentro de la sección de viga existente hasta lograr dicho equilibrio.

Si las vigas del marco existente se encamisan para reforzarlo integralmente, se deberá prestar atención al anclaje del refuerzo longitudinal a fin de que pueda desarrollar su esfuerzo especificado de fluencia multiplicado por 1.25.

6.6.5.2.3 Refuerzo transversal para confinamiento

Se cumplirá con los incisos 8.2.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), con excepción de los incisos 8.2.3.c y 8.2.3.d. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (figura 6.6.11), seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni que 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3). Dependiendo del diámetro de la(s) barra(s) en las esquinas, es posible que el doblez tenga que hacerse para alojar las barras, como se muestra en la figura 6.6.8.

Para el diseño del refuerzo transversal para confinamiento, se aceptará tomar en cuenta la contribución a la resistencia del refuerzo transversal existente de la viga si los dobleces del refuerzo son de, al menos, 135 grados, o bien, si los dobleces quedarán cubiertos por el nuevo encamisado.

6.6.5.2.4 Refuerzo transversal para cortante

El refuerzo transversal para fuerza cortante se diseñará según los requisitos del inciso 8.2.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

Se exceptúa el cumplimento de colocar estribos de una pieza. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (figura 6.6.6, seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni de 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3).

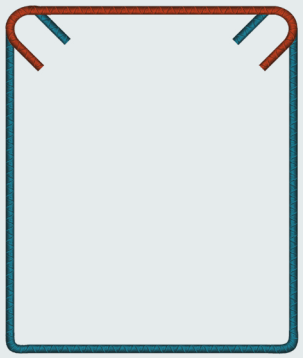


Figura 6.6.11
Estribo de dos piezas aceptable para encamisado de vigas de concreto. Fuente: elaboración propia.

Para el diseño del refuerzo por fuerza cortante, se aceptará tomar en cuenta la contribución a la resistencia del refuerzo transversal existente de la viga si los dobleces del refuerzo son de, al menos, 135 grados, o bien, si los dobleces quedarán cubiertos por el nuevo encamisado.

6.6.5.2.5 Fuerza cortante rasante

En caso de encamisados parciales, se revisará la necesidad de colocar conectores o anclas para resistir la fuerza cortante rasante. Se deberán satisfacer los requisitos de la sección 5.4 de esta Guía técnica.

6.6.5.2.6 Soldadura entre aceros de refuerzo

No se permitirá soldar el refuerzo transversal o longitudinal existente al nuevo refuerzo.

6.6.5.3 Columnas

6.6.5.3.1 Requisitos geométricos

a. La relación de aspecto de la sección transversal no exceda de 3.
b. El espesor mínimo de la capa de concreto de la camisa será de 100 milímetros.

c. El recubrimiento mínimo será de 15 mm, según la sección 4.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
d. Se revisará que la distancia libre entre barras longitudinales y la superficie de concreto existente no sea menor que una vez el diámetro nominal de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo de agregado, ni que 25 milímetros.
e. Se procurará que la distancia libre entre barras longitudinales no sea menor que 1.5 veces el diámetro nominal de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo de agregado, ni que 40 mm.
f. Se aceptará el uso de paquetes formados por tres barras como máximo en la camisa de columnas.
g. Se deberán cumplir los requisitos del inciso 9.3.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.6.5.3.2 Refuerzo longitudinal

a) Las barras longitudinales tendrán un diámetro mínimo de 15.8 mm (número 5).
b) La cuantía de refuerzo longitudinal de la columna, considerando la suma de las cuantías del refuerzo existente y del nuevo, no excederá de 0.06.
c) Se permite formar paquetes de tres barras.
d) Se cumplirá con los incisos 9.3.3.c a 9.3.3.e de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

Para calcular la cuantía de refuerzo longitudinal de la camisa, se aceptará incluir la contribución del refuerzo longitudinal existente a la resistencia a flexocompresión, siempre y cuando esté bien anclado, no haya perdido su sección transversal por corrosión y no esté fracturado o pandeado.

En el cálculo de la resistencia a flexocompresión se aplicarán las hipótesis de la sección 4.3 de esta Guía técnica. Para determinar la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos se aceptará suponer, en un primer intento, que la profundidad del bloque queda dentro del espesor de la camisa. En caso de no cumplirse el equilibrio entre las fuerzas de compresión y tensión en la sección, incluida la carga axial de diseño, aplicando la hipótesis de secciones planas, se variará la profundidad del bloque dentro de la sección de viga existente hasta lograr dicho equilibrio.

Si las columnas del marco existente se encamisan para reforzarlo integralmente, se deberá prestar atención al anclaje del refuerzo longitudinal a fin de que pueda desarrollar su esfuerzo especificado de fluencia multiplicado por 1.25.

6.6.5.3.3 Refuerzo transversal para confinamiento

Se cumplirá con el inciso 8.2.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), con excepción de:

a. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas que estén rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (figura 6.6.13), seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni de 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3).
b. Colocar estribos de cuatro ramas (inciso 8.2.3.d de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

En la figura 6.6.13 se presenta un ejemplo de estribos con dobleces a 90 grados. Ésta es una práctica incorrecta y no permitida en esta Guía técnica. Durante las demandas sísmicas, el agrietamiento y la expansión del concreto muy probablemente harán que los estribos se abran, pudiéndose reducir significativamente su contribución a resistir fuerzas cortantes y a la capacidad de deformación inelástica del elemento. En contraste, en la figura 6.6.14 se muestran estribos con dobleces a 135 grados. Nótese, además, el adecuado anclaje del refuerzo longitudinal de la columna.

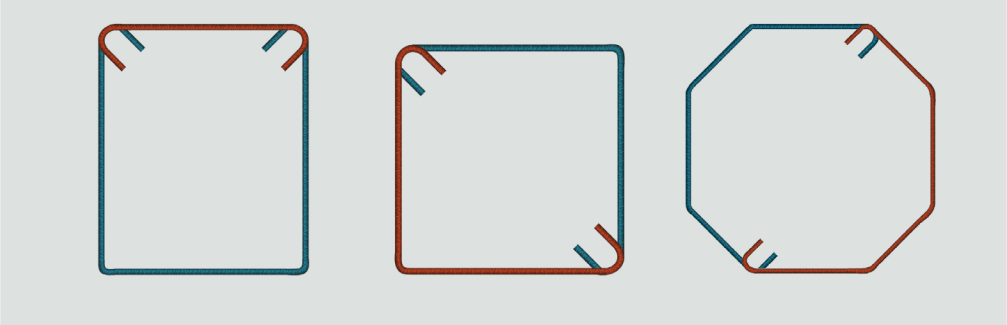


Figura 6.6.12
Estribos de dos piezas aceptables para encamisado de concreto. Fuente: elaboración propia.

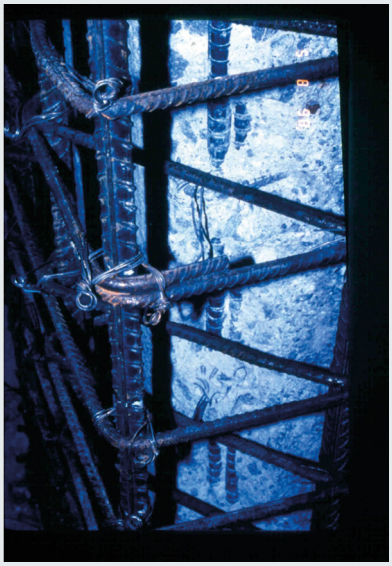




Figura 6.6.13
Práctica incorrecta: estribos con dobleces a 90 grados. Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).



Figura 6.6.14
Encamisado de columna con estribos con dobleces a 135 grados y con refuerzo longitudinal anclado a la cimentación. Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).

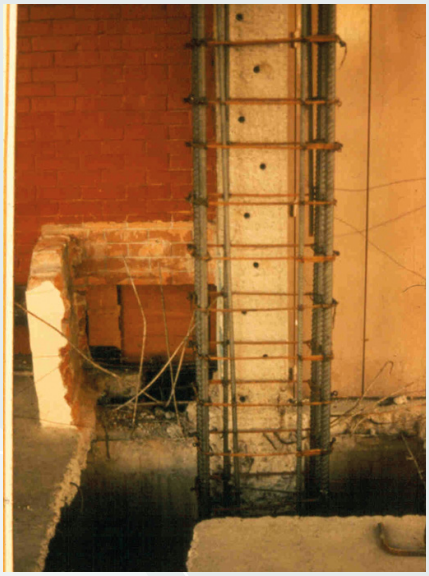


Figura 6.6.15
Columna con agujeros para instalar anclas ahogadas en resina epóxica. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1991).



Figura 6.6.16
Práctica no permitida: soldadura entre aceros de refuerzo. Fuente: Vandoros y Dritsos (2006).

Para el diseño del refuerzo transversal para confinamiento, se aceptará tomar en cuenta la contribución a la resistencia del refuerzo transversal existente de la columna si los dobleces del refuerzo son de, al menos, 135 grados, o bien, si los dobleces quedarán cubiertos por el nuevo encamisado.

6.6.5.3.4 Refuerzo transversal para cortante

El refuerzo transversal para fuerza cortante se diseñará según los requisitos del inciso 8.2.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

Se exceptúa el cumplimiento de colocar estribos de una pieza. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas que estén rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (figura 6.6.13), seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni de 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3).

Para el diseño del refuerzo por fuerza cortante, se aceptará tomar en cuenta la contribución a la resistencia del refuerzo transversal existente de la viga si los dobleces del refuerzo son de, al menos, 135 grados, o bien, si los dobleces quedarán cubiertos por el nuevo encamisado.

6.6.5.3.5 Fuerza cortante rasante

En caso de encamisados parciales, se revisará la necesidad de colocar conectores o anclas para resistir la fuerza cortante rasante (figura 6.6.15). Se satisfarán los requisitos de la sección 5.4 de esta Guía técnica.

6.6.5.3.6 Soldadura entre aceros de refuerzo

No se permitirá soldar el refuerzo transversal o longitudinal existente al nuevo refuerzo (figura 6.6.16).

6.6.5.4 Nudos

6.6.5.4.1 Se deberán encamisar los nudos, si se cumple cualquiera de los puntos a o b:

a) Se encamisan las vigas y columnas del marco existente.
b) Se encamisan las columnas, de manera continua, en la altura del edificio.

6.6.5.4.2 Se deberá cumplir con la sección 9.7 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), con las excepciones siguientes:

a. En el inciso 9.7.2, el refuerzo transversal horizontal se podrá colocar mediante:
   i. Estribos hechos por dos piezas y que estén rematados con dobleces de, al menos, 135 grados, si se demuele la zona próxima de las vigas que llegan al nudo. En este caso, se deberán tomar las medidas apropiadas de apuntalamiento y/o arriostramiento.
   ii. Ángulos y soleras que confinen el nudo formando una armadura de acero (véase figura 6.6.9).
b. En el inciso 9.7.4, para revisar la resistencia a cortante del nudo, se usará la ecuación 6.4.1 para calcular una resistencia a compresión de concreto equivalente:

$$f_c'_{eq} = \frac{f_c' A_{col,existente} + f_c' A_{encamisado}}{A_{col,existente} + A_{encamisado}}$$

Ecuación (6.4.1)

donde:

$f_c'_{eq}$ resistencia a compresión del concreto equivalente para revisión de la resistencia a fuerza cortante de un nudo encamisado, MPa (kg/cm²).

$A_{col,existente}$ área de la sección transversal de la columna existente, mm² (cm²).

$A_{encamisado}$ área de la sección transversal del concreto nuevo, mm2 (cm²).

La ecuación 6.4.1 será aplicable cuando el concreto existente en la unión viga-columna exhiba daño nulo, ligero o moderado.

En la revisión de la resistencia a fuerza cortante del nudo, se usarán los anchos de los elementos encamisados.

c En el inciso 9.7.5.2 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), se aceptará cambiar el límite de 20 a 18.

6.6.5.4.3 Soldadura entre aceros de refuerzo

No se permitirá soldar el refuerzo transversal o longitudinal existente al nuevo refuerzo.

6.6.6 Requisitos de construcción

a) Se preparará toda la superficie de concreto del elemento por encamisar hasta obtener una rugosidad de al menos 6 mm (1/4 pulg) entre valle y cresta. La cara escarificada deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del concreto nuevo (figura 6.6.17).

b) Dos horas antes del colado, se deberá saturar la superficie del concreto existente con agua limpia.

c) No será necesario usar adhesivo entre concretos nuevo y existente ni cualquier otro aditivo para el efecto.



Figura 6.6.17
Ejemplo de preparación de la superficie de una columna existente.
Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).

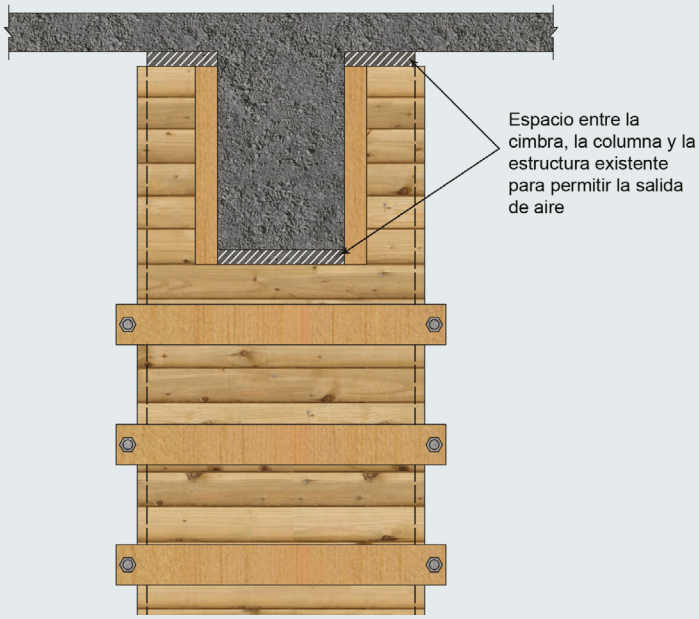


Figura 6.6.18
Ejemplo de cimbra de columna encamisada diseñada para facilitar la salida de aire del concreto.
Fuente: elaboración propia.

d) El revenimiento y el tamaño máximo del agregado se seleccionarán de acuerdo con la separación mínima y el recubrimiento del refuerzo.
e) Diseñar las cimbras para facilitar la salida del aire en el concreto (o mortero) del encamisado, con objeto de evitar la formación de panales o huecos en el concreto (figura 6.6.18).

6.6.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

1. Revisar que toda la superficie de concreto se escarifique hasta alcanzar una rugosidad como la especificada en los planos de construcción.
2. Para asegurar las características del concreto de diseño, se recomienda no fabricar el concreto en obra. Se debe muestrear el concreto en estado fresco y determinar su peso volumétrico para asegurar que el concreto es clase 1. El director, con el visto bueno del corresponsable, aprobará el uso del concreto para el encamisado.

6.7 Encamisados de vigas, columnas o nudos con acero

6.7.1 Deficiencia por corregir

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

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

a. Edificios con columnas cuyo modo de comportamiento está controlado por fuerza cortante. Tal es el caso de columnas en edificios de planta baja flexible (figura 6.7.1).
b. Edificios cuyas columnas tienen escasa capacidad de deformación lateral o requieren incrementar su resistencia a carga axial mediante el confinamiento de las camisas metálicas.
c. Edificios con vigas y/o columnas cuyos traslapes del refuerzo existente son escasos.

Edificios construidos antes de 1986 usualmente caen en alguna o varias de las categorías anteriores. En edificaciones posteriores es posible encontrar deficiencias como las señaladas.

En ningún caso los encamisados de acero se emplearán para incrementar la resistencia ni la rigidez lateral de marcos existentes. Los encamisados de vigas, columnas o nudos son de aplicación local, a nivel de elemento estructural.

6.7.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

6.7.3 Descripción de la técnica

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

Para un correcto funcionamiento, se debe garantizar la sujeción y/o contacto entre las piezas metálicas y el concreto, dependiendo del comportamiento esperado de la camisa metálica. Si la camisa metálica se diseña para incrementar el confinamiento del elemento existente, bastará con conectar la camisa al concreto existente mediante morteros fluidos de baja contracción. Si el encamisado se diseñó para incrementar la resistencia a flexión y/o fuerza cortante, además de colocar mortero fluido de baja contracción, se debe revisar la necesidad de colocar conectores para transmitir la fuerza cortante rasante. Siempre se llenará el espacio entre la camisa metálica y el elemento de concreto existente con mortero fluido de baja contracción o equivalente.

6.7.3.1 Encamisado de vigas

Consiste en la colocación de una placa de acero que cubra el lecho inferior de la viga, en contacto con el concreto por medio de mortero y conectores (figura 6.7.2). Los lados pueden ser encamisados también con placas o con soleras que se conectan a la losa con el uso de ángulos y conectores.

Es posible también encamisar las vigas con armaduras hechas con ángulos y soleras soldados entre sí. En la unión de la viga y la losa, los ángulos de la armadura sirven para conectarla con la losa de concreto. Los ángulos se fijan a la losa por medio de conectores (figura 6.7.2).



Figura 6.7.1
Ensaye de laboratorio de una conexión viga-columna con placas de acero en el lecho inferior de la viga conectadas con anclas adheridas. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1991).



Figura 6.7.2
Encamisado de vigas con ángulos y soleras. Fuente: Horse Construction Company China, www.horseen.com



a) Columna con encamisado completo sin conectores



b) Columna con encamisado completo con conectores

Figura 6.7.3
Encamisado completo de columna: a) sin conectores; b) con conectores.
Fuente: archivos personales de Víctor Cruz (2019) y Rubén Bautista (2019).

6.7.3.2 Encamisado de columnas

Se distinguen dos tipos principales de encamisados de columnas con acero:

a) Placas que cubren todo el perímetro del elemento.

Se tienen dos casos: el más usual es el encamisado de la columna en toda su altura (o encamisado completo); el otro es el encamisado local, normalmente colocado para confinar la zona de un traslape de refuerzo con longitud insuficiente, o bien, para reforzar e incrementar el confinamiento en una zona donde se esperan deformaciones inelásticas.

En el caso del encamisado completo, la técnica se aplica para incrementar la capacidad de deformación lateral, resistencia a cortante y/o carga axial. El encamisado se deberá diseñar de modo que se minimice la cantidad de soldadura en campo.

Dependiendo del tipo de comportamiento para el que fue diseñado el encamisado, será necesario asegurar contacto entre las placas y el concreto existente. Si el encamisado se diseñó para incrementar el confinamiento de la columna original, bastará con rellenar el espacio entre las placas metálicas de la camisa y la columna con mortero fluido de baja contracción.

Si la camisa se diseñó para incrementar la resistencia a flexión y/o fuerza cortante, además del mortero fluido de baja contracción, se revisará la necesidad de colocar conectores entre la camisa y la columna. Los conectores se deben distribuir de forma uniforme en toda la altura de la columna en cada una de sus caras. La profundidad de empotramiento de los conectores será de al menos 1/3 de la menor dimensión transversal de la columna. En la figura 6.7.3 se muestran ejemplos de columnas encamisadas sin (figura 6.7.3.a) y con conectores (figura 6.7.3.b).

En esta modalidad de encamisado, las placas deben ser soldadas entre sí. En caso de encamisados de columnas rectangulares, se recomienda soldar las placas a ángulos metálicos que se coloquen en las esquinas de la camisa, por dentro de ella (figura 6.7.4).

Si el encamisado se coloca para aumentar la capacidad de deformación y/o la resistencia a

Figura 6.7.4
Encamisado local de una columna con longitud escasa de traslapes. Véase el detalle de soldadura de las placas del encamisado a ángulos en las esquinas. Fuente: Aboutaha (1994).

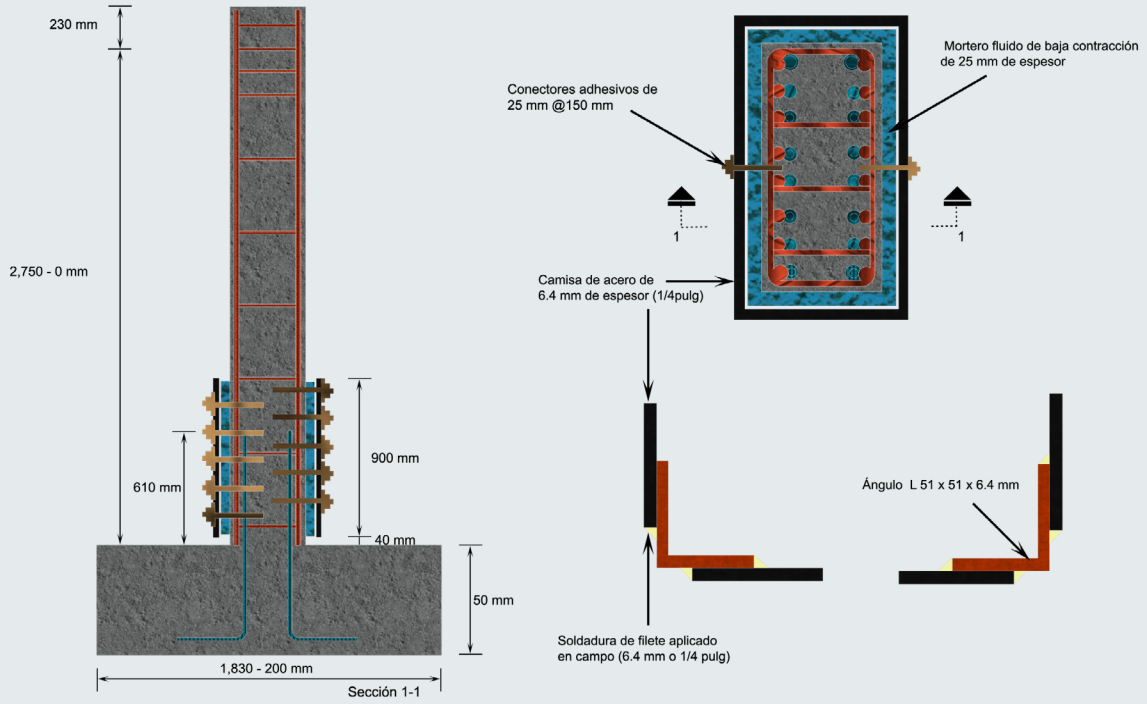




Figura 6.7.5
Práctica no permitida: encamisado metálico sin mortero entre los elementos de acero y el miembro de concreto. Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).



Figura 6.7.6
Encamisado local, sujetado con conectores y mortero fluido entre el concreto y el acero. Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).

cortante, se dejará una separación de 30 mm de la losa inferior y del nudo o losa superior. No será aceptable un encamisado metálico sin mortero entre la camisa y el concreto existente (figura 6.7.5).

En el caso de encamisados locales, se conectará la camisa a la columna por medio de conectores en las caras sujetas a flexión (figuras 6.7.4 y 6.7.6). Adicionalmente, se colocará mortero fluido sin contracción.



Figura 6.7.7
Ejemplo de encamisado con armadura de ángulos y soleras, con y sin conectores. Fuente: Horse Construction Company China, www.horseen.com





Figura 6.7.8
Ejemplos de la colocación de placas de acero en los extremos de la columna para conectar el encamisado a la columna y también a la losa. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

b) Armadura de ángulos y soleras.

Consiste en la colocación de ángulos en las esquinas de la columna unidos mediante soleras metálicas soldadas a los ángulos. La armadura de ángulos y soleras se pueden diseñar para incrementar el confinamiento de la columna (y, consecuentemente, mejorar la capacidad de desplazamiento lateral) y/o para aumentar la resistencia a cortante.

En el primer caso, sólo es necesario rellenar el espacio entre los ángulos, soleras y el concreto existente, con mortero fluido sin contracción.

En el segundo, además de colocar el mortero fluido sin contracción, se debe revisar la necesidad de conectar la camisa al concreto mediante conectores (figura 6.7.7).

En los extremos de la columna, se recomienda colocar placas de acero para conectar la camisa a la columna y, también, a la losa y viga. Estas placas son fijadas por medio de conectores (figura 6.7.8).

6.7.3.3 Encamisado de nudos

El encamisado de nudos se hará para incrementar su confinamiento y, consecuentemente, su resistencia a corte y capacidad de deformación. El encamisado de los nudos sólo será continuo con la columna inferior; es decir, no se deberá perforar la losa. El encamisado de los nudos se puede fabricar mediante placas de acero soldadas que cubren las distintas caras de la intersección entre la columna y la viga o losa. En la figura 6.7.9 se muestra esquemáticamente la colocación de placas de longitud parcial para encamisar el nudo. El caso ilustrado no refiere la existencia de una losa de piso.

Todas las placas se deben unir al concreto por medio de conectores con una profundidad de 1/3 de la longitud menor de la sección transversal del elemento (viga o columna) o de 1/2 del peralte de la losa, la que resulte mayor.

6.7.4 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.

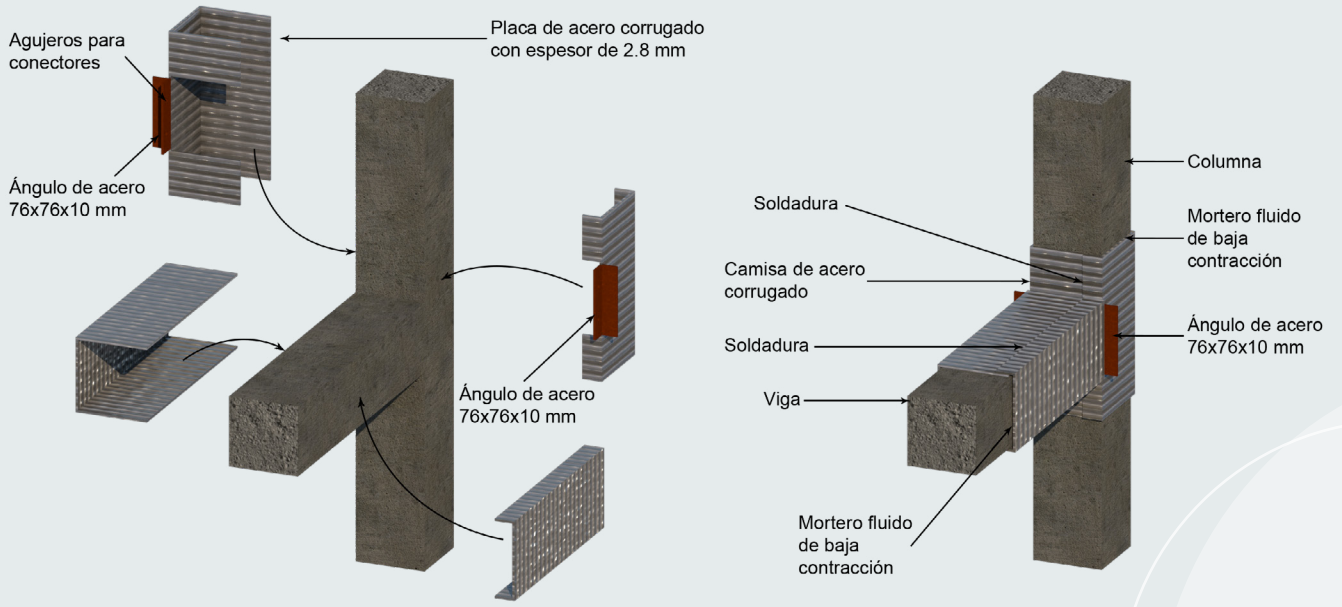


Figura 6.7.9
Ensamblado esquemático de placas para un encamisado de nudo.
Fuente: elaboración propia con base en Ghobarah, Aziz y Biddah (1996).

b. Factor de comportamiento sísmico. Se deberá cumplir con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica.
c. Comportamiento. Para fines de análisis, se deberá suponer un comportamiento de sección compuesta de la estructura existente con el encamisado de acero. Ello implica que existe un contacto completo entre el acero y el concreto existente. Se deberán cumplir los requisitos del inciso 4.3.3.3 de esta Guía técnica.
d. Momento de inercia. El incremento de rigidez del encamisado metálico es poco significativo. Por ello, para el análisis, sólo se considerará el momento de inercia del elemento de concreto existente.
e. Carga axial. Se supondrá que la carga axial es resistida por la columna existente y que la camisa nueva de acero no resiste carga axial, a menos de que se estime que las cargas gravitacionales aumenten significativamente durante la operación del edificio rehabilitado.
f. Factor de rigidez efectiva para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para la sección encamisada según el inciso 3.2.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Si el elemento original tiene daño moderado o severo, según las N-Rehabilitación, se debe ignorar la aportación de la rigidez del elemento original. Si el elemento fue inyectado con resina epóxica, de acuerdo con la sección 6.3, se podrá suponer el menor valor de la rigidez recuperada señalado en la tabla 6.3.1.

6.7.5 Requisitos de diseño

6.7.5.1 Materiales

a) Para asegurar el contacto de los encamisados metálicos, ya sea en forma de placas (sección rectangular o circular) o con ángulos y soleras, se usará mortero fluido sin contracción que tenga una resistencia a compresión mínima de 30 MPa (300 kg/cm²) o igual a la del concreto original, la que sea mayor.

b) Los espesores mínimos y máximos de las placas de acero serán de 6.4 y 12.7 mm (1/4 y 1/2 pulg), respectivamente.
c) Los espesores mínimo y máximo de los ángulos de acero serán de 6.4 y 19.1 mm (1/4 y 3/4 pulg), respectivamente.
d) Si es necesario usar conectores, se deberá cumplir con los requisitos de las secciones 5.3, 5.4, 5.6 y 6.5 de estas Guía técnica.

6.7.5.2 Vigas

6.7.5.2.1 Requisitos geométricos

a. El área de la sección transversal de acero del encamisado (placas o ángulos) se calculará según el inciso 5.1.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), y no debe ser menor que 0.01 del área de la sección de concreto.
b. Si se usan encamisados a base de armaduras de ángulos y soleras:
   i. Las dimensiones de las alas de los ángulos deberán estar en un intervalo entre 1/5 y 1/4 parte de la dimensión transversal de la viga (b, h) y con un espesor t_a máximo de 19 mm (3/4 pulg) (figura 6.7.10).
   ii. Las soleras sólo se colocarán en forma paralela al eje transversal de la sección en la dirección de análisis. Es decir, para vigas, se colocarán en las caras laterales.
   iii. Las soleras tendrán un peralte, h_{sol}, tal que las relaciones h_{sol}/h_a y h_{sol}/b_a se encuentren entre 3/4 y 1, donde h_a y b_a son el peralte y el ancho de la sección transversal del ángulo, respectivamente (figura 6.7.10).
   iv. La separación centro a centro entre soleras, s, se definirá en función del peralte de la solera, tal que la relación h_{sol}/s se encuentre entre 1/5 y 1/3. Además, s, no deberá ser mayor que 0.5 veces el peralte efectivo de la viga ($s \leq d/2$) (figura 6.7.10).
   v. El espesor, t_s, máximo de las soleras será de 12.7 mm (1/2 pulg). El espesor de la solera será 3.18 mm (1/8 pulg) menor que el espesor del ángulo t_a.
   vi. La longitud l_s de la solera será igual al espacio libre entre los ángulos más la longitud del ala del ángulo. Por tanto, el cordón de soldadura en los extremos será igual al peralte de la solera más la longitud del ala (figura 6.7.11).

6.7.5.2.2 Resistencia a flexión

a. No se considerará que el encamisado metálico de una viga incremente su resistencia a la flexión.

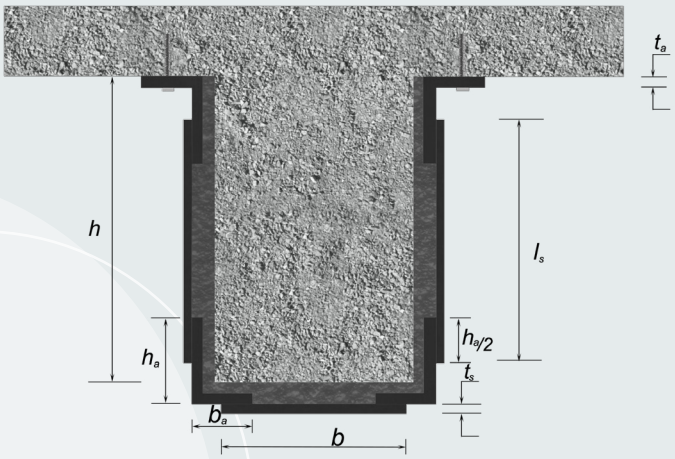


Figura 6.7.10
Sección transversal de viga encamisada con ángulos y solera.
Fuente: elaboración propia.

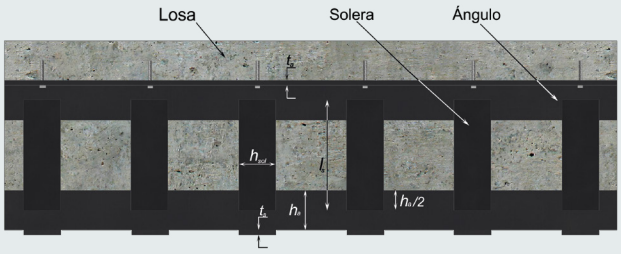


Figura 6.7.11
Sección longitudinal de viga encamisada con ángulos y soleras.
Fuente: elaboración propia.

6.7.5.2.3 Resistencia a fuerza cortante

a. La resistencia a fuerza cortante de la viga encamisada será igual a la suma de las contribuciones a fuerza cortante del elemento existente y la del encamisado metálico. La contribución de la viga existente será nula si el daño es moderado o severo, según las N-Rehabilitación. Si el elemento fue inyectado con resina epóxica de acuerdo con la sección 6.3, se podrá suponer el menor valor de la resistencia recuperada señalada en la tabla 6.3.1.
b. Se empleará la sección 5.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) para calcular la resistencia a la fuerza cortante.
c. La separación centro a centro entre soleras no deberá exceder 0.5 d, donde d es el peralte efectivo de la viga por encamisar.

6.7.5.2.4 Encamisado local para incrementar el confinamiento

a) Si se coloca un encamisado local para incrementar el confinamiento en una zona con traslape de refuerzo escaso y/o donde se esperan deformaciones inelásticas, el encamisado se fabricará con placas de acero (figura 6.7.6).
b) Si la camisa de acero se coloca para mejorar la resistencia de un traslape de barras con longitud insuficiente para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia de las barras traslapadas multiplicado por 1.25 (*i. e.*, valor esperado del esfuerzo de fluencia), se podrá considerar que el traslape tiene una resistencia equivalente a la de un traslape con longitud calculada con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), siempre que se cumplan los puntos i a iii:
   i. La camisa rodee a la viga en sus tres lados (suponiendo una losa monolítica).
   ii. La camisa se extienda más allá de la zona del traslape, al menos, una distancia igual a la máxima dimensión transversal de la viga.
   iii. La camisa esté sujeta al concreto existente con conectores. Al menos se colocarán dos hileras verticales de dos conectores por lado. Los conectores se diseñarán para resistir una cortante rasante igual a la fuerza a tensión que debe resistir el traslape.
c) Si la camisa se coloca para incrementar la capacidad de deformación inelástica de una zona, las placas de acero cubrirán 0.25l_v, donde l_v es el claro de cortante e igual a la distancia entre la sección de momento máximo y el punto de inflexión en el diagrama de momentos.
d) Se deberá revisar la resistencia de la columna existente que quede fuera del encamisado, suponiendo valores de límite inferior de las resistencias de los materiales (véase inciso 4.2.4.3).

6.7.5.2.5 Soldadura entre aceros de refuerzo

No se permitirá soldar el refuerzo transversal o longitudinal existente al nuevo refuerzo.

6.7.5.3 Columnas

6.7.5.3.1 Requisitos geométricos

a. La relación de aspecto de la sección transversal no exceda de 3.
b. El área de la sección transversal del acero del encamisado (placas o armaduras de ángulos y soleras) se calculará de acuerdo con el inciso 5.1.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). El área transversal del encamisado no debe ser menor que 0.01 del área de la sección de concreto.
c. Si se usan encamisados a base de armaduras de ángulos y soleras:
   i. Se colocarán ángulos con dimensiones de sus alas en un intervalo entre 1/5 y 1/4 de la dimensión transversal y con un espesor, t_a, máximo de 19.1 mm (3/4 pulg) (figura 6.7.12).
   ii. Las soleras sólo se colocarán en forma paralela al eje transversal de la sección en la dirección de análisis.
   iii. Las soleras tendrán un peralte, h_{sol}, tal que las relaciones h_{sol}/h_a y h_{sol}/b_a se encuentren entre 3/4 y 1, donde h_a y b_a son el peralte y el ancho de la sección transversal del ángulo, respectivamente (figura 6.7.12).

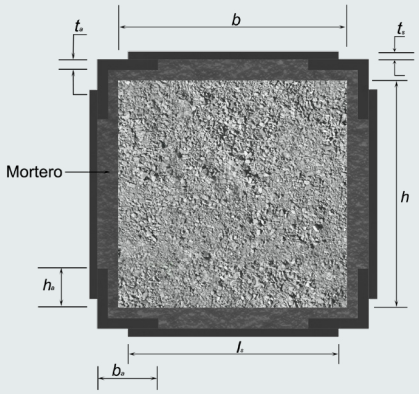
iv. La separación entre soleras, s, se definirá en función del peralte de la solera, tal que la relación h_{sol}/s se encuentre entre 1/5 y 1/3. Además, s no deberá ser mayor que 0.5 veces la dimensión transversal h de la columna, en la dirección paralela a la dirección de análisis ($s \leq h/2$) (figura 6.7.13).

v. El espesor, t_s, máximo de las soleras será de 12.7 mm (1/2 pulg). El espesor de la solera será 3.18 mm (1/8 pulg) menor que el espesor del ángulo t_a.

vi. La longitud, l_s, de la solera será igual al espacio libre entre los ángulos más la longitud del ala del ángulo. Por tanto, el cordón de soldadura en los extremos será igual al peralte de la solera más la longitud del ala (figura 6.7.13).

d. En los extremos superior e inferior de la columna, las placas tendrán un peralte de entre 200 y 300 mm. Estas placas se anclarán al concreto por medio de dos conectores de al menos 15.9 mm (5/8 pulg) de diámetro (figura 6.7.14). Estos conectores se anclarán dentro del núcleo de la columna, dentro del tercio medio de cada lado de la columna.

Figura 6.7.12
Sección transversal de columna encamisada con ángulos y soleras.
Fuente: elaboración propia



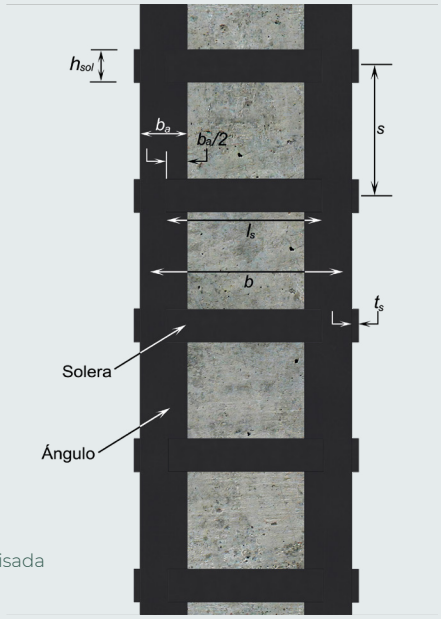


Figura 6.7.13
Elevación de una columna encamisada con ángulos y solera.
Fuente: elaboración propia.



Figura 6.7.14
Encamisado de columna con placa con conectores en el extremo.
Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).

6.7.5.3.2 Resistencia a flexocompresión

a. No se considerará que el encamisado de acero proporcione un incremento en la resistencia a flexocompresión de la columna ni a la flexión del marco.
b. Si la camisa de acero se coloca para mejorar la resistencia de un traslape de barras con longitud insuficiente para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia de las barras, se podrá considerar que el traslape tiene una resistencia equivalente a la obtenida si se calcula la longitud de traslape con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), siempre que se cumplan los puntos i a iii:
   i. La camisa rodee la columna en sus cuatro lados.
   ii. La camisa se extienda más allá de la zona del traslape, al menos, una distancia igual a la máxima dimensión transversal de la columna.
   iii. La camisa esté sujeta al concreto existente con conectores. Al menos se colocarán dos hileras verticales de dos conectores por lado. Los conectores se diseñarán para resistir una cortante rasante igual a la fuerza a tensión que debe resistir el traslape.

6.7.5.3.3 Resistencia a fuerza cortante

a) Se aceptará que la resistencia a fuerza cortante de un encamisado de acero sea igual a la suma de las contribuciones del elemento original más la del encamisado de acero. Se despreciará la contribución de la columna existente cuando se cumpla cualquiera de las siguientes características:
   i. Tenga daño moderado o severo, según las N-Rehabilitación.
   ii. Si la estructura fue diseñada con un reglamento anterior a la versión de 1987.

b) Se revisará que no se exceda el límite de fuerza cortante que pueda resistir el elemento de concreto existente.

c) La separación centro a centro entre soleras no deberá exceder 0.5h, donde h es la dimensión transversal de la columna en la dirección de análisis.

6.7.5.3.4 Confinamiento

Si se encamisa la columna por medio de placas continuas para incrementar su confinamiento y, con ello, su capacidad de deformación lateral y de carga axial, se usarán las ecuaciones 6.5.1 y 6.5.2 para calcular la cuantía de refuerzo por confinamiento:

a) En caso de encamisado con placas continuas:

$$p_c = \frac{2t_p}{b_2} \qquad \textit{Ecuación 6.5.1}$$

b) En caso de encamisado con ángulos y soleras:

$$p_c = \frac{2th_{sol}}{b_2 s} \qquad \textit{Ecuación 6.5.2}$$

donde:

p_c cuantía de refuerzo de confinamiento considerada equivalente a los estribos; su límite superior es de 0.012.
t_p espesor de la placa del encamisado de acero, mm.
b_2 dimensión transversal de la sección de la columna perpendicular a la dirección de análisis, mm.
h_{sol} peralte (altura) de la solera, mm.
s separación de soleras, mm.

6.7.5.3.5 Encamisado local para incrementar el confinamiento

a) Si se coloca un encamisado local para incrementar el confinamiento en una zona con traslape de refuerzo escaso y/o donde se esperan deformaciones inelásticas, el encamisado se fabricará con placas de acero (véase figura 6.7.6).

b) Si la camisa de acero se coloca para mejorar la resistencia de un traslape de barras con longitud insuficiente para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia de las barras traslapadas multiplicado por 1.25 *(i. e.*, valor esperado

del esfuerzo de fluencia), se podrá considerar que el traslape tiene una resistencia equivalente a la de un traslape con longitud calculada con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), siempre que se cumpla i a iii:

i. La camisa rodee a la columna en todo su perímetro.
ii. La camisa se extienda más allá de la zona del traslape, al menos, una distancia igual a la máxima dimensión transversal de la columna.
iii. La camisa esté sujeta al concreto existente con conectores. Al menos se colocarán dos hileras verticales de dos conectores por lado. Los conectores se diseñarán para resistir una cortante rasante igual a la fuerza a tensión que debe resistir el traslape.

c) Si la camisa se coloca para incrementar la capacidad de deformación inelástica de una zona, las placas de acero cubrirán:

i. 0.25l_v , para incrementar la capacidad de deformación inelástica de la zona encamisada y si la carga axial en la columna es menor o igual a 0.3 $f_c'A_g$.
ii. 0.375l_v, para incrementar la capacidad de deformación inelástica de la zona encamisada y si la carga axial en la columna es mayor que 0.3 $f_c'A_g$,

donde l_v es el claro de cortante e igual a la distancia entre la sección de momento máximo y el punto de inflexión en el diagrama de momentos.

d) Se deberá revisar la resistencia de la columna existente que quede fuera del encamisado, suponiendo valores de límite inferior de las resistencias de los materiales (véase inciso 4.2.4.3).

6.7.5.3.6 Soldadura entre aceros de refuerzo

No se permitirá soldar el refuerzo transversal o longitudinal existente al nuevo refuerzo.



Figura 6.7.15
Distribución adecuada de conectores en encamisado de placas de acero. Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

6.7.6 Requisitos de construcción

6.7.6.1 Encamisado con placas

a. Se preparará la superficie de concreto del elemento por encamisar hasta obtener una rugosidad de al menos 6 mm (1/4 pulg) entre valle y cresta. La cara escarificada deberá estar libre de cualquier sustancia que impida el correcto funcionamiento de la sustancia adhesiva.
b. Si se usan conectores adhesivos con resina epóxica en vigas y columnas, su profundidad será la que se calcule de acuerdo con la sección 6.5 de esta Guía técnica. La profundidad mínima será la mayor de 100 mm o un tercio de la menor dimensión transversal del elemento. En losas, la profundidad será de medio peralte.
c. Si se usan conectores, su distribución será al tresbolillo con una separación máxima de 200 mm en forma paralela al eje longitudinal y se localizarán dentro del tercio medio de la dimensión transversal (b o h) del elemento (figura 6.7.15).

d. En todo encamisado, el espacio entre el concreto y la placa será de al menos 25 mm (1/pulg) y deberá ser rellenado con mortero fluido sin contracción con resistencia a compresión al menos igual a la del elemento por encamisar o de 30 MPa (300 kg/cm²), la que resulte mayor.

6.7.6.2 Ángulos y soleras

a) Se preparará la superficie de concreto del elemento por encamisar correspondiente con el área de contacto de los ángulos y soleras hasta obtener una rugosidad de al menos 6 mm (1/4 pulg) entre valle y cresta. La cara escarificada deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la correcta adhesión del mortero al concreto original.
b) Durante la colocación de los ángulos, se utilizará un anillo de acero o su equivalente, con objeto de mantener en posición a los ángulos durante el soldado de las soleras. Los ángulos deberán estar separados, al menos, 12.7 mm (1/2 pulg) del concreto.
c) El espacio entre el concreto, los ángulos y la solera deberá rellenarse con mortero fluido sin contracción con una resistencia a compresión mínima de 30 MPa (300 kg/cm²) (figura 6.7.16).
d) En ningún caso se aceptará un encamisado metálico que no esté en contacto con el elemento de concreto mediante mortero (véase figura 6.7.5).



Figura 6.7.16
Mortero fluido sin contracción colocado entre las soleras y el concreto. Fuente: archivo personal de Víctor Cruz (2019).

6.7.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

a. Se debe revisar que toda la superficie de concreto se escarifique hasta alcanzar una rugosidad como la especificada en los planos de construcción.
b. El diámetro y la profundidad del agujero para alojar anclas o conectores sean las especificadas en el proyecto ejecutivo, con las tolerancias establecidas por los fabricantes.
c. Se limpie el agujero de polvo y residuos de la perforación para la correcta adhesión de la resina con el concreto existente.
d. Cuando corresponda, rellenar el espacio anular entre el agujero de las placas y el conector con resina epóxica.
e. Se cumpla con lo establecido en el capítulo 13 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). En particular, se debe garantizar que las soldaduras de penetración completa cumplan con los espesores y longitud de cordón requeridos.
f. En caso de colocar concreto o mortero fluido sin contracción, debe verificarse que la cimbra permita la salida de aire y facilite la colocación del material.

6.8 Encamisados de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF)

6.8.1 Deficiencia por corregir

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

El encamisado de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF) se emplea para:

a. Restaurar la capacidad original de un elemento estructural deteriorado.
b. Incrementar la capacidad de carga de elementos.
c. Incrementar la ductilidad y la capacidad a flexión (no muy usual) y fuerza cortante de columnas y muros.
d. Incrementar la ductilidad y la capacidad a flexión y fuerza cortante de vigas.

6.8.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

6.8.3 Descripción de la técnica

6.8.3.1 General

Este tipo de encamisado consiste en el recubrimiento del elemento estructural con capas de fibras que se adhieren por medio de resina epóxica. Dichas fibras trabajan de forma unidireccional, razón por la cual su orientación depende de la característica estructural (resistencia, confinamiento) que se busca mejorar. Así, si se desea incrementar la resistencia a la flexión de una viga, por ejemplo, las fibras deberán ser colocadas colinealmente al eje del elemento; si se quiere mejorar la resistencia a fuerza cortante, las fibras serán transversales al eje de la viga.

El encamisado del elemento estructural puede ser total, si se cubren todas las caras del elemento, o parcial, si se cubren dos o tres caras del elemento estructural. Su uso depende de la característica estructural que se quiera mejorar y el área en donde lo requiere. Es común encontrar encamisados de CPRF cubriendo de forma total a las columnas. En el caso de vigas, es usual que sólo se encamise el alma y/o el lecho inferior.

Su aplicación es sencilla y se lleva a cabo rápidamente. Debido a la ligereza del material y al bajo volumen empleado, los encamisados no cambian significativamente el peso de la estructura ni reducen la superficie útil de la planta.

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

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

Las fibras pueden ser precuradas (o preimpregnadas) o no. Antes de colocar las fibras, es usual que el concreto del sustrato se repare localmente

para lograr una superficie tersa y uniforme para promover una adecuada adhesión con la resina empleada para pegar las fibras.

6.8.3.2 Consideraciones para la colocación de CPRF

Los procedimientos de instalación de polímeros reforzados con fibras pueden variar entre fabricantes. Las diferencias dependen del tipo de sistema y del estado de la estructura a rehabilitar. En los incisos 6.8.3.2.1 a 6.8.3.2.5 se describen las principales consideraciones para la instalación de CPRF. En la figura 6.8.1 se ilustran gráficamente los pasos a seguir para colocar los CPRF. Una demostración de la colocación de CPRF en especímenes de laboratorio se puede observar en la figura 6.8.2

6.8.3.2.1 Previamente a la colocación

a. Los imprimadores, resinas y adhesivos no se deben aplicar sobre superficies frías o congeladas a menos de que el fabricante lo permita.
b. Se puede utilizar una fuente de calor auxiliar para elevar la temperatura ambiente y la superficie durante la instalación y mantener temperaturas adecuadas durante el curado.
c. Las resinas y adhesivos no se deben aplicar en superficies húmedas o mojadas a menos de que el fabricante así lo permita.
d. Los sistemas no deben aplicarse a superficies de concreto que estén sujetas a transmisión de vapor de humedad.
e. Todo equipamiento debe estar limpio y en buenas condiciones de funcionamiento y el personal debe tener la capacitación de operación del equipamiento.
f. El personal debe contar con el equipo de seguridad necesario, como guantes, máscaras, protectores oculares y overoles.

6.8.3.2.2 Preparación de la superficie de contacto

Los recubrimientos existentes, polvos, suciedad, aceites, obstrucciones y objetos incrustados en la superficie deben retirarse del concreto (figura 6.8.1.a). Las grietas de más de 0.3 mm de grosor deben ser inyectadas a presión con resina epóxica antes de la instalación del CPRF, la inyección se deberá llevar a cabo según se indica en la sección 6.3 de esta Guía técnica. Las grietas más pequeñas pueden requerir inyección de resina o sellado para evitar la corrosión del acero de refuerzo existente. En ningún caso se podrá aplicar el CPRF si el elemento muestra signos de corrosión.

Las variaciones fuera del plano de la superficie de contacto no deben exceder 1 mm. Estas variaciones se pueden eliminar mediante rectificado o chorro de agua, o se pueden alisar mediante una masilla a base de resina. Los agujeros o huecos deben rellenarse con masilla a base de resina.

Toda la superficie deberá estar seca, como lo indica el fabricante del sistema. Las superficies a encamisar deberán ser, como mínimo, planas o convexas. Los huecos grandes en la superficie deben ser reparados con un material de reparación compatible con el concreto existente.

6.8.3.2.3 Aplicación del CPRF

La imprimación debe ser colocada de manera uniforme sobre toda la superficie del concreto donde se colocarán las fibras. Se puede aplicar mediante el uso de un rodillo liso, y si fuera el caso, la masilla se puede aplicar con ayuda de una espátula. La imprimación aplicada debe protegerse de polvo, humedad u otros contaminantes antes de aplicar el CPRF. Antes de colocar la resina *saturante*, se debe dejar que el imprimador o masilla curen de acuerdo con lo especificado por el fabricante.

Una vez curada la imprimación, se aplica la resina *saturante* de forma uniforme en todas las superficies preparadas donde se colocará el sistema (figura 6.8.1.b). Las fibras se pueden impregnar por separado antes de colocarlas en la superficie de concreto usando una máquina de impregnación de resina.

Al colocar las fibras en la superficie, se deben presionar suave y uniformemente (figura 6.8.1.c). Es necesario eliminar el aire atrapado entre las capas de resina antes de que ésta endurezca. Se tiene que aplicar suficiente resina *saturante* para

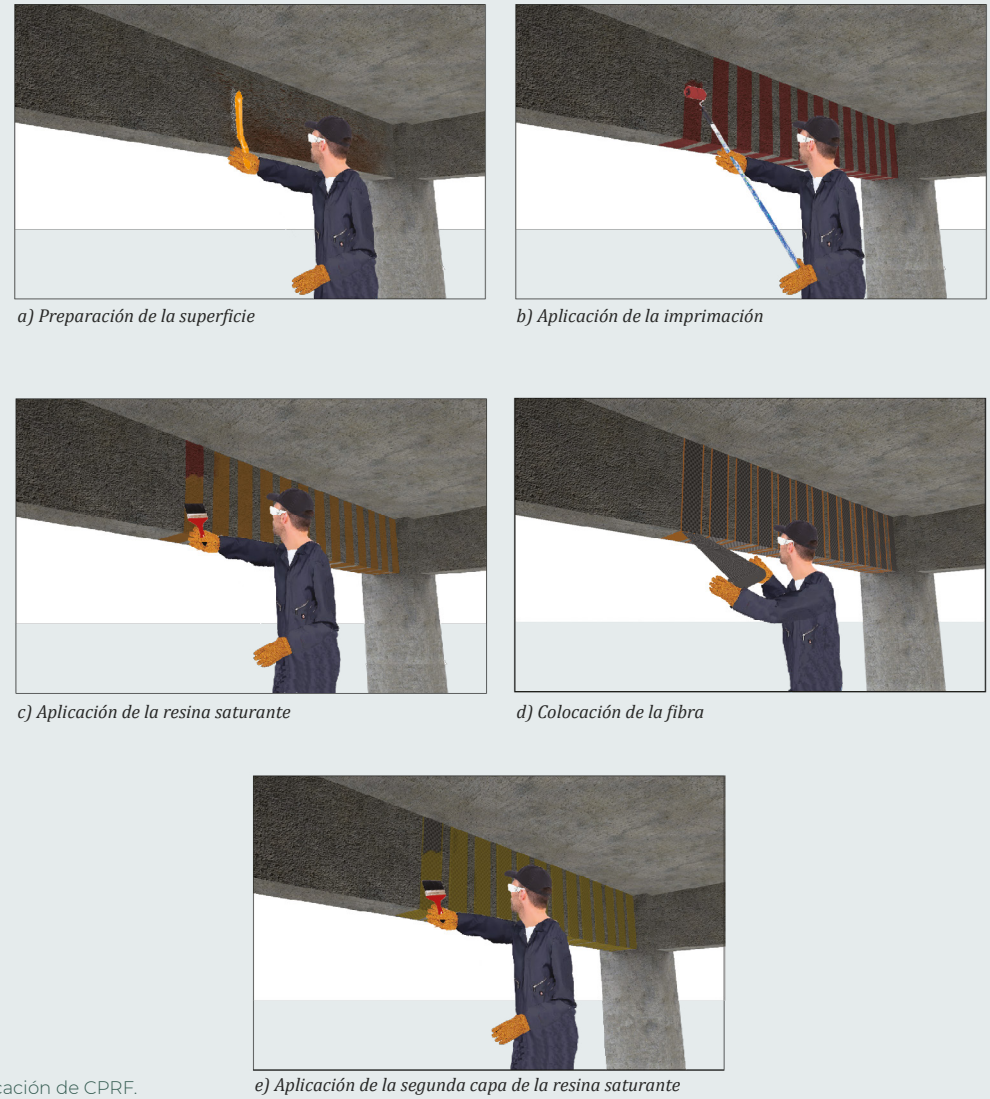
lograr cubrir totalmente las fibras (figura 6.8.1.d). Si se coloca una nueva capa de fibras, se debe instalar antes de que la capa de resina anterior se cure y se dificulte la adecuada unión entre las diversas capas de resina y fibras.

6.8.3.2.4 Curado de resina

Todas las resinas deben curarse de acuerdo con las indicaciones del fabricante. La instalación de capas sucesivas debe detenerse si existe alguna anomalía en el curado de las resinas de las capas anteriores.

6.8.3.2.5 Protección

Durante el periodo del curado de la resina, se deberá tener cuidado con temperaturas adversas, el contacto con agua, polvo o suciedad, la luz solar excesiva y la alta humedad. Como protección temporal se recomienda utilizar algún elemento, como plástico o carpas que ayuden a proteger el elemento reforzado. Si se requiere apuntalamiento temporal, el CPRF debe estar completamente curado antes de quitar el apuntalamiento.



a) Preparación de la superficie

b) Aplicación de la imprimación

c) Aplicación de la resina saturante

d) Colocación de la fibra

e) Aplicación de la segunda capa de la resina saturante

Figura 6.8.1
Guía ilustrada del proceso de colocación de CPRF.
Fuente: elaboración propia.

Figura 6.8.2
Fotos de una demostración de colocación de hojas de fibra de carbono en laboratorio. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1994).



a) Superficie limpia, ya preparada y con resina saturante



b) Colocación de hojas de fibra



c) Colocación de resina saturante sobre las fibras



d) Resultado final antes de capa de protección

6.8.4 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se deberá cumplir con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica.
c. Comportamiento monolítico. Para fines de análisis, se deberá suponer un comportamiento de sección compuesta de la estructura existente con el encamisado de CPRF. Ello implica que haya un contacto completo entre el CPRF y el concreto existente.
d. Momento de inercia. El incremento de rigidez del CPRF es bajo. Por ello, para el análisis, sólo se considerará el momento de inercia del elemento de concreto existente.
e. Carga axial. Se supondrá que la carga axial en columnas es resistida solamente por el elemento original, ya que el CPRF no trabaja a compresión. Se podrá incrementar la capacidad axial de los elementos existentes si se diseña el encamisado de CPRF para aumentar su confinamiento.
f. Factor de rigidez efectiva para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para la sección encamisada según el inciso 3.2.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Se debe ignorar la aportación de la rigidez del encamisado de CPRF. Si el elemento fue inyectado con resina epóxica de acuerdo con la sección

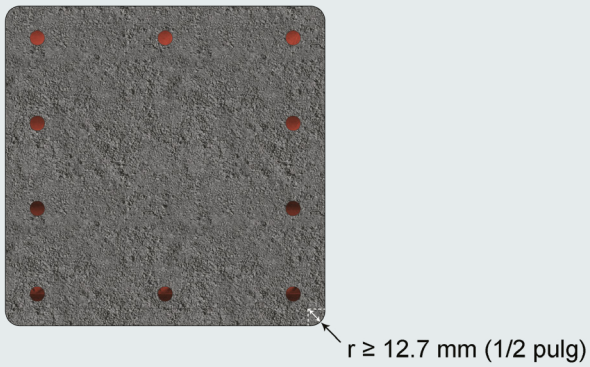


Figura 6.8.3
Esquinas redondeadas en elementos de concreto.
Fuente: elaboración propia.



Figura 6.8.4
Ejemplos de aplicación de un encamisado completo en columnas, con y sin conectores.
Fuente: cortesía de Oscar López (1995).

6.3, se podrá suponer el menor valor de la resistencia recuperada señalada en la tabla 6.3.1.

6.8.5 Requisitos de diseño

6.8.5.1 Requisitos geométricos

a. En el caso de elementos con sección transversal rectangular, se redondearán las esquinas con un radio al menos igual a 12.7 mm (1/2 pulg), pero no menor que el valor recomendado por el fabricante de las fibras (figura 6.8.3).
b. Si se requiere incrementar el confinamiento en elementos con sección transversal rectangular por medio de CPRF, la relación lado largo a lado corto de la sección transversal deberá ser menor o igual que 1.5, y ninguna de las dimensiones de la sección transversal deberá ser mayor que 900 mm. Si alguna de las dimensiones es mayor que 900 mm, se deberá convertir la sección rectangular en una sección circular mediante la adición de alguna camisa de concreto.

En la figura 6.8.4 se muestran dos columnas encamisadas con fibras de carbono, con y sin conectores. En ambos casos, las esquinas de las columnas existentes fueron redondeadas para evitar la fractura de las fibras.

6.8.5.2 Resistencia a flexión en vigas

El diseño a flexión en vigas deberá satisfacer los requisitos de ACI 440.2R-17.

6.8.5.3 Resistencia a flexocompresión en columna

El diseño a flexocompresión de una columna deberá cumplir con ACI 440.2R-17.

6.8.5.4 Refuerzo transversal para confinamiento

La cuantía de fibras para proveer confinamiento se calculará de conformidad con el capítulo 13 de ACI 440.2R-17.

a. Para calcular el espesor del encamisado, se usarán las ecuaciones 6.8.1 y 6.8.2 (correspondientes a las ecuaciones 13.3.3a de ACI 440.2R):

$$nt_f = 1\,000\frac{D}{E_f}$$ *Ecuación 6.8.1*

Sección circular

$$nt_f = 1\,500\frac{D}{E_f}$$ *Ecuación 6.8.2*

Sección rectangular

donde:

- D diámetro de la sección o la dimensión mayor, mm.
- E_f módulo de elasticidad del CPRF, MPa.
- n número de capas de CPRF.
- t_f espesor de la capa de CPRF, mm.

b. Para secciones circulares, la cuantía de CPRF se calculará con la ecuación 6.8.3 (a partir de las ecuaciones 13.3.4a, b y c de ACI 440.2R):

$$\rho_f = \frac{4nt_f}{D}\frac{w_f}{s_f}$$ *Ecuación 6.8.3*

Para secciones rectangulares:

$$\rho_f = 2nt_f\left(\frac{b+h}{bh}\right)\frac{w_f}{s_f}$$ *Ecuación 6.8.4*

donde:

- D diámetro de la sección circular o la diagonal de la sección rectangular, mm.
- b y h dimensiones de la sección rectangular, mm.
- w_f ancho de la banda de CPRF, mm.
- s_f separación entre los ejes de las bandas de CPRF, mm.

En cualquier caso, se debe cumplir que:

$$\rho_f \geq \frac{0.0052\rho_l D}{d_{bl}}\frac{f_y}{f_{fe}}$$ *Ecuación 6.8.5*

donde:

- D diámetro o diagonal de la sección, mm.
- ρ_l cuantía de acero de refuerzo longitudinal.
- d_{bl} diámetro del acero de refuerzo longitudinal, mm.
- f_y esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, MPa.
- f_{fe} tensión efectiva del CPRF, MPa.

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe}E_f$$ *Ecuación 6.8.6*

donde:

- E_f módulo de elasticidad del CPRF, MPa.
- ε_{fe} deformación unitaria efectiva.

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq k_\varepsilon\varepsilon_{fu}$$ *Ecuación 6.8.7*

donde:

- k_ε 0.58
- ε_{fu} deformación unitaria última del CPRF.

c. En los casos donde el encamisado no es continuo, la separación libre entre las bandas de CPRF no deberá ser mayor que 150 mm ni que la calculada con la ecuación 6.8.8 (figura 6.8.5):

$$s_f \leq \left[3 - 6\left(\frac{f_u}{f_y} - 1\right)\right]d_{bl} \leq 6d_{bl}$$ *Ecuación 6.8.8*

donde:

- f_u esfuerzo último del acero de refuerzo longitudinal, MPa.

6.8.5.5 Requisitos para fuerza cortante

El diseño del encamisado para resistir la fuerza cortante se hará de acuerdo con el capítulo 11 de ACI 440.2R-17.

La resistencia a fuerza cortante de un elemento encamisado con CPRF será igual a la suma de las contribuciones del concreto y del refuerzo transversal del elemento existente, más la contribución de la camisa de CPRF. Si la estructura fue diseñada con un reglamento anterior a la versión de 1987, se despreciará la contribución del elemento existente a la resistencia a la fuerza cortante.

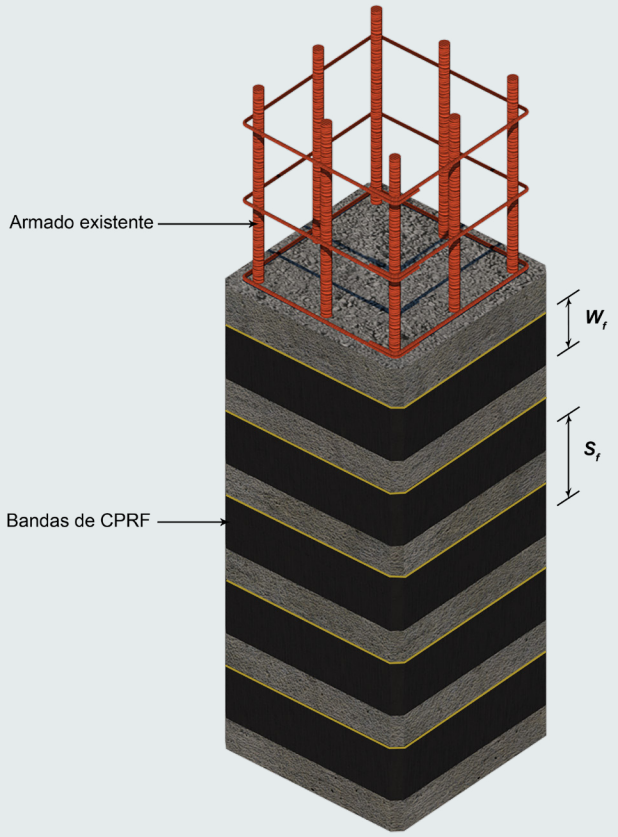


Figura 6.8.5
Notación para el encamisado de elementos con bandas de CPRF.
Fuente: elaboración propia con base en ACI 440-2R (2017).

La contribución del CPRF será igual a $\Psi_f V_f$. El factor Ψ_f se considerará igual a 0.95 en el caso de un encamisado completo; en el caso de encamisados parciales (en los cuales se cubren tres o dos caras —opuestas— del elemento), el factor Ψ_f se considerará igual a 0.85 (figura 6.8.6).

La contribución a la resistencia a fuerza cortante del CPRF se calcula a partir de la ecuación 6.8.9:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\operatorname{sen}\alpha + \cos\alpha) d_{fv}}{s_f} \qquad \textit{Ecuación 6.8.9}$$

Para secciones rectangulares, A_{fv} se calcula como:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \qquad \textit{Ecuación 6.8.10}$$

Para secciones circulares, se calcula de la siguiente forma:

$$A_{fv} = \frac{\pi}{2} nt_f w_f \qquad \textit{Ecuación 6.8.11}$$

Las dimensiones mencionadas en las expresiones anteriores se definen en la figura 6.8.7.

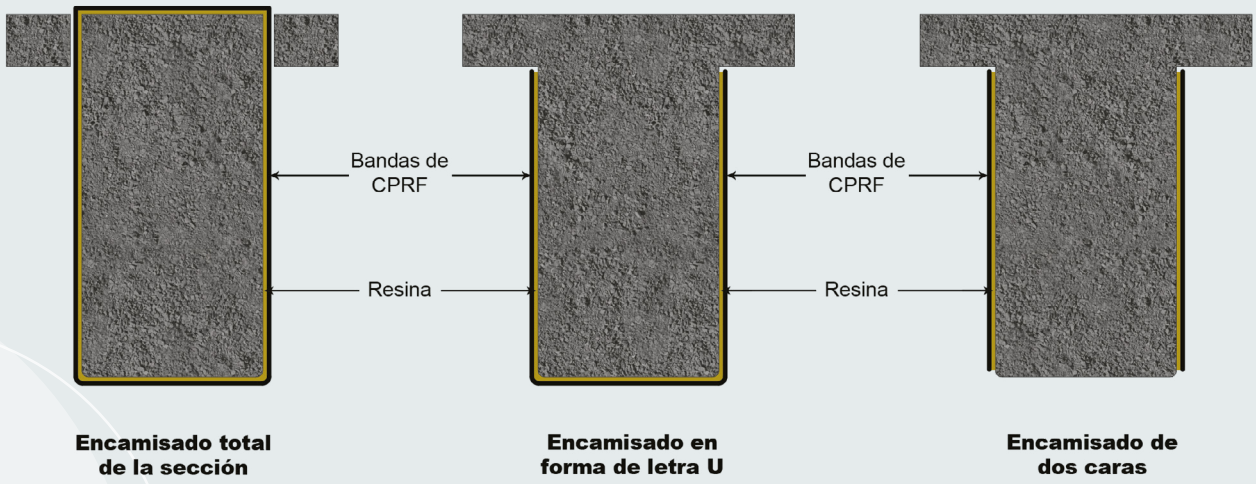


Figura 6.8.6
Encamisados completo y parcial de vigas.
Fuente: elaboración propia con base en ACI 440.2R (2017).

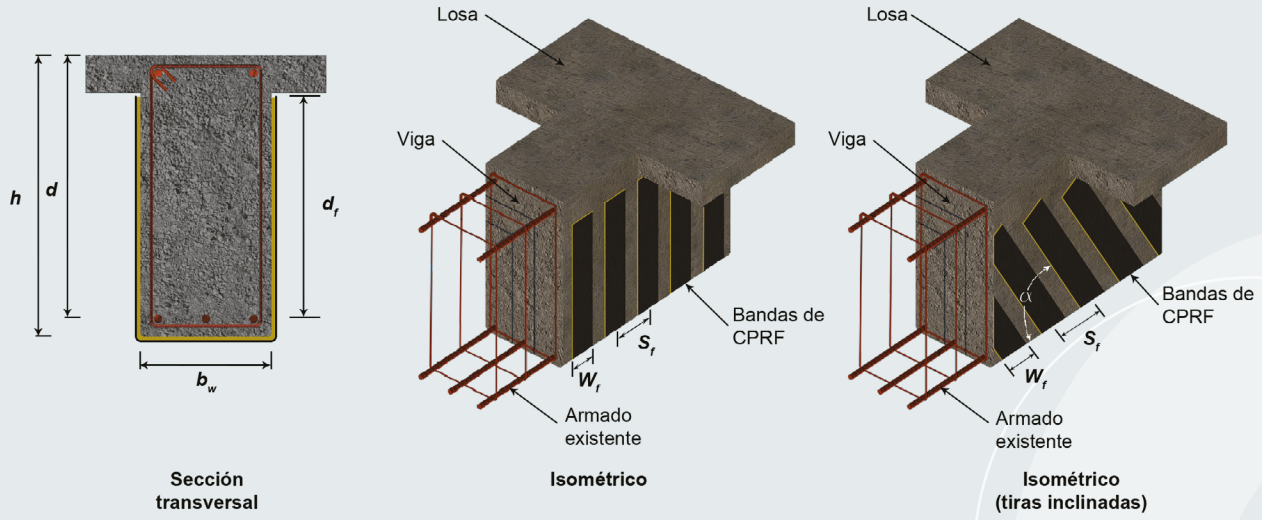


Figura 6.8.7
Notación de encamisados de vigas con bandas de CPRF.
Fuente: elaboración propia con base en ACI 440.2R (2017).

6.8.5.5.1 Límite del refuerzo cortante

El límite de la suma de las contribuciones a la resistencia a fuerza cortante aportada por el acero de refuerzo existente y el CPRF es el especificado en las ecuaciones 6.8.12 y 6.8.13 para elementos con sección rectangular o circular, respectivamente. La primera ecuación corresponde al sistema internacional de unidades y medidas; en paréntesis se presentan las expresiones equivalentes en el sistema gravitacional usual (kilogramo fuerza y centímetro).

$$V_s + V_f \leq 0.66\sqrt{f_c'}\,bh \qquad \text{Sección rectangular}$$

$$\left(V_s + V_f \leq 2.20\sqrt{f_c'}\,bh\right) \qquad \textit{Ecuación 6.8.12}$$

$$V_s + V_f \leq 0.66\sqrt{f_c'}\,0.8D^2 \qquad \text{Sección circular}$$

$$\left(V_s + V_f \leq 2.20\sqrt{f_c'}\,0.8D^2\right) \qquad \textit{Ecuación 6.8.13}$$

donde:

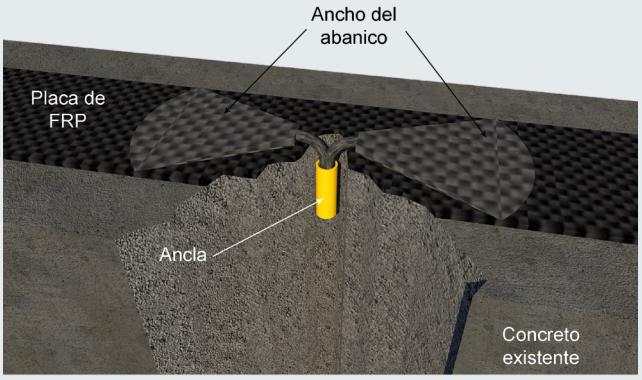
V_s Resistencia a fuerza cortante del acero de refuerzo, N (kg).

6.8.6 Conectores de CPRF

Se aceptará el uso de conectores hechos de CPRF. Los conectores o anclas de CPRF son un método viable de conexión, entre otros, para retrasar o evitar el desprendimiento del CPRF del concreto.

Para formar los conectores, la tela u hoja de fibras de carbono o de otro material se corta de forma perpendicular a la dirección de las fibras. Posteriormente, se enrolla en forma de un cilindro con diámetro igual al del anclaje calculado. El cilindro formado se amarra en un extremo; este extremo es el que se insertará en el agujero. El otro extremo del cilindro se corta longitudinalmente (*i. e.*, en la dirección de las fibras) en varias tiras, haciéndolo parecer a una escobeta. El conector se ahoga en la perforación con una resina polimérica. Las dimensiones del conector y del agujero en el concreto serán determinadas siguiendo el método de diseño del inciso 6.8.6.1. En el inciso 6.8.6.2 se describen los pasos para la colocación de anclas de CPRF. En la figura 6.8.8 se muestra un conector hecho con CPRF (Del Rey et al., 2017).

Se distinguen tres tipos de conectores de CPRF (figura 6.8.9): a. Conector recto, en el cual el plano



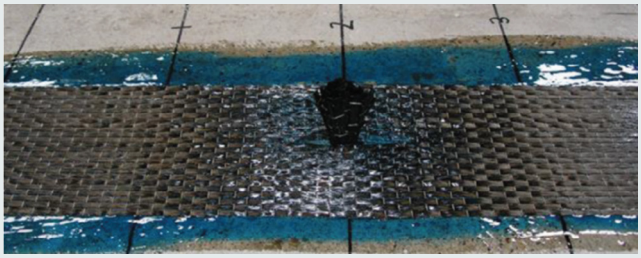
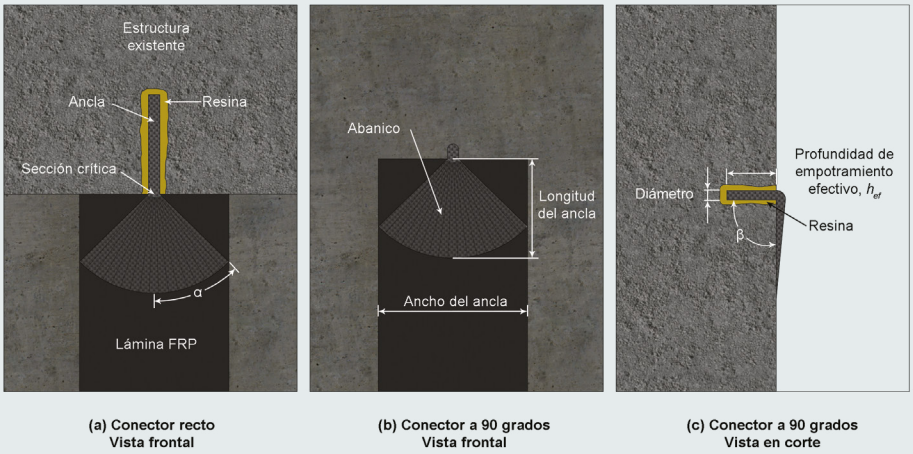
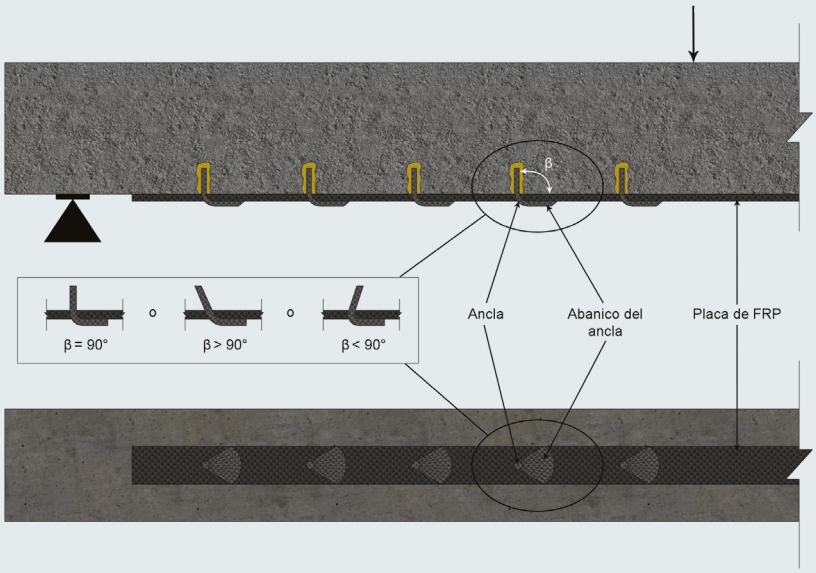


Figura 6.8.8
Conector de CPRF. Fuente: Del Rey et al. (2017) y elaboración propia con base en Zhang y Smith (2011).

Figura 6.8.9
Tipos de conectores de CPRF.
Fuente: elaboración propia con base en Del Rey et al. (2017) y Zhang y Smith (2011).





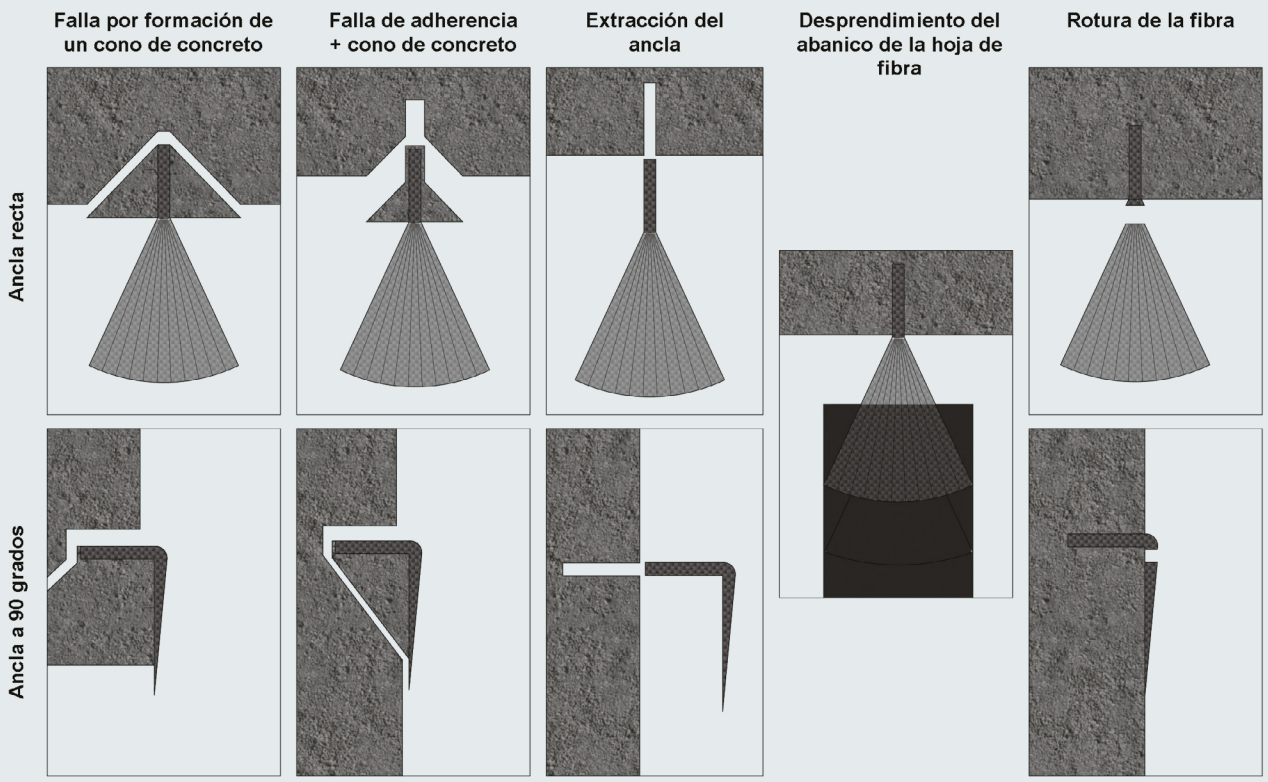


Figura 6.8.10
Modos de falla de conectores de CPRF. Fuente: elaboración propia con base en Del Rey et al. (2017).

del abanico es colineal al eje del ancla; b. Conector a 90 grados, cuando el plano del abanico forma 90 grados con respecto al eje del ancla; c. Conector a β grados, cuando el ángulo entre el plano del abanico y el eje del ancla es de β grados. Es claro que el conector a 90 grados es un caso particular del conector a β grados.

Los tres modos de falla de un conector se pueden observar en la figura 6.8.10 (Del Rey et al., 2017). Los modos son:

a. Falla del concreto mediante la formación de un cono.
b. Falla mixta del concreto con formación de un cono y de adherencia.
c. Falla por extracción del ancla.
d. Desprendimiento del abanico de la hoja de fibra.
e. Rotura de la fibra.

6.8.6.1 Metodología de diseño de conectores de CPRF

Para el diseño de conectores de CPRF se deberán seguir los pasos siguientes (Del Rey et al., 2017):

a) Determinar si se requieren instalar conectores de CPRF para fijar el encamisado. Para ello, se requiere calcular la resistencia del elemento rehabilitado con CPRF usando los requisitos de diseño del inciso 6.8.5 de esta Guía técnica. Si la resistencia requerida no se puede alcanzar con capas adicionales de CPRF o si el diseño no es eficiente, se deberá considerar el uso de conectores de CPRF.
b) Deformación unitaria efectiva del encamisado fijado con conectores. Determinar la magnitud de la deformación unitaria efectiva de diseño en el CPRF requerida para satisfacer la demanda de diseño suponiendo un anclaje perfecto.

c) Fuerza de tensión total del CPRF fijado con conectores. Determinar la fuerza de tensión resultante en las capas de CPRF utilizando la deformación unitaria efectiva y el módulo de elasticidad del CPRF. Esta fuerza se transmitirá a través de las anclas al sustrato. Los conectores permitirán el desarrollo de la deformación unitaria efectiva supuesta en las hojas de fibra.

d) Número de conectores necesarios. Determinar el número de conectores que se instalarán, teniendo en cuenta que éstos deben estar distribuidos en todo el ancho de la fibra. Posteriormente, se debe calcular la fuerza de tensión por ancla.

e) Área transversal del conector de CPRF. Calcular el diámetro del ancla del CPRF como:

i. Suponiendo que N_{fr} es la fuerza de tensión en el conector, calcular el área transversal mínima del ancla de CFRP usando la ecuación 6.6.14 para conectores rectos, la ecuación 6.6.15 para conectores a 90 grados, o la ecuación 6.6.16 para conectores a β grados (véase figura 6.8.11).

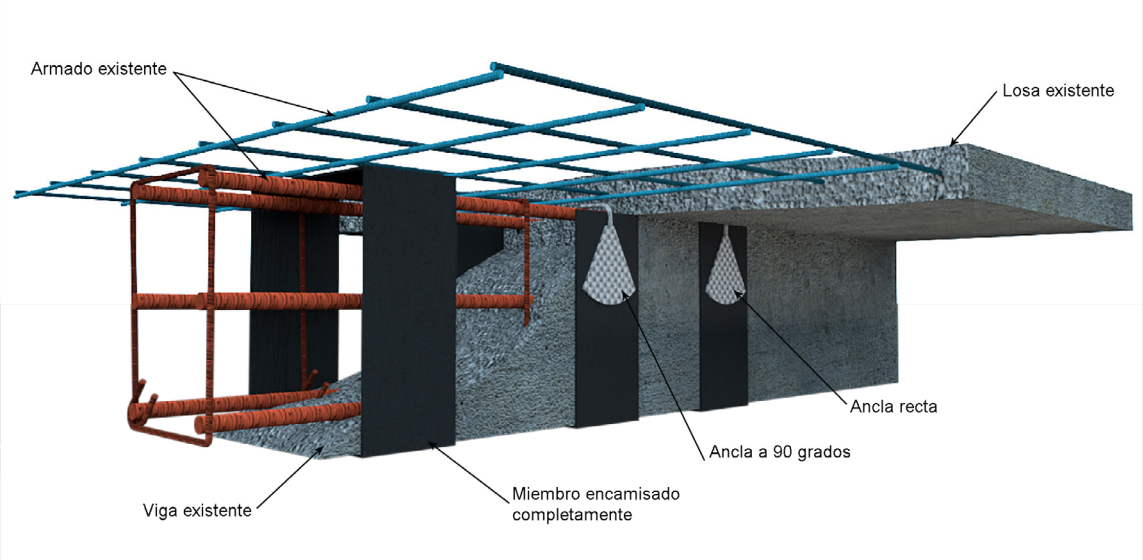


Figura 6.8.11
Ejemplo de uso de conectores de CPRF.
Fuente: elaboración propia con base en Del Rey et al. (2017).

Para anclajes rectos:

$$N_{fr}=0.59\, w_f\ t_f\ f_{fu} \qquad \textit{Ecuación 6.6.14}$$

donde:

- N_{fr} resistencia a tensión de la fibra (rotura a tensión), N.
- w_f ancho de la tira de CPRF, mm.
- t_f espesor de la capa de CPRF usada para elaborar el conector de CPRF, mm.
- f_{fu} resistencia última la tensión del CPRF, MPa.

Para conectores a 90 grados:

$$N_{fr} = 2.2\, E_f\, \varepsilon_{fu}\, 10^{-3} A_{ancla}^{0.62} \left(\frac{90-\alpha}{90}\right) \qquad \textit{Ecuación 6.6.15}$$

donde:

- E_f módulo de elasticidad del CPRF, MPa.
- ε_{fu} deformación unitaria de falla del CPRF usado en el ancla, mm/mm.
- A_{ancla} área de la sección transversal del ancla de conector de CPRF, mm^2.
- α ángulo del abanico definido en la figura 6.8.9, grados.

Para anclajes con ángulo de inserción diferente, se multiplica la ecuación 6.6.15 por el factor k_β de la ecuación 6.6.16:

$$k_\beta = 2.34\left(\frac{\beta}{2\pi}\right) - 0.33 \qquad \textit{Ecuación 6.6.16}$$

donde:

k_β factor de reducción para conectores a β grados.
β ángulo de inclinación del conector, rad.

ii. Cuando se usan propiedades netas (en condiciones secas de la fibra), se debe tener en cuenta que el área de la sección transversal real del conector de CPRF es mayor que el área de las fibras, ya que éstas deben saturarse con resina epóxica. Aunque una relación de fibra a volumen total depende en gran medida del método de fabricación y la calidad de la mano de obra, se puede suponer una relación de 0.3 a 0.5 para calcular el área real del ancla una vez que las fibras están saturadas con resina y colocadas en el agujero.
iii. Se ha recomendado que el volumen total de fibras en el ancla debe ser al menos igual al volumen de fibras en la hoja por ser anclada.

f) Dimensión del barreno en el elemento de concreto. Usando la fuerza a tensión requerida en el anclaje igual a N_{cc} y N_{cb}, en las ecuaciones 6.6.17 a 6.6.19, calcular la profundidad de empotramiento efectiva requerida, h_{ef}, y el diámetro del agujero, d_0. Se recomienda que h_{ef} sea, al menos, mayor que la suma del recubrimiento de concreto más 25 mm para mitigar el desprendimiento del CPRF. El diámetro del orificio perforado deberá ser ligeramente mayor (entre 3 y 4 mm) que el diámetro externo del conector.

$$N_{cc} = 9.68\, h_{ef}^{1.5}\sqrt{f'_c} \qquad \textit{Ecuación 6.6.17}$$

Falla del cono de concreto

$$N_{cb} = 4.62\,\pi d_0 h_{ef}, si\ f'_c < 20MPa \qquad \textit{Ecuación 6.6.18}$$

$$N_{cb} = 9.07\,\pi d_0 h_{ef}, si\ f'_c \geq 20MPa \qquad \textit{Ecuación 6.6.19}$$

Falla de concreto y adherencia

donde:

N_{cc} resistencia a tensión en el conector cuando se produce la falla del concreto en forma de cono, N.
N_{cb} resistencia a tensión en el conector cuando se produce una falla mixta (formación de un cono en el concreto y falla por adherencia), N.
h_{ef} profundidad de empotramiento efectiva del barreno, mm.
d_0 diámetro del barreno, mm.
f'_c resistencia especificada del concreto a compresión, MPa.

g) Dimensión del abanico. Usando la fuerza de tensión en el conector como Nsd en la ecuación 6.6.20, calcular el área del abanico requerida para transmitir la fuerza de tensión desde la hoja de CPRF al conector. Para ello, se supone un ángulo para el abanico y se calcula la longitud y el ancho del abanico para lograr el área requerida.

$$N_{sd}=0.35 v_{sb}\, A_{abanico}$$

donde:

N_{sd} resistencia a la adherencia del abanico, N.
v_{sb} esfuerzo resistente a la adherencia de la resina epóxica, MPa.
$A_{abanico}$ área del abanico, mm².

6.8.6.2 Proceso de colocación

Los conectores se deberán instalar durante el proceso de rehabilitación con CPRF como se indica a continuación (Breña, 2010):

a. Los agujeros para los conectores se deberán perforar a la profundidad requerida por el diseño con un diámetro entre 3 y 4 mm más grande que el del ancla de CPRF.
b. La superficie de concreto deberá estar libre de recubrimientos, polvos, aceites, obstrucciones y objetos incrustados. El agujero para

el conector se limpiará para retirar el polvo o material suelto siguiendo el mismo proceso de limpieza que para anclas de acero, especificado en la sección 6.5 de esta Guía técnica.

c. Se deberá aplicar una imprimación de resina epóxica sobre la superficie de concreto y dentro de la perforación. Se deberá dejar que la imprimación se cure de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
d. Posteriormente, se aplica el *saturante* sobre la superficie de concreto y dentro de la perforación. Después se colocan las hojas de fibra sobre la superficie de concreto y se saturan con resina, según las recomendaciones del fabricante. En el proceso de colocación de las fibras, éstas deberán desplazarse cuidadosamente, sin cortarlas, alrededor de los agujeros para permitir la inserción de los conectores.
e. Se insertan los conectores en el agujero con resina y se acomodan las tiras de fibras para formar el abanico sobre la superficie de la fibra a conectar.
f. Se aplica una segunda capa de resina que sature a la fibra y al conector.
g. Curar el sistema de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Durante el periodo de curado de la resina se deberá tener cuidado con temperaturas extremas, contacto con el agua, polvo o suciedad, exposición excesiva a luz solar y alta humedad.

6.8.7 Requisitos de construcción

a) Se deben cumplir los requisitos establecidos en el capítulo 6 del 440.2R-17.
b) Antes de encamisar un elemento con CPRF, si es el caso, se debe reparar localmente el elemento (véase sección 6.1 de esta Guía técnica), especialmente si exhibe deterioro por corrosión (véase capítulo 7).
c) Se deberán usar productos certificados por un organismo nacional de certificación.
d) Cuando la aplicación dependa de la adherencia de las fibras al concreto existente (como en el caso de encamisados para incrementar la resistencia a la flexión), se debe preparar la superficie de concreto para garantizar la adherencia del CPRF. Se deberán seguir las instrucciones de los fabricantes de CPRF.
e) Cuando la aplicación dependa del contacto entre las fibras y el concreto existente (como en el caso de encamisados para incrementar el confinamiento de una zona), la superficie debe estar seca y limpia, libre de cualquier sustancia o defecto que pueda afectar el contacto entre el concreto existente y el CPRF. Se debe limpiar con un cepillo con cerdas rígidas.
f) No se aplicarán encamisados de CPRF en elementos que presenten corrosión en el acero de refuerzo, a menos de que se reparen, previamente, como se establece en el inciso 7.4.2 de esta Guía técnica.
g) La colocación de las fibras y resina, así como el curado de la resina se harán siguiendo las indicaciones del fabricante.
h) Se recomienda proteger el encamisado con cubiertas de plástico hasta que la resina termine su proceso de curado.

6.8.8 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Para llevar a cabo una correcta supervisión que garantice la calidad del proceso, se recomienda consultar el capítulo 7 de ACI 440.2R-17. Al menos, se observarán y registrarán los aspectos a a p siguientes:

a. Fecha y tiempo de instalación.
b. Temperatura ambiente, humedad relativa y observaciones generales del estado del clima.
c. Temperatura de la superficie del concreto.
d. Humedad de la superficie del concreto.
e. Método de pretratamiento de la superficie.
f. Descripción cualitativa de la limpieza de la superficie.
g. Tipo de fuente auxiliar de calor, en casos aplicables.
h. Tamaño de grietas no inyectadas con epóxicos.
i. Número de fibras o número de lotes de láminas precuradas y ubicación aproximada en la estructura.

j. Número de lotes, relaciones de mezcla, tiempo de mezclado y descripción cualitativa de la apariencia de todas las mezclas de resina, incluyendo los primarios *(primers)*, saturantes, resinas de regulación, adhesivos y mezclas de revestimiento.
k. Observaciones del progreso del curado de las resinas.
l. Conformidad con los procesos de instalación.
m. Resultado de pruebas de extracción: adherencia, modo de comportamiento y localización.
n. Propiedades del CPRF obtenidas mediante pruebas de paneles de muestra de campo o de paneles testigos, si son requeridos.
o. Ubicación y tamaño de cualquier delaminación y/o burbujas de aire.
p. Progreso general del trabajo.

El supervisor debe proporcionar al constructor, al proyectista, al corresponsable y al director los resultados de las pruebas en paneles. Éstos deben ser conservados por lo menos 10 años o durante el periodo especificado por el corresponsable. El contratista de la instalación debe conservar muestras de las mezclas de resinas y el registro de la ubicación de cada lote.

6.9 Encamisado de muros de mampostería

6.9.1 Deficiencia por corregir

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de comportamiento de la estructura existente, como resultado de la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que pueden ser rehabilitados para mejorar su desempeño sísmico mediante encamisado de muros de mampostería son:

a. Edificios de marcos resistentes a momento, de concreto o de acero, con muros diafragma, con o sin daño, cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio.
b. Edificios a base de muros de carga de mampostería, con o sin daño.

La técnica de encamisar muros de mampostería tiene como objetivo mejorar el comportamiento de los muros ante cargas sísmicas a través de:

- Incrementar la resistencia a fuerza cortante.
- Aumentar la capacidad de deformación inelástica.
- Aumentar la rigidez.
- Incrementar la capacidad a flexocompresión del muro cuando se añaden castillos en los extremos para anclar la malla.

Esta técnica puede ser utilizada en muros con cualquier grado de daño, como reparación, o en muros sin daño previo, como reforzamiento.

6.9.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

6.9.3 Descripción de la técnica

Consiste en el aumento de la sección transversal de un muro estructural de mampostería mediante la colocación de mallas de alambre soldadas, capas de CPRF[1] o barras corrugadas de acero cubiertas con varios centímetros de

[1] Por lo general, cuando se emplean encamisados con mallas o bandas de CPRF, no se utiliza material de recubrimiento (mortero o concreto), salvo el indicado para protegerlas de los rayos ultravioleta.



Figura 6.9.1
Ejemplo del uso de encamisado de muros de mampostería para rehabilitar una escuela. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

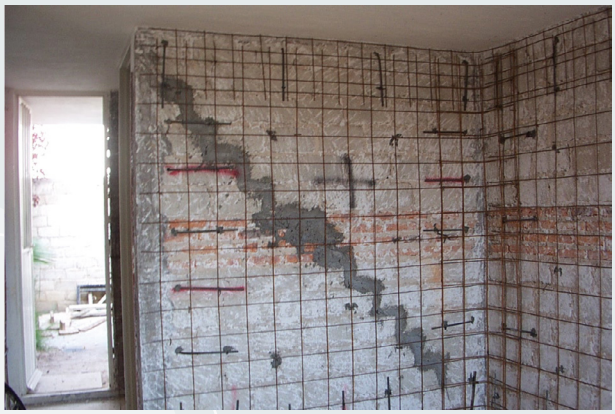


Figura 6.9.2
Práctica correcta: continuidad del refuerzo del encamisado en muros transversales mediante traslape de malla en forma de letra L. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (2003).

mortero de cemento o de concreto, colocados a mano o mediante lanzado. También se pueden encamisar los muros con ferrocemento o con concreto reforzado con fibras de acero. El encamisado puede ser completo, si rodea a todo el muro, o parcial, si sólo cubre una cara. Es usual que el encamisado se aplique solamente en una cara del muro, como en aquellos de colindancia en los cuales no se tenga acceso por el exterior. En la figura 6.9.1 se pueden observar las mallas de alambre soldadas colocadas sobre la mampostería, listas para ser recubiertas con mortero.

En caso de muros de mampostería simple o de muros mal confinados (según los requisitos de las NTC-Mampostería para mampostería confinada), se puede considerar construir nuevos castillos y dalas, en adición al encamisado de muros. La construcción de dalas es compleja y laboriosa; se recomienda aprovechar la losa como elemento de confinamiento. En tal caso, se deberá anclar el refuerzo longitudinal del castillo en la losa, ya sea mediante su paso continuo a través de ella o mediante un doblez a 90 grados.

6.9.4 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se cumplirá con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica. Se analizará la estructura suponiendo un factor de comportamiento sísmico consistente con el tipo de pieza del muro, ya sea sólida o hueca, según la definición de las NTC-Mampostería. Para el primer caso, se usará Q=2; para el segundo, Q=1.5.
c. Comportamiento monolítico. Para fines de análisis, se supondrá comportamiento monolítico entre la mampostería existente y el encamisado. Esto implica que el encamisado, y más específicamente la malla se conecte al muro de conformidad con las NTC- Mampostería de la Ciudad de México.
d. Carga axial. Si el muro es de carga, se supondrá que el muro existente resiste la carga

axial. Si se requiere, se deberá reforzar el muro por medio de inserción de castillos o adosando un muro al existente para resistir un incremento de la carga axial. Si el muro es diafragma o de relleno, se deberá considerar que no contribuye a resistir cargas verticales.

e. Factor de rigidez efectiva para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para el muro encamisado igual a 0.5, el cual afectará el módulo de rigidez a cortante del muro. En el cálculo de la rigidez lateral del muro, se aceptará incluir la aportación del mortero o concreto del encamisado.
f. Continuidad. Se debe cumplir con lo requerido en la sección 3.3 de las NTC-M de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). El encamisado de los muros de mampostería se debe extender a los muros transversales de manera continua, ya sea doblando la malla, o bien, traslapando un tramo de malla (figuras 6.9.2 y 6.9.3). De igual forma, el encamisado debe rodear las aberturas en el muro (figura 6.9.4).



Figura 6.9.3
Práctica no permitida: falta de continuidad del refuerzo del encamisado en muros transversales.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).



Figura 6.9.4
Práctica correcta: continuidad del refuerzo del encamisado en abertura mediante traslape de malla en forma de letra C.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1996).

6.9.5 Requisitos de diseño

6.9.5.1 Materiales

a) Si se emplean mallas de alambre soldado, éstas deberán cumplir con la NMX-B-290.
b) Si el encamisado es a base de mortero de cemento, éste deberá ser de tipo I, con una resistencia mínima especificada a la compresión de 12.5 MPa (125 kg/cm²). Se aceptará el uso de fibras de vidrio para el repellado de mortero de acuerdo con la dosificación del fabricante.
c) Si se emplea concreto para el encamisado, se usará concreto clase 1 con una resistencia mínima especificada a la compresión de 25 MPa (250 kg/cm²).
d) Si se emplean clavos para conectar la malla de alambre soldado a la mampostería, éstos deberán tener una longitud mínima de 50 mm.
e) Si se emplean conectores instalados a través de carga explosiva de potencia controlada, el tipo de carga (o de potencia) se determinará a partir de las recomendaciones del fabricante y mediante ensayes en sitio para verificar que la potencia sea la adecuada.
f) Se acepta el uso de alcayatas o grapas de barra de refuerzo o alambrón para fijar la malla a la mampostería. Estas barras se anclarán en barrenos practicados al muro con resina o mortero epóxico.
g) Si se emplean morteros o concretos con fibras metálicas o plásticas, se deberán dosificar las fibras de modo que su contribución a resistir fuerza cortante sea equivalente a la contribución de barras de acero de refuerzo

a) Clavos de potencia controlada

d) Grapa de barra de refuerzo o alambrón

e) Estribo abierto en forma de letra U



b) Conectores instalados a través de carga explosiva

c) Alcayatas

Figura 6.9.5
Ejemplos de conectores para usar en encamisados de muros de mampostería. Fuente: elaboración propia.

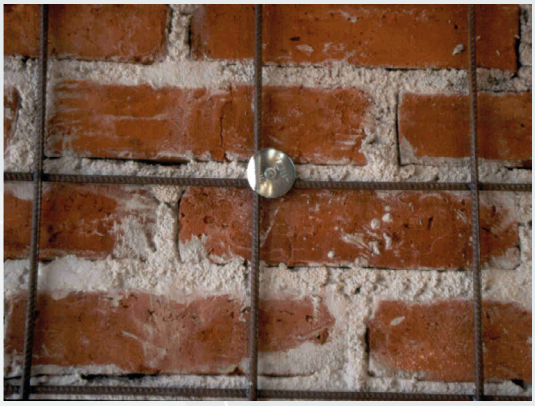


Figura 6.9.6
Conector instalado a través de carga explosiva de potencia controlada. Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1996)

convencional. Si se emplean fibras de acero, el contenido de fibras deberá ser de 40 kg/m³ y la relación de aspecto de la fibra (longitud/diámetro) mayor que 50, a menos que se justifique ante el corresponsable un contenido y relaciones de aspecto distintos.

En la figura 6.9.5 se ilustran ejemplos de conectores; en la figura 6.9.6 se muestra un conector instalado a través de carga explosiva de potencia controlada.

6.9.5.2 Requisitos geométricos

a) El espesor mínimo del mortero del encamisado será de 15 milímetros.
b) El espesor mínimo del concreto del encamisado será de 35 milímetros.

6.9.5.3 Resistencia al cortante de encamisados de malla de alambre recubierta con mortero

6.9.5.3.1 Tipo de refuerzo y cuantías de acero

Para el diseño de la malla de alambre soldado, así como del mortero a emplear en el encamisado, se debe contemplar lo siguiente:

a. Las mallas que se utilizarán para el encamisado deberán tener, en ambas direcciones, la misma área de refuerzo por unidad de longitud.
b. El esfuerzo de fluencia para diseño no deberá ser mayor que 500 MPa (5 000 kg/cm²).
c. Las mallas se anclarán y detallarán como se señala en los incisos 3.3.6.5 y 3.3.7.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). No se permite el uso de separadores o silletas entre la malla y el muro de mampostería.
d. Las mallas deberán ser continuas a lo largo del muro. No se permitirá traslapar las mallas en ninguna sección vertical del muro.
e. Las mallas deberán ser continuas en muros transversales. Se aceptará doblar la malla; si no es posible, se podrá traslapar un tramo de malla en forma de letra L.
f. En caso de que se necesite traslapar los alambres verticales de la malla, el traslape entre los alambres transversales extremos no será menor que dos veces la separación entre alambres transversales más 50 mm, de acuerdo con el inciso 3.3.7.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
g. Las cuantías mínimas y máximas del refuerzo deberán cumplir las establecidas en el inciso 5.4.4.2 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.9.5.3.2 Diseño de la malla de alambre soldado

El diseño de la malla para resistir fuerza cortante se hará de conformidad con el inciso 5.4.4.3 de las

NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

Se aceptará usar el procedimiento optativo del inciso 5.4.5 para diseñar la malla.

Se considerará que la malla se colocará en contacto directo con la mampostería.

6.9.5.4 Resistencia al cortante de encamisados de concreto con barras corrugadas de acero

6.9.5.4.1 Tipo de refuerzo y cuantías de acero

a. Se aceptará usar una capa de refuerzo horizontal y vertical de barras corrugadas de acero.
b. El esfuerzo de fluencia para diseño será de 420 MPa (4 200 kg/cm²).
c. El acero de refuerzo se conectará al muro de mampostería mediante anclas hechas a base de barras lisas o corrugadas instaladas con resina o mortero epóxico. También se podrán usar conectores instalados a través de carga explosiva de potencia controlada. En el diseño de las anclas o conectores se usarán los requisitos de la sección 5.4 de esta Guía técnica.
d. Las cuantías mínimas y máximas del acero de refuerzo del encamisado serán las indicadas en los incisos 7.4.2.4.c y 7.4.2.4.d de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.9.5.4.2 Diseño del acero de refuerzo corrugado del encamisado

a. El acero de refuerzo del encamisado con concreto se diseñará según el inciso 7.4.2.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
b. Puesto que la técnica de rehabilitación se usa para incrementar la resistencia a fuerza cortante y la capacidad de deformación lateral del muro, no será necesario anclar el refuerzo vertical del muro. Si se requiere aumentar la capacidad a flexocompresión del muro, se deberá seguir lo indicado en la sección 6.10 de esta Guía técnica.

6.9.6 Requisitos de construcción

6.9.6.1 Preparación del muro y reparación de grietas

a) Se debe tratar la superficie del muro antes de colocar el refuerzo y aplicar el mortero o el concreto para lograr un comportamiento monolítico de la mampostería con el encamisado. Se deben retirar los acabados y revestimientos del muro (yeso, morteros, azulejos, por ejemplo). Se deberá preparar la superficie de mampostería mediante un martelinado suave, con el fin de lograr una rugosidad de 3 mm (del orden de 1/8 pulg). Las superficies de los castillos y dalas se deberán preparar hasta una rugosidad de 6 mm (1/4 pulg). Previamente a la colocación del refuerzo del encamisado, la superficie de la mampostería deberá estar limpia.
b) Si los muros presentan daños, se deberán retirar los fragmentos y piezas sueltas de la superficie de la mampostería y se limpiará el polvo y las partículas en el interior de las grietas mediante un chorro de agua limpia.
c) Si el muro presenta agrietamiento moderado o severo, se deben reparar las grietas. Para la reparación de grietas se pueden emplear dos técnicas (véase Alcocer, 2019):
   i. Inyección. En este caso, las grietas se rellenarán con resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento sin contracción (con consistencia de lechada). Esta técnica se aplicará para los casos de muros de piezas sólidas con bajo número de grietas, las cuales deben estar bien definidas. De acuerdo con las NTC-Mampostería de la Ciudad de México, no se permiten inyecciones por el método de vacío. Los fluidos que sean inyectados deberán fluir correctamente a través de las grietas y vacíos, pero sin aumentar la segregación, sangrado y contracción plástica.

En la figura 6.9.7 se muestra una grieta rellenada con mortero.

ii. Rajueleo. Consiste en la colocación de pedazos de piezas en las grietas; se aplica cuando las grietas tienen espesores superiores a 5 mm (figura 6.9.8). Las rajuelas deben acuñarse y pegarse con mortero tipo I. Es necesario limpiar y humedecer las superficies que estarán en contacto con el mortero antes de colocarlo. Se sugiere utilizar fibra de vidrio o algún aditivo estabilizador de volumen en el mortero de pega para controlar los cambios volumétricos y la contracción por secado que pueda sufrir.

d) Si la mampostería está aplastada, será necesario sustituir las piezas por otras con características mecánicas y dimensiones similares. Análogamente, si los extremos del castillo, en el caso de mampostería confinada, están dañados por el agrietamiento inclinado del muro, se recomienda demoler y reconstruir con concreto. Este concreto deberá tener, al menos, la misma resistencia que el original. Se recomienda dejar una separación de 10 mm entre el concreto nuevo y el existente para ser rellenada después con mortero seco con estabilizador de volumen (véase Alcocer, 2019).

e) Si la estructura es de mampostería simple, o bien, de mampostería mal confinada, y se opta por añadir nuevos castillos y/o dalas, se deberá proceder como sigue:

i. Para nuevos castillos: se debe cumplir con lo requerido en el inciso 6.14.6, con excepción de considerar el espesor de la junta mencionado. Adicionalmente, se debe colocar el concreto del castillo por capas. Se recomienda construir el castillo por mitades para asegurar una buena compactación del concreto y, así, evitar oquedades. Si no se construye una dala, se deberá anclar el refuerzo longitudinal del castillo en la losa, ya sea atravesándola para darle continuidad en la altura, o mediante un gancho a 90 grados.

ii. Para nuevas dalas: apuntalar el sistema de piso. Retirar el número de hiladas para lograr un peralte de la dala de 140 mm. Preparar la cara inferior de la losa que estará en contacto con el nuevo concreto de la dala. Colocar el acero de refuerzo



Figura 6.9.7
Reparación de grietas mediante relleno con mortero.
Fuente: Flores et al. (2004).



Figura 6.9.8
Reparación de grietas por rajueleo.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1994).



Figura 6.9.9
Reemplazo de piezas aplastadas.
Fuente: Flores et al. (2004).





Figura 6.9.10
Reconstrucción de castillos dañados.
Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (1994).

longitudinal de la dala que se anclará en la unión con el castillo. Colocar el concreto a través de ranuras en la losa, usando una cimbra con resbaladilla.

6.9.6.2 Colocación de refuerzo del encamisado

Se debe cumplir con los incisos a a j siguientes:

a. Se podrá encamisar el muro por una o dos caras.
b. Las mallas de alambre soldado o capas de barras corrugadas de acero deben ser fijadas a los castillos —extremos e intermedios— y a las dalas (en caso de que estos elementos existan o se inserten) mediante anclajes. Se podrán usar clavos, anclas, grapas, estribos abiertos o cualquier otro conector que permita fijar la malla y transmitir la fuerza cortante. Si se usan conectores expansivos o adheridos (anclas), se deberán satisfacer los requisitos de la sección 6.5 de esta Guía técnica. Se acepta que las anclas tengan forma de letra L. Si se usan grapas o estribos abiertos, sus dobleces a 135 grados deberán abrazar las barras longitudinales del castillo existente. La separación máxima entre conectores, a lo largo de castillos y dalas, será de 450 mm. En las figuras 6.9.11 y 6.9.12 se muestran ejemplos del uso de anclas y de estribos abiertos para conectar el refuerzo del encamisado con elementos de confinamiento, respectivamente.
c. Con la intención de distribuir el agrietamiento en forma uniforme y obtener un comportamiento estable y con amplia disipación de energía, se usará una densidad mínima de 9 anclajes/m² en el muro de mampostería. Las mallas de calibre pequeño (8 y 10) pueden fijarse con clavos de 50 mm de longitud, colocados manualmente con martillo.
d. La separación máxima de conectores, en sentidos horizontal y vertical, será de 450 mm. Si se considera que las piezas son de mala calidad, la separación se puede reducir hasta a 250 mm cuando se esté utilizando malla de calibre pequeño (8 o 10); cuando se utilice un calibre mayor (4 o diámetros de 6.4 mm) se recomienda utilizar clavos de 51 mm de longitud con arandela, instalados mediante cargas explosivas de potencia controlada (figura 6.9.13).
e. La malla debe rodear ambos bordes verticales del muro (o castillos, en caso de que estos elementos existan), así como los bordes de las ventanas o aberturas que éste tenga.
f. Si la malla sólo se coloca en una cara del muro, deberá rodear los extremos del muro, así como

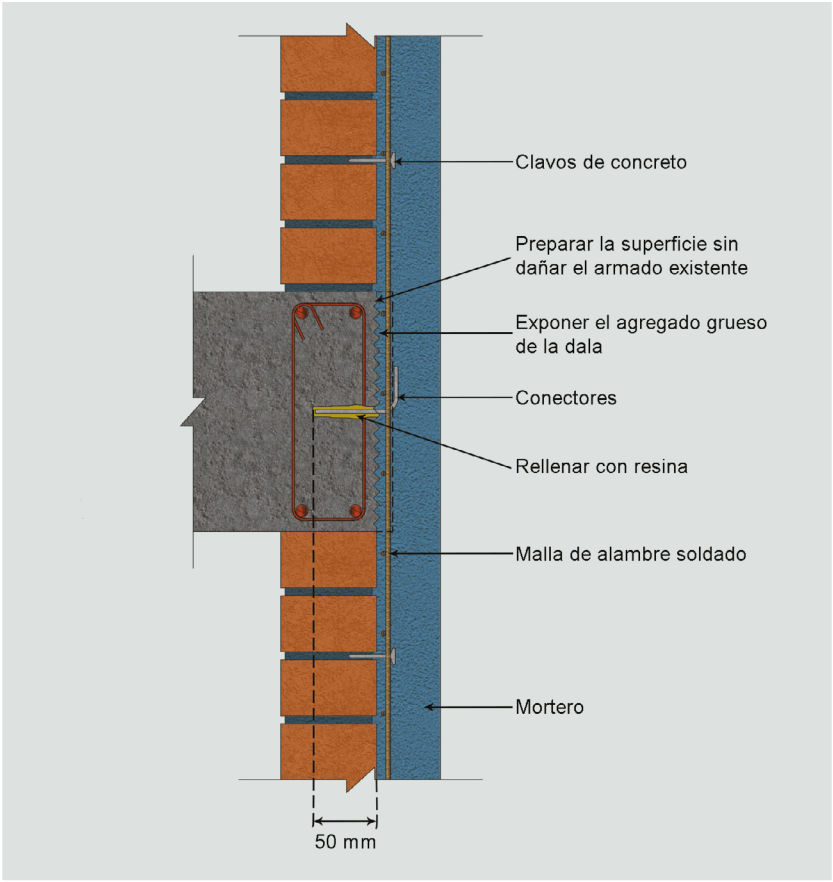
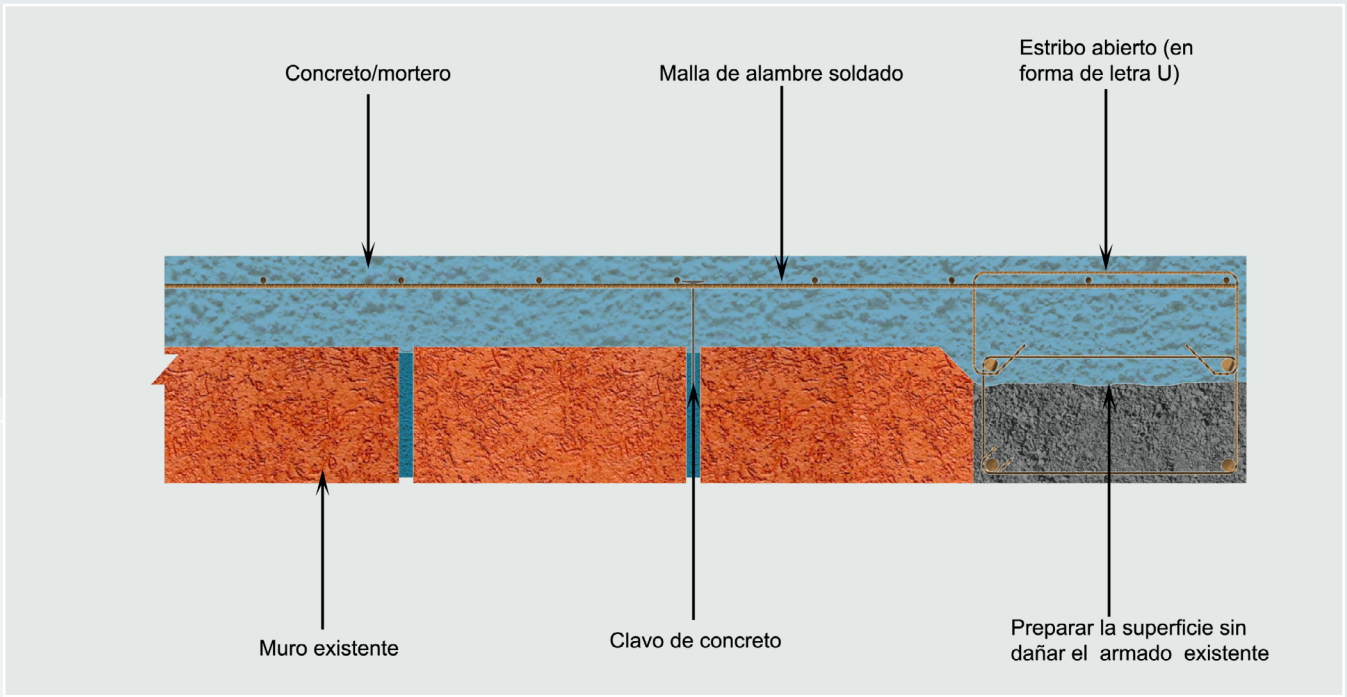


Figura 6.9.11
Detalle de la conexión del refuerzo del encamisado a dalas usando anclas a 90 grados. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.9.12
Detalle de la conexión del refuerzo del encamisado a castillos mediante estribos abiertos con dobleces a 135 grados. Fuente: elaboración propia.



extenderse al menos dos veces la separación entre alambres transversales y anclarse a la mampostería (figuras 6.9.14 y 6.9.15).

g. En caso de que la malla no pueda ser doblada y anclada alrededor de los bordes laterales del muro, de las aberturas o las ventanas, se deberá colocar un refuerzo en forma de letra "U" hecho con malla de calibre no inferior a 10 (3.43 mm de diámetro) que sea traslapado con la malla principal en una zona donde los esfuerzos en los alambres de la malla sean bajos. En el diseño de los traslapes se satisfarán los requisitos del inciso 3.3.7.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). En este inciso se considera que la unión de los extremos de las hojas de malla no será menor que dos veces la separación entre alambres más 50 mm (figura 6.9.16).

h. Si se encamisa el muro por ambas caras, se pueden fijar las mallas con clavos o alcayatas. Es aceptable usar conectores, en forma de grapas o estribos de alambrón, que atraviesen el espesor del muro para poder fijar las mallas en ambos lados. Para esto, es necesario perforar el muro, colocar el elemento de acero y rellenar el espacio libre del agujero con resina o mortero epóxico. En las figuras 6.9.17 y 6.9.18 se ejemplifica un encamisado total, usando grapas para sujetar las mallas de alambre soldado o las capas de barras de acero de refuerzo.

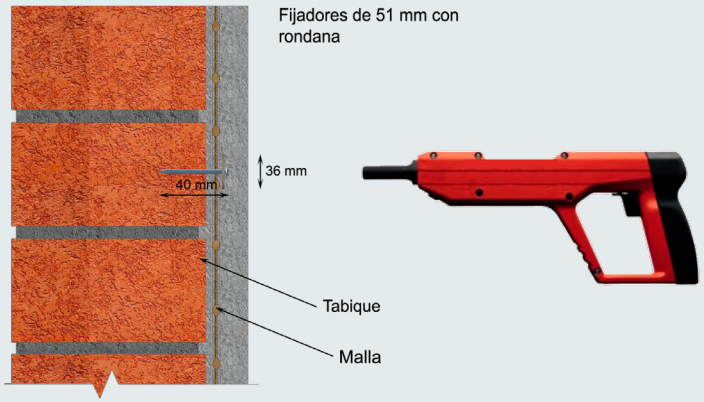
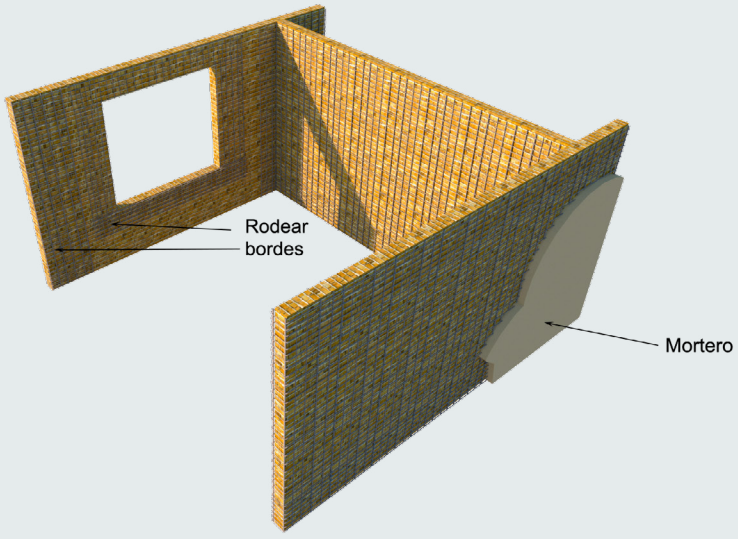


Figura 6.9.13
Anclaje de malla con conectores instalados mediante cargas explosivas de potencia controlada: Fuente: Alcocer (2019).



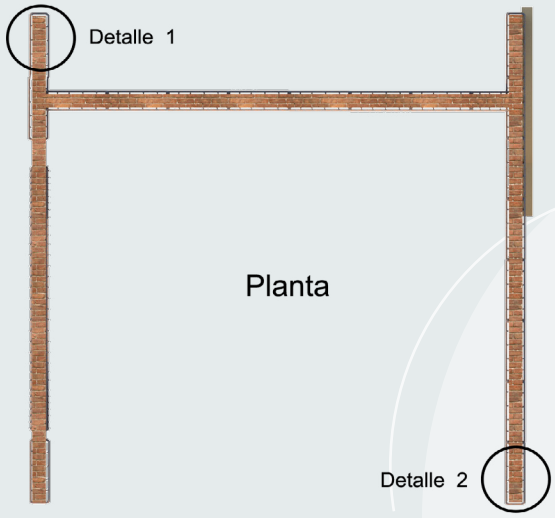
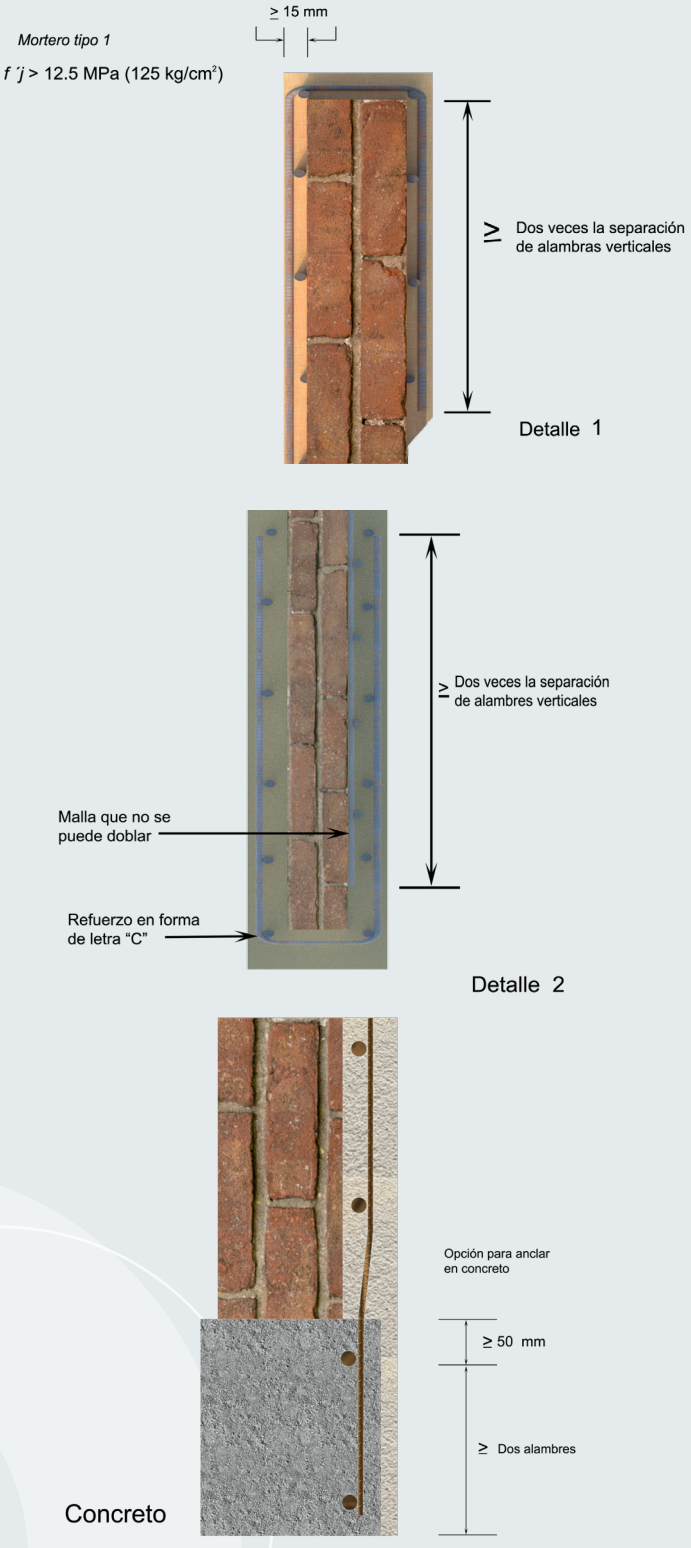
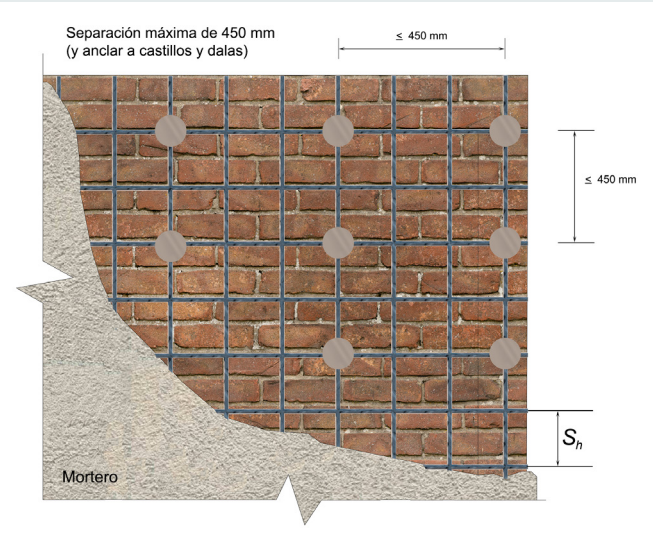


Figura 6.9.14
Colocación de malla de alambre soldado en la superficie de los muros de mampostería. Fuente: elaboración propia con base en NTC-Mampostería (2017).

Figura 6.9.15
Detalles para la colocación de malla de alambre soldado sobre muros de mampostería.
Fuente: elaboración propia con base en NTC-Mampostería (2017).





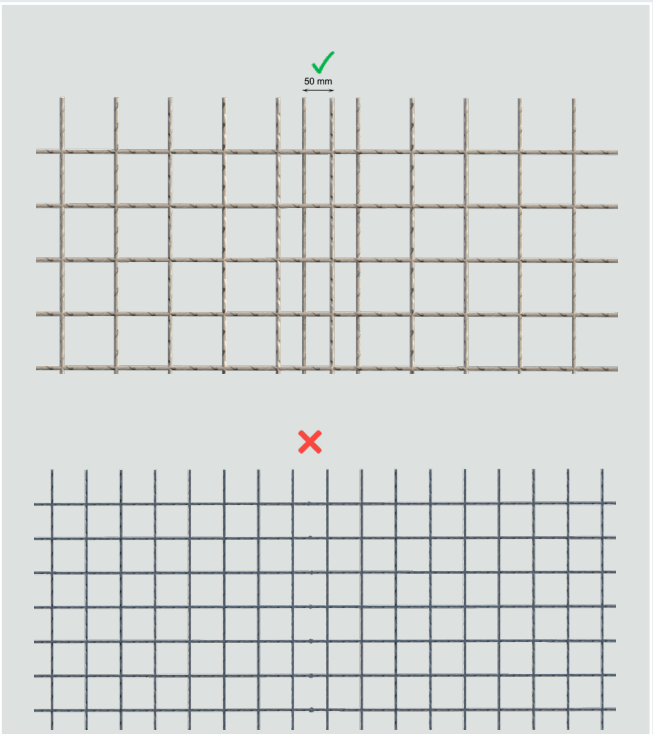
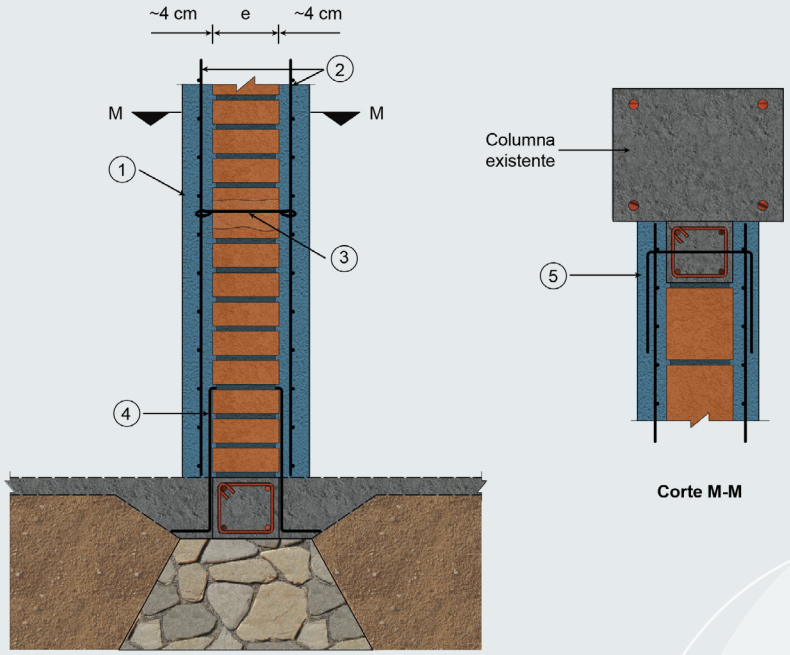


Figura 6.9.16
Traslape de malla de alambre soldado. Arriba se muestra un traslape adecuado; en el dibujo de abajo el traslape es incorrecto.
Fuente: elaboración propia con base en Flores et al. (2004).

Figura 6.9.17
Ejemplo de fijación de mallas de alambre soldado o de capas de barras de acero de refuerzo en dos caras del muro. Fuente: elaboración propia con base en De la Torre (1995).



Recubrimiento armado (encamisado) para reforzamiento de muros de mampostería

1. Capa de mortero colocada sobre el muro de mampostería.
2. Malla de alambre soldado o barras para armado de los aplanados.
3. Grapa para sujetar las dos mallas, colocadas a través de "cajas" o perforaciones hechas en el propio muro que a la vez servirán como conectores (separada @ 80 cm máx).
4. Barras ancladas al elemento estructural existente para traslaparse con la malla.
5. Dos capas de mortero, Tipo I, mínimo.

i. El refuerzo del encamisado del muro se deberá continuar en los muros transversales (figura 6.9.14, al menos una distancia igual a cuatro veces la separación entre alambres verticales. Si no se puede doblar la malla, se deberá colocar un refuerzo en forma de letra L hecho con malla de calibre no inferior a 10 (3.43 mm de diámetro) que sea traslapado con la malla principal o con la capa de barras de acero de refuerzo.

j. Cuando en el proyecto de rehabilitación se contemple la necesidad de extender el refuerzo hasta la cimentación, se deben ranurar las zapatas. Las dimensiones de las ranuras serán suficientes para poder colocar el armado del encamisado y el mortero o concreto. Las ranuras se deben limpiar de cualquier material que impida la adhesión del mortero o concreto de la camisa con el cimiento. Se recomienda que la ranura tenga distintas profundidades a lo largo del muro,



Figura 6.9.18
Sujeción de malla de alambre soldado mediante grapas (en forma de letra C). Fuente: archivo personal de Sergio Alcocer (2003).

de modo de formar una llave de corte para incrementar la resistencia al cortante por deslizamiento. Finalmente, se debe impermeabilizar el encamisado.

6.9.6.3 Colocación de mortero o concreto

Se debe cumplir con los incisos siguientes:

a. Antes de colocar el mortero sobre la malla o el concreto del encamisado, se deberá saturar la superficie del muro con agua.
b. El mortero se podrá colocar con medios manuales (figura 6.9.19) o con dispositivos neumáticos (lanzado) (figura 6.9.20). En caso de utilizar la técnica de lanzado, se debe tomar en cuenta la posibilidad de formación de huecos debido al rebote de la mezcla en la superficie de la estructura.
c. El concreto se podrá colocar por gravedad, preparando la cimbra para facilitar la salida del aire atrapado en el concreto. Se acepta el uso de concreto lanzado.
d. En la fabricación del mortero se usará arena bien graduada de conformidad con la norma NMX-C-111-ONNCCE.
e. El mortero y concreto se curarán de acuerdo con los requisitos del inciso 15.3.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se localice la escuela).
f. Para evitar agrietamiento por contracción en mortero o concreto lanzado, se deberán emplear aditivos, como humo de sílice, los cuales permiten incrementar el espesor de la capa a aplicar, aumentan la densidad de la mezcla, incrementan la resistencia a los agentes químicos, a factores térmicos, a la adherencia, a flexión y compresión, y disminuyen el rebote del material lanzado. También se pueden emplear fibras de polipropileno que reducen el agrietamiento por contracción plástica. Se aceptará colocar una capa adicional de malla de gallinero y así también poder controlar el agrietamiento prematuro.
g. El espesor del recubrimiento de mortero debe ser al menos de 15 mm en cada lado del muro.
h. El mortero será tipo I. Se deberán revisar las relaciones volumétricas recomendadas para morteros tipo I en la tabla 2.5.1 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
i. Si el encamisado es de concreto normal, el espesor mínimo será de 35 milímetros.





Figura 6.9.19
Colocación por medios manuales del mortero sobre la malla de alambre soldado. Fuente: Flores et al. (2004).

6.9.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se revisará que se cumpla con lo siguiente:

a. Se deberá constatar que los materiales a utilizar en el encamisado cumplan con las especificaciones establecidas en los planos de construcción y en las memorias de cálculo del proyecto ejecutivo de rehabilitación.
b. El mortero no deberá fabricarse en contacto con el suelo.
c. La dosificación del mortero deberá controlarse para obtener la resistencia de diseño.
d. Se debe verificar que los conectores estén firmemente instalados en la mampostería y concreto, con la cuantía y separación especificadas en los planos.
e. El refuerzo del encamisado se continuará en muros transversales, ya sea doblándolo, o bien, traslapando un refuerzo hecho con malla con calibre mínimo del número 10 (3.43 mm de diámetro).
f. Saturar con agua limpia la superficie del muro y de sus elementos confinantes, si existen, antes de colocar el mortero o concreto.
g. El mortero debe ser colocado en un tiempo menor o igual a dos horas posteriores a su fabricación, de lo contrario, éste debe ser desechado.



Figura 6.9.20
Colocación de mortero lanzado sobre la malla de alambres soldado. Fuente: CYPE (2020).

h. Se recomienda curar el mortero o concreto manteniendo un ambiente húmedo durante siete días.

6.9.8 Rehabilitación de edificios de adobe

Se aceptará rehabilitar edificios hechos a base de muros de adobes o de muros de tapia utilizando encamisados de malla y mortero. En Alcocer (2019) se pueden consultar otras técnicas.

El encamisado de muros de adobe deberá satisfacer los requisitos señalados en la figura 6.9.21.

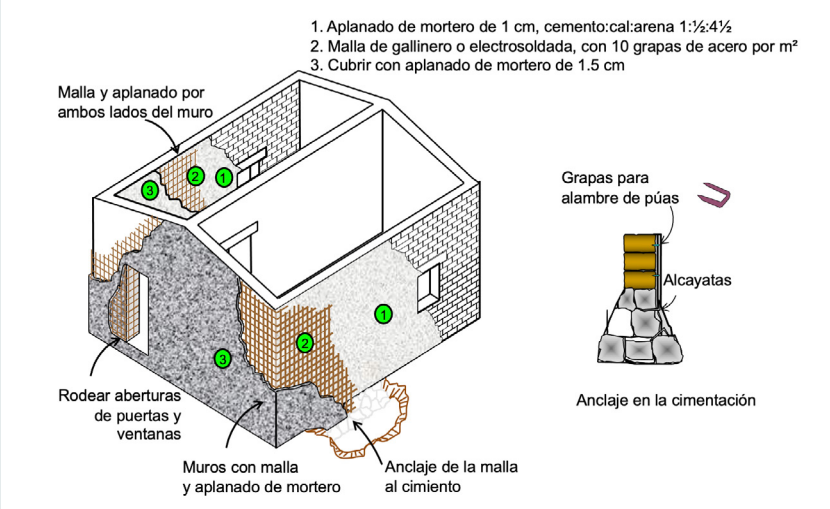
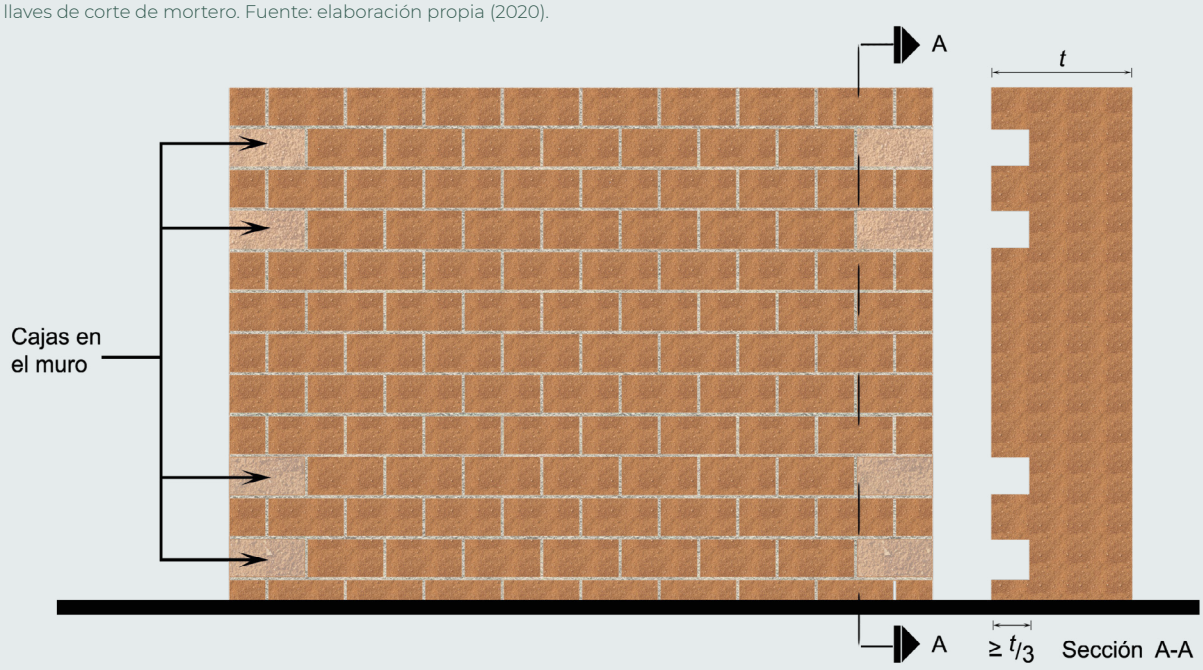


Figura 6.9.21
Rehabilitación de edificios de adobe con encamisado de malla y mortero. Fuente: cortesía del CENAPRED (2019).

Opcionalmente a las grapas de acero, se aceptará fijar la malla con alcayatas o con grapas de alambrón, si se encamisan los muros completamente (es decir, por ambas caras).

Para asegurar una adecuada adherencia entre el mortero del encamisado y el adobe, así como su permanencia en el tiempo, se deberán practicar cajas en el muro de adobe para crear llaves de cortante de mortero. En elevación, las cajas tendrán las dimensiones (altura y longitud) de los adobes; su profundidad mínima será de 1/3 del espesor del muro. Se deberán practicar, al menos, cuatro cajas en cada borde vertical de muro. En el caso de muros de tapia, las dimensiones, en elevación de las cajas, serán de 200 x 100 milímetros.

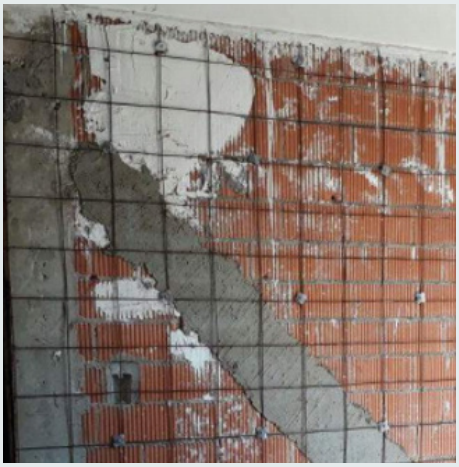
Figura 6.9.22
Dimensiones de cajas por practicarse en muros de adobe para formar llaves de corte de mortero. Fuente: elaboración propia (2020).



6.9.9 Uso en la infraestructura escolar

El encamisado de muros de mampostería ha sido uno de los tres métodos principales de rehabilitación de estructuras que el CAPFCE/INIFED ha empleado ante daños moderados a severos en la infraestructura educativa. Este método se emplea principalmente para rehabilitar muros de carga en prototipos Regionales de varias aulas. También se ha usado para rehabilitar muros diafragma en prototipos de concreto y de estructura metálica. A raíz de los sismos de 2017 se ha empleado para encamisar los muros de tabique de barro recocido en el prototipo Regional de Concreto. En estos casos se han empleado mallas 6x6 -10/10 fijadas a los muros con conectores instalados con cargas explosivas de potencia controlada. En las fotografías de la figura 6.9.23 se ilustra: a) una adecuada colocación de la malla que rodea los bordes verticales del muro; b) malla que rodea los bordes verticales del castillo. En contraste, en la figura 6.9.23.c la malla se interrumpe sin rodear el borde y sin traslapar otra malla, en forma de letra C, para rodearlo.





a y b. Práctica correcta de rodear bordes de aberturas



c. Práctica incorrecta de cortar el armado del encamisado en el borde, sin darle continuidad alrededor de él

Figura 6.9.23
Rehabilitación de escuelas con encamisado de muros de mampostería. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

6.10 Adición de muros de concreto

6.10.1 Deficiencia por corregir

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

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

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

Con la adición de muros de concreto se puede:

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

6.10.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

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

Figura 6.10.1
Muros patín como técnica de rehabilitación. Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma y cortesía del CENAPRED (2019).



6.10.3 Descripción de la técnica

Consiste en la colocación de muros de concreto para incrementar la rigidez y resistencia lateral de la estructura existente. Con ellos se logra obtener una capacidad de deformación adecuada. Es muy probable que la adición de muros obligue a incrementar la capacidad de la cimentación. En todo caso, es crítica la unión del muro nuevo con la cimentación existente de modo que el muro pueda desarrollar su capacidad de diseño.

Los nuevos muros de concreto se pueden clasificar en muros patín, muros completos, muros diafragma o incrementos de espesor (encamisados) de los muros existentes.

6.10.3.1 Muros patín

Los muros patín son segmentos cortos de muros unidos a las caras laterales de la columna diseñados para incrementar su resistencia lateral (figura 6.10.1). Se utilizan para aumentar la resistencia a cortante de la columna, cambiando el modo de comportamiento controlado por las columnas a uno controlado por las vigas. La colocación del muro patín obliga a revisar las vigas (y tal vez rehabilitarlas) de modo que exhiban un comportamiento dúctil controlado por flexión. Se deberá examinar la resistencia a cortante de la viga y, en su caso, incrementarla, puesto que el claro libre de las vigas se reduce por la longitud del muro lateral. También se pueden usar en edificios a base de losas planas; en este caso, se revisará la resistencia a cortante en dos direcciones de la losa suponiendo que el perímetro crítico de cortante es el delimitado por el extremo de los nuevos segmentos de muro.

Los muros patín pueden ser colados en obra o prefabricados. Esta técnica es más apropiada cuando las vigas son excéntricas a las columnas, ya que facilitan el paso del refuerzo longitudinal a través del sistema de piso o viga, según sea el caso. Se deben colocar los muros de manera simétrica en planta y deben ser continuos en la altura para evitar una distribución no uniforme de la resistencia y rigidez de los marcos. Es recomendable que el eje del muro patín se encuentre alineado con el eje de la columna y se coloquen dos muros simétricos en cada lado de la columna.

El comportamiento de muros patín está determinado por la calidad en la colocación y compactación del concreto del nuevo muro. Por ello, se deberá diseñar la cimbra y la mezcla de modo de evitar aire atrapado, oquedades, segregación, entre otros. Obsérvese en la figura 6.10.1 que los estribos terminan en dobleces a 90 grados, el cual es un detalle inadecuado para elementos sujetos a fuerzas laterales cíclicas que produzcan deformaciones inelásticas en ellos.

6.10.3.2 Muros completos

La modalidad más común en la construcción de nuevos muros es que tengan una longitud igual a la de la crujía del marco. Ésta es muy efectiva para controlar los desplazamientos laterales y para reducir el daño en el marco. Los muros pueden ser construidos en el sitio con concreto normal o concreto lanzado. Para reducir tiempo y costo, se pueden construir con paneles prefabricados de distintas dimensiones. Los muros pueden ser:

a. Concéntricos, cuando su eje longitudinal es colineal con el eje del marco y su refuerzo es continuo en la altura a través del sistema de piso (véase el armado de un muro concéntrico en la figura 6.10.2).
b. Excéntricos, cuando se instalan por fuera de la estructura original y su refuerzo es continuo en la altura del edificio (figura 6.10.3).
c. Diafragma, son similares a los concéntricos, pero su refuerzo vertical no es continuo en la altura del edificio (figura 6.10.4).

Figura 6.10.2
Armado de un muro concéntrico añadido a la estructura. Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).



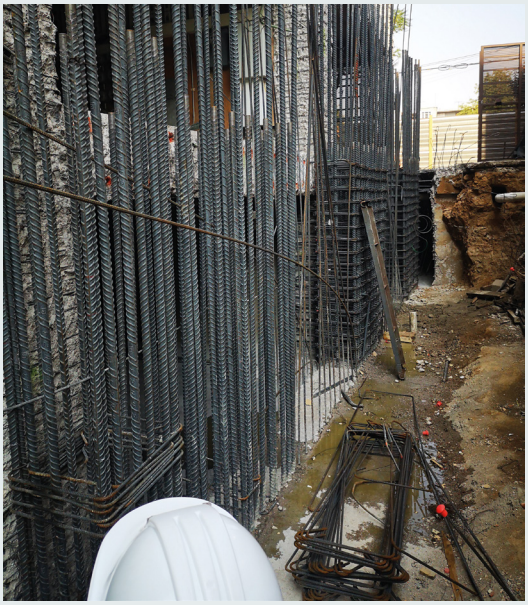


Figura 6.10.3
Refuerzo de un muro de concreto excéntrico. Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).



Figura 6.10.4
Muro diafragma construido dentro de la crujía de un marco. Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

Los muros de cortante con una relación de esbeltez baja $(H/L< 1.5)$ tienen un comportamiento dominado por corte (tensión diagonal) caracterizado por una rápida degradación de la resistencia y rigidez, así como una reducida capacidad de deformación plástica. Los muros esbeltos $(H/L \geq 3)$ actúan esencialmente como vigas en voladizo y su comportamiento está gobernado por la flexión. Entre H/L igual a 1.5 a 3, el comportamiento es mixto, con agrietamiento por flexocompresión (grietas horizontales e inclinadas) y curva carga-desplazamiento menos dúctil que la de muros esbeltos.

Puesto que los nuevos muros se conectan a una estructura ya deformada y que soporta su propio peso, la carga axial sobre el nuevo muro es generalmente reducida, en comparación con muros de concreto en estructuras nuevas que se construyen monolíticamente con el resto del edificio.

En el diseño de los nuevos muros para una estructura rehabilitada se debe considerar la jerarquía de modos de comportamiento, con objeto de promover la ocurrencia de modos dúctiles. Cuando ello no sea posible, como en el caso de muros robustos, se deberá revisar que la falla por corte de los muros no desencadene la inestabilidad local o total del edificio.



Figura 6.10.5
Refuerzo helicoidal vertical para confinar traslapes en muros.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

El refuerzo longitudinal debe ser continuo en toda la altura del muro, pasando por la losa y las vigas, de preferencia sin traslapes. Este refuerzo se debe anclar a la cimentación, de modo que sea capaz de desarrollar su esfuerzo especificado de fluencia.

Los elementos de refuerzo en los extremos de los muros se deben diseñar de acuerdo con el inciso 6.10.5.3 de esta Guía técnica. Estos elementos de refuerzo deberán contar con refuerzo transversal con la cuantía y separaciones necesarias para confinar el concreto sujeto a compresión y así evitar el aplastamiento del concreto, así como evitar o retrasar el pandeo del acero a compresión. Es frecuente que la adición de muros incluya el encamisado de las columnas extremas, en cuyo caso trabajarán como elementos de refuerzo del muro.

Si no se encamisan las columnas, el refuerzo horizontal del muro se debe unir a las columnas existentes por medio de traslapes con anclas ahogadas en el marco. Estudios experimentales han demostrado que este tipo de conexión es suficiente para lograr una adecuada transmisión de fuerzas entre el nuevo muro y la estructura existente.

Optativamente, con objeto de confinar la zona del traslape entre el acero de refuerzo del nuevo muro y las anclas de unión, se puede colocar refuerzo transversal en los extremos del muro (como parte de los elementos de refuerzo) o refuerzo helicoidal o zuncho (adyacente a las caras de las columnas) (figura 6.10.5). El paso del refuerzo helicoidal será de 50 mm. La longitud de traslape será calculada con la sección 6.6 de las NTC–Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), suponiendo un índice de refuerzo transversal igual a cero, a menos de que se coloque refuerzo transversal o helicoidal, en cuyo caso se

deberá calcular el índice de refuerzo transversal, K_{tr}, correspondiente.

El comportamiento de muros concéntricos está determinado por la calidad en la colocación y compactación del concreto del nuevo muro. Por ello, se deberá diseñar la cimbra y la mezcla de modo de evitar aire atrapado, oquedades, segregación, entre otros.

6.10.3.3 Muros diafragma

En caso de colocar muros dentro de las crujías, se revisará la resistencia a cortante de las columnas para que sea suficiente para soportar al menos la mitad de la resistencia a cortante del muro diafragma. Se revisará el muro diafragma para tres modos de comportamiento: tensión diagonal, compresión diagonal y deslizamiento.

Para que esta técnica de rehabilitación sea efectiva, es esencial diseñar y construir un mecanismo de transmisión de esfuerzos de cortante entre el nuevo muro y la estructura existente mediante una o la combinación de las siguientes soluciones: anclas o conectores instalados *a posteriori,* llaves de corte o anclando el nuevo refuerzo en elementos existentes. Una posibilidad es anclar el acero de refuerzo del muro dentro de barrenos con resina epóxica. Esta solución es posible si el diámetro del refuerzo del muro es bajo, de modo que la barra se pueda doblar ligeramente para colocarla dentro del barreno con resina epóxica. Otra solución más práctica consiste en traslapar el refuerzo del muro con anclas ahogadas en las columnas y vigas/losa perimetrales. La longitud de traslape será calculada con la sección 6.6 de las NTC–Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), suponiendo un índice de refuerzo transversal, K_{tr}, igual a cero, a menos de que se coloque refuerzo transversal o helicoidal con paso de 50 mm, como el mostrado en la figura 6.10.5, en cuyo caso se deberá calcular el índice de refuerzo transversal correspondiente.

El comportamiento de muros colocados en las crujías está determinado por la calidad en la colocación y compactación del concreto del nuevo muro. Por ello, se deberá diseñar la cimbra y la mezcla de modo de evitar aire atrapado, oquedades, segregación, entre otros.

6.10.3.4 Incremento de espesor de muros existentes

Una variante de añadir muros de concreto es la construcción de una capa de concreto reforzado sobre el muro existente (figura 6.10.6). Esta capa, de varios centímetros, se diseña para trabajar monolíticamente con el elemento existente. De este modo, se pueden sumar las contribuciones a la resistencia y rigidez de ambos elementos. Para ello, se debe revisar la necesidad de conectar el



Figura 6.10.6
Incremento de espesor de muros existentes y detalle de anclas a 90 grados.
Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).

nuevo muro (o capa de concreto reforzado) al existente con conectores o anclas diseñados para resistir el cortante rasante (véase sección 6.5 de esta Guía técnica).

6.10.3.5 Cimentación

Se deberá revisar la capacidad estructural de la cimentación y la resistencia del suelo debido al incremento de peso del edificio por la adición de los muros, así como por el cambio en las demandas por sismo (carga axial y momento). Asimismo, se deberá diseñar el anclaje del nuevo muro a la cimentación de modo que sea capaz de desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia. Si se espera que ocurran deformaciones inelásticas en la base del muro, el anclaje del refuerzo vertical del nuevo muro deberá ser capaz de resistir 1.25 f_y.

6.10.4 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se debe cumplir con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica.
c. Carga axial. Para fines de diseño, se considerará que la carga axial en el muro añadido es nula; se podrá considerar su peso propio. Se supone que la carga vertical del edificio es resistida por la estructura existente, normalmente a base de columnas. Ante nuevas demandas sísmicas, las fuerzas axiales en las columnas, convertidas ahora en elementos de refuerzo del muro, aumentarán o disminuirán en función de la flexión que resista el nuevo muro conectado a ellas. Estos cambios en las fuerzas axiales se deberán tomar en cuenta en el diseño.
d. Comportamiento monolítico. Se supondrá que existe un adecuado mecanismo de transmisión de esfuerzos entre el muro y la estructura existente de modo que el comportamiento sea monolítico. Se deberán cumplir los requisitos del inciso 4.3.3.3 de esta Guía técnica.
e. Restricción a flexión. Se deberá revisar la posible restricción a la deformación global a flexión de los nuevos muros por parte de sistemas de piso o vigas de gran peralte, como las descritas en el inciso 10.3.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
f. Factor de rigidez relativa para un análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva de conformidad con el inciso 3.2.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.10.5 Requisitos de diseño

6.10.5.1 Alcances y requisitos generales

Se aplicará lo requerido en la sección 8.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Adicionalmente:

a) El espesor mínimo de los muros no será menor que 150 mm ni que 0.06 veces la altura no restringida lateralmente. En muros diafragma, el ancho del muro no será mayor que el ancho de la viga del marco existente.
b) Separación entre barras de refuerzo. La separación libre entre barras paralelas no será menor que el diámetro nominal de la barra, ni que 1.5 veces el tamaño máximo del agregado.
c) Tamaño máximo de agregado. El tamaño nominal máximo de los agregados no debe ser mayor que un quinto de la menor distancia horizontal entre caras de los moldes, ni dos tercios de la separación horizontal libre mínima entre barras.
d) Paquete de barras. No se permitirán paquetes de barras en el alma del muro. Se permitirá formar paquetes de dos barras en los elementos de refuerzo de un muro.
e) Recubrimiento. El recubrimiento libre de toda barra de refuerzo no será menor que su diámetro, ni menor que 20 milímetros.
f) La resistencia del concreto no será menor de 25 MPa (250 kg/cm²), ni menor que la resistencia de la estructura existente.
g) Si se emplean morteros o concretos con fibras metálicas o plásticas, se deberán dosificar las fibras de modo que su contribución a resistir fuerza cortante sea equivalente a la

contribución de barras de acero de refuerzo convencional. Si se emplean fibras de acero, el contenido de fibras deberá ser de 40 kg/m³ y la relación de aspecto de la fibra (longitud/diámetro) mayor que 50, a menos de que se justifique ante el corresponsable un contenido y relaciones de aspecto distintos.

6.10.5.2 Momentos flexionantes de diseño

Se aplicará lo establecido en el inciso 7.4.2.2 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.10.5.3 Flexión y flexocompresión

Se aplicará lo establecido en el inciso 7.4.2.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) con la excepción del inciso 7.4.2.3.c.

Si se usa el método optativo del inciso 7.4.2.3.a de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), se concentrará el acero a tensión en una longitud igual a 0.25 L, donde L es la longitud del muro.

Se deberá incluir un elemento de refuerzo en cada extremo del muro o del segmento de muro (se entiende por segmento de un muro a la porción de éste entre aberturas o entre una abertura y un borde vertical, como el caso de un muro patín) con las siguientes características (figura 6.10.7):

a. El elemento de refuerzo se extenderá en una distancia de 1/5 de L a partir de la fibra extrema en compresión. El elemento de refuerzo podrá incluir parte o toda la columna existente o la columna existente y parte del alma del nuevo muro. Si se encamisan las columnas, el elemento de refuerzo podrá incluir parte o toda la columna encamisada o la columna encamisada y parte del alma del nuevo muro.
b. Cuando el muro se conecte a una columna existente, se deberá revisar que ésta resista la fuerza de compresión y tensión producto de la flexión conjunta marco existente-nuevo muro debida al sismo, en adición a la carga axial que obra sobre la columna al momento de conectar el nuevo muro.
c. El acero de refuerzo vertical de un elemento de refuerzo no será menor que $2.8/f_y$, en MPa, ($28/f_y$, en kg/cm²). Para su cálculo se considerará el refuerzo longitudinal de la columna original si éste puede desarrollar su esfuerzo de fluencia.
d. El refuerzo vertical del elemento de refuerzo en el muro debe restringirse contra el pandeo con estribos o grapas con separación no mayor que la menor de i, ii o iii:
   i. 8 veces el diámetro de la barra longitudinal o de la barra más delgada del paquete.
   ii. 24 diámetros de la barra del estribo.
   iii. La tercera parte de la menor dimensión del elemento de refuerzo.
e. La suma de las áreas de estribos y grapas, A_{sh}, en cada dirección de la sección del elemento de refuerzo, no será menor que la obtenida a partir de las ecuaciones 9.3.2 y 9.3.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
f. El refuerzo transversal en el elemento de refuerzo debe estar formado por estribos hechos por dos piezas, sencillos o sobrepuestos, de diámetro no menor que 9.5 mm (número 3) y rematados como se indica en el inciso 7.3.4.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Puede complementarse con grapas del mismo diámetro que los estribos, separadas igual que éstos a lo largo del miembro. Cada extremo de una grapa debe abrazar a una barra longitudinal de la periferia con un doblez de, al menos, 135 grados seguido de un tramo recto de al menos seis diámetros de la grapa, pero no menor que 80 milímetros.
g. Si el elemento de refuerzo del muro será una columna existente, se deberá revisar que se cumplen los incisos d a f inmediatos anteriores.

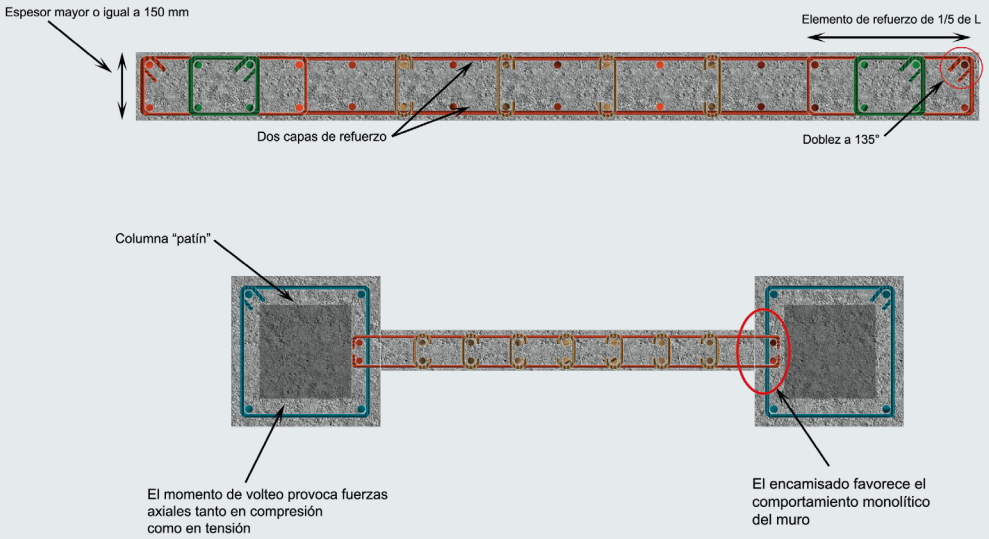


Figura 6.10.7
Elementos de refuerzo en cada extremo del muro o del segmento de muro.
Fuente: elaboración propia.

6.10.5.4 Fuerza cortante

Se aplicará lo establecido en el inciso 7.4.2.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) con excepción del inciso 7.4.2.4.c.

Las cuantías de p_m y p_n no serán menores de 0.0025, donde:

p_m cuantía de refuerzo paralelo a la dirección de la fuerza de diseño calculada con la ecuación 7.4.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

p_n cuantía de refuerzo perpendicular a la fuerza cortante de diseño calculada con la ecuación 7.4.5 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

El refuerzo se colocará uniformemente distribuido con separación no mayor de 350 mm. Se pondrán dos capas, cada una próxima a la cara correspondiente del muro.

El refuerzo horizontal de muros debe cumplir con a o b:

a. Ser anclado en las columnas extremas de manera que pueda alcanzar el esfuerzo especificado de fluencia.
b. Ser traslapado con anclas o conectores instalados *a posteriori* en las columnas existentes. El traslape se diseñará de conformidad con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), suponiendo un índice de refuerzo transversal, K_{tr}, igual a cero. Se aceptará confinar la zona del traslape por medio de refuerzo transversal o helicoidal con paso máximo de 50 mm, en cuyo caso se deberá calcular el K_{tr} correspondiente. A lo largo de la unión entre el nuevo muro y la columna, se preparará toda la superficie de la columna hasta lograr una rugosidad de 6 mm (1/4 pulg).

En la figura 6.10.8 se muestran ejemplos de traslapes del refuerzo horizontal de muros en las columnas extremas. Obsérvese que en algunos casos el traslape con el ancla ahogada en el marco existente ocurre en elementos de refuerzo del muro con elevadas cuantías de refuerzo longitudinal y transversal. Esta solución es idónea, ya que el refuerzo transversal del nuevo muro confina el concreto alrededor del extremo del ancla en el muro, mejorando su comportamiento a la adherencia.

El refuerzo vertical de muros debe cumplir con a y b (figura 6.10.9):



Figura 6.10.8
Ejemplos de traslapes del refuerzo horizontal de muros de concreto en columnas extremas del marco. Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).

a. Ser anclado en la cimentación de la estructura de manera que pueda alcanzar el esfuerzo especificado de fluencia. Si se espera que ocurran deformaciones inelásticas en la base del muro, el anclaje del refuerzo vertical del nuevo muro deberá ser capaz de resistir 1.25 f_y.
b. Ser continuo en la altura del edificio (figura 6.10.9.a), o bien, unirse mediante traslapes, con anclas o conectores post-instalados en las vigas existentes (figura 6.10.9.b). El traslape se diseñará de conformidad con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), suponiendo un índice de refuerzo transversal, K_{tr}, igual a cero. Se aceptará confinar la zona del traslape por medio de refuerzo transversal o helicoidal con paso máximo de 50 mm, en cuyo caso se deberá calcular el K_{tr} correspondiente. A lo largo de la unión entre el nuevo muro y la viga, se preparará toda la superficie de la viga hasta lograr una rugosidad de 6 mm (1/4 pulg).

En ningún caso se aceptará soldar el refuerzo del nuevo muro al refuerzo existente, ni a las anclas o conectores post-instalados.

a) Refuerzo vertical continuo a través de las losas



b) Anclas ahogadas en el sistema de piso inferior para ser traslapadas con las barras de refuerzo vertical del nuevo muro



Figura 6.10.9
Ejemplos de soluciones de continuidad del refuerzo vertical de nuevos muros de concreto.
Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).

Se deberá revisar que la resistencia a cortante del muro sea menor que la resistencia a cortante rasante del muro con el marco existente.

Se deberá revisar la resistencia por cortante fricción en el desplante del muro, de modo que sea superior a la requerida.

Se aceptará considerar la contribución de la resistencia a cortante de las columnas existentes a la resistencia a cortante del muro, si éstas no tienen daño moderado o severo y si la estructura fue diseñada con la versión de 1987 o con una versión posterior a ésta.

Las anclas y conectores post-instalados se diseñarán de acuerdo con la sección 6.5 de esta Guía técnica.

No se permite traslapar las barras de acero horizontal del muro a lo largo del alma.

En muros diafragma, se acepta traslapar el refuerzo vertical con anclas adheridas a las vigas o sistema de piso superior e inferior. En muros completos, se permite traslapar las barras de acero vertical del muro, ya sea en el alma o en el elemento de refuerzo, a partir del tercer piso.

Se aceptará el uso de concreto con fibras metálicas para reducir la cuantía de refuerzo horizontal y vertical del alma del muro, únicamente si las cuantías p_m y p_n son las mínimas permitidas, es decir, 0.0025. En este caso, el contenido de fibras de acero será de 40 kg/m³ y la relación de aspecto de la fibra (longitud/diámetro) mayor que 50. Las fibras deberán ser certificadas por organismos nacionales de certificación.

6.10.5.5 Muros con aberturas

Si el muro posee aberturas, se deberá considerar su influencia en la capacidad a flexión y cortante. Se deberá verificar que alrededor de las aberturas se pueda desarrollar un flujo de fuerzas tal que no exceda la resistencia de los materiales y que esté en equilibrio con el sistema de acciones o fuerzas internas de diseño (momentos flexionantes, cargas axiales, fuerzas cortantes). Se podrá utilizar el método de puntales y tensores del Apéndice B de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.10.5.5.1 Fuerza cortante

En muros con aberturas, para evaluar la fuerza cortante que toma el concreto en los segmentos verticales entre aberturas o entre una abertura y un borde, se tomará la mayor relación altura a longitud entre la del muro completo y la del segmento considerado.

Se proporcionará refuerzo en la periferia de toda abertura para resistir las tensiones que puedan presentarse. Como mínimo, deben colocarse dos barras de 12.7 mm de diámetro (número 4), o su equivalente, a lo largo de cada lado de la abertura. El refuerzo se prolongará una distancia no menor que su longitud de desarrollo, L_d, desde las esquinas de la abertura.

Las aberturas deben tomarse en cuenta al calcular las rigideces y resistencias.



Figura 6.10.10
Anclaje del refuerzo vertical de un nuevo muro diafragma en agujeros con resina epóxica.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

6.10.5.6 Unión con el sistema de piso

En el caso de muros diafragma, se anclará el refuerzo vertical del muro en los sistemas de piso inferior y superior como se explica en el inciso 6.10.3.3 de esta Guía técnica (figura 6.10.10).

Cuando el acero de refuerzo vertical de los muros sea continuo en la altura, se podrá ejecutar una ranura en la losa, o bien, demoler parte de la viga con un ancho igual al espesor del muro (figura 6.10.11). Se deberán tomar las precauciones para no dañar el acero de refuerzo original. Si es necesario, se deberá apuntalar y/o arriostrar la estructura.



Figura 6.10.11
Demolición de concreto de sistema de piso para dar continuidad al refuerzo vertical del muro.
Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).

Alternativamente, se podrán utilizar los detalles de las figuras 6.10.12 y 6.10.13 aplicables a estructuras con losas macizas, y de las figuras 6.10.14 y 6.10.15 para estructuras con losas nervadas o reticulares. En estos detalles, la continuidad del acero de refuerzo vertical se logra mediante el traslape del refuerzo del muro con anclas o barras de acero de refuerzo que pasan a través de ranuras y agujeros en el sistema de piso. La función de las ranuras es proporcionar una ventana para la colocación y la compactación del concreto del muro inferior. En el caso de que las nervaduras sean perpendiculares al muro o en el caso de una losa reticular, debido a la dificultad de pasar el refuerzo horizontal del muro a través de las nervaduras, puede ser necesaria la colocación de uno o dos estribos o grapas horizontales entre dos nervaduras, como se muestra en la figura 6.10.15.

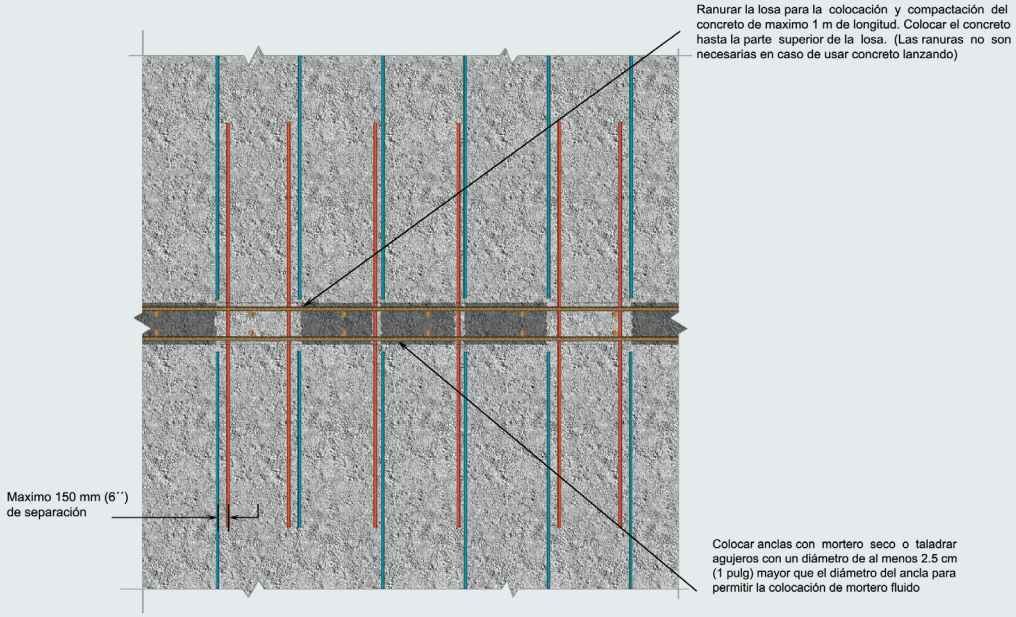


Figura 6.10.12
Detalle del anclaje del refuerzo vertical de un muro en edificios con losas macizas.
Fuente: elaboración propia con base en FEMA-547 (2006).

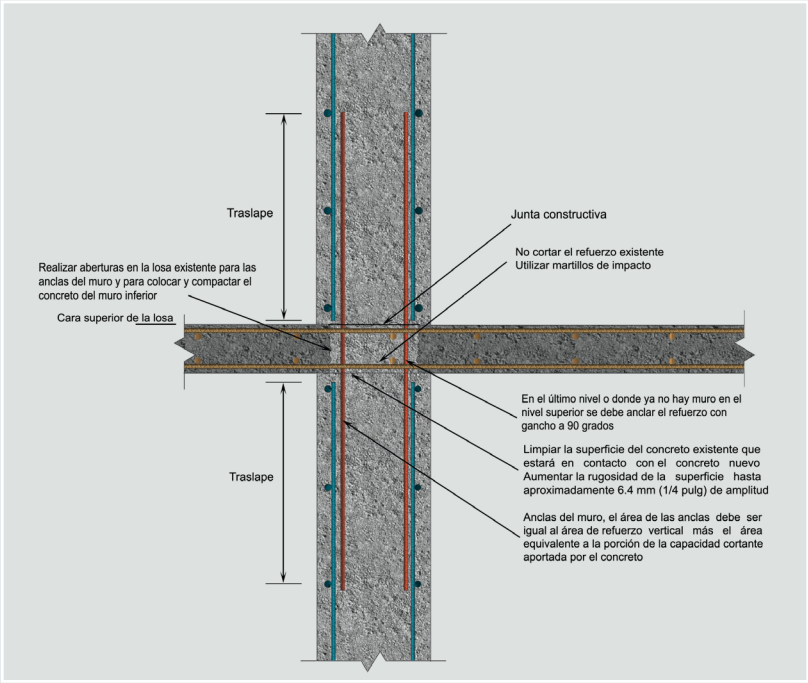


Figura 6.10.13
Detalle del anclaje del refuerzo vertical de un muro en edificios con losas macizas -Sección A-A.
Fuente: elaboración propia con base en FEMA-547 (2006).

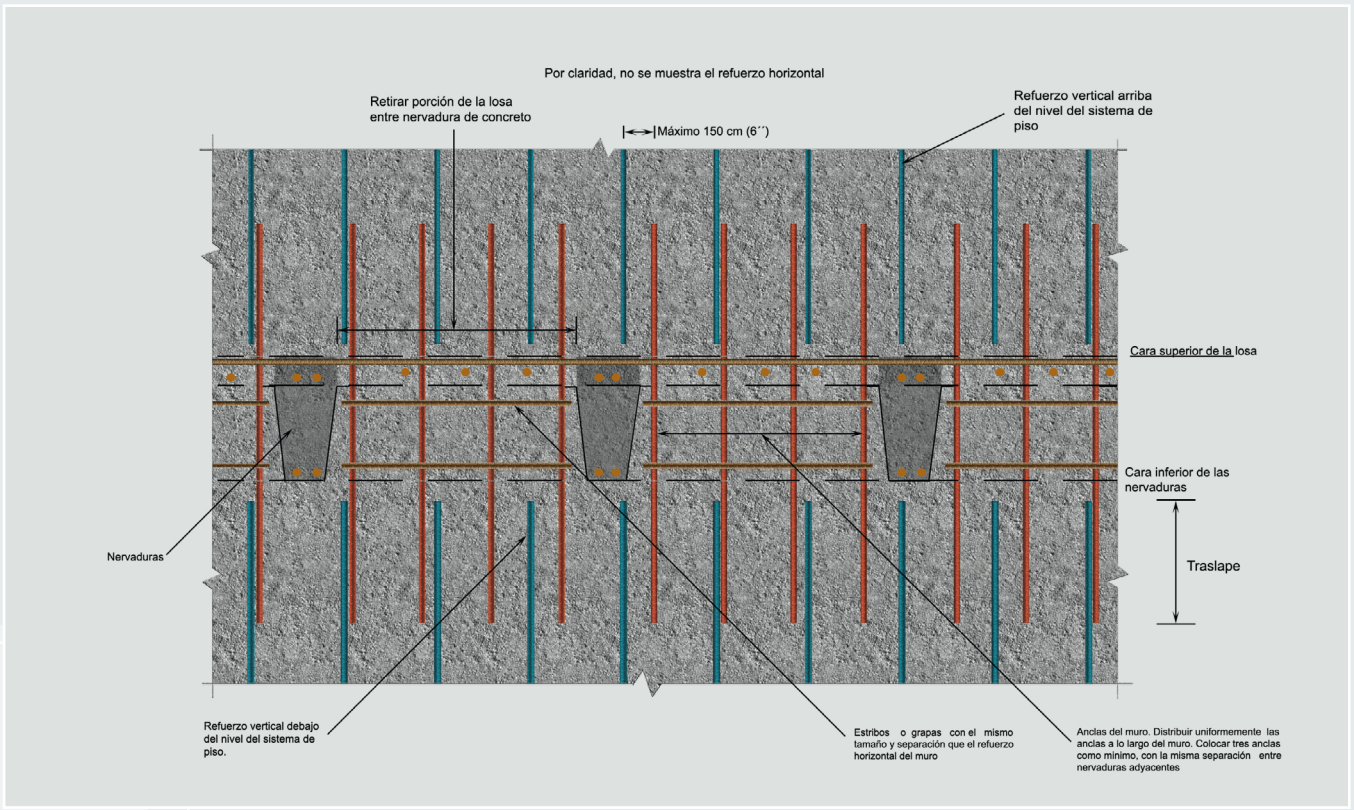


Figura 6.10.14
Detalle del anclaje del refuerzo vertical de un muro en edificios con losas reticulares o con losas nervadas en la dirección perpendicular al muro.
Fuente: elaboración propia con base en FEMA-547 (2006).

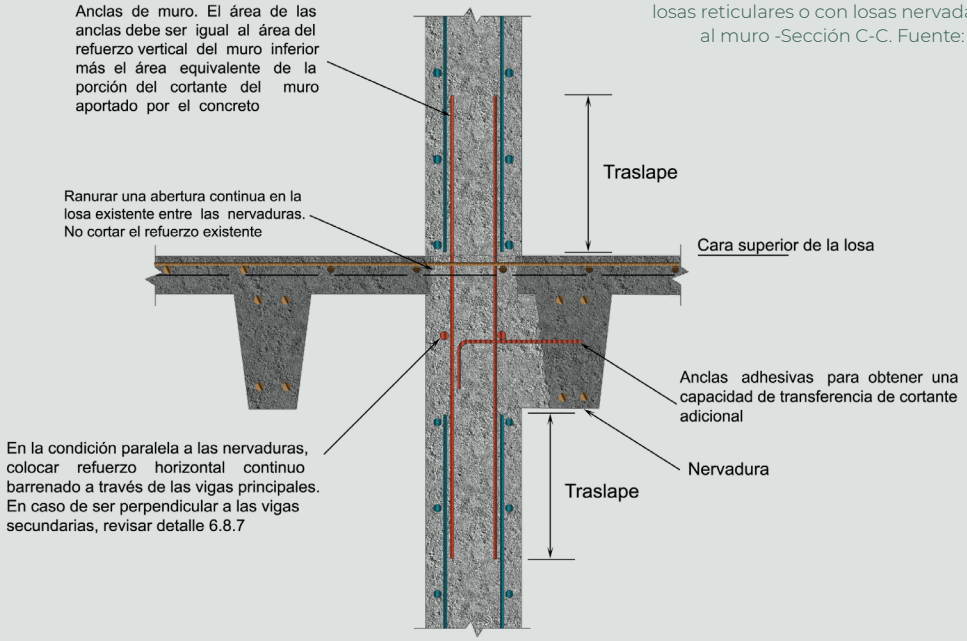


Figura 6.10.15
Detalle del anclaje del refuerzo vertical de un muro en edificios con losas reticulares o con losas nervadas en la dirección perpendicular al muro -Sección C-C. Fuente: elaboración propia con base en FEMA-547 (2006).

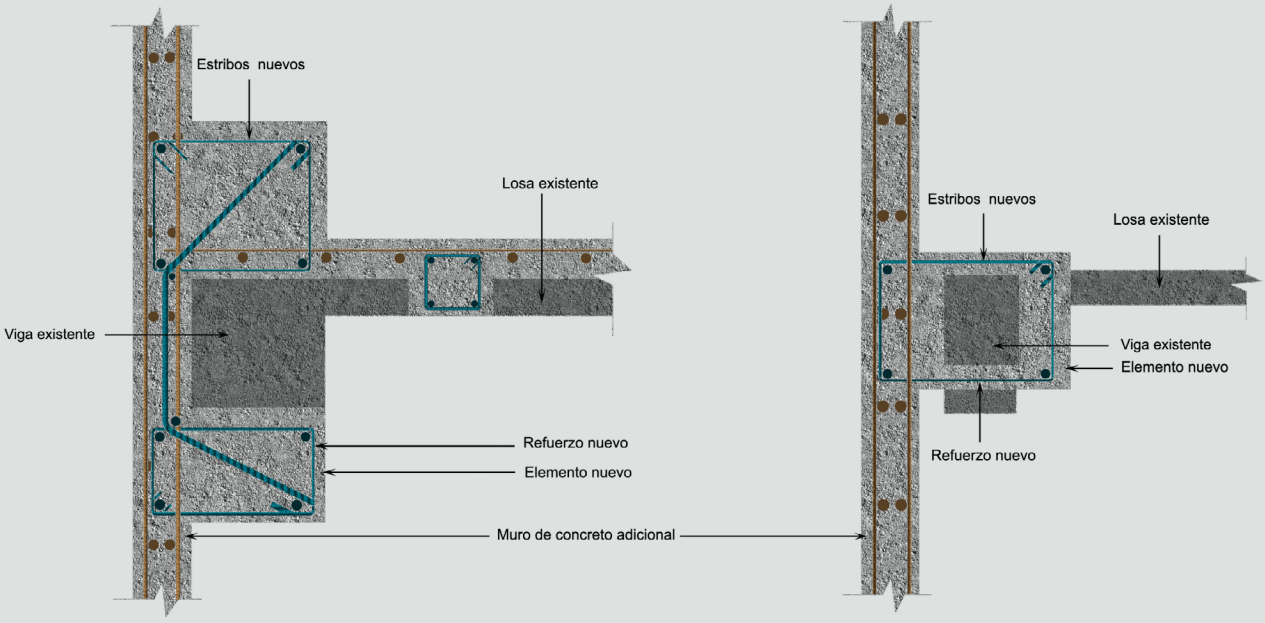


Figura 6.10.16
Figura 6.10.16 Ejemplo de conexión entre muros excéntricos y marcos existentes de concreto. Fuente: elaboración propia con base en Aguilar et al. (1996).

En muros excéntricos al marco, se podrá utilizar el detallado de la figura 6.10.16 para conectar el muro con el sistema de piso. La solución mostrada implica la construcción de vigas de borde conectadas a las vigas existentes. En la figura de la izquierda se observa, además, un incremento del peralte del sistema de piso. Esta solución es aplicable cuando el diafragma de piso requiere ser reforzado para transmitir las fuerzas inducidas por el sismo a los nuevos muros.

Los muros excéntricos se pueden conectar a la estructura original por medio de encamisados de columnas y/o vigas, así como por medio de anclas con doblez a 90 grados, colocadas en la estructura original (figura 6.10.17). Como se ilustra en la figura 6.10.18, el concreto existente se debe preparar para promover un comportamiento monolítico con el nuevo elemento.

6.10.5.7 Juntas de colado

Todas las juntas de colado cumplirán con los incisos 5.3.3.3 y 15.3.10 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.10.6 Requisitos de construcción

Se deberá cumplir con los conceptos siguientes:

a. De ser necesario, ranurar los cimientos para anclar el refuerzo vertical del alma y de los elementos de refuerzo del muro o segmentos de muro.
b. Preparar toda la superficie de concreto de los elementos existentes que estarán en contacto con el nuevo muro. La rugosidad obtenida será de al menos 6 mm (1/4 pulg) entre valle y cresta. La cara rugosa deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del concreto nuevo (véase figura 6.10.18).



Figura 6.10.17
Muros excéntricos conectados a la estructura original por medio de encamisados de columnas.
Fuente: archivo personal de Bernardo Moctezuma (2019).



Figura 6.10.18
Figura 6.10.18 Preparación de la superficie del concreto existente que estará en contacto con el nuevo concreto con rugosidad media de 6 mm (1/4 pulg).
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

c. Dos horas antes del colado, saturar la superficie del concreto existente con agua limpia.
d. No será necesario usar adhesivo entre concretos nuevo y existente ni cualquier otro aditivo para el efecto.
e. Seleccionar el revenimiento y el tamaño máximo del agregado de acuerdo con la separación mínima y el recubrimiento del refuerzo.
f. Diseñar las cimbras para facilitar la salida del aire en el concreto del nuevo muro, con objeto de evitar la formación de oquedades en el concreto.
g. En muros diafragma, colocar anclas elaboradas con barras de acero de refuerzo adheridas a los elementos del marco mediante resina epóxica.
h. En muros continuos se podrá utilizar cualquier detallado mencionado en la sección 6.10.5.6.
i. Demoler el concreto con una herramienta (martillo) de impacto. Se deberá evaluar la necesidad de apuntalar y arriostrar la escuela.
j. Colocar el concreto del muro. En muros patín, diafragma o concéntricos se podrá usar uno o la combinación de los incisos i a iii siguientes:
   i. Emplear concreto autocompactante.
   ii. Usar cimbras especiales con resbaladilla, y de ventanas en la losa (figura 6.10.19).
   iii. En caso de usar concreto normal:
      a) Colocar el concreto del muro en varias capas para facilitar su compactación. El espesor de las capas no excederá de tres veces la longitud del cabezal del equipo de vibración.
      b) Usar un revenimiento que facilite la trabajabilidad del concreto. Se aceptará usar aditivos fluidificantes. Un revenimiento de 200 mm es adecuado.
      c) La última capa debe ser de mortero o concreto fluido sin contracción con resistencia especificada a la compresión al menos igual a la del concreto del muro.
k. Curar el nuevo muro manteniendo un ambiente húmedo durante siete días.

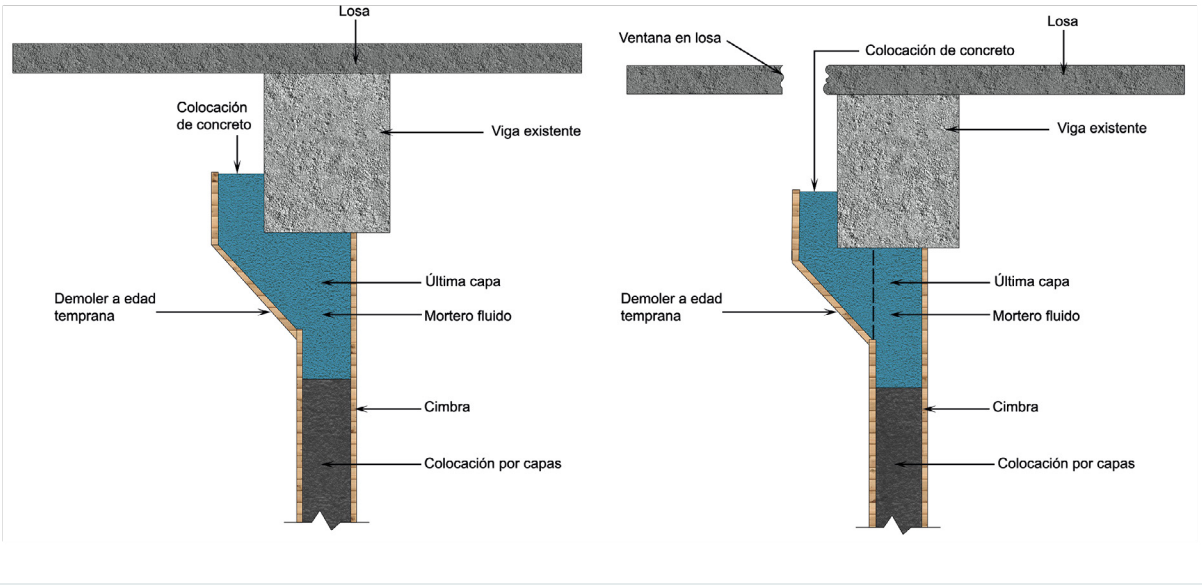


Figura 6.10.19
Cimbra para colocación de concreto de muros diafragma y muros concéntricos. Fuente: elaboración propia con base en Terán (2009).

6.10.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se deberá revisar que se cumplan los conceptos siguientes:

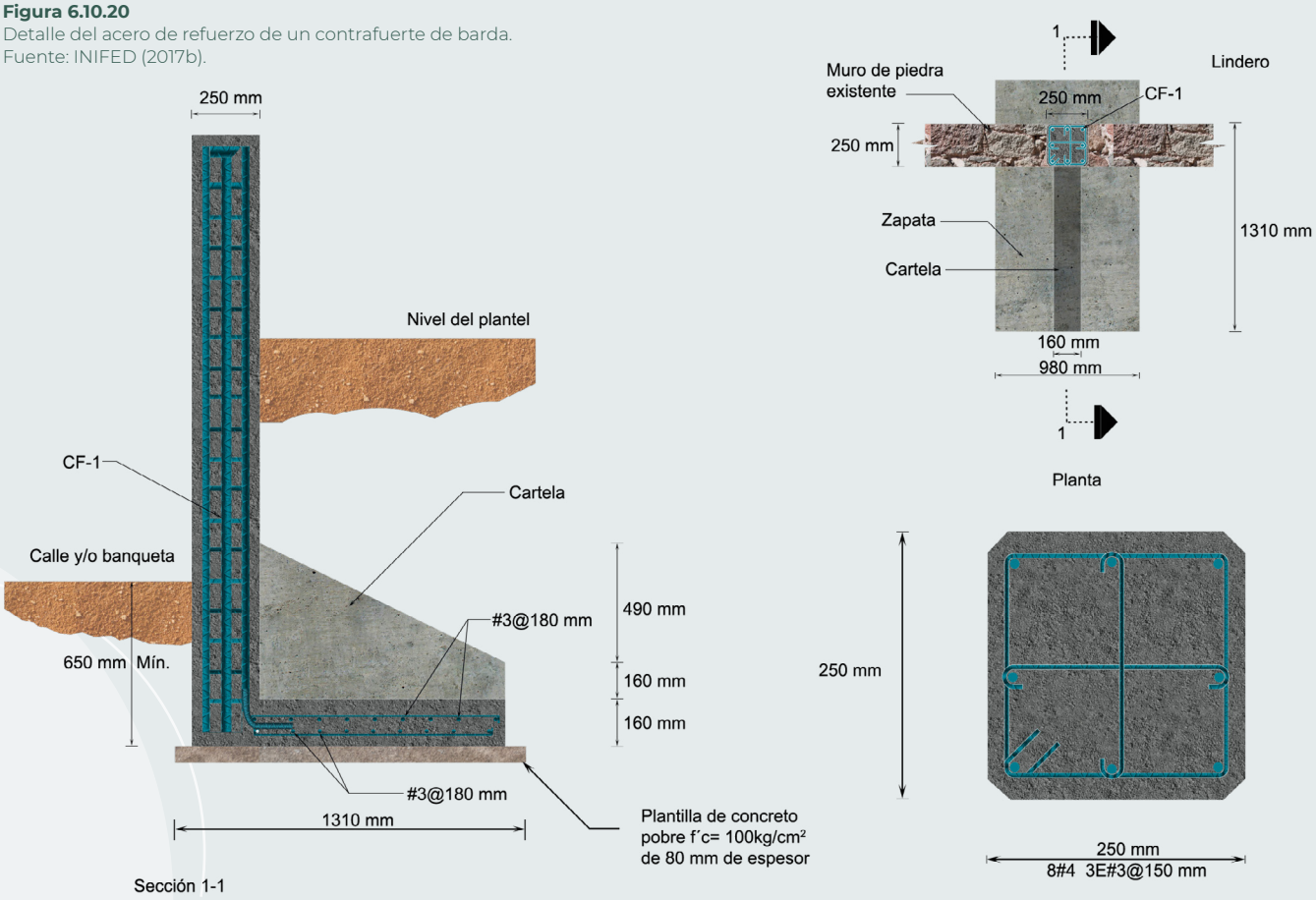
a. Cuando así se requiera, se construyan los elementos de refuerzo del muro de conformidad con el proyecto ejecutivo.
b. El acero transversal de los elementos de refuerzo del muro se coloque con la separación requerida y se remate con dobleces de, al menos, 135 grados.
c. Si se usan anclas, se coloquen de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y de la sección 6.5 de esta Guía técnica.
d. La longitud de traslape entre el refuerzo del muro y las anclas, sea el establecido en los planos; en su caso, que el refuerzo transversal o helicoidal de confinamiento de los traslapes tenga la separación o el paso máximo requerido, respectivamente.
e. Se emplee el concreto con la trabajabilidad necesaria para evitar segregación, oquedades u otros defectos durante la colocación y compactación del concreto.
f. No haya oquedades o separación entre el concreto del muro dentro de la crujía y la viga o sistema de piso superior.

6.10.8 Reforzamiento y rigidización de bardas

Un caso especial de la adición de muros es la construcción de contrafuertes en bardas perimetrales de edificios educativos. Además de los requisitos de los incisos anteriores, se deberá cumplir con:

a. Colocar cada contrafuerte a cada 3.5 m como máximo, debiendo alternarse las demoliciones.

Figura 6.10.20
Detalle del acero de refuerzo de un contrafuerte de barda.
Fuente: INIFED (2017b).



b. Alcanzar el nivel de desplante (80 cm por debajo del nivel de terreno natural); colocar, inmediatamente, una plantilla de concreto pobre ($f'c$= 100 kg/cm²) de 6 cm de espesor para evitar la alteración del suelo.
c. Usar concreto clase 1, con peso volumétrico mayor que 21.6 kN/m³ (2 200 kg/m³) y una resistencia especificada a la compresión de 25 MPa (250 kg/cm²).
d. Asegurar que el recubrimiento libre en castillos, columnas y/o cartela sea consistente con el nivel de exposición para fines de diseño por durabilidad de las NTC-Concreto.
e. El agregado grueso para la elaboración del concreto (grava) deberá cumplir con la norma.

6.10.9 Uso en la infraestructura escolar

Esta técnica de rehabilitación se ha usado en prototipos a base de marcos rígidos de concreto (U1-C, U2-C, U3-C) y metálicos (U1, U2, U3 y A-70) (figura 6.10.21). Los muros colocados han tenido espesores de 150, 200 o 250 mm, dependiendo de la zona sísmica, del tipo de suelo y del número de niveles. En edificios de uno y dos pisos el espesor usado ha sido de 150 mm y de 200 a 250 mm en edificios de tres y cuatro pisos. Los muros han sido reforzados con dos capas ortogonales de barras del número 3 a cada 300 mm, en adición a cinco bandas de barras del número 3 inclinadas en forma de letra X. Normalmente, cuentan con elementos de refuerzo del muro de 200 mm de lado.



Figura 6.10.21
Escuela rehabilitada con muros de concreto reforzado.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

En estructuras metálicas (tipo A-70), la conexión entre las columnas existentes y el nuevo muro se ha hecho por medio de ángulos de acero soldados a la columna y que quedan ahogados en los elementos de borde dentro del muro. Si las edificaciones son de varios pisos, el refuerzo vertical del muro se ha traslapado con barras del número 4 que rodean las vigas.

Si la estructura es a base de losas de concreto nervadas, se ha ranurado la losa para pasar el refuerzo vertical, en especial el de los elementos de refuerzo del muro. De igual forma, se han practicado dentellones (llaves de corte) a lo largo de la losa como mecanismo de transferencia de cortante entre el concreto existente y el nuevo.

6.11 Adición de contraventeos de acero

6.11.1 Deficiencia por corregir

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

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

a) Edificios con columnas cuyo comportamiento está controlado por fuerza cortante y cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio.

b) Edificios a base de marcos resistentes a momento con insuficiente resistencia y/o rigidez lateral.
c) Edificios con pisos débiles, usualmente en la planta baja.

La adición de contraventeos metálicos permite:

a. Incrementar la resistencia global de la estructura ante cargas laterales como las inducidas por sismo.
b. Aumentar la rigidez lateral global de la estructura y, consecuentemente, disminuir las demandas de desplazamiento lateral.
c. Colocar dispositivos de protección sísmica (disipadores de energía). Véase sección 6.15 de esta Guía técnica.

6.11.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

6.11.3 Descripción de la técnica

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

No se recomienda combinar esta técnica de rehabilitación con otras que aumenten la rigidez considerablemente, como la adición de muros de concreto o marcos con muros diafragma de mampostería, por ejemplo. Esto porque para que un contraventeo contribuya a la resistencia y rigidez laterales, se requiere que la estructura existente se desplace lateralmente. Si esta restricción es muy alta, como en el caso de una estructura a base de muros de concreto, el contraventeo no será deformado y, por tanto, no contribuirá a la capacidad lateral.

Si el marco es de concreto y sus elementos tienen daño severo, se deberá rehabilitarlos previamente a fin de mejorar su capacidad resistente y de deformación.

Figura 6.11.1
Contraventeos en X y K permitidos para la rehabilitación de estructuras. Fuente: elaboración propia.

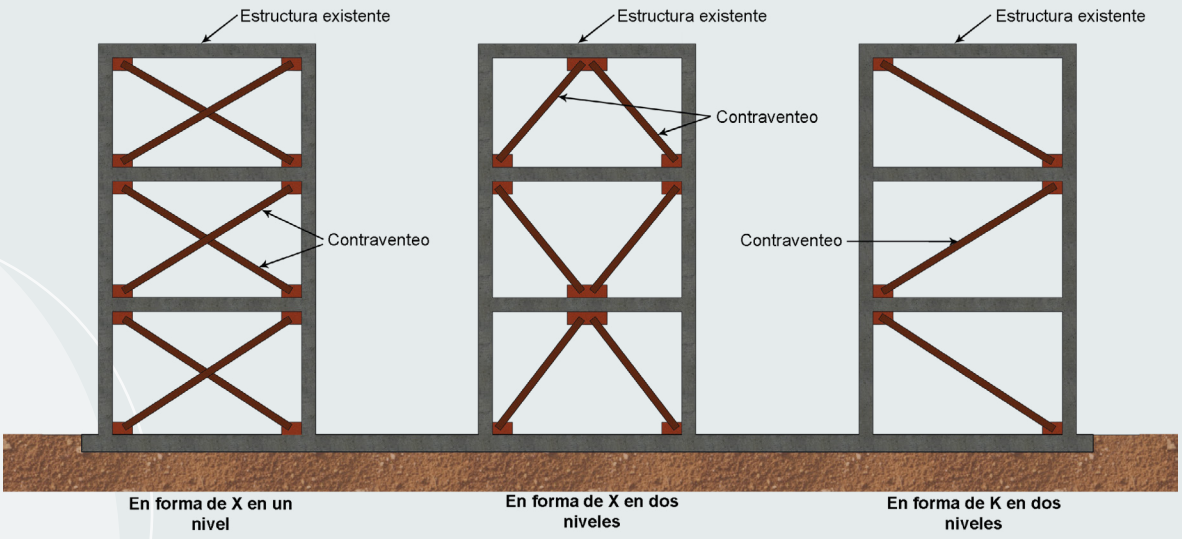


Figura 6.11.2
Contraventeos en V y V invertida permitidos para la rehabilitación de estructuras.
Fuente: elaboración propia (2020).

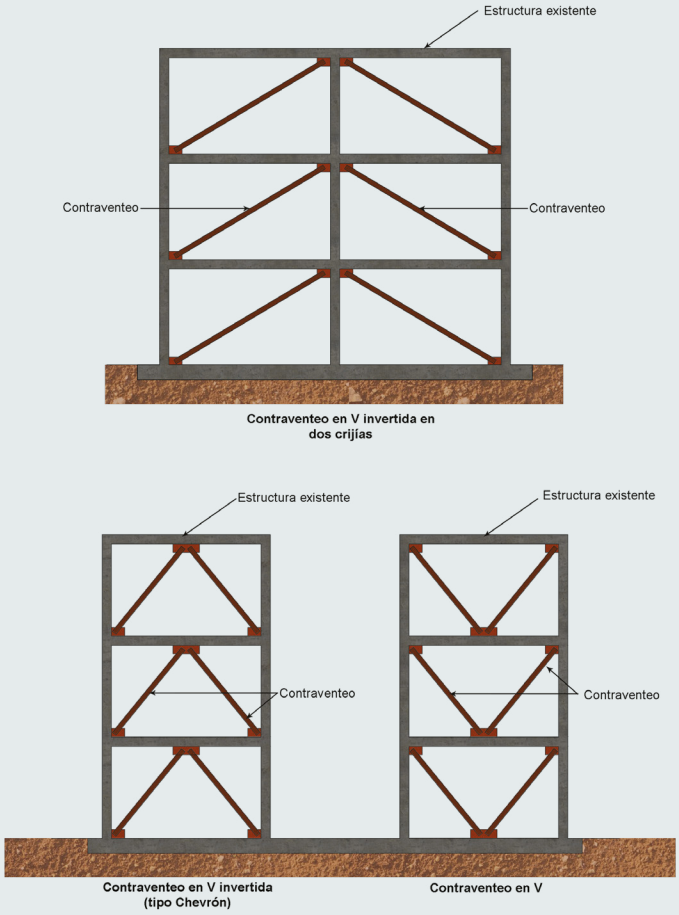


Figura 6.11.3
Ejemplo de rehabilitación de un prototipo CAPFCE/INIFED U3C mediante contraventeos concéntricos en el plano.
Fuente: elaboración propia.

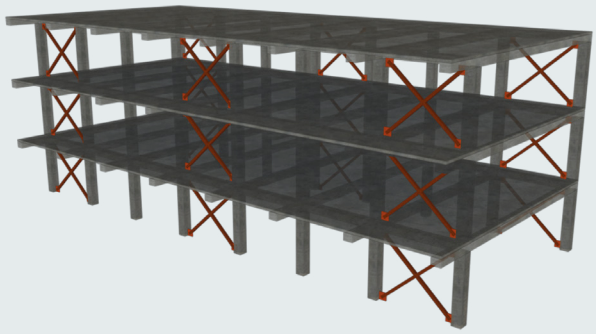
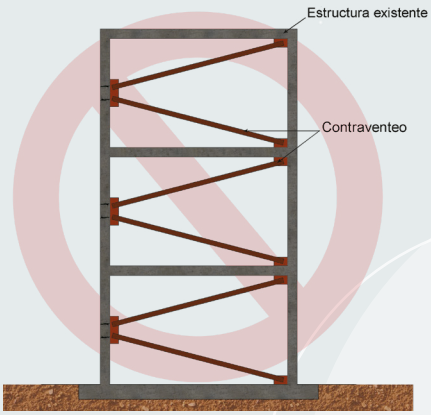


Figura 6.11.4
Contraventeo tipo K en un nivel no permitido en la rehabilitación de edificios existentes. Fuente: elaboración propia.



6.11.4 Disposición de contraventeos

Los contraventeos se pueden clasificar según su geometría, su disposición en el edificio y su empleo para colocar sistemas de control de la respuesta.

6.11.4.1 Contraventeos según su geometría

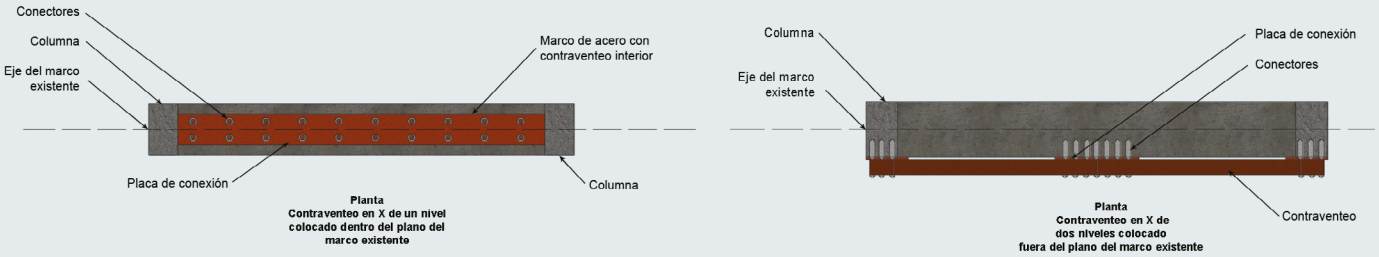
En las figuras 6.11.1 y 6.11.2 se muestran los diferentes tipos de contraventeos metálicos permitidos en la rehabilitación de estructuras escolares.

En la figura 6.11.3 se ilustra la colocación de contraventeos en forma de letra X en el plano del marco de un prototipo CAPFCE/INIFED U3C.

Para las geometrías de los contraventeos anteriores, si la estructura tiene grandes claros, es conveniente emplear el tipo V o V invertida, debido a que se reduce la longitud no arriostrada de contraventeos y se requiere una sección de acero más pequeña. Esta solución debe ser continua en la altura del edificio.

En la figura 6.11.4 se muestra un esquema de una estructura con contraventeos tipo K de un nivel. Este tipo de contraventeo no es permitido en la rehabilitación de edificios. Las fuerzas de compresión y tensión que se desarrollan en los contraventeos ocasionan una elevada concentración de esfuerzos en la mitad de la columna que

Figura 6.11.5
Vista en planta de contraventeos dentro y fuera del plano del marco existentes (concéntricos y excéntricos, respectivamente). Fuente: elaboración propia.



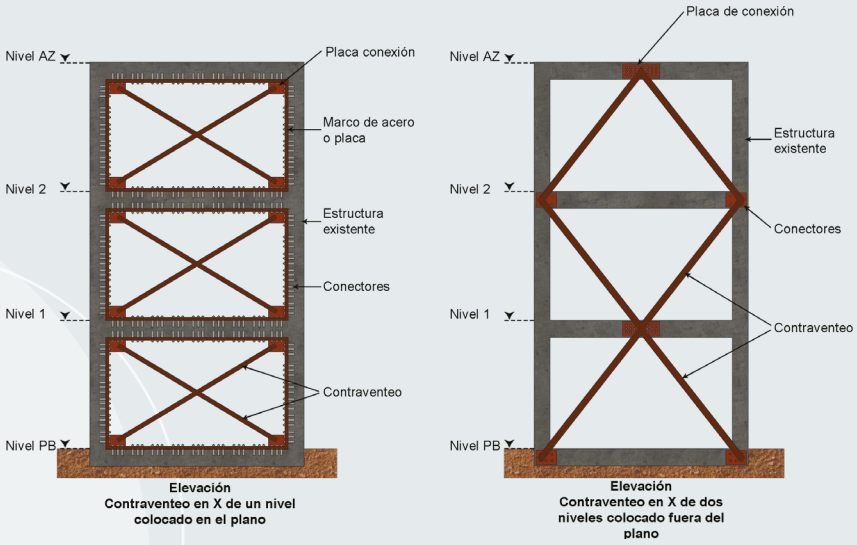
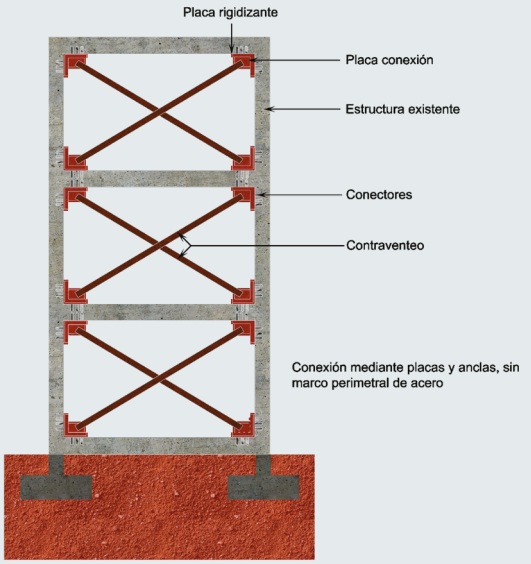


Figura 6.11.6
Elevación de contraventeos concéntricos y excéntricos. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.11.7
Rehabilitación con contraventeos en X concéntricos conectados mediante conectores post-instalados. Fuente: elaboración propia.



probablemente produzca daños por cortante severos y el acortamiento de la columna.

6.11.4.2 Contraventeos según su disposición en el edificio

Los contraventeos se pueden colocar dentro del plano de la estructura existente o fuera de él (figuras 6.11.5 y 6.11.6).

En el caso de contraventeos en el plano, las conexiones del contraventeo con la estructura existente se harán por la cara interior del marco. Si la fuerza resultante del contraventeo a compresión es mayor que la resistencia del nudo o que la resistencia a fuerza cortante de la viga o columna, será necesario reforzar los elementos. En la figura 6.11.7 se muestra la conexión de un contraventeo con un marco de concreto mediante conectores.

Otra opción para conectar los contraventeos dentro de las crujías es mediante un marco de acero que fija al marco existente con conectores (figura 6.11.8). Esta técnica tiene la ventaja de que el marco metálico con contraventeo puede ser fabricado en taller, con condiciones idóneas para una buena calidad de la soldadura. Además, usualmente, esta técnica no requiere el reforzamiento de la estructura original.

Una variante de la modalidad anterior es la mostrada en la figura 6.11.9. En este caso, el contraventeo cuenta con un marco metálico perimetral, el cual se conecta con la estructura existente de concreto mediante un marco de concreto que se construye con concreto de baja contracción. Esta solución tiene la ventaja de poderse fabricar en taller, eliminando la soldadura de campo. El mecanismo de transmisión de cortante entre el marco de concreto de conexión y la estructura existente consta de conectores soldados al marco metálico y de anclas ahogadas en el marco existente. Esta técnica es recomendable cuando se opta por añadir contraventeos en la crujía de un marco.

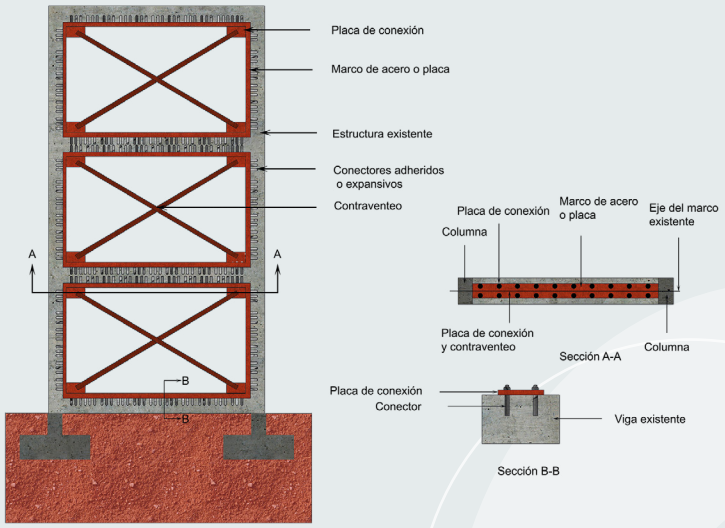
En la figura 6.11.10 se presenta el punto de trabajo cuando se usan contraventeos concéntricos en X conectados mediante marcos metálicos inferiores.

Cuando por facilidad constructiva convenga, se pueden colocar los contraventeos fuera del plano de la estructura existente. En la figura 6.11.11 se muestra, de manera esquemática, la instalación de un contraventeo fuera del plano. La conexión debe diseñarse para que el contraventeo adicional y la estructura existente trabajen juntos. La conexión debe tener la capacidad de soportar la resistencia esperada del contraventeo; es decir, las fuerzas máximas que pueden desarrollar los elementos diagonales suponiendo el valor esperado del esfuerzo de fluencia.

6.11.4.3 Contraventeos para instalar dispositivos disipadores de energía sísmica

Usualmente, se emplean sistemas de contraventeo para instalar dispositivos disipadores de

Figura 6.11.8
Contraventeos concéntricos en X conectados al marco existente por medio de un marco perimetral metálico. Fuente: elaboración propia.



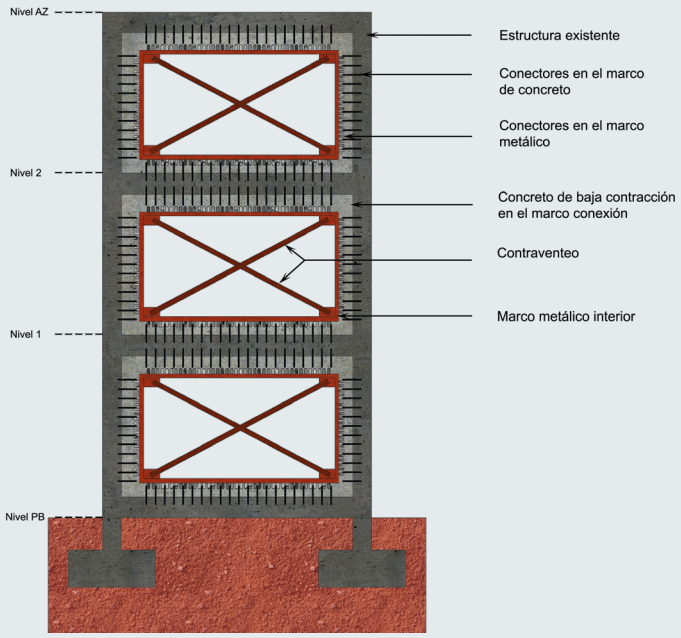
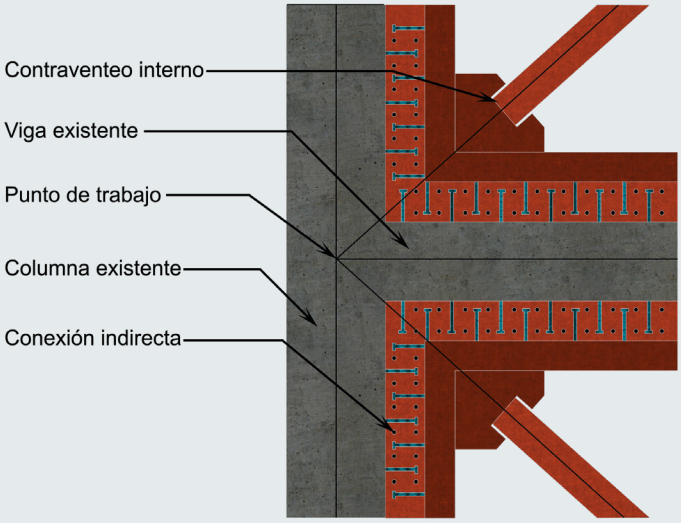


Figura 6.11.9
Contraventeo concéntrico en X dentro de la crujía de un marco de concreto. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.11.10
Ejemplo de punto de trabajo de los contraventeos concéntricos en X de la figura 6.11.9. Fuente: elaboración propia.



energía sísmica. El análisis, diseño, construcción y supervisión de esta técnica se detalla en la sección 6.15 de esta Guía técnica. En la figura 6.11.12 se muestra un ejemplo del empleo de este sistema mediante un amortiguador viscoso en una estructura de concreto.

6.11.5 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se deberá cumplir con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica.
c. Distorsiones máximas permitidas. Las distorsiones laterales permitidas serán las establecidas para el sistema dual formado por marcos de concreto y contraventeos metálicos de baja ductilidad de la tabla 4.2.1 de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Si la estructura existente es a base de losas planas, se tomarán las distorsiones laterales permitidas de un sistema dual formado por losas planas y muros de baja ductilidad indicados en la misma tabla.

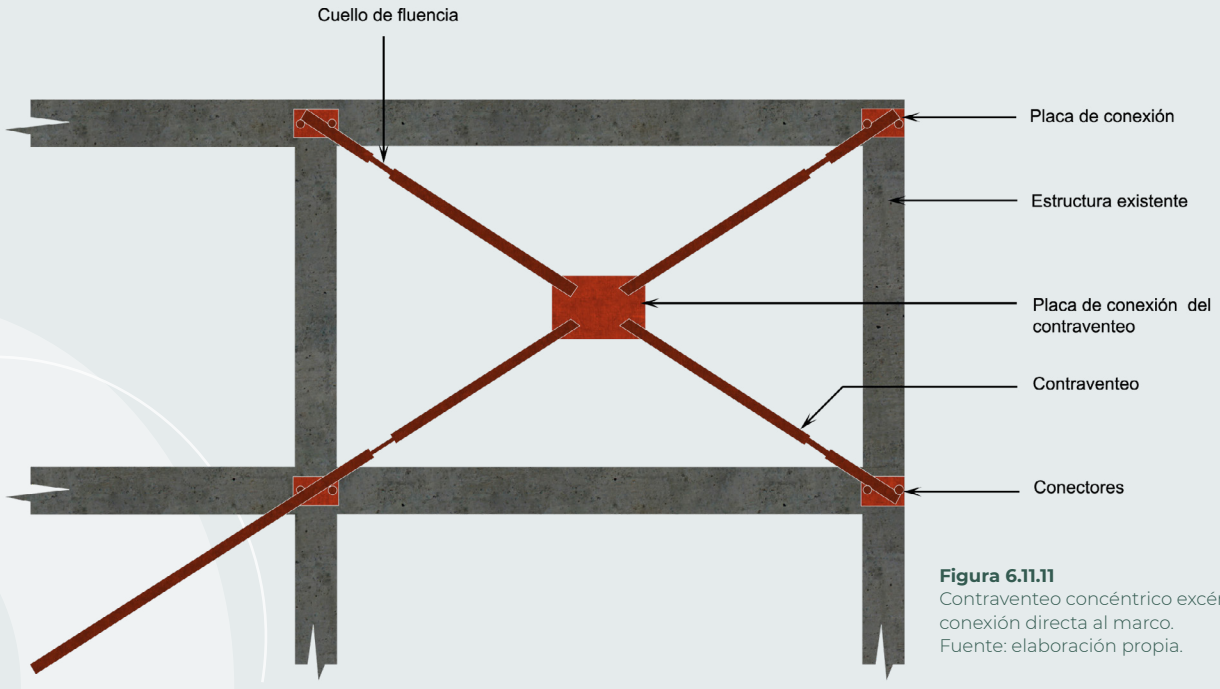


Figura 6.11.11
Contraventeo concéntrico excéntrico con conexión directa al marco.
Fuente: elaboración propia.

d. Método de análisis sísmico. Se analizará la estructura de acuerdo con las NTC-Sismo y NTC-Acero de la Ciudad de México (o sus equivalentes en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Se tendrán en cuenta las secciones agrietadas de la estructura de concreto existente en el inciso 3.2.1.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
e. Contribución de la estructura existente a resistir cargas laterales. Si la estructura fue diseñada con un reglamento anterior a la versión de 1987, se aceptará despreciar su contribución a la resistencia y rigidez lateral. Si se diseñó con la versión 1987 o posteriores a ésta, se podrá incluir su contribución a la resistencia y rigidez lateral. En todo caso, se deberá revisar que la estructura tenga la capacidad resistente y de deformación que demanden los contraventeos. Si los elementos estructurales existentes tienen daños moderados o severos, será necesaria su rehabilitación.
f. Localización de los contraventeos nuevos en la estructura. Los nuevos contraventeos deben minimizar los efectos torsionales globales mediante su colocación simétrica en ambos sentidos de análisis de la estructura a rehabilitar.



Figura 6.11.12
Adición de contraventeo con amortiguador viscoso en un marco de concreto. Fuente: MEXT (2006).

6.11.6 Requisitos de diseño

6.11.6.1 Materiales

a) Contraventeos. Se deben emplear los aceros estructurales señalados en la tabla 1.4.1 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
b) Anclajes y/o conectores. Se deben emplear los anclajes y/o conectores que cumplan las especificaciones de tornillos de alta resistencia y tuercas según los incisos 1.4.3.2 y 1.4.3.3 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Específicamente:
    i. Resistencia de tornillos de alta resistencia del grupo A, por ejemplo, los especificados por ASTM A325 y ASTM A490.
    ii. Resistencia de tuercas y roldanas que cumplan con ASTM A563.
    iii. El diseño de anclajes y conectores se hará de acuerdo con el inciso 5.6.6 de esta Guía técnica.
c) Mortero fluido sin contracción. Debe cumplir la norma ASTM C1107, con una resistencia a compresión mínima de 35 MPa (350 kg/cm²) y máxima de 55 MPa (550 kg/cm²) y un módulo de elasticidad 20 a 35 GPa (200 000 a 350 000 kg/cm²).
d) Concreto de baja contracción. Cuando se emplee concreto de baja contracción para el marco de conexión en contraventeos dentro de la crujía, se usará concreto clase 1 con aditivos para reducir su contracción.
e) Soldaduras. Deberán satisfacer las especificaciones de las NTC-Acero, o bien, de la American Welding Society (AWS).

6.11.6.2 Contraventeos en el plano con conexión directa a estructura existente mediante placas

6.11.6.2.1 Contraventeo

En el diseño del contraventeo se deberá cumplir con a a d:

a. Sección transversal. Se deberán emplear contraventeos que tengan secciones con altos radios de giro, similares en ambas direcciones. Las secciones comúnmente utilizadas son tubular cuadrada o circular, o bien, secciones H.

b. Relación de esbeltez. El elemento de contraventeo debe tener una relación de esbeltez que cumpla con la condición de la ecuación 6.11.1

$$\frac{KL}{r} \leq 4\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Ecuación 6.11.1

donde:

K factor de longitud efectiva
L longitud del contraventeo, mm
r radio de giro mínimo de la sección, mm
E módulo de elasticidad del acero estructural, MPa (kg/cm²)

Esta relación de esbeltez resulta de 96 para aceros A572 Gr50 con un esfuerzo especificado de fluencia de 352 MPa f_y= (3 520 kg/cm²).

Este límite pretende evitar el pandeo elástico de los contraventeos ante demandas cíclicas y la consecuente diferencia entre las fuerzas a tensión y a compresión. En general, los contraventeos esbeltos acumulan deformaciones inelásticas en pocos ciclos de carga, lo que genera ineficiencia del sistema.

c. Fuerza axial máxima que aplican los contraventeos a columnas y vigas. Se deberán revisar las columnas y vigas existentes para las máximas fuerzas a tensión y a compresión que puedan desarrollar los contraventeos. A tensión, será la resistencia a tensión; a compresión será igual a la resistencia residual (figura 6.11.13).

donde:

P carga axial máxima a compresión o a tensión, N (kg)
R_y cociente del esfuerzo de fluencia esperado entre el mínimo especificado, véase tabla 12.1.1 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela)
F_y valor mínimo garantizado del esfuerzo correspondiente al límite inferior de fluencia del acero en tensión, MPa (kg/cm²)
A_s área transversal de la sección del contraventeo, milímetros.
R_c resistencia del contraventeo en compresión axial según el inciso 5.2.1 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), N (kg).

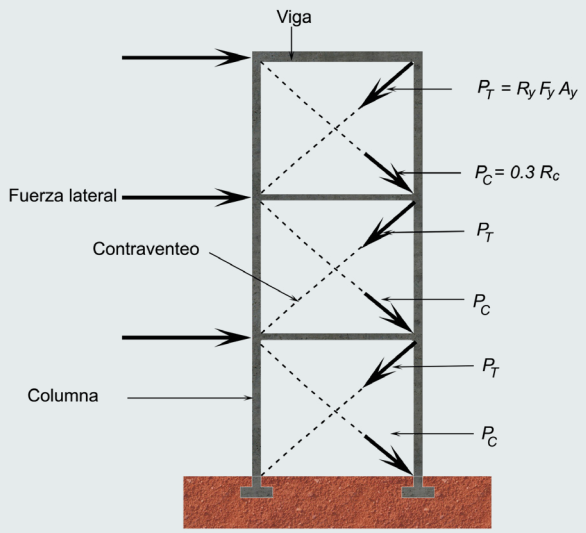


Figura 6.11.13
Distribución de fuerzas máximas en contraventeos trabajando a tensión y a compresión. Fuente: elaboración propia.

d. En caso de rehabilitar el inmueble con contraventeos en V y en V invertida, se deben satisfacer los requisitos i a iv siguientes:

i. Si la estructura existente es de concreto, se deberán colocar vigas metálicas en las crujías, las cuales deberán estar conectadas a las vigas o a la losa de concreto (en

caso de losas planas). Se deberá revisar que las vigas (o losa) de concreto existentes y las vigas metálicas añadidas, en conjunto, tengan la capacidad de resistir las acciones generadas por los contraventeos.

ii. La viga metálica deberá resistir la componente vertical de la carga de las diagonales, como se ilustra en la figura 6.11.14.

iii. Las columnas deberán resistir las fuerzas generadas por los contraventeos. Si las columnas existentes no tienen capacidad para resistir las nuevas acciones, se podrá considerar la adición de una columna metálica, como se ilustra en la figura 6.11.15.

iv. Resistencia de los contraventeos. La resistencia esperada a tensión, R_t, es $R_y F_y A_t$. La resistencia esperada en compresión, R_c, es igual a la menor de las cantidades $R_y F_y A_t$ y 1.14 $F_y A_t$, donde f_n se calcula como se indica en el capítulo 5 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), sustituyendo en las ecuaciones pertinentes F_y por $R_y F_y$. La resistencia posterior al pandeo, o resistencia residual, es, como máximo, igual a 0.3 veces la resistencia esperada del contraventeo comprimido.

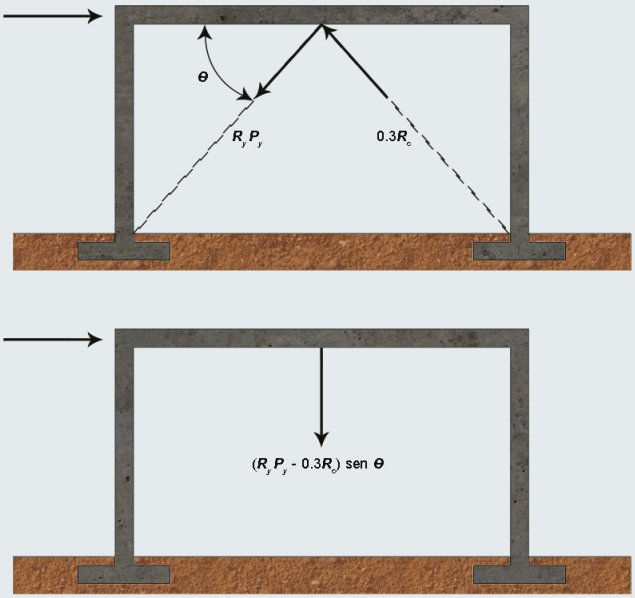


Figura 6.11.14
Distribución de fuerzas máximas en marcos con contraventeos en V invertida. Fuente: elaboración propia.

6.11.6.2.2 Conexiones metálicas

En el diseño de las conexiones, se deberá cumplir con los requisitos siguientes:

a. Placas de unión. Se deben minimizar las excentricidades. Si llegaran a existir, se deben considerar en el análisis.

b. Resistencia requerida. Las conexiones de los contraventeos tendrán una resistencia no menor que la más pequeña de 1 y 2:
   1. La resistencia esperada en tensión del elemento de contraventeo igual a $R_y F_y A_t$.
   2. La fuerza máxima obtenida en el análisis, que puede ser transmitida al contraventeo.

c. Resistencia a tensión. La resistencia de diseño a tensión de las conexiones de los elementos de contraventeo, basada en los estados límite de fractura en la sección neta (inciso 4.2b de las NTC-Acero de la Ciudad de México

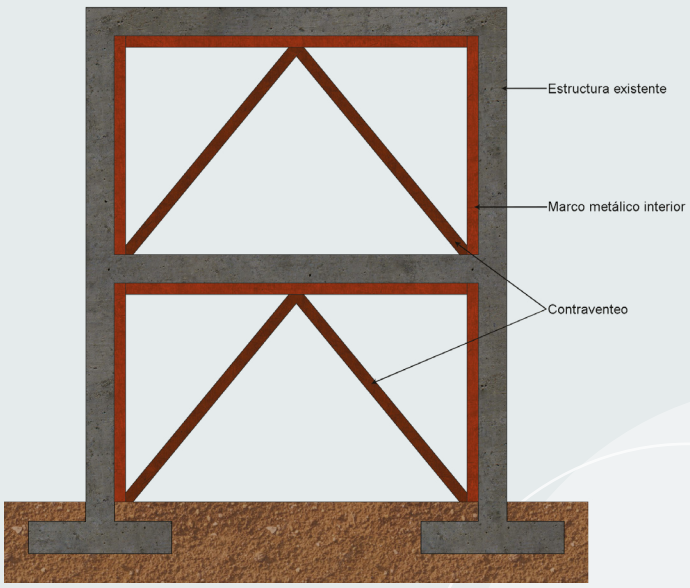


Figura 6.11.15
Marco metálico conectado a un marco de concreto cuando se usan contraventeos concéntricos tipo V invertida. Fuente: elaboración propia.

o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) y de ruptura en bloque por cortante y tensión (inciso 10.4.3 de las NTC-Acero de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), será igual o mayor que la resistencia requerida determinada en el inciso 12.3.3.5.2a de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

d. Resistencia a compresión. La resistencia de diseño a compresión de las conexiones de los elementos de contraventeo, basada en el estado límite de pandeo, será igual o mayor que la resistencia requerida a compresión definida en el inciso 12.3.3.5.2 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), tomando en cuenta en el cálculo de F_n el esfuerzo de fluencia esperado, $R_y F_y$.
e. Resistencia a flexión. La resistencia de diseño a flexión de la conexión en la dirección en que pandeará el contraventeo será igual o mayor que la resistencia requerida del contraventeo flexionado alrededor del eje de pandeo, multiplicada por 1.1 (es decir, 1.1 $R_y M_p$).
f. En el diseño de las placas de conexión deben considerarse sus posibles formas de pandeo.
g. Su geometría debe cumplir el requisito indicado en la figura 6.11.16 tomada de las NTC-Acero de la Ciudad de México. Esta geometría tiene como objetivo generar la plastificación de la placa en la dirección perpendicular, y así disminuir la contribución de los contraventeos en dicha dirección. En la figura 6.11.17 se muestran ejemplos de placas de conexión de contraventeos.
h. No deben utilizarse combinaciones de tornillos y soldaduras para resistir las fuerzas en la conexión. En caso de utilizar una conexión atornillada, se deberá cumplir lo establecido en las NTC-Acero.
i. Zonas protegidas y soldaduras de demanda crítica. Son zonas protegidas las siguientes:
    1. El cuarto central de los contraventeos.
    2. Una zona de los contraventeos adyacente a cada conexión, de longitud igual a un peralte del contraventeo en esa zona.
    3. Los elementos que unen los contraventeos con vigas y columnas.

    En el caso de contraventeos, se considerará a las soldaduras en conexiones como críticas y deberán satisfacer los requisitos del inciso 12.1.6.2 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
j. Placas de conexión con estructura existente. Su dimensionamiento y tipo de acero deberán cumplir con las NTC-Acero.
k. La unión de los contraventeos, vigas y columnas metálicas, así como placas de conexión con la estructura existente se deberá hacer garantizando la continuidad. Para la unión de los elementos de acero a la estructura de concreto se pueden aplicar algunas de las siguientes técnicas:
    1. Anclajes de expansión o adheridos diseñados e instalados de acuerdo con el inciso 5.6.6 de esta Guía técnica.

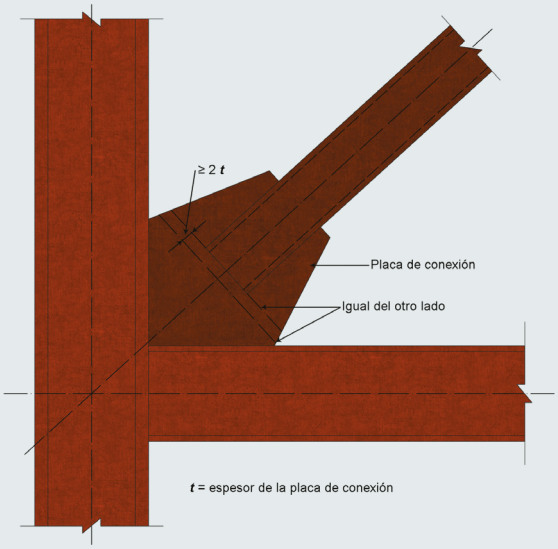


Figura 6.11.16
Requerimientos geométricos para una placa de conexión de contraventeo. Fuente: elaboración propia con base en NTC-Acero (2017).

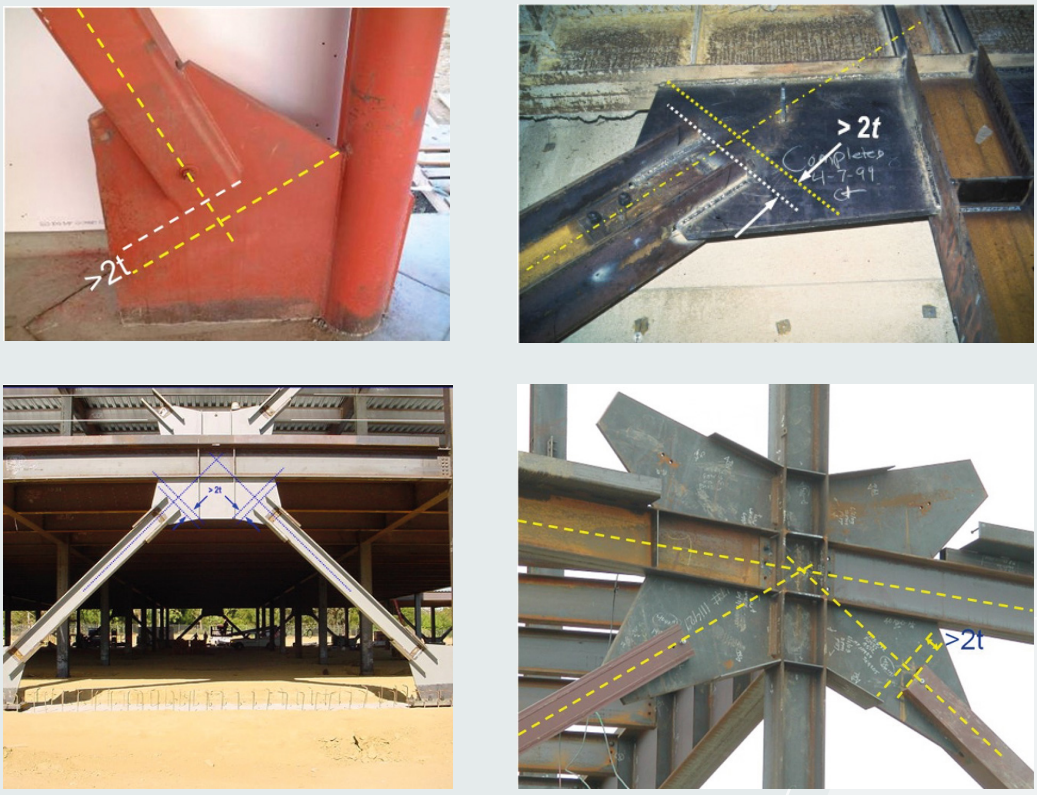


Figura 6.11.17
Ejemplos de placas de conexión de contraventeos.
Fuente: archivo personal de Germán Bogoya (2020)

2. Placas y anclas que atraviesen el elemento de concreto (previa perforación) y/o colocados por la parte exterior del elemento de concreto.

En las NTC-Acero de la Ciudad de México se definen todos los estados límite de resistencia que se deben verificar, además de las especificaciones en cuanto a separaciones mínimas entre anclajes, así como al borde.

En las figuras 6.11.18 y 6.11.19 se ilustran ejemplos de conexión mediante conectores adheridos y conectores externos e internos, respectivamente.

l. Si se instalan marcos metálicos contraventeados dentro de crujías de marcos resistentes a momento, el concreto del marco de conexión deberá ser de clase 1 de baja contracción con una resistencia mínima a la compresión de 25 MPa (250 kg/cm²) (figuras 6.11.20 y 6.11.21). El espesor del marco de conexión no debe ser mayor a 1.5 veces el peralte del perfil del marco perimetral de acero. El marco metálico se dimensionará de acuerdo con el inciso 6.9.6.3.3.2a de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Se pueden emplear perfiles de alma llena o tubulares. En el diseño de los conectores tipo Nelson, soldados al marco metálico interior, se cumplirá lo requerido en el inciso 9.2.7.2.1 o, alternativamente, en el inciso 9.3.7 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela)

En la figura 6.11.22 se muestra el proceso de instalación de un contraventeo conectado a la estructura existente mediante marco perimetral de acero y marco de concreto de baja contracción.

Figura 6.11.18
Ejemplo de conexión de contraventeo al interior de la crujía usando conectores adheridos. Fuente: elaboración propia.

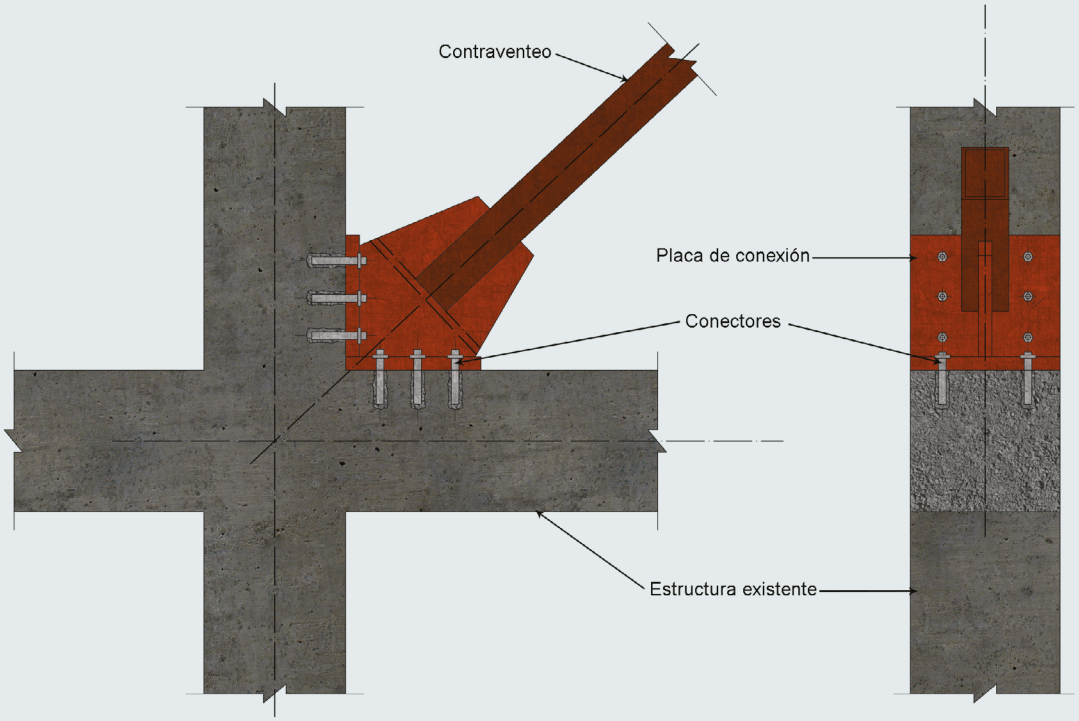
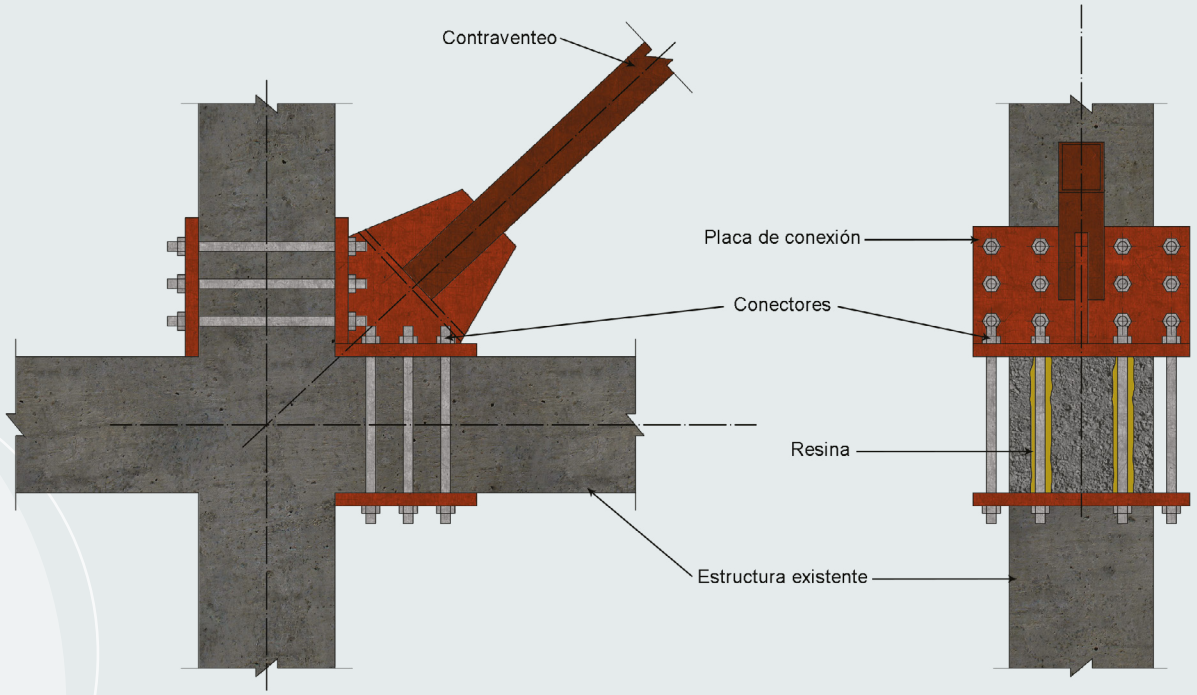


Figura 6.11.19
Ejemplo de conexión de contraventeo al interior de la crujía usando conectores exteriores. Fuente: elaboración propia.



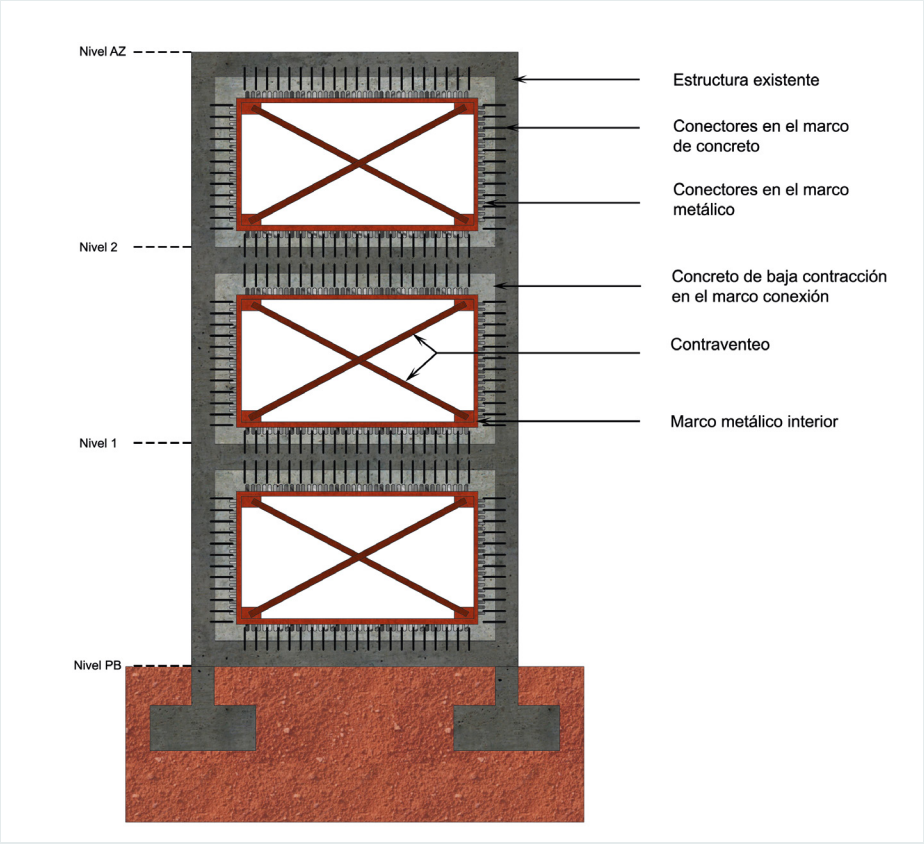
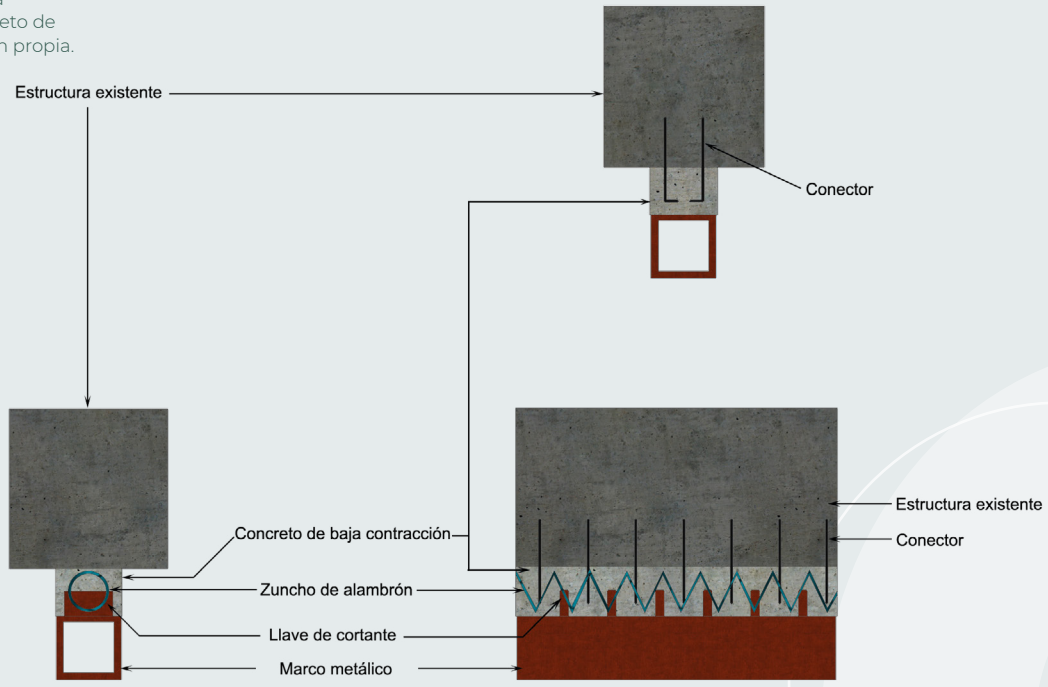


Figura 6.11.20
Elevación de contraventeos conectados a la estructura existente mediante marcos metálicos perimetrales y marcos de concreto de baja contracción. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.11.21
Detalle del marco de conexión con la estructura existente mediante concreto de baja contracción. Fuente: elaboración propia.





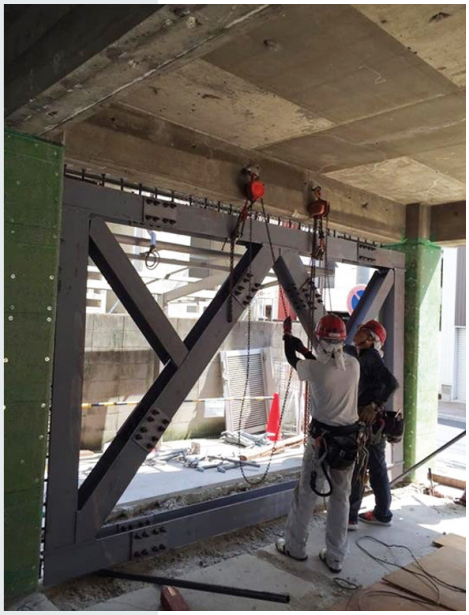






Figura 6.11.22
Ejemplo de contraventeo conectado a la estructura existente mediante marco metálico perimetral y marco de concreto de baja contracción. Fuente: https://retrofit.enshow.com/

6.11.6.3 Contraventeos externos o fuera del plano del marco existente

6.11.6.3.1 Geometría. Se podrán colocar contraventeos externos o fuera del plano, en forma de letra X, en diagonal o en forma de letra V o V invertida.

6.11.6.3.2 Contraventeos. Se dimensionarán según inciso 6.11.6.2.1 de esta Guía técnica. Se recomienda que los contraventeos externos tengan una relación de esbeltez de KL/r menor o igual a 80.

6.11.6.3.3 Conexión metálica

En el diseño de conexiones de contraventeos externos, se deberá cumplir con los incisos a a d siguientes:

a. Placas de conexión. Las placas de conexión se dimensionarán de acuerdo con el inciso 6.11.6.2.2 de esta Guía técnica.

b. Colectores de cortante. Se instalarán para resistir la componente horizontal de los contraventeos externos, como se muestra en la figura 6.11.23.

c. Soldaduras. Para las conexiones mostradas anteriormente, se deben emplear soldaduras de demanda crítica (inciso 12.1.6.2 de las NTC-Acero de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

d. Anclaje. Los anclajes post-instalados deben cumplir con el inciso 5.6.6 de esta Guía técnica.

Algunos ejemplos de colectores horizontales en marcos de concreto rehabilitados con contraventeos excéntricos se presentan en la figura 6.11.24.

6.11.7 Requisitos de construcción

Durante la construcción, se deberá prestar atención a:

a. Colocar los pernos adheridos o de expansión para fijar placas de conexión entre la estructura original y el contraventeo de acuerdo con la sección 6.5 de esta Guía técnica.

b. Favorecer la ejecución del corte, habilitado y soldadura de elementos metálicos de contraventeos en taller.

c. Si se emplea la opción de contraventeo dentro de la crujía:

i. Habilitar y soldar el marco metálico con dimensiones exteriores al menos 150 mm menores que las dimensiones libres de la crujía donde se instalará el marco de conexión de concreto.

ii. Colocar pernos tipo Nelson en el perímetro del marco metálico de acuerdo con el proyecto ejecutivo.

iii. Preparar toda la superficie de los elementos de concreto existentes que estarán en contacto con el concreto del marco de conexión con una profundidad media de 6 mm (1/4 pulg).

iv. Colocar anclas de acero elaboradas con barras corrugadas en el perímetro interno de la crujía.

v. Posicionar el marco metálico y colocar y compactar el concreto de baja contracción en el marco de conexión. Detallar la cimbra para evitar que quede aire atrapado durante la colocación y compactación del concreto.

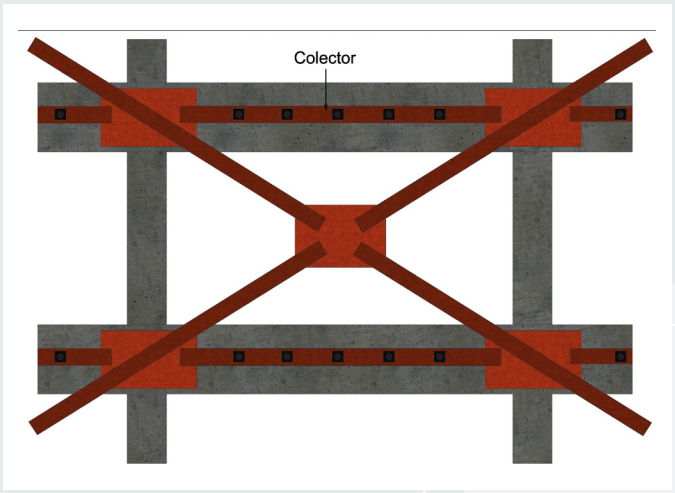


Figura 6.11.23
Colector horizontal para transmitir la fuerza cortante a la estructura original cuando se usan contraventeos externos.
Fuente: elaboración propia.



Figura 6.11.24
Ejemplos de colectores horizontales en contraventeos externos con conexión directa a la estructura existente. Fuente: Tokyo Metropolitan Urban Development Bureau (2013).

6.11.8 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se deberá revisar que:

a. El diámetro y la profundidad del agujero para alojar anclas o conectores sean los especificados en el proyecto ejecutivo, con las tolerancias establecidas por los fabricantes.
b. Se limpie el agujero de polvo y residuos de la perforación para la correcta adhesión de la resina con el concreto existente.
c. Cuando corresponda, rellenar el espacio anular entre el agujero de las placas y el conector con resina epóxica.
d. Se cumpla con lo establecido en el capítulo 13 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Se debe garantizar en particular que las soldaduras de penetración completa cumplan con los espesores y longitud de cordón requeridos.
e. En caso de colocar concreto o mortero fluido sin contracción, verificar que la cimbra permita la salida de aire y facilite la colocación del material.
f. El revenimiento del concreto del marco de conexión sea el adecuado para favorecer su trabajabilidad y colocación.

6.11.9 Uso en la infraestructura escolar

La adición de contraventeo se ha usado en prototipos de acero y, en algunas ocasiones, en los prototipos de concreto. En el caso de los prototipos de concreto, ha sido crítica su conexión con los elementos de concreto a fin de asegurar un comportamiento monolítico.

Los marcos metálicos con contraventeos de 75 mm de sección transversal han sido soldados directamente a la estructura metálica con cordones de soldadura intermitente a lo largo de los elementos de acero como vigas y columnas. En la figura 6.11.25 se muestra una escuela rehabilitada con contraventeos en forma de X conectados al marco de concreto mediante un marco de acero.



Figura 6.11.25
Escuelas rehabilitadas con contraventeos en X.
Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

6.12 Adición de contraventeos metálicos a base de cables postensados

6.12.1 Deficiencia por corregir

El diseño de la rehabilitación mediante la adición de contraventeos metálicos a base de cables postensados dependerá del modo de comportamiento de la estructura existente que se haya identificado durante la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que pueden ser rehabilitados para mejorar su desempeño sísmico mediante la adición de contraventeos a base de cables postensados son:

a. Edificios con columnas cuyo modo de comportamiento está controlado por fuerza cortante y cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio.
b. Edificios a base de marcos resistentes a momento con insuficiente resistencia y/o rigidez lateral.

La adición de contraventeos a base de cables postensados permite:

a) Incrementar la resistencia global de la estructura ante cargas laterales como las inducidas por sismo.
b) Aumentar la rigidez lateral global de la estructura y, consecuentemente, disminuir las demandas de desplazamiento lateral.

6.12.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

6.12.3 Descripción de la técnica

El contraventeo con cables postensados consiste en suministrar suficiente tensión a los cables para incrementar la rigidez y la resistencia lateral del edificio. Idóneamente, se aplica una magnitud de postensado que no requiera la rehabilitación de los elementos estructurales existentes, con excepción de una modificación local de la cimentación para anclar los cables y para resistir las acciones generadas por los cables. Esta técnica ofrece la ventaja de aprovechar la capacidad estructural existente, sin adicionar masa (o peso) de manera significativa. Por lo regular, esta técnica se aplica en edificios de hasta cuatro niveles.

En la figura 6.12.1 se muestran detalles de los armados de las zonas de anclaje de los cables postensados en la cimentación y en la azotea de edificios escolares rehabilitados en 1985. Cuando los edificios rehabilitados fueron de cuatro pisos, se instalaron guías para evitar las vibraciones fuera del plano de los cables (figura 6.12.2.a) o zonas de anclaje intermedias, en el nivel 2, como la mostrada esquemáticamente en la figura 6.12.2.b.

6.12.4 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se deberá cumplir con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica.
c. Las dimensiones de los cables de postensado se determinan de tal manera que la rigidez del sistema de refuerzo sea compatible con la de la estructura original para que ambos trabajen de manera conjunta.
d. Se supone que las conexiones tienen un comportamiento monolítico y se diseñan de acuerdo con la geometría de los nudos de la

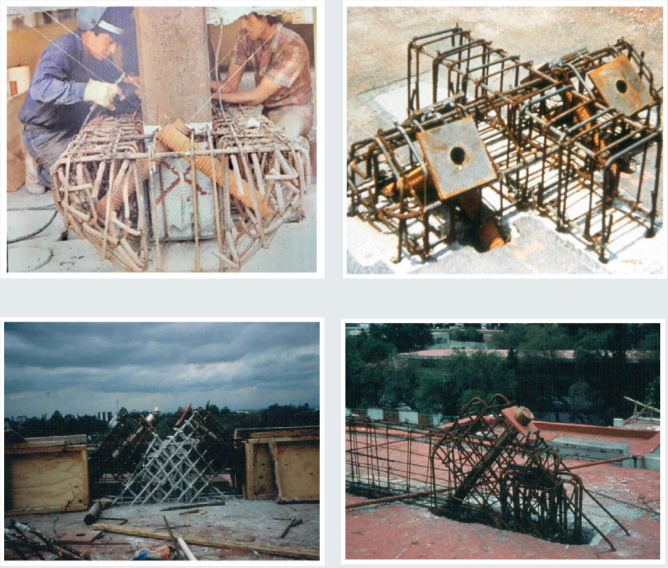
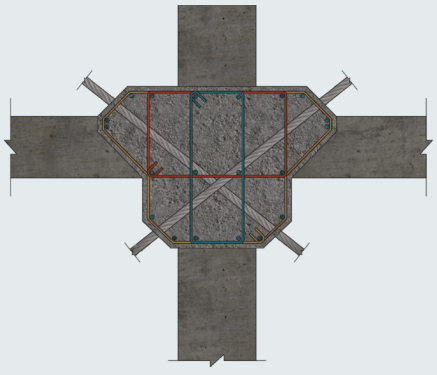
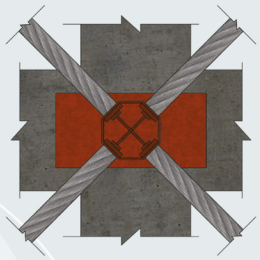


Figura 6.12.1
Ejemplos de armados de zonas de anclaje en cimentación y azotea para contraventeos a base de cables postensados. Fuente: cortesía de Grupo Riobóo (2020).



a) Guía de cables postensados para evitar vibraciones del cable fuera del plano



b) Zona de anclaje intermedia de cables postensados

Figura 6.12.2
Ejemplos de armados de zonas de anclaje en cimentación y azotea para contraventeos a base de cables postensados. Fuente: cortesía de Grupo Riobóo (2020).

estructura. Consiste en anclajes de cables de presfuerzo unidos a la estructura, mediante dispositivos especiales que pueden ser metálicos o de concreto construidos en el sitio. Las conexiones se construyen en la azotea y en la cimentación del edificio. Si el inmueble tiene más de tres niveles, se coloca otro anclaje en el piso intermedio.

6.12.5 Requisitos de diseño

a. Se deberán diseñar los apoyos de los cables postensados para que puedan transmitir las fuerzas a la estructura existente.
b. Los apoyos (o atraques) se detallarán con refuerzo transversal (perpendicular al eje del cable) para confinar el concreto de acuerdo con el inciso 11.7.5 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
c. Se aceptará el uso del método de puntales y tensores para el diseño de estas zonas (Apéndice B de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
d. Se revisará la resistencia a flexocompresión de las columnas para soportar las componentes verticales del presfuerzo con las cargas totales del análisis.
e. Se revisará la capacidad a fuerza cortante de la estructura original, en especial de columnas ante los desplazamientos laterales de diseño inducidos por el sismo.

6.12.6 Requisitos de construcción

Durante la construcción, se deberá prestar atención a los incisos siguientes:

a) Preparar toda superficie de concreto que estará en contacto con los atraques (de cimentación, intermedios y de azotea) con una profundidad media de 6 mm (1/4 pulg).
b) Construir los atraques en la cimentación conectados a la zapata existente por medio de anclas.

c) Localizar las barras de acero de refuerzo existentes en el sistema de piso y techo para poder realizar las perforaciones sin afectarlas.
d) Rehabilitar las columnas, si es necesario, mediante encamisado de concreto, de acero o de CPRF.
e) Apuntalar la estructura durante el proceso de instalación del contraventeo.
f) Perforar la losa para pasar los cables, así como para colocar y comprar el concreto de atraques superiores e intermedios.
g) Una vez construidos los atraques, tensar los cables según lo especificado en el proyecto ejecutivo (véase figura 6.12.3).
h) Inyectar la funda de los cables con mortero fluido de baja contracción. Para evitar el uso de la funda, se aceptará el uso de cables de acero galvanizado.

6.12.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se deberá revisar que:

a. Toda la superficie de concreto se escarifique hasta alcanzar una rugosidad como la especificada en los planos de construcción.
b. El diámetro y la profundidad del agujero para alojar anclas o conectores sean los especificados en el proyecto ejecutivo, con las tolerancias establecidas por los fabricantes.
c. Se limpie el agujero de polvo y residuos de la perforación para la correcta adhesión de la resina con el concreto existente.
d. Cuando corresponda, rellenar el espacio anular entre el agujero de las placas y el conector con resina epóxica.
e. Se cumpla con lo establecido en el capítulo 13 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Especialmente, se debe garantizar que las soldaduras de penetración completa cumplan con los espesores y longitud de cordón requerido.
f. En caso de colocar concreto o mortero fluido sin contracción, se permita la salida de aire y facilite la colocación del material.

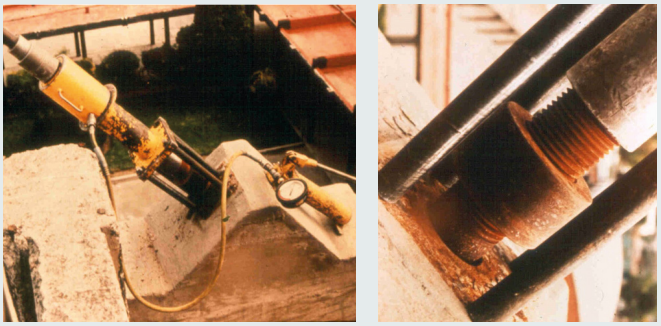


Figura 6.12.3
Tensado de cables de contraventeo. Fuente: cortesía de Grupo Riobóo (2020).

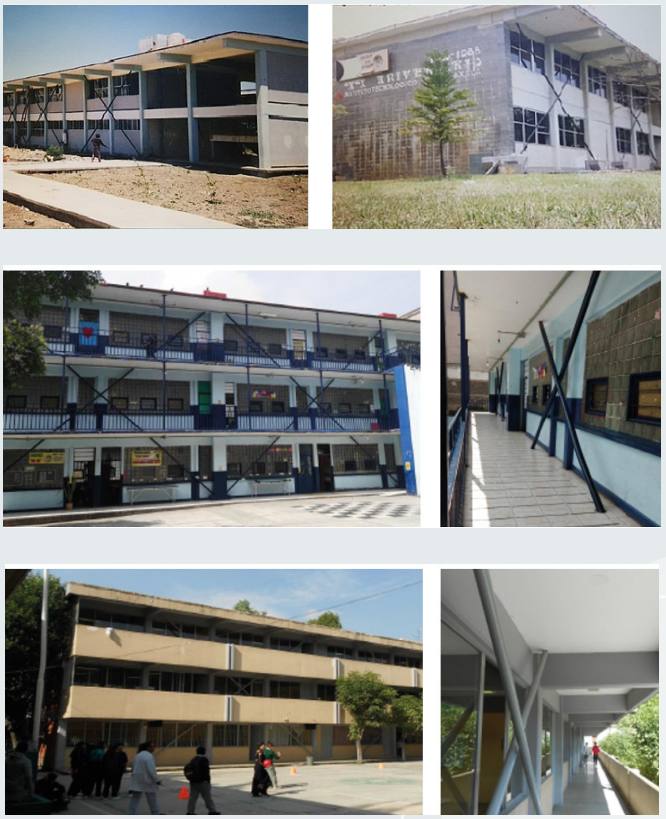


Figura 6.12.4
Escuelas rehabilitadas a base de cables postensados. Fuente: cortesía de Grupo Riobóo (2020).

6.12.8 Uso en la infraestructura escolar

Esta técnica se ha usado para rehabilitar escuelas urbanas de concreto de hasta cuatro niveles. Después del sismo de 1985 se rehabilitaron más de un centenar de edificios (figura 6.12.4).

6.13 Sustitución o adición de muros diafragma de mampostería

6.13.1 Deficiencia por corregir

La decisión de sustituir muros diafragma de mampostería dañados o con resistencia insuficiente, así como de añadir muros diafragma de mampostería, dependerá del modo de comportamiento de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación sísmica.

Los edificios que se pueden rehabilitar mediante la sustitución y/o adición de muros diafragma de mampostería son:

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

Con la sustitución y/o adición de muros diafragma de mampostería se logra:

a) Incrementar la rigidez lateral del marco de concreto o de acero.
b) Aumentar la resistencia lateral global de la estructura.
c) Evitar la falla por cortante de columnas existentes con dimensiones y cuantías de refuerzo insuficientes.
d) Reducir daños estructurales y no estructurales al limitarse las distorsiones laterales.

6.13.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

En escuelas, como las que se construyeron siguiendo los prototipos de CAPFCE o INIFED, es frecuente el uso de esta técnica en la dirección perpendicular al corredor del edificio. Los muros diafragma se aprovechan para separar los salones de clase. Será necesario revisar la capacidad de la cimentación y del suelo, en especial si los muros diafragma son nuevos en la estructura.

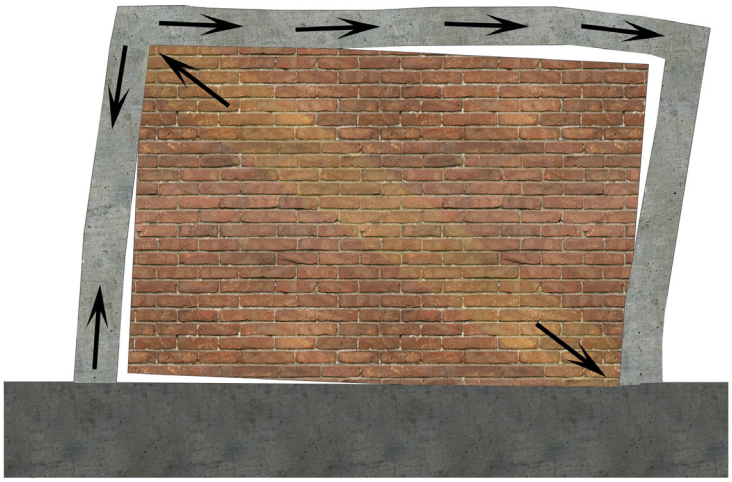
6.13.3 Descripción de la técnica

Consiste en la sustitución de muros de mampostería de relleno dañados o débiles y/o en la adición de muros diafragma, construidos en contacto en toda la altura de las columnas laterales y en toda la longitud de la viga superior. En la figura 6.13.1 se puede observar un espécimen para ensaye de laboratorio de un marco de concreto con muro diafragma de bloques de mampostería.



Figura 6.13.1
Marco de concreto con muro diafragma de bloques de mampostería para ser ensayado en laboratorio. Fuente: cortesía del CENAPRED (2019).

Figura 6.13.2
Interacción entre un marco y un muro diafragma. Fuente: elaboración propia con base en Crisafulli (1997).



A diferencia de los muros de carga que resisten cargas verticales y laterales, los muros diafragma únicamente resisten cargas laterales. Puesto que las vigas y columnas de los marcos usualmente se deforman por flexión y los muros diafragma se deforman por cortante, la interacción marco-muro diafragma ocurre en las esquinas del muro en contacto con el marco (figura 6.13.2). Esta interacción produce una concentración de fuerzas cortantes en los extremos de las vigas y columnas, para las cuales se deben revisar y, en su caso, reforzar. Durante los desplazamientos laterales inducidos por el sismo, el muro diafragma desarrolla un mecanismo resistente caracterizado por un campo de compresión a lo largo de la diagonal. Este campo de compresión se conoce comúnmente como puntal diagonal, el cual reacciona contra el marco en esquinas opuestas. La estabilidad de este mecanismo depende del tipo de pieza de mampostería, así como de las dimensiones relativas y detallado del marco.

Los muros diafragma de mampostería deben ser de mampostería confinada (con o sin refuerzo horizontal, o con o sin malla de alambre soldado). En los casos en que se usen mallas de alambre soldado, se debe cumplir con lo establecido en la sección 6.9 de esta Guía técnica. En ningún caso se aceptará colocar muros diafragma de mampostería simple (es decir, sin castillos ni dalas) o reforzada interiormente. Los muros de mampostería simple tienen baja resistencia y se degradan con rapidez. Los muros de mampostería reforzada interiormente, si bien tienen un comportamiento superior a la modalidad simple, son difíciles de construir cuando ya existe el marco. Un ejemplo de muro diafragma de mampostería simple con daño severo se puede observar en la figura 6.13.3.



Figura 6.13.3
Muro diafragma de mampostería simple dañado durante los sismos de 2017. Fuente: cortesía de INIFED (2019b).

Si el muro diafragma existente se va a dejar, se deberán construir los castillos laterales y la dala superior. Esto implica ranurar verticalmente el muro diafragma existente y retirar alguna o algunas

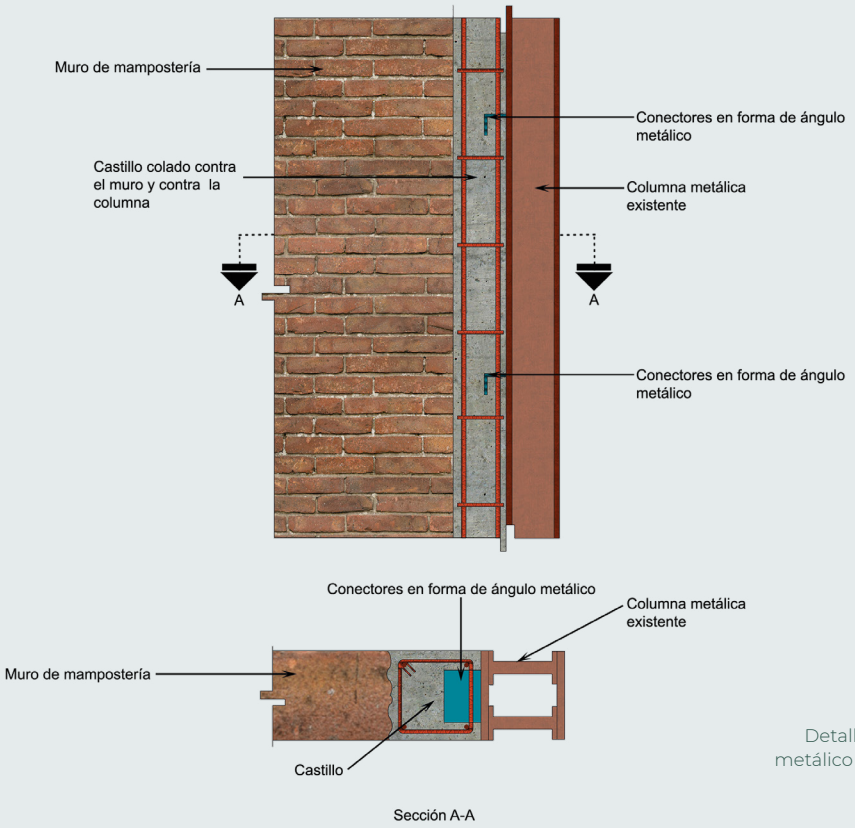


Figura 6.13.4
Detalle de conexión de muro diafragma a un marco metálico mediante ángulos. Fuente: elaboración propia con base en INIFED (2017b).

hiladas superiores. El refuerzo vertical del castillo se deberá anclar en su base de conformidad con las NTC-Concreto, si el marco es de concreto. Si el marco es de acero, se aceptará soldar las barras longitudinales con soldadura de filete.

Los castillos y dalas externos al muro se conectarán al marco existente por medio de anclas o conectores ahogados en resina (en caso de marcos de concreto) o soldados (si el marco es de acero). En el caso de marcos de concreto, la conexión es similar a la de los marcos construidos para conectar contraventeos metálicos de tipo concéntrico (véase figura 6.11.9).

Si el marco es metálico, se deberá prestar atención a la unión con los elementos de confinamiento del muro diafragma. Se deberá verificar que el mecanismo de transferencia de cortante entre el marco metálico y los elementos de confinamiento sea suficiente para mantener en contacto las esquinas del muro diafragma con las columnas y vigas del marco. En la figura 6.13.4 se muestra el detalle de la conexión del muro diafragma confinado al marco metálico mediante ángulos de acero estructural. Si bien esta solución se ha usado en la práctica, es dudoso que el concreto quede bien colocado debajo el ángulo. Un detalle optativo es usar barras con tuerca o pernos tipo Nelson.

En ocasiones, es necesario construir nuevas zapatas corridas, o bien, agrandar las existentes, así como encamisar contratrabes existentes para resistir las nuevas cargas verticales, por el peso de los muros, y el cortante que se transmite a la cimentación.

6.13.4 Requisitos de análisis

a. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 4.3 de esta Guía técnica.
b. Factor de comportamiento sísmico. Se cumplirá con el inciso 4.3.3.8 de esta Guía técnica. Se analizará la estructura con un factor de

comportamiento sísmico Q=2 si se emplean piezas macizas. Si se usan piezas huecas se usará Q=1.5. Si se usan piezas huecas con al menos la cuantía mínima de refuerzo horizontal según las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), se aceptará usar Q=2.

c. Carga axial. Se considerará que la carga axial en el muro diafragma es nula; se podrá considerar su peso propio. Se supone que la carga vertical del edificio es resistida por las columnas de la estructura existente.
d. Comportamiento monolítico. Se supondrá que existe un adecuado mecanismo de transmisión de esfuerzos entre el muro diafragma y la estructura existente, de modo que el comportamiento sea monolítico. Para lograrlo, se deberá diseñar el mecanismo de transferencia de cortante entre el muro diafragma y el marco existente.
e. Factor de rigidez relativa para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para la estructura original si es de concreto, según el inciso 3.2.1 de las NTC - Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Para el muro diafragma, se usará un factor de rigidez efectiva de 0.5 para ser aplicado al módulo de rigidez a cortante del muro.

6.13.5 Requisitos de diseño

6.13.5.1 Alcances y requisitos generales

a) Se cumplirán los requisitos de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), con las siguientes precisiones o excepciones:
   i. Se satisfarán los requisitos del capítulo 4 de las NTC-Mampostería.
   ii. Sólo se aceptarán muros diafragma con elementos de confinamiento, detallados y construidos según el capítulo 5 de las NTC-Mampostería.
   iii. Para el cumplimiento del inciso 4.1.a, se considerará a los edificios existentes como estructuras Tipo II, según la definición de la sección 1.5 de las NTC-Mampostería.
   iv. Separación de castillos. La separación de los castillos deberá satisfacer el inciso 5.1.1.a.
   v. Detallado y anclaje. Se deberán cumplir los requisitos de la sección 3.4 de las NTC-Mampostería sobre el detallado y anclaje del refuerzo longitudinal y transversal de castillos y dalas.
   vi. Dimensiones y cuantías mínimas de refuerzo de elementos confinantes. Las dimensiones y cuantías mínimas de refuerzos longitudinal y transversal de castillos y dalas satisfarán los incisos 5.1.1 y 5.1.2 de NTC-Mampostería.
   vii. Resistencia del concreto. La resistencia del concreto de los castillos y dalas no será menor que 25 MPa (250 kg/cm²), ni menor que la resistencia de la estructura existente.
   viii. Tamaño máximo de agregado. El tamaño nominal máximo de los agregados no debe ser mayor que un quinto de la menor distancia horizontal entre caras de los moldes, ni dos tercios de la separación horizontal libre mínima entre barras.
   ix. Mortero. Se usará mortero tipo I para pegar las piezas de mampostería.
b) Se diseñará un mecanismo de transferencia de cortante entre el muro diafragma y el marco existente.
   I. Si el marco es de concreto, se aceptará que el cortante de diseño del muro diafragma (inciso 4.1.b de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) sea resistido por barras corrugadas de acero ahogadas en resina epóxica (anclas). Las anclas serán diseñadas de acuerdo con la sección 6.3 de esta Guía técnica. Las anclas deberán rematarse con ganchos a 90 grados dentro del castillo o dala.
   II. Si el marco es de acero, se aceptará que el cortante de diseño del muro diafragma (inciso 4.1.b de las NTC- Mampostería de la



Figura 6.13.5
Ejemplo de un muro diafragma confinado por castillos y dalas. Se observa el castillo colado en la mitad inferior.
Fuente: cortesía del CENAPRED (2019).

Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), sea resistido por medio de conectores tipo Nelson o barras con tuercas soldados a la columna y vigas. Los conectores tipo Nelson se diseñarán de acuerdo con la sección 10.7 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Si se opta por usar barras soldadas al marco con tuercas, el diámetro de éstas será dos veces el de aquéllas.

6.13.6 Requisitos de construcción

Durante la construcción, se deberá prestar atención a los incisos a a g siguientes:

a. Reforzar, si se requiere, la cimentación existente; en algunos casos, es necesario construir nuevos elementos estructurales. Se debe dejar la preparación para anclar el refuerzo longitudinal de los castillos.
b. Si no se requiere reforzar la cimentación, ranurar el cimiento para anclar el refuerzo longitudinal de los castillos extremos e intermedios (si es necesario).
c. Preparar toda superficie de concreto que estará en contacto con los elementos de confinamiento del muro diafragma con una profundidad media de 6 mm (1/4 pulg).
d. Colocar las anclas (en caso de marcos de concreto) o de conectores tipo Nelson o barras con tuercas (en caso de marcos metálicos) de acuerdo con el proyecto ejecutivo.
e. Habilitar la cimbra de modo que se facilite la salida del aire atrapado en el concreto.
f. Colocar y compactar el concreto de castillos y dalas, usando concreto clase 1, con aditivo estabilizador de volumen y, de ser necesario, con aditivos fluidificantes.
g. En la colocación del concreto de las dalas, se acepta usar cimbras especiales con resbaladilla (véase figura 6.10.10). Se acepta el empleo de mortero fluido sin contracción, con resistencia al menos igual a la del marco de concreto o de 30 MPa (300 kg/cm²) para los últimos 25 mm en contacto con la viga.

6.13.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se debe supervisar que:

a) Si se requiere, se rehabilite (más comúnmente, se refuerce) la cimentación según lo señalado en los planos.
b) El refuerzo longitudinal de los castillos esté adecuadamente anclado en la cimentación y en el sistema de piso, como lo indican los planos.
c) Las anclas o conectores entre el muro diafragma y las columnas y viga se coloquen de conformidad con el proyecto ejecutivo.
d) El concreto tenga el revenimiento suficiente para colocar el concreto evitando oquedades por aire atrapado en la cimbra.
e) De usarse, el mortero fluido sin contracción tenga una resistencia al menos igual a 30 MPa (300 kg/cm²) o 5 MPa (50 kg/cm²) superior a la del marco existente, la que resulte mayor. Se aceptará el uso de un aditivo expansor con una dosificación correspondiente a la mitad de la especificada por el fabricante.

6.13.8 Uso en la infraestructura escolar

Esta técnica de rehabilitación se ha usado en prototipos a base de marcos rígidos de concreto (U1-C, U2-C, U3-C) y metálicos (U1, U2, U3 y A-70).

En la figura 6.13.5 se aprecia el armado de los castillos y dalas antes de la colocación del concreto.

6.14 Separación y recorte de pretiles en marcos de concreto o acero

6.14.1 Deficiencia por corregir

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

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

A. Edificios a base de marcos resistentes a momento de concreto o de acero, con pretiles.

Con el recorte y separación de los pretiles se logra:

a. Permitir el desplazamiento lateral de las columnas (de concreto o acero) del marco.
b. Evitar el modo de comportamiento llamado de "columna corta" de elementos de concreto, caracterizado por agrietamiento por cortante, rotura del refuerzo transversal y pandeo del refuerzo longitudinal. Daños muy severos están asociados a la pérdida de la capacidad lateral e, incluso, de la capacidad para resistir cargas verticales.
c. Evitar el modo de comportamiento de "columna corta" en marcos de acero, caracterizado por pandeo del alma, rotura de soldaduras y aplastamiento de la columna. Este daño conduce a la pérdida de la capacidad lateral e, incluso, de la capacidad para resistir cargas verticales.

En la figura 6.14.1 se muestran ejemplos de daños en columnas de marcos de acero y de concreto como resultado de la interacción de pretiles o muros bajo ventana construidos directamente contra las columnas, o bien, separados una distancia insuficiente para permitir el desplazamiento lateral de las columnas. El fenómeno de restringir el desplazamiento lateral de una columna en parte de su altura se conoce como "columna corta", y también ocurre cuando las vigas o faldones de fechada son muy peraltadas y restringen el desplazamiento de las columnas.

6.14.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

En caso de que la estructura existente no cuente con la resistencia y/o rigidez lateral requeridas tras la evaluación, la estructura tendrá que rehabilitarse con alguna de las técnicas ya descritas. Se podrán usar las siguientes, solas o combinadas:

a) Encamisado de columnas con concreto (véase sección 6.6 de esta Guía técnica).
b) Encamisado de columnas con acero (véase sección 6.7 de esta Guía técnica).



Figura 6.14.1
Daños tipo observados en edificios escolares por el fenómeno de la "columna corta". Fuente: cortesía del INIFED (2019b); archivo personal de Sergio Alcocer y Rubén Bautista (2018).

c) Encamisado de columnas con CPRF (véase sección 6.8 de esta Guía técnica).
d) Adición de muros de concreto (véase sección 6.10 de esta Guía técnica).
e) Adición de contraventeos (véase sección 6.11 de esta Guía técnica).
f) Adición de contraventeos a base de cables postensados (véase sección 6.12 de esta Guía técnica).

6.14.3 Descripción de la técnica

Consiste en la separación de muros cortos bajo la ventana (pretiles) que están en contacto con las columnas de un marco, de concreto o de acero, o bien, que están separados de ellas menos de la distancia requerida según los requisitos de las NTC-Sismo. Si el muro es de mampostería, éste será recortado vertical y horizontalmente para poder construir castillos y dalas en sus extremos laterales y en la parte superior. Se permite recortar la altura del muro si la construcción de la dala afecta el funcionamiento del edificio, en especial, su iluminación y su ventilación.

Si el muro es de concreto, igualmente se demolerán los extremos para alojar refuerzo vertical y transversal en forma de un castillo dentro del espesor del muro.

El propósito del refuerzo vertical y transversal de los castillos es dotar al pretil de suficiente resistencia y rigidez fuera de plano y, así, evitar su volteo. El refuerzo longitudinal de los castillos se deberá anclar en la cimentación y/o losa de piso, según corresponda.

En la figura 6.14.2 se puede observar el refuerzo longitudinal de un castillo de confinamiento de un pretil reconstruido. Nótese que las barras longitudinales están traslapadas con anclas instaladas en la cimentación.



Figura 6.14.2
Pretil de mampostería reconstruido y confinado con castillos anclados a la cimentación. Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2018).

6.14.4 Consideraciones de análisis

a) No será necesario analizar los pretiles para acciones fuera de plano si se cumplen los requisitos de diseño del inciso 6.14.5.

6.14.5 Requisitos de diseño

Será necesario separar y recortar un pretil en contacto con o separado de la columna menos de la distancia requerida calculada según los requisitos de las NTC-Sismo. Sólo será necesario separar y recortar pretiles cuya altura sea superior a la cuarta parte de la altura libre de la columna.

Adicionalmente, se deberá cumplir con a y b:

a. Separación libre. La separación libre del pretil recortado, incluyendo los nuevos castillos y refuerzo en sus extremos laterales, con respecto a la columna del marco, será mayor o igual que la distancia requerida calculada según los requisitos de las NTC-Sismo. La separación calculada se indicará en los planos de construcción.
b. Acero de refuerzo de elementos confinantes del pretil. Para el diseño y detallado del refuerzo longitudinal y transversal de castillos y dalas en pretiles de mampostería recortados, se aplicará lo requerido en las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). En particular, se deberán cumplir los requisitos de:
    i. La sección 3.4 sobre el detallado del refuerzo.
    ii. Los incisos 5.1.1 y 5.1.2, según aplique, sobre las dimensiones y cuantías mínimas de refuerzos longitudinal y transversal de castillos y dalas, suponiendo que el pretil es una estructura tipo I, según la definición de la sección 1.5 de las NTC-Mampostería.
c. Para el refuerzo vertical y horizontal de pretiles de concreto, se tratará el muro como si fuera de mampostería y se aplicará lo requerido en el inciso anterior.
d. Resistencia del concreto. La resistencia del concreto de los castillos y dalas no será menor de 25 MPa (250 kg/cm^2), ni menor que la resistencia de la estructura existente.
e. Se aceptará traslapar anclas ahogadas en cimentación o losa de piso con el refuerzo longitudinal del castillo, en caso de pretiles de mampostería, o con el refuerzo vertical en el borde recortado del pretil de concreto.

6.14.6 Requisitos de construcción

Durante la construcción, se deberá prestar atención a los incisos siguientes:

a. Abrir un espacio vertical en toda la altura del pretil, adyacente a la columna, de 140 mm de ancho (para el castillo) más el espesor de la nueva junta flexible que separará el pretil recortado de la columna.
b. Preparar el borde vertical del muro que estará en contacto con el concreto del nuevo castillo. En el caso de un pretil de mampostería, hacer un dentado que tenga una amplitud entre cresta y valle de al menos 50 mm. Si el pretil es de concreto, la rugosidad será de al menos 6 mm (1/4 pulg).
c. Alojar el nuevo refuerzo longitudinal del castillo en la caja practicada para el efecto en la cimentación. En caso de una losa de piso, anclar el refuerzo longitudinal mediante resina epóxica. Se aceptará traslapar el refuerzo vertical con anclas ahogadas en el cimiento o en la losa de piso.
d. Habilitar la cimbra para facilitar la salida del aire atrapado en el concreto.
e. Colocar el concreto en los castillos (en caso de pretiles de mampostería) o en el pretil de concreto recortado en una capa, a menos de que el castillo o pretil tenga más de 150 mm de altura, y compactar de conformidad con las NTC-Concreto.
f. Colocar el concreto de la dala, si se requiere, y compactar de conformidad con las NTC-Concreto.
g. Colocar el material de relleno de la junta de conformidad con el proyecto ejecutivo.
h. Verificar que la junta del pretil recortado con el marco no haya quedado cubierta de concreto o mortero.

6.14.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se debe supervisar que:

a) El refuerzo longitudinal del castillo se ancle a los cimientos o losas de piso como lo indican los planos.
b) La separación entre la columna y el nuevo castillo sea mayor o igual que lo especificado en los planos.
c) Se coloque la junta flexible entre la columna y el pretil rehabilitado, sin contaminación de concreto o mortero.

6.14.8 Uso en la infraestructura escolar

Esta técnica de rehabilitación se ha usado en prototipos a base de marcos rígidos de concreto (U1-C, U2-C, U3-C) y metálicos (U1, U2, U3 y A-70) (figura 6.14.1). En la figura 6.14.3 se muestra un detalle del armado de los castillos y dalas de un pretil de mampostería recortado. Obsérvese la espuma de poliestireno que se debe instalar en la junta vertical entre el castillo del pretil y la columna de la estructura existente. Asimismo, se puede notar el anclaje del refuerzo vertical del castillo con dobleces a 90 grados, así como el uso de conectores (anclas) en la base de los castillos.

6.15 Sistemas de protección pasiva

6.15.1 Deficiencia por corregir

La decisión de colocar disipadores de energía sísmica dependerá del modo de comportamiento de la estructura existente que se haya identificado como resultado de la evaluación estructural ante sismos y del Objetivo de la Rehabilitación.
Los edificios que se pueden rehabilitar mediante la colocación de disipadores de energía sísmica son:

a. Edificios a base de marcos resistentes a momento, de concreto o acero, con rigidez y/o resistencia lateral insuficientes.

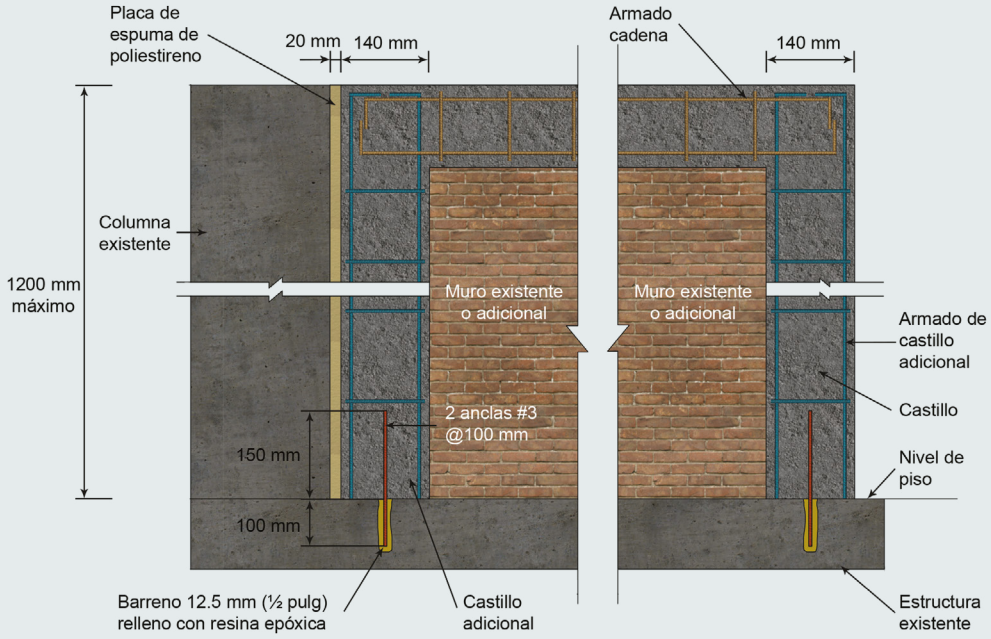


Figura 6.14.3
Detalle de la separación y recorte de un pretil. Fuente: INIFED (2017b).

b. Edificios a base de marcos resistentes a momento, de concreto o de acero, cuya falla está controlada por fuerza cortante en las columnas.
c. Edificios a base de marcos resistentes a momento con excentricidades en la distribución de rigideces en planta.

Con la adición de disipadores de energía sísmica se logra:

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

6.15.2 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

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

6.15.3 Descripción de la técnica

Consiste en la colocación de disipadores de energía sísmica, como sistema secundario, con objeto de reducir la respuesta sísmica del edificio. En la mayoría de los casos, los disipadores de energía sísmica están conectados a contraventeos metálicos. Los elementos de contraventeo deben

permanecer dentro de su intervalo de comportamiento elástico ante fuerzas asociadas al estado límite de seguridad contra colapso.

De acuerdo con el Apéndice B de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), los disipadores de energía sísmica se clasifican como sigue:

a. Elementos en los que la disipación de energía depende principalmente del desplazamiento relativo entre sus extremos. A este tipo de dispositivos se les llama aquí disipadores histeréticos. Incluyen tanto disipadores de fricción como los constituidos por materiales que desarrollan deformación plástica.
b. Elementos en los que la disipación de energía depende principalmente de la velocidad relativa de sus componentes. Pueden depender, en menor medida, del desplazamiento relativo entre sus extremos. Un ejemplo son los disipadores viscoelásticos.

En la figura 6.15.1 se presentan ejemplos de distintos tipos de disipadores de energía sísmica.

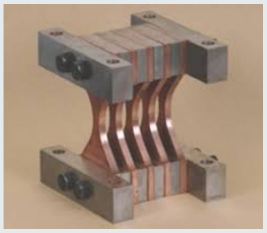
Figura 6.15.1
Tipos de disipadores de energía sísmica: a) contraventeos restringidos al pandeo; b) amortiguadores viscoelásticos; c) dispositivos histeréticos tipo ADAS; d) disipadores histeréticos de placa tipo oruga; e) dispositivos de fricción; f) muros de placa de acero. Fuente: cortesía de César Viramontes (2020).



a) Contraventeos restringidos al pandeo



b) Disipadores viscoelásticos



c) Disipadores histeréticos tipo ADAS



d) Disipadores histeréticos de placa tipo oruga



e) Disipadores de fricción



f) Muros de placa de acero

6.15.4 Requisitos de análisis

Los edificios rehabilitados mediante la adición de contraventeos metálicos y disipadores de energía sísmica se analizarán de conformidad con el Capítulo 3 y el Apéndice B de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.15.5 Requisitos de diseño

a. Se cumplirán los requisitos de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) para el diseño del sistema secundario (inciso B.1.2).
b. Se deberán satisfacer los requisitos para diseño de contraventeos metálicos de la sección 6.11 de esta Guía técnica.

6.15.6 Requisitos de construcción

Se deberá prestar atención a los requisitos de:
a) Contraventeos metálicos. Cumplir los requisitos de construcción de la sección 6.11 de esta Guía técnica.
b) Disipadores de energía. Instalar, alinear y conectar los disipadores de energía siguiendo las instrucciones del fabricante.

6.15.7 Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad

Se debe supervisar que:
a. Se cumpla con los requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad para nuevos contraventeos metálicos incluidos en la sección 6.11 de esta Guía técnica.
b. Los disipadores de energía satisfagan las pruebas, en su caso, control de calidad y los criterios de aceptación del Apéndice B de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

6.16 Rehabilitación de la cimentación

6.16.1 General

En esta sección se describen, de modo breve, las distintas opciones disponibles para rehabilitar los elementos estructurales de la cimentación, así como para recimentar y/o renivelar un edificio existente.

Puesto que las estructuras de los edificios existentes en planteles escolares son relativamente bajas, sus cimentaciones son, por lo general, superficiales. Éstas pudieron haber sido resueltas con zapatas corridas, de concreto o de piedra braza, con losas de concreto con contratrabes de rigidez o con cajones de cimentación desplantados a profundidades someras. En algunos casos, en zonas de suelos muy blandos, se encuentran cimentadas con pilotes, ya sea de punta, fricción o de fricción con control.

6.16.2 Deficiencias por corregir

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:
i. Edificios cuya rehabilitación de la estructura demandará mayores acciones (fuerzas y momentos) internas que las que pueden resistir los elementos estructurales de la cimentación ante los estados límite de servicio y falla.
ii. Edificios que experimentaron daños moderados o severos en los elementos estructurales de la cimentación.
iii. Edificios cuya inclinación es superior al límite establecido en el Reglamento y sus Normas y que requieren ser recimentados y/o renivelados.

En la figura 6.16.1 se presenta un diagrama de flujo que ilustra cuándo recimentar una estructura y cuándo recimentar y renivelarla, simultáneamente. Se requerirá recimentarla si la estructura rehabilitada estará sometida a acciones internas superiores a las de diseño y/o cuando los elementos

estructurales de la cimentación estén dañados. Adicionalmente, será necesario renivelarla si la inclinación del edificio excede los límites establecidos en el Reglamento y sus Normas.

6.16.3 Demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño sísmico

Las demandas de resistencia, rigidez y capacidad de deformación inelástica para diseño se calcularán a partir de la NMX-R-079-SCFI-2015 o, en su defecto, de las NTC-Sismo del reglamento de construcciones local, la que resulte en mayores valores.

Se aceptará revisar los elementos estructurales de la cimentación para fuerzas y momentos internos calculados usando un factor de comportamiento sísmico $Q=2$.

6.16.4 Investigación del subsuelo

Dependiendo de la población en donde se encuentre el edificio escolar en estudio, se deberá investigar el subsuelo atendiendo a sus características y los requisitos del Reglamento y de sus NTC-Cimentaciones.

En el inciso 6.16.4.1 se establecen los requisitos aplicables para la Ciudad de México. Éstos se podrán cumplir, según corresponda, en otras poblaciones.

6.16.4.1 Investigación del subsuelo de la Ciudad de México

a. Se deberá investigar el subsuelo según los requisitos establecidos en el capítulo 2 de los NTC-Cimentaciones de la Ciudad de México:
   i. Investigación de colindancias. Para definir el tipo y las condiciones de cimentación de las estructuras colindantes, así como las características de las instalaciones subterráneas cercanas para verificar que no haya interferencia entre estas estructuras y los trabajos de rehabilitación.
   ii. Reconocimiento del sitio. Establecer de manera preliminar en cuál de las tres zonas geotécnicas se localiza el proyecto de rehabilitación: zona I (lomas), II (transición) o III (lacustre) con apoyo de la figura 2.2.1 de las NTC-Cimentaciones de la Ciudad

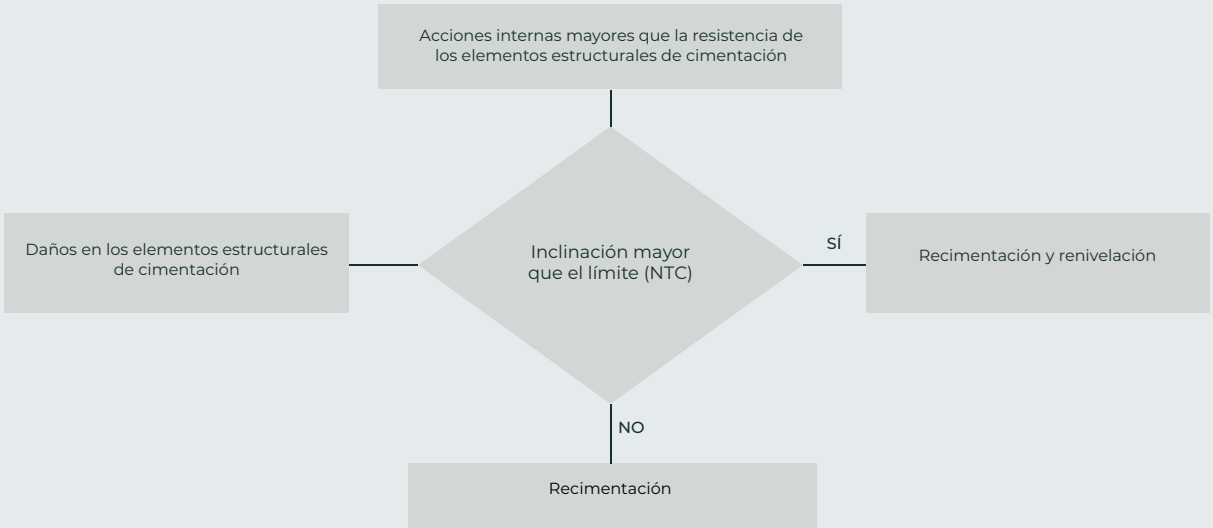


Figura 6.16.1
Diagrama de flujo para decidir cuándo recimentar y/o renivelar un edificio. Fuente: Cuevas (2019).

de México. Con esta información, se podrá programar la exploración geotécnica de campo y laboratorio para determinar las características estratigráficas y el comportamiento del subsuelo. La información recopilada deberá aclarar la secuencia estratigráfica, los parámetros mecánicos y las condiciones piezométricas.

iii. Número y profundidad de los sondeos. Se establecerá el número mínimo de sondeos que se deben realizar en cada caso, el cual es función del perímetro de la superficie cubierta por la construcción. La profundidad de los sondeos dependerá del ancho del área cargada, de las características del suelo y del nivel del estrato incompresible. Asimismo, se tomará en cuenta si el proyecto consta de varias estructuras desligadas para hacer un análisis de asentamientos del conjunto, lo que demandará profundizar la exploración.

b. La exploración geotécnica se hará como se indica en la tabla 6.16.1 según el tipo de suelo. En la figura 6.16.2 se muestra la correlación entre la resistencia de cono, q_c, y el módulo de compresibilidad, m_v, para suelo del sector oriente de la zona lacustre. En la tabla 6.16.2 se muestran la estratigrafía y las propiedades del sector oriente de la zona lacustre, en la tabla 6.16.3 las del sector no colonial desarrollada a partir de 1900, y en la tabla 6.16.4 las de la antigua traza de la Ciudad (COVITUR,1987). La figura 6.16.2 y las tablas 6.16.2 a 6.16.4 son aplicables a la Ciudad de México.

c. El estudio de mecánica de suelos deberá incluir, al menos:

i. Referencia a la tabla 2.3.1 de las NTC-Cimentaciones de la Ciudad de México con respecto a la inspección detallada, pozos a cielo abierto, pruebas de laboratorio o de campo.

ii. Ubicación de pozos a cielo abierto y de sondeos en el plano de la cimentación existente.

iii. Estratigrafía, propiedades de los materiales y definición de la profundidad de desplante (si aplica).

iv. Justificación y análisis del tipo de sondeo realizado (véase inciso 2.3.d de las NTC-Cimentaciones de la Ciudad de México).

v. Definición de la profundidad de desplante.

vi. Resultados de las pruebas de laboratorio.

vii. Modelo geomecánico de diseño que incluya las unidades estratigráficas, su profundidad, clasificación SUCS, propiedades índice y mecánicas.

viii. Condiciones piezométricas para el análisis.

ix. Descripción de la metodología de análisis.

x. Recomendación sobre el estudio de interacción suelo-estructura para revisar la seguridad estructural del edificio rehabilitado de conformidad con el capítulo C.2.1 "Diseño estructural de cimentaciones" del *Manual de Diseño de Obras Civiles* (CFE, 2017a).

6.16.5 Rehabilitación de elementos estructurales de la cimentación

Será necesario rehabilitar elementos estructurales de la cimentación cuando exhiben daños moderados o severos, o bien, porque no poseen la resistencia y/o rigidez necesaria para transmitir las acciones internas al suelo. En estos casos, se cumplirá con los requisitos siguientes:

a) Se aceptará la reparación local (sección 6.2), reparación de grietas (sección 6.3), la sustitución de elementos dañados (sección 6.4) y el uso de anclas y conectores para su rehabilitación (sección 6.5). Se deberán aplicar los requisitos correspondientes.

b) Sólo se aceptará el encamisado con concreto de elementos estructurales de la cimentación. Para el análisis, diseño, construcción y supervisión, se cumplirán los requisitos de la sección 6.6 de esta Guía técnica.

c) Si se amplía el tamaño de los elementos estructurales, se deberá diseñar el mecanismo de transmisión de carga entre elemento existente y la adición, de conformidad con las secciones 5.4 y 6.5 de esta Guía técnica.

Tabla 6.16.1
Requisitos para la exploración geotécnica en la Ciudad de México

Tipo de suelo	Núm. sondeos	Profundidad	Tipo de sondeos	Observaciones	Núm. muestras
I	Perímetro/80 Deberán ser suficientes para verificar las variaciones de la estratigrafía	1B o se profundiza si hay rellenos o estratos compresibles	Directos	Se determinará la presencia de rellenos sueltos, minas, oquedades, así como la estratigrafía y propiedades de los materiales.	
			PCA	Se obtienen muestras inalteradas y se observa directamente el perfil estratigráfico.	1 de cada estrato
			SPT	Se recuperan muestras alteradas de manera continua y se determina la consistencia y compacidad de los estratos (SPT).	
			Pruebas *in situ*	Ficómetro, presiómetro.	
			Indirectos: geofísicos	Sirven de complemento a la exploración directa, pero nunca de sustituto.	
II	Perímetro/80 Deberán ser suficientes para verificar las variaciones de la estratigrafía	3B o hasta la profundidad donde los incrementos de esfuerzos en el suelo sean significativos	Despalme	Detección de rellenos sueltos y grietas.	
			Directos	Se determinará la estratigrafía, propiedades índice y mecánicas y se verificará la continuidad estratigráfica. Se obtendrá un perfil continuo.	
			SM (SPT+ SCE)	Consiste en combinar técnicas para suelos blandos y duros. El sondeo mixto tradicional alterna SPT y muestreo selectivo.	
			SPT	Se recuperan muestras alteradas de manera continua y se determina la consistencia y compacidad de los estratos.	
III	Perímetro/120 Deberán ser suficientes para verificar las variaciones de la estratigrafía	3B o hasta la profundidad donde los incrementos de esfuerzos en el suelo sean significativos	SCE	Se mide la resistencia a la penetración del cono eléctrico (suelos blandos o sueltos).	
			SMS	Se obtienen muestras inalteradas, cuyas profundidades se definen con un sondeo continuo previo.	1 a cada 5-7m
			PCA	Obtención de muestras inalteradas, observación directa del perfil estratigráfico.	1 de cada estrato
			Pruebas *in situ*	Ficómetro, presiómetro, dilatómetro, veleta.	
				* Las condiciones piezométricas se determinan mediante: Estación piezométrica. Mediciones puntuales con piezoconos.	

NOTAS: B= el ancho del área cargada. PCA= pozo a cielo abierto. SPT= sondeo de penetración estándar. SM= sondeo mixto. SCE= sondeo de cono eléctrico. SMS= sondeo de muestreo selectivo.

Figura 6.16.2
Correlación entre la resistencia a la penetración de cono, q_c, y el módulo de compresibilidad, m_v, para suelo del sector oriente de la zona lacustre de la Ciudad de México.
Fuente: Cuevas (2019).

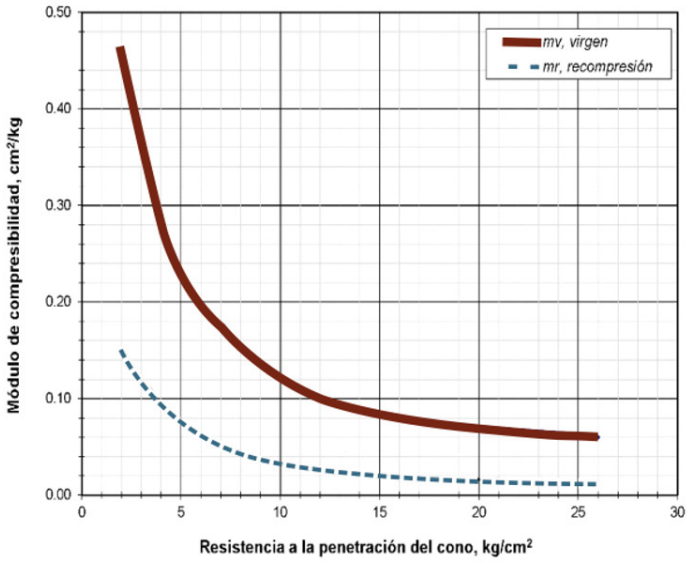


Tabla 6.16.2
Estratigrafía y propiedades, sector oriente de la zona lacustre de la Ciudad de México (COVITUR, 1987)

Estrato *	Espesor, en m	γ, en t/m³	c, en t/m²	ϕ, en grados
Costra superficial	1 a 2.5	1.4	1	20
Serie arcillosa superior	38 a 40	1.15	0.5 a 1	-
Capa dura**	1 a 2	-	0 a 10	25 a 36
Serie arcillosa inferior	15 a 30	1.25	3 a 4	-

*En orden de aparición a partir de la superficie.
**Los parámetros presentados corresponden con pruebas triaxiales CU.
γ, peso volumétrico; c, cohesión; ϕ, ángulo de fricción interna.

Tabla 6.16.3
Estratigrafía y propiedades, zona lacustre sector no colonial, desarrollada a partir de 1900 en la Ciudad de México (COVITUR, 1987)

Estrato *	Espesor, en m	γ, en t/m³	c, en t/m²	ϕ, en grados
Costra superficial	4 a 6	1.6	4	25
Serie arcillosa superior	20 a 30	1.2	1 a 2	-
Capa dura**	3 a 5	1.5-1.6	0 a 10	25 a 36
Serie arcillosa inferior	8 a 10	1.3-1.35	5 a 8	-

*En orden de aparición a partir de la superficie.
**Los parámetros presentados corresponden con pruebas triaxiales CU.
γ, peso volumétrico; c, cohesión; ϕ, ángulo de fricción interna.

Tabla 6.16.4
Estratigrafía y propiedades, zona lacustre antigua traza de la Ciudad de México (COVITUR, 1987)

Estrato *	Espesor, en m	γ, en t/m³	c, en t/m²	ϕ, en grados
Costra superficial	6 a 10	1.7	4	25
Serie arcillosa superior	20 a 25	1.3	3	-
Capa dura**	3 a 5	1.5-1.6	0 a 10	25 a 36
Serie arcillosa inferior	6 a 8	1.3-1.4	6 a 12	-

*En orden de aparición a partir de la superficie.
**Los parámetros presentados corresponden con pruebas triaxiales CU.
γ, peso volumétrico; c, cohesión; ϕ, ángulo de fricción interna.

6.16.6 Incremento del área de la cimentación y adición de pilotes

a. Cuando las nuevas solicitaciones demanden un incremento del área de la cimentación, a fin de que se satisfagan los estados límite de falla y de servicio de las NTC-Cimentaciones, se revisarán las opciones siguientes (figura 6.16.3):
   1. Modificar las zapatas aisladas para convertirlas en zapatas corridas.
   2. Cambiar las zapatas corridas en una dirección a zapatas corridas en ambas direcciones.
   3. Convertir las zapatas corridas en un cajón de cimentación.

b. Para los casos en los que el incremento del área de cimentación resulte insuficiente o sea muy compleja su construcción, será necesario añadir pilotes o micropilotes (los cuales tienen diámetros entre 300 y 500 mm), a fin de resistir las acciones de diseño. En el caso

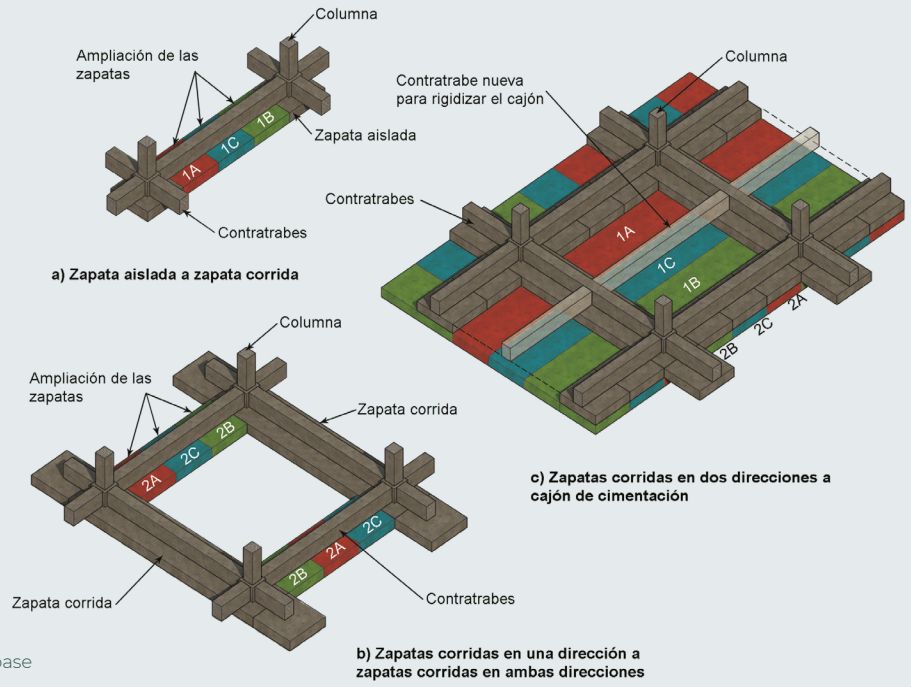


Figura 6.16.3
Opciones de modificación de la cimentación superficial de un edificio en proceso de rehabilitación. Fuente: elaboración propia con base en Cuevas (2019).

de que también sea indispensable recuperar la verticalidad del inmueble, los pilotes podrán ser utilizados para tal propósito.

c. Se aceptará incluir nuevos pilotes, enteros o en segmentos que puedan unirse entre sí. En caso de pilotes segmentados, se diseñará un mecanismo que asegure su comportamiento como una pieza. Se aceptará postensar los segmentos para lograr un comportamiento como una pieza. En la figura 6.16.4 se presenta una serie de fotografías sobre la instalación de pilotes segmentados en un edificio en rehabilitación.
d. Los pilotes se diseñarán para que puedan transmitir la carga de acuerdo con la resistencia y deformabilidad del suelo señalados en el estudio de mecánica de suelos.
e. Si se espera que el pilote contribuya a transmitir las cargas verticales del edificio existente, se deberá pre-cargar antes de conectarlo a la cimentación.
f. La ampliación de cimentación, los pilotes y la estructura de transmisión a la estructura existente se revisarán de acuerdo con las NTC-Concreto o NTC-Acero, según aplique. Se aceptará usar el apéndice B de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) para diseñar los dados de cimentación.



a) Pilotes segmentados



b) Maniobra de acercamiento del pilote



c) Colocación del pilote en la perforación de la cimentación

Figura 6.16.4
Recimentación de un edificio usando pilotes segmentados: a) pilotes segmentados; b) maniobra de acercamiento del pilote; c) colocación del pilote en la perforación de la cimentación.
Fuente: cortesía de Cuevas (2019).

6.16.7 Recimentación y renivelación

6.16.7.1 General

Los problemas más frecuentes de cimentaciones que se presentan en la práctica son los hundimientos diferenciales en escuelas sobre suelos blandos. Éste es el caso de edificios desplantados en las zonas geotécnicas II y III de la Ciudad de México, por ejemplo, siendo más graves los problemas cuando se encuentran en las fronteras de suelos con rigideces muy diferentes.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2017) precisa el límite máximo de la inclinación visible mediante la ecuación 6.16.1 en función de la altura de la estructura, h_c, en metros:

$$Inclinación = \frac{100}{100 + 3h_c}$$ *Ecuación 6.16.1*

El valor máximo de inclinación que los usuarios de un edificio en México pueden tolerar, es aproximadamente 40 por ciento mayor que la inclinación visual. La experiencia ha mostrado que inclinaciones mayores que 2 por ciento, sobre todo en edificios altos, generan incomodidad e inseguridad a sus ocupantes. En la práctica, se acepta como límite entre 1 y 1.5 por ciento. En el caso de un edificio escolar, las mayores alturas son del orden de 10 m. Para estos casos, el límite máximo de la inclinación visible será de 0.74 por ciento.

La renivelación se orienta a corregir la inclinación de las estructuras. Las técnicas para renivelar han consistido casi siempre en hacer descender la parte que ha quedado alta. Lo más frecuente ha sido reforzar

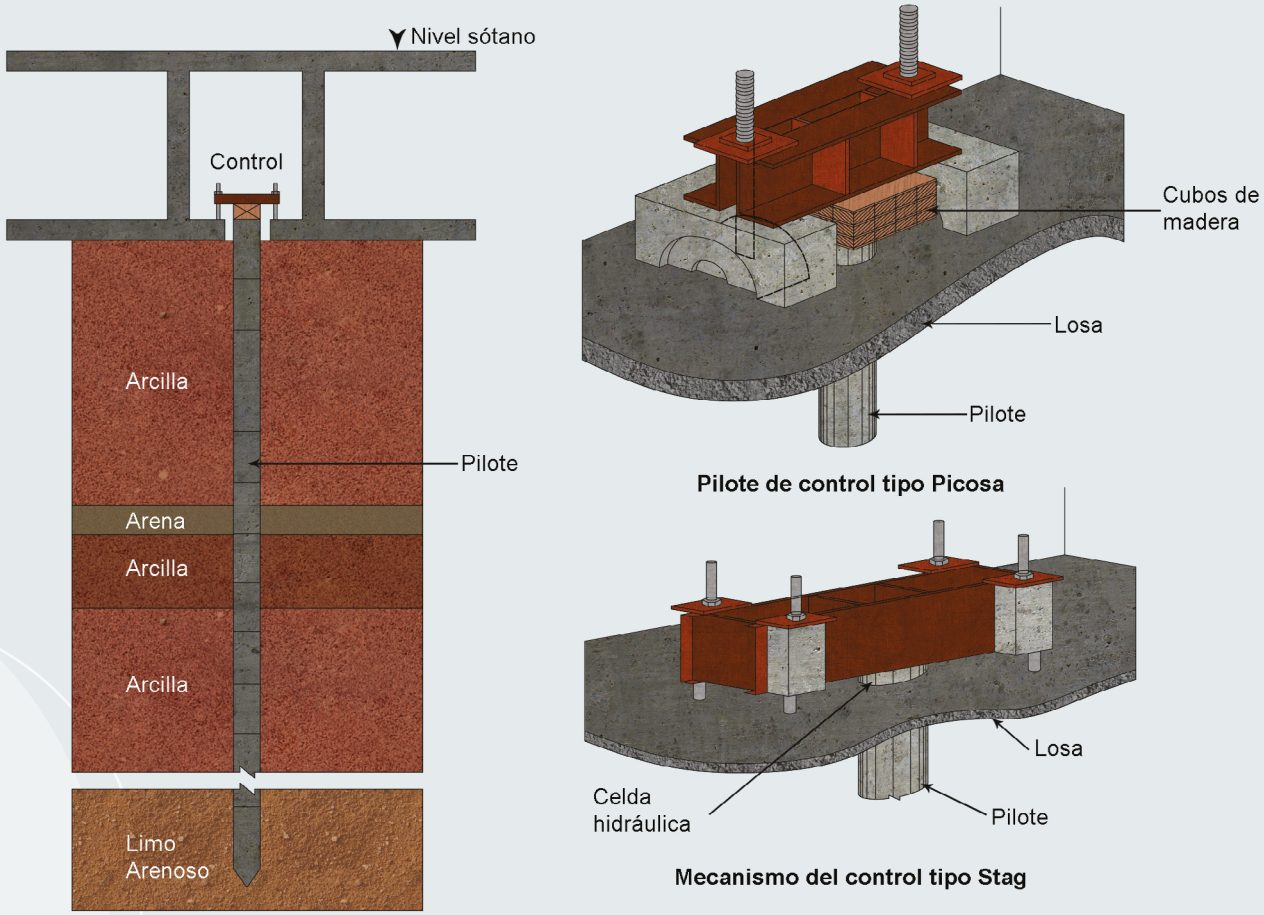
y rigidizar la cimentación para evitar deformaciones y daños, para posteriormente excavar el suelo por debajo de ella y así permitir el hundimiento correctivo (subexcavación). En todo caso, es indispensable revisar los estados límite de falla y de servicio de la cimentación para determinar la necesidad de reforzar la cimentación.

Los edificios se pueden recimentar y/o renivelar normalmente usando una combinación de técnicas, como son la ampliación de las secciones de los elementos de la cimentación, hincar pilotes de control, y/o micropilotes, y/o mediante un proceso de subexcavación. La selección del método la hará el proyectista especialista en geotecnia con apoyo del ingeniero estructural, después de estudiar los suelos y la condición de la cimentación existente, y de analizar la congruencia del tipo de solución que elija con el logro del Objetivo de la Rehabilitación.

6.16.8 Pilotes de control

Los pilotes de control fueron concebidos para estar apoyados en una capa dura de asentamiento nulo o muy pequeño. En la figura 6.16.5 se muestra un dispositivo de control de deformación tipo *Picosa* mediante celdas de madera de caobilla. En las fotos de la figura 6.16.6 se pueden observar detalles de un pilote de control.

Figura 6.16.5
Pilote de control. Fuente: elaboración propia con base en Santoyo y Segovia (1995).



Los pilotes de control se deberán diseñar para carga estática (inciso 6.16.8.1) y dinámica (6.16.8.2).

6.16.8.1 Diseño de pilotes de control para condiciones estáticas

Para diseñar pilotes de control en condiciones estáticas, se deberá revisar que se cumplan los criterios de capacidad de carga (figura 6.16.7) y de asentamiento (figura 6.16.8). En las figuras 6.16.7.a y 6.16.8.a se muestran los diagramas de cuerpo libre para la condición estática según los dos criterios enunciados, respectivamente (Tamez, 1988).

- Carga neta
  $W_{ne} = W_{te} - W_c$
- Equilibrio
  $W_{se} = W_{ne} - Q_c$
- Para que no haya emersión
  $W_{se} + F_{nn} \geq Q_r$
- No penetración
  $Q_f + Q_c \leq Q_p F_R$
- Carga de fluencia para la celda deformable
  $Q_c \leq Q_p F_R - Q_f$
- Reacción estática de la capa dura
  $R_e = W_c + P - F_{nn}$
- Separación mínima de pilotes
  $$D_a = \sqrt{\frac{F_{nn}}{\gamma_m H - U_p}}$$

6.16.8.2 Diseño de pilotes de control para condiciones dinámicas

Para diseñar pilotes de control para condiciones dinámicas, se deberán cumplir los criterios siguientes. En las figuras 6.16.7.b y 6.16.8.b (Tamez, 1988) se muestran los diagramas de cuerpo libre para la condición dinámica según los criterios de diseño por carga y asentamiento, respectivamente.

- Carga dinámica al suelo
  $W_{ds} = W_{se} + \Delta W_s$



Figura 6.16.6
Pilotes de control. Fuente: cortesía de Cuevas (2019).

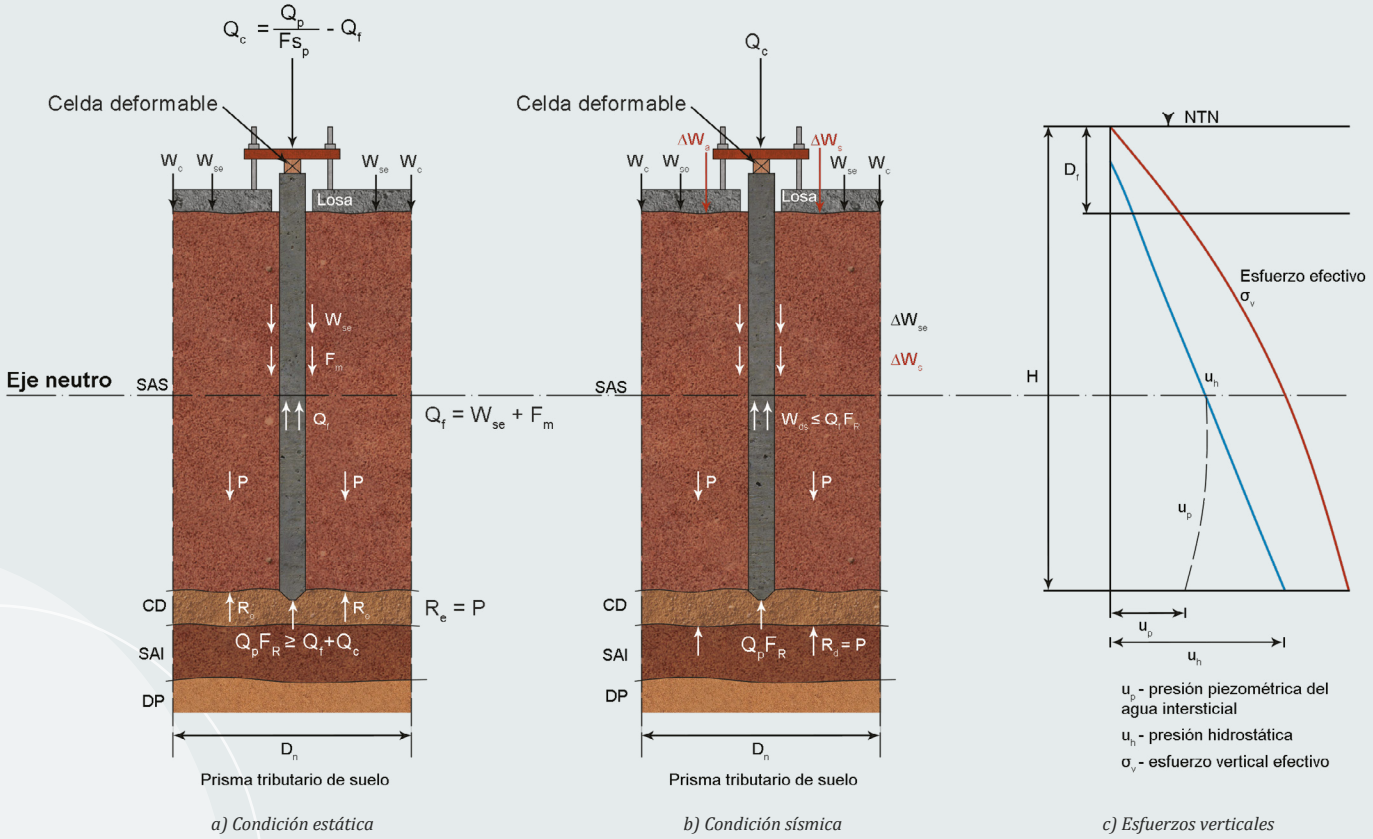
- Mínimo asentamiento
  $W_{ds} \leq Q_f F_R$
- Reacción de la capa dura
  $R_d = W_c + P + \Delta W_c$

donde:

W_{te} carga total estática, N (kg).
W_c carga compensada, N (kg).
W_{ne} carga neta estática, N (kg).
W_{se} carga estática transmitida al suelo, N (kg).
Q_c carga de fluencia de la celda, N (kg).
F_{nn} fricción negativa, N (kg).
Q_f capacidad a fricción del pilote, N (kg).
Q_p capacidad última de punta, N (kg).
ΔW_c incremento de carga por sismo, N (kg).
W_{ds} carga dinámica al suelo, N (kg).
R_e reacción estática de la capa dura, N (kg).
R_d reacción dinámica de la capa dura, N (kg).
P peso total del prisma de arcilla, N (kg).

F_R factor de resistencia (NTC-Cimentaciones).
γ_m peso volumétrico de la capa dura, t/m³.
U_h presión hidrostática, MPa (kg/cm²).
U_p presión piezométrica del agua, MPa (kg/cm²).
σ_v esfuerzo efectivo, MPa (kg/cm²).
H profundidad de la capa dura, mm.
NTN nivel de terreno natural.
SAS serie arcillosa superior.
CD capa dura.
SAI serie arcillosa inferior.
DP depósitos profundos.

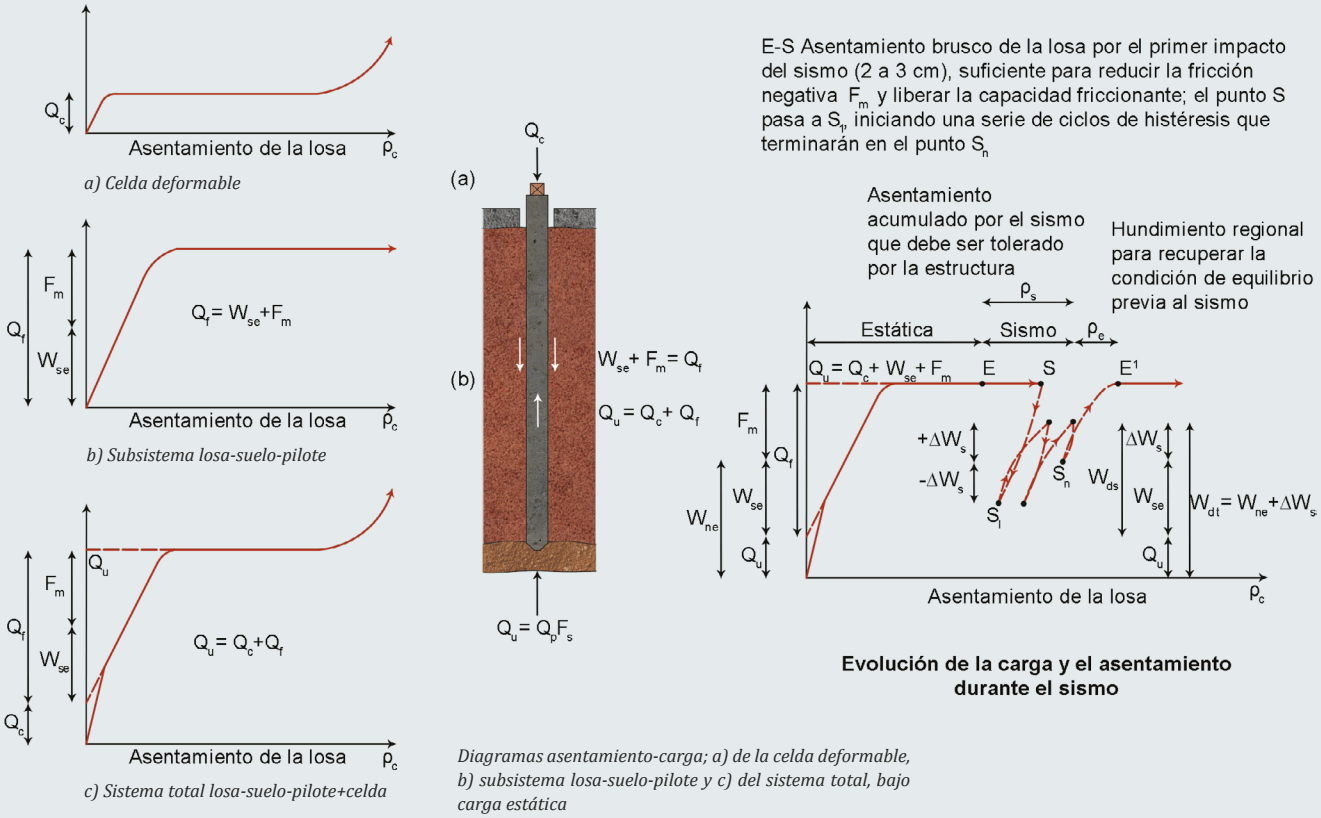
Figura 6.16.7
Diseño de pilotes de control para: a) condición estática, b) condición dinámica y c) esfuerzos verticales. Fuente: elaboración propia con base en Tamez (1988).



6.16.9 Subexcavación

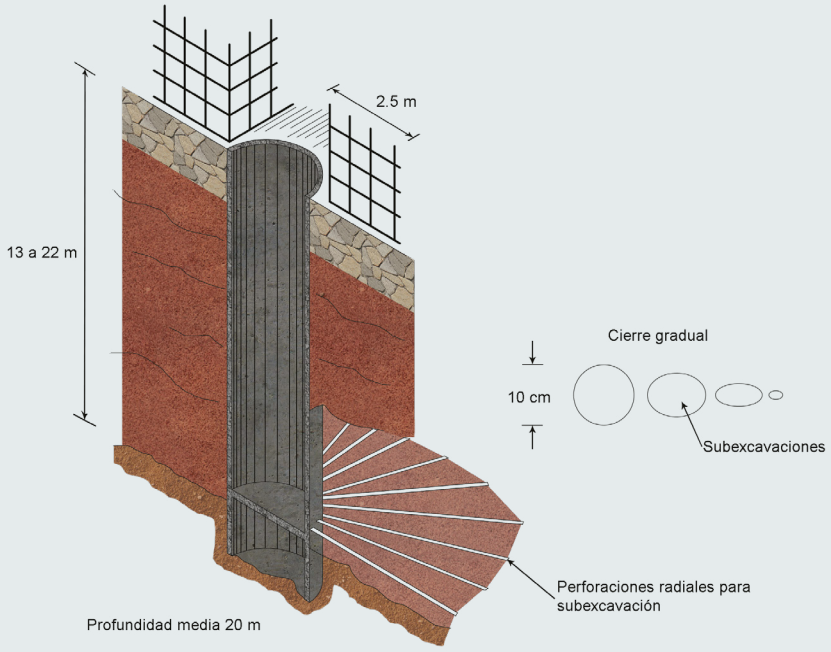
El método de subexcavación se propuso en Italia como una opción para enderezar la Torre de Pisa. Consiste en practicar perforaciones horizontales o inclinadas de pequeño diámetro en la parte menos hundida, para que su colapso (o cierre) genere la deformabilidad que reduce la inclinación (figura 6.16.9). Las perforaciones, en general, se hacen por debajo del nivel de desplante de la cimentación, en un estrato de suelo blando. La subexcavación se puede hacer desde cepas, túneles o lumbreras practicadas bajo la cimentación (figura 6.16.10). La extracción del suelo debe hacerse de manera controlada, de modo de tomar la decisión a tiempo de cuándo detener el proceso.

Figura 6.16.8
Diagramas de asentamiento-carga: a) de la celda deformada; b) subsistemas losa-suelo-pilote; c) del sistema total, bajo cargas estáticas. Fuente: Tamez (1988).



Diagramas asentamiento-carga; a) de la celda deformable, b) subsistema losa-suelo-pilote y c) del sistema total, bajo carga estática

Figura 6.16.9
Procedimiento de subexcavación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México.
Fuente: elaboración propia con base en Santoyo y Segovia (1995).






Lumbreras de subexcavación




Trincheras de subexcavación

Figura 6.16.10
Lumbreras y trincheras de subexcavación. Fuente: cortesía de Alberto Cuevas (2019).




Figura 6.16. 11
Pilotes colados en el lugar provistos de funda bifuncional hecha de un geotextil. Fuente: cortesía de Cuevas (2019).

6.16.10 Micropilotes

Un micropilote es un elemento de cimentación profunda, como son los pilotes y las pilas, salvo que siempre es de pequeño diámetro y casi siempre fabricado en el lugar. Su empleo inicial fue para la recimentación de estructuras con problemas de comportamiento, generalmente, por insuficiencia de su cimentación.

Los micropilotes se fabrican en una perforación practicada en el suelo. Así, una vez terminada la perforación previa, se introducen, por separado, el acero de refuerzo y el mortero del fuste; casi siempre se coloca primero el mortero y después el acero. Se emplea mortero dado el reducido diámetro transversal del micropilote. Los micropilotes, análogamente a los pilotes, pueden operar como elementos de punta, de fricción y de punta-fricción.

En los micropilotes se usan fundas geotextiles que sólo tienen el propósito de contener al mortero. Su aplicación ha sido exitosa cuando el espesor de suelo blando es reducido y la capacidad de carga del micropilote la proporciona su resistencia de punta. Se permite el uso de micropilotes con una funda textil bifuncional que tiene las siguientes características:

a. En micropilotes de fricción, la funda bifuncional primero contiene al mortero, al igual que la convencional, para después, gracias a su permeabilidad controlada, permitir el paso de cierto volumen del mortero para garantizar la adherencia con el suelo circundante.
b. En micropilotes trabajando de punta únicamente, sujetos a la indeseable fricción lateral negativa, la funda bifuncional sirve para contener al mortero y, después, impide el desarrollo de esa componente de fricción, al anular por completo la adherencia micropilote-suelo (figura 6.16.11).
c. La función complementaria de la funda bifuncional es la de reforzar el perímetro exterior del mortero en su contacto con el suelo.

También se aceptará usar pilares de mortero (figura 6.16.12). Éstos son cilindros esbeltos de mortero simple, carentes de refuerzo interno de acero, constituidos únicamente por la funda y el mortero, que pueden tener o no protuberancias laterales y también pueden tener ampliación en su base. Mediante uno o dos tubos de manguitos, se pueden introducir lechadas que inducen fracturas verticales radiales con un plano predominante y que, una vez endurecidas, refuerzan la masa de suelo. El suelo es transformado en una estructura intercalada de láminas duras verticales, que incrementan la resistencia y reducen la deformabilidad del sistema integrado por el suelo y la estructura intercalada.

En una recimentación, los micropilotes se construyen, de preferencia, alrededor del edificio, de modo que las cargas se transmitan a la estructura mediante una extensión de la cimentación existente que conecte a los micropilotes. En términos generales, la técnica consiste en ampliar la losa de cimentación o las zapatas de lindero para transmitir la carga a los micropilotes. Si el espacio perimetral es limitado, los trabajos se harán desde un sótano, o desde el interior del edificio. En todo momento, se debe procurar mantener la excentricidad entre el centro de acción de cargas verticales y la reacción de la cimentación con valores cercanos a cero (figura 6.16.13).

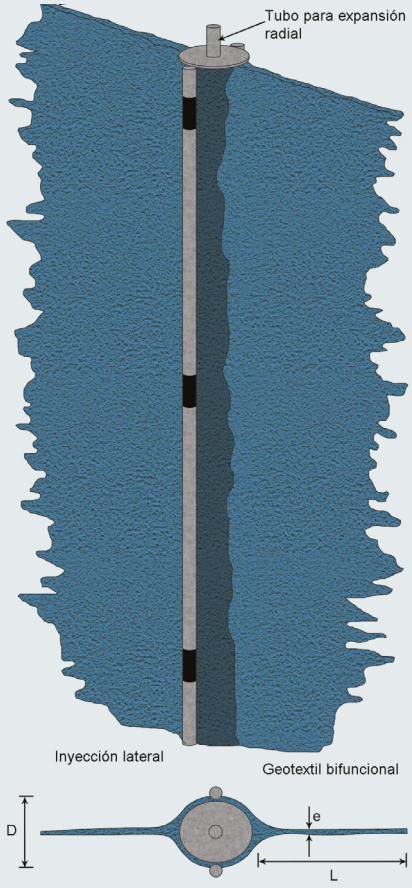
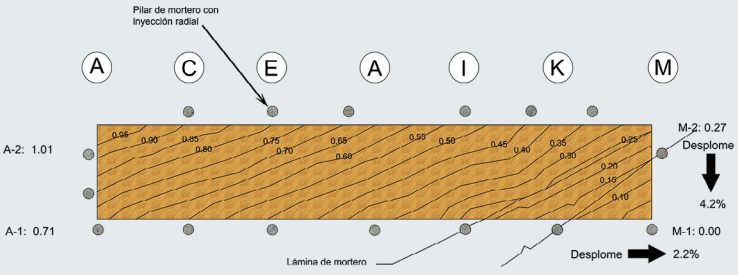


Figura 6.16. 12
Pilar de mortero para reducir la deformabilidad de suelos arcillosos. Fuente: elaboración propia con base en Santoyo y Miranda (1997).



a) Condición antes de la subexcavación y tratamiento del suelo



b) Condición posterior a la subexcavación y endurecimiento del suelo

Figura 6.16.13
Aplicación de los pilares de mortero para recimentar y renivelar un edificio. Fuente: elaboración propia con base en Santoyo y Miranda (1997).



Capítulo 7

Durabilidad

7.1 Alcance general

7.1.1 En el diseño de la rehabilitación se debe considerar que los materiales empleados en la rehabilitación, los elementos rehabilitados y la estructura en su conjunto resistan el medio ambiente en donde se encuentran.

7.1.2 La durabilidad depende de la compatibilidad química, electroquímica y física entre los materiales de rehabilitación, la estructura existente y el medio ambiente que los rodea.

7.1.3 La durabilidad de la estructura por rehabilitar deberá revisarse para alcanzar una vida útil de 50 años. La vida útil de una estructura puede disminuir si no se atienden factores como los indicados en los apartados a a h:

a. Desempeño estructural inaceptable.
b. Frecuencia y actividades de mantenimiento esporádicos e inaceptables.
c. Agrietamiento excesivo o de alto espesor debido a corrosión o fuerzas y momentos internos.
d. Niveles de cloruros superiores a los límites establecidos en las Normas, especialmente en la interfaz del acero de refuerzo existente en la zona por reparar.
e. Profundidad de la carbonatación que conduce a corrosión del refuerzo.
f. Pérdida excesiva de la sección del acero de refuerzo debido a la corrosión.
g. Deterioro excesivo del concreto a causa de mecanismos como corrosión, ataque químico (ataque de sulfatos y ácidos), factores físicos (como elevados gradientes de temperatura o cristalización de sales).
h. Pérdida de hermeticidad o goteo excesivo.

7.1.4 Los materiales de reparación y rehabilitación, y sus métodos de aplicación se seleccionarán de modo que sean compatibles con la estructura original y con el medio ambiente al que estarán sujetos.

7.2 Recubrimiento

7.2.1 El recubrimiento de los elementos rehabilitados o nuevos deberá cumplir con los requisitos de las NTC-Concreto y NTC-Mampostería, en especial los de la sección 4.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). El recubrimiento deberá ser suficiente para proteger el refuerzo de la corrosión contra incendio, así como para mejorar el anclaje de las barras, sea mediante dobleces o longitud de desarrollo.

7.2.2 La vida útil de la estructura debe considerar las condiciones actuales y el deterioro potencial de las zonas reparadas y/o reforzadas, así como de las áreas adyacentes.

7.2.3 Se deberán incluir en el proyecto ejecutivo y en el Programa de Mantenimiento del Edificio, las consideraciones, acciones, sistemas y métodos para lograr alcanzar la vida útil de las reparaciones y reforzamientos.

7.3 Grietas

7.3.1 Se deberá evaluar la(s) causa(s) de las grietas para diseñar su reparación y la rehabilitación de la estructura. Se considerará el movimiento a través de la grieta, su longitud, orientación, espesor y patrón.

7.3.2 No todas las grietas deben ser reparadas. Serán reparadas aquellas ocasionadas por sismo, de conformidad en las N-Rehabilitación. Serán reparadas cualesquiera otras que tengan suficiente tamaño para el ingreso de agentes corrosivos, como cloruros, y que puedan causar corrosión del acero de refuerzo (véase inciso 6.2.4 de esta Guía técnica).

7.3.3 No se aceptará inyectar grietas que se originen por corrosión del acero de refuerzo o reacción álcali-agregado. En caso de daño por corrosión, se deberá proceder como se indica en la sección 7.4 de esta Guía técnica.

7.4 Corrosión y deterioro del refuerzo de elementos metálicos embebidos

7.4.1 Introducción a la corrosión

Uno de los problemas más serios y complejos asociados a la durabilidad de las estructuras es la corrosión[2] del refuerzo o de los metales ahogados en concreto o mampostería.

El concreto es un material con alta alcalinidad, con valores pH entre 12 y 13. En este ambiente, el acero ahogado permanece protegido de la corrosión por una película pasiva que está adherida a la superficie de la barra. Cuando esta capa se altera, puede ocurrir corrosión. La corrosión se acelerará si el pH baja debido a carbonatación, o bien, si penetran al concreto o ahogan en él agentes químicos agresivos o materiales metálicos distintos. Este último caso se conoce como corrosión galvánica. En las fotos de la figura 7.4.1 se muestran ejemplos de corrosión del refuerzo longitudinal de columnas y viga de concreto.

El agrietamiento y desconchamiento del concreto debidos a la corrosión dependen, fundamentalmente, de la resistencia a tensión del concreto, la calidad y espesor del recubrimiento, la adherencia entre las barras y el concreto, el diámetro de la barra y de la cuantía de corrosión (expresada como variación del peso de la barra). En particular, es relevante la relación entre el recubrimiento r y el diámetro de la barra d_b. Así, mientras menor sea esta relación para un mismo diámetro de barra, menor será la cuantía de corrosión necesaria para agrietar el concreto. Por ejemplo, para r/d_b de 3 y barras del número 4, se requiere 1 por



Figura 7.4.1
Ejemplos de barras corroídas en viga y columnas de concreto. Fuente: cortesía del INIFED (2019b).

2. La corrosión es un proceso electroquímico que requiere un ánodo, un cátodo y un electrolito. La matriz húmeda del concreto constituye un excelente electrolito, y el acero de refuerzo proporciona al ánodo y al cátodo. La corriente eléctrica fluye entre el cátodo y el ánodo, de modo que la reacción resulta en un incremento del volumen del metal al formarse óxidos ferroso y férrico, y al precipitarse con el color "óxido" característico. Se requiere agua y oxígeno para la relación.

ciento de corrosión para producir agrietamiento, mientras que para una relación de 7, se requiere 4 por ciento. La adherencia aumenta para cuantías de corrosión de 1 por ciento, a partir de este valor, disminuye rápidamente.

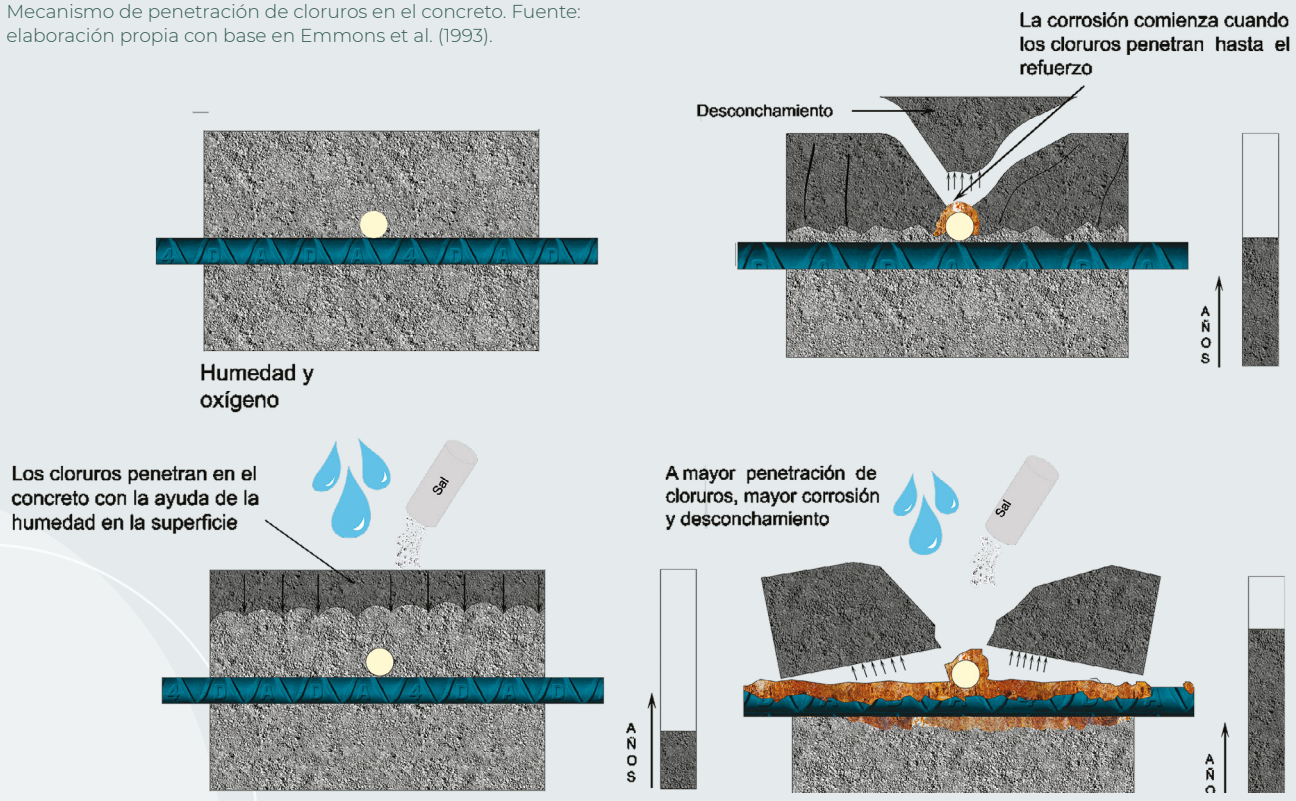
Los cloruros en el ambiente penetran en el concreto con ayuda de la humedad en la superficie y llegan al acero de refuerzo (figura 7.4.2). Durante este proceso, el concreto se agrieta y se desprende debido a la expansión del acero corroído, lo que se traduce en una mayor penetración de cloruros y, por ende, en más corrosión. La penetración de cloruros en el concreto se ve favorecida cuando ocurre lo siguiente:

a. Existe una alta concentración de cloruros en el ambiente.
b. El concreto es permeable.
c. La humedad es alta.
d. El pH del concreto es alto. Por ejemplo, si el pH es de 13.2, la concentración de cloruros será del orden de 8 000 ppm, mientras que si el pH es de 11.6, será de 70 ppm.

La anchura máxima permitida de grietas o juntas para evitar la corrosión varía según la condición de exposición. En condiciones secas, la anchura máxima es de 0.4 mm en contacto con humedad, aire húmedo o suelos, de 0.3 mm en contacto con agua, y de 0.15 mm con brisa de mar.

Los cloruros pueden entrar al concreto si se usan aditivos acelerantes, arena de mar o agua de mar. Si se considera que el concreto reforzado estará en un ambiente húmedo y expuesto a cloruros, se recomienda que el porcentaje de cloro por peso de cemento sea menor que 0.10; si no estará expuesto a cloruros, este valor puede subir a 0.15.

Figura 7.4.2
Mecanismo de penetración de cloruros en el concreto. Fuente: elaboración propia con base en Emmons et al. (1993).



Como se dijo antes, la corrosión del acero puede ocurrir debido a la carbonatación del concreto. Ésta es una reacción entre gases ácidos en la atmósfera y productos de la hidratación del cemento. El dióxido de carbono de la atmósfera penetra al concreto y se difunde reaccionando con el hidróxido de calcio presente en el concreto. Como resultado, el pH baja a 10 y, consecuentemente, se pierde la protección contra la corrosión. En esta circunstancia, la corrosión empieza rápidamente. Se ha estimado que, en concretos de buena calidad, la tasa de avance de la carbonatación es de 1 mm/año. Dicho proceso requiere ciclos de secado-mojado (Emmons et al., 1993).

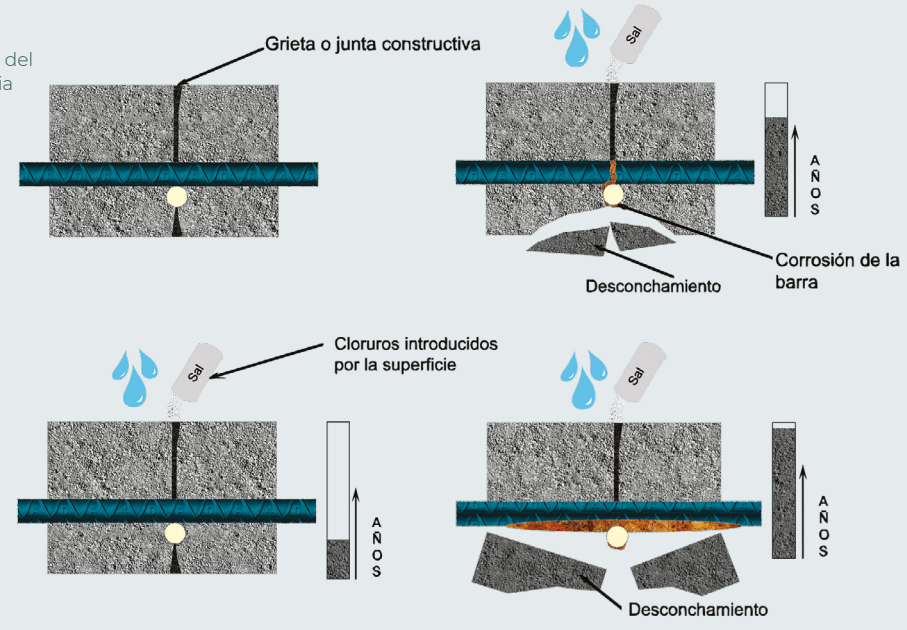
Otro tipo de corrosión es la galvánica. Ésta ocurre cuando dos materiales metálicos diferentes se dejan ahogados en el concreto. En presencia de cloruros y humedad, estos metales forman un par galvánico, que se caracteriza por un flujo de electrones desde el ánodo al cátodo y de iones en sentido inverso. Con el tiempo, el ánodo se oxida, provocando expansiones y agrietamiento del concreto que lo rodea.

En la lista que sigue se han ordenado los metales de modo creciente según su actividad corrosiva: 1. Zinc. 2. Aluminio. 3. Acero. 4. Fierro. 5. Níquel. 6. Estaño. 7. Plomo. 8. Latón. 9. Cobre. 10. Bronce. 11. Acero inoxidable. 12. Oro. Cuando dos metales están en contacto, vía un electrolito activo, el metal menos activo de esta serie (con el menor número) se corroe. Así, por ejemplo, si se ahoga un elemento de aluminio y una barra de acero en concreto, el aluminio será el ánodo (y se oxidará, en este caso formando óxido de aluminio), y el acero será el cátodo.

Frecuentemente, cuando se evalúa una estructura con corrosión importante en las barras de refuerzo, surge la duda sobre la resistencia remanente de la barra, ésta disminuye si se pierde sección. Se ha encontrado que si el porcentaje de corrosión es hasta de 1.5 por ciento, la resistencia de la barra es igual a la nominal. Si el porcentaje de corrosión es de 4.5 por ciento, la resistencia es 15 por ciento menor que la nominal.

En ocasiones, la corrosión se manifiesta en la parte inferior del elemento estructural (vigas, losas), pero se debe a la penetración de cloruros y humedad por grietas o juntas constructivas en la cara superior (figura 7.4.3).

Figura 7.4.3
Efecto de las grietas o juntas en la corrosión del acero de refuerzo. Fuente: elaboración propia con base en Emmons et al. (1993).



7.4.2 Reparación de la corrosión

7.4.2.1 Objetivos de desempeño

7.4.2.1.1 Antes de seleccionar el material a usar en la reparación por corrosión, es conveniente conocer los objetivos de desempeño que busca el dueño o usuario de la estructura. Así, por ejemplo, será importante conocer si la reparación debe quedar oculta o visible, cuál es la textura aceptable de la superficie, en qué condiciones de uso se realizaría la reparación, cuál es la vida útil de ésta, qué tipo de falla (agrietamiento, delaminación, separación, otras) y qué consecuencias de ella se aceptan en las personas, en el desempeño estructural y en el ambiente. Además, se deben identificar las condiciones ambientales y de servicio a que estará expuesta la estructura: gases, sustancias químicas, rayos ultravioletas, humedad, cambios térmicos, cargas.

7.4.2.1.2 Será necesario entender cómo pueden afectar las características de exposición a la superficie, el material de reparación, el refuerzo, la interfaz del concreto existente y el concreto existente.

7.4.2.2 Materiales para la reparación

7.4.2.2.1 Con objeto de eliminar el agrietamiento por contracción, el material que se use deberá tener un alto contenido de agregados, los cuales deberán estar limpios y ser lo más grandes posible.

7.4.2.2.2 Se deberá eliminar cualquier diseño de mezcla que exija altos contenidos de agua.

7.4.2.2.3 Se deben procurar los más bajos consumos de cemento asociados a las resistencias esperadas.

7.4.2.2.4 Se deben curar adecuadamente. En la tabla 7.4.1 se ilustra la interacción entre las relaciones agua/cemento y cemento/agregado en la contracción por fraguado.

7.4.2.2.5 Se deberá considerar la corrosión y el deterioro del refuerzo en el diseño de la rehabilitación. En ella no se deberán usar materiales que sean corrosivos para el acero de refuerzo.

7.4.2.2.6 En la evaluación de la estructura y en el diseño de la rehabilitación se tomará en cuenta la posible ocurrencia de la corrosión galvánica entre materiales con distinto potencial electroquímico.

7.4.2.2.7 En caso de que ocurra o se pueda presentar corrosión galvánica, se deberá optar por aislar el refuerzo existente del refuerzo o conectores usados en la zona reparada, o por proteger el refuerzo existente y el refuerzo en la zona reparada de modo de minimizar la corrosión galvánica.

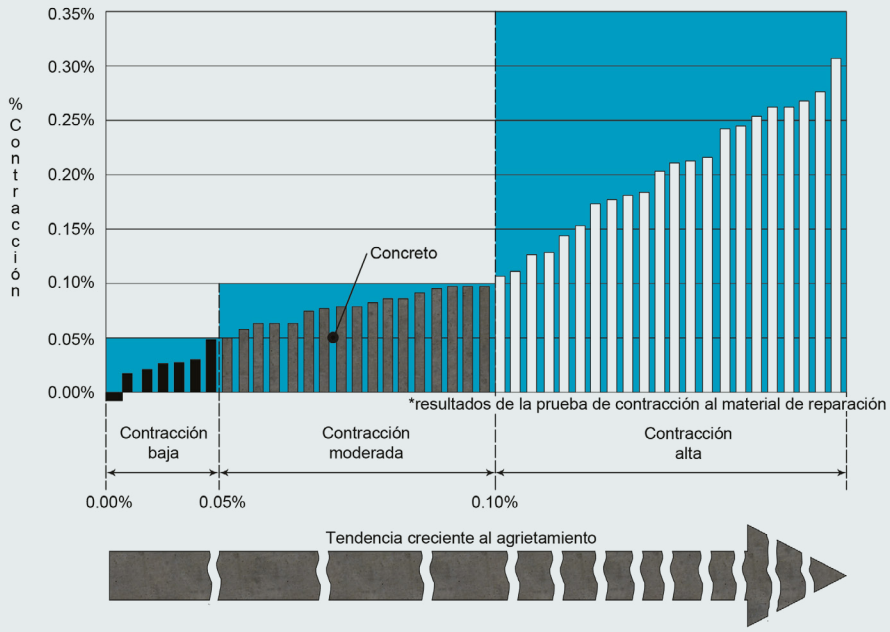
7.4.2.2.8 En estructuras presforzadas y postensadas con tendones adheridos y no adheridos, se diseñarán sistemas de protección a la corrosión. En el diseño se considerarán la condición del acero de presfuerzo y del estado de la corrosión de las anclas de los cables, así como de los sistemas de anclaje.

Tabla 7.4.1

Interacción entre las relaciones agua/cemento y cemento/agregado en la contracción por fraguado de materiales de reparación

		Relación agua/cemento				Contracción
		0.4	0.5	0.6	0.7	
Relación cemento/agregado	3	0.08	0.12			Alta
	4	0.055	0.085	0.105		
	5	0.04	0.06	0.075	0.085	Moderada
	6	0.03	0.04	0.055	0.065	
	7	0.02	0.03	0.04	0.05	Baja

Figura 7.4.4
Contracción medida en varios materiales de reparación, comercializados como de baja contracción. Fuente: elaboración propia con base en Emmons et al. (1993).



7.4.2.2.9 Si se emplean sistemas electroquímicos para proteger el acero de refuerzo en el área reparada y la estructura, se considerará su interacción con el elemento reparado, la estructura y el medio ambiente.

7.4.2.2.10 No se permitirá usar encamisados de compuestos de polímeros reforzados con fibras como una técnica para reparar elementos con corrosión, a menos de que el concreto dañado sea reparado y la corrosión sea mitigada. Para este caso, se recomienda revisar el documento ACI 440.2R.

7.4.2.3 Ejecución de la reparación

7.4.2.3.1 Para reparar una zona dañada por corrosión del acero de refuerzo se debe practicar una caja, con cortes a 90°, que expongan el acero corroído (figuras 7.4.3 y 7.4.4). Los primeros 20 mm de profundidad sobre el perímetro de la caja se cortarán usando disco. El concreto se puede retirar mediante cincel y maceta, un martillo neumático o eléctrico, o chorro de agua a presión (entre 140 y 280 MPa – 1 400 y 2 800 kg/cm²). En ICRI 310.1R se encuentran recomendaciones adicionales.

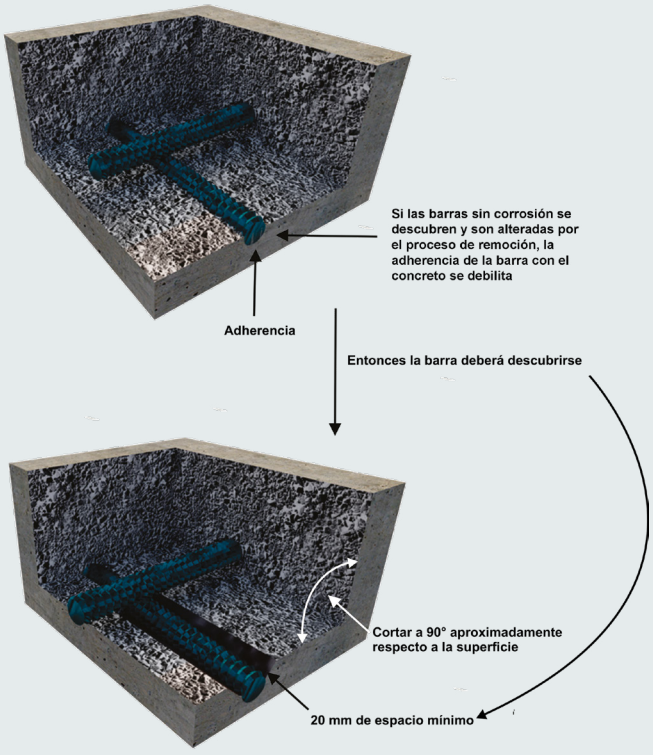


Figura 7.4.5
Preparación del concreto en una zona efectada por corrosión. Fuente: elaboración propia con base en Emmons et al. (1993).

7.4.2.3.2 Si al descubrir el acero se observan barras corroídas en contacto con sanas, se deberán descubrir completamente dejando, cuando menos, 20 mm libres debajo de ellas. Lo anterior obedece a que durante los trabajos de demolición del concreto se pudo haber deteriorado la adherencia del refuerzo sano con el concreto circundante. La colocación de concreto nuevo para rellenar la caja, de modo que cubra al acero corroído y al sano, pretende restituir la adherencia.

7.4.2.3.3 Posteriormente, se limpian las superficies del acero y del concreto. Las barras de acero se pueden limpiar usando un escarificador de agujas, agua a alta presión (entre 21 y 70 MPa- 210 y 700 kg/cm²), chorro abrasivo de arena *(sandblasteado)* o carda de metal. En cualquier caso, se debe asegurar la limpieza del perímetro completo de la barra; es frecuente que la limpieza sea imperfecta por una incorrecta aplicación de las técnicas de limpieza (figura 7.4.6).

7.4.2.3.4 Se debe prestar atención a limpiar la superficie de concreto de la caja de modo de retirar polvo, pedazos sueltos y cualquier otro material que reduzca la adherencia entre el concreto y el material de reparación.

7.4.2.3.5 Si las barras han perdido más de 25 por ciento de su sección transversal, será necesario reemplazarlas, o bien, colocar barras adicionales ancladas adecuadamente.

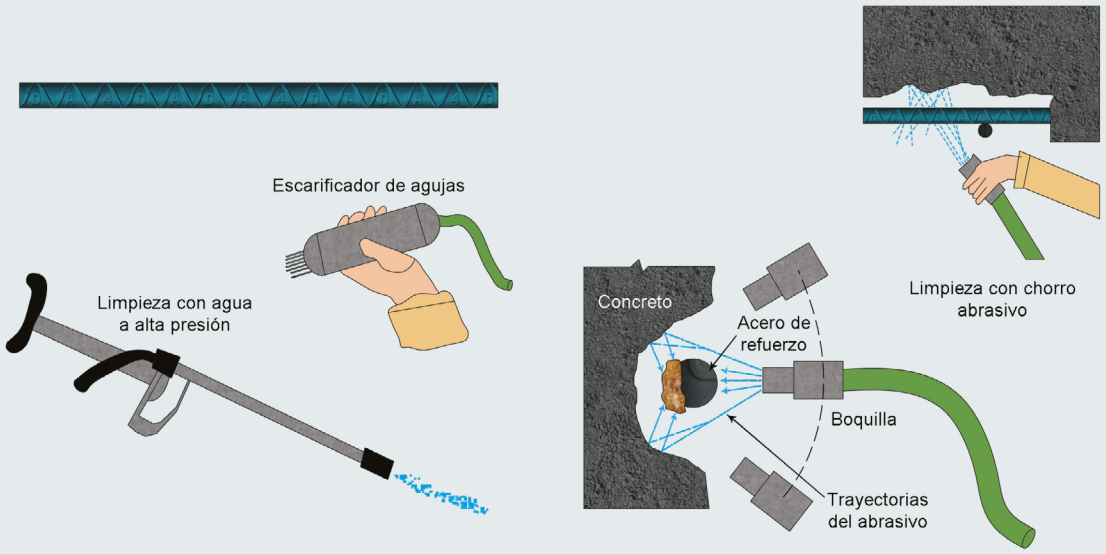


Figura 7.4.6
Limpieza de acero de refuerzo. Fuente: elaboración propia con base en Emmons et al. (1993).

7.5 Protección del refuerzo contra la corrosión

7.5.1 General

7.5.1.1 Cuando sea conveniente proteger al refuerzo de la corrosión, se evaluarán las siguientes cuatro categorías de soluciones:

a. Encapsulado. Las barras se cubren herméticamente con resinas epóxicas, las cuales se aplican sobre las barras en forma líquida con brocha o mediante atomizador. Tiene el inconveniente de que es difícil lograr un

encapsulado perfecto en aplicaciones en la obra. además, si queda alguna zona sin resina, las corrientes eléctricas se pueden concentrar y acelerar la corrosión.

b. Protección catódica con ánodo de sacrificio. Se usa un metal de sacrificio como alternativa de protección. Generalmente, se aplica zinc a la barra, una vez que todas las superficies han sido reparadas. Las barras cubiertas con zinc son conectadas eléctricamente con el resto del armado. Su aplicación ha sido experimental hasta ahora.
c. Protección catódica a través de una corriente inducida. Su principio se basa en invertir el flujo de corriente eléctrica que causa la corrosión. Se instalan ánodos sobre la superficie de concreto o cerca de ella y se conectan eléctricamente con el armado. La corriente se debe revisar y ajustar periódicamente.
d. Películas alcalinas. Las barras se impregnan con materiales alcalinos de modo de crear una barrera de protección contra la corrosión.

7.5.2 Estrategias para inhibir el proceso de corrosión

7.5.2.1 Adicionalmente a las opciones anteriores, existen varias estrategias para inhibir el proceso de corrosión, como son:

a) Aplicar a la superficie del elemento una película selladora que reduzca la permeabilidad, con esta película se crea una barrera a los cloruros.
b) Colocar un material hidrófobo que penetre en el concreto, ésta es una doble protección, ya que la barrera a los cloruros no sólo existe en la superficie.
c) Reemplazar el concreto afectado por uno con aditivos especiales que reduzcan la permeabilidad y con mejores propiedades mecánicas.
d) Combinar los procedimientos anteriores.

7.5.2.2 Las películas selladoras y membranas que pueden aplicarse son basadas en silanos, siloxanos, epóxicos, uretanos, hules clorinados y metacrilatos. En ICRI 510-2 (2019) se pueden consultar recomendaciones para su aplicación.

7.5.2.3 Los aditivos de concreto que se venden comercialmente para proteger contra la corrosión lo hacen de modo pasivo y activo. En el primer caso, el aditivo forma una barrera que dificulta la migración de cloruros y humedad en el concreto, lo que se traduce en un retraso en el tiempo de corrosión. En el segundo modo, se reduce la tasa de corrosión mediante la formación de una barrera a nivel molecular en el acero de refuerzo. Esta película protectora incrementa la resistencia del acero a los ataques de cloruros y disminuye las reacciones corrosivas.

7.5.2.4 Para proteger al concreto de la carbonatación, se puede impregnar con silicatos de sodio, aplicar membranas superficiales de acrilatos y estirenos de acrilato, o capas de morteros, de preferencia con polímeros.

7.6 Tratamiento de la superficie y revestimientos

7.6.1 Con objeto de mejorar la durabilidad de la estructura, se considerará la transmisión de la humedad y la influencia de un posible tratamiento de la superficie a base de revestimientos, películas selladoras o membranas. En ICRI 310.2R se presentan criterios para la selección y especificación de la preparación de la superficie de concreto.

7.6.2 En el Programa de Mantenimiento de Edificios existentes se especificará la periodicidad con que el revestimiento, sellador o membrana se debe inspeccionar, reemplazar y las acciones para su reparación.



Capítulo 8

Construcción

8.1 General

8.1.1 En adición a las consideraciones de construcción para cada técnica en particular señaladas en el capítulo 6 de esta Guía técnica, se observará lo requerido en el presente apartado.

8.1.2 El proyecto ejecutivo (memoria de cálculo, normas, especificaciones y planos de construcción) señalará lo indicado en los incisos a a e:

a. Que el constructor es responsable de construir y ejecutar el proyecto de la rehabilitación de conformidad con el proyecto ejecutivo aprobado por el proyectista, el corresponsable y el director, así como con el Reglamento, Normas y esta Guía técnica.

b. Que el constructor tendrá la obligación de facilitar y proveer los recursos y acceso para la supervisión, las pruebas de materiales, las pruebas de carga y el aseguramiento de la calidad.
c. Los requisitos específicos de apuntalamiento y arriostramiento diseñados de conformidad con la sección 8.2 de esta Guía técnica.
d. Los requisitos especiales de aplicación de fuerzas por medio de gatos hidráulicos, en su caso.
e. Los requisitos específicos de supervisión, ensaye, construcción y aseguramiento de la calidad señalados en el capítulo 9 de esta Guía técnica y los requeridos en el capítulo 6 para cada técnica de rehabilitación en particular.

8.1.3 El constructor será responsable de observar e implantar los sistemas de seguridad para el personal que realice los trabajos de rehabilitación. En ICRI 120.1 se pueden consultar lineamientos y recomendaciones sobre seguridad en la obra durante labores de rehabilitación.

8.2 Apuntalamiento y arriostramiento temporales

8.2.1 El proyecto ejecutivo incluirá:

a. Las partes de la obra que requieran de apuntalamiento y/o arriostramiento temporal, antes, durante y después de la rehabilitación.
b. Las cargas de diseño y límites de desplazamiento para el apuntalamiento y/o arriostramiento temporal.
c. Las responsabilidades del constructor para la instalación, aseguramiento de la calidad y mantenimiento del apuntalamiento y/o arriostramiento temporal.

8.2.2 En el diseño del apuntalamiento y/o arriostramiento temporal, se considerará todo lo señalado a continuación:

a) Condiciones actuales y cambios durante la construcción, en especial de:
   i. Mecanismos de transmisión de carga.
   ii. Cargas de construcción.
   iii. Longitudes no arriostradas.
   iv. Redistribución de cargas y acciones internas que resulten del retiro de elementos estructurales adyacentes o del cambio en la aplicación de cargas sobre los elementos estructurales.
b) Efectos de desplazamientos laterales y verticales medidos, inclinaciones, efectos secundarios y de cargas.
c) Impacto del apuntalamiento y/o arriostramiento temporal en la estructura.
d) Efectos de la compatibilidad de deformaciones del sistema de apuntalamiento y/o arriostramiento con el sistema y elementos soportados y de soporte.
e) La estabilidad estructural de elementos, componentes, sistemas y de todo el edificio.
f) Efectos del daño o deterioro de los elementos o sistemas existentes.
g) Otras acciones que se puedan anticipar, como granizo, viento, sismo.

En la figura 8.2.1 se muestran ejemplos de apuntalamiento y arriostramiento de edificios en proceso de rehabilitación.

8.2.3 El diseño del apuntalamiento y/o arriostramiento lo deberá efectuar un proyectista especializado en el tema, o bien, el proyectista de la rehabilitación, en consulta con el constructor. El corresponsable y el director revisarán la idoneidad del diseño. Se aceptará usar las guías de diseño siguientes:

a. Steel Design Guide Series 10, del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC, 1997).
b. SP-4, del Instituto Americano del Concreto (ACI SP4, 2014).



Figura 8.2.1
Edificios apuntalados y arriostrados durante su rehabilitación tras los sismos de 2017: a) apuntalamiento de la excavación para ampliar la cimentación; b) arriostramiento temporal del edificio y c) apuntalamiento y arriostramiento temporal.
Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2019).

c. Guía Técnica de Operaciones de Apuntalamiento, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU (CIEEU, 2013).

8.2.4 El apuntalamiento y el arriostramiento deberán diseñarse para mantener la estabilidad global de la estructura antes y durante las fases de la rehabilitación. Se revisará la capacidad estructural de elementos existentes, en especial de aquellos que puedan fallar frágilmente.

8.2.5 Las cargas laterales para el diseño del apuntalamiento y/o arriostramiento temporal serán las prescritas en la sección 2.8 de las NTC-Sismo de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población en donde se encuentre la escuela).

8.2.6 La rigidez vertical y lateral del apuntalamiento y del arriostramiento serán suficientes para que los desplazamientos verticales y laterales no

excedan los valores establecidos por el proyectista. El valor mínimo de la carga lateral será igual a 2% de la carga axial máxima del elemento por ser arriostrado.

8.2.7 Se deberá revisar que los elementos estructurales, sin daño o con daño, antes de ser rehabilitados, tengan la capacidad estructural para resistir y transmitir las cargas del edificio y las cargas temporales de construcción y apuntalamiento. Si es necesario, se deberán apuntalar y/o arriostrar los elementos estructurales durante la obra o hasta que sean rehabilitados.

8.3 Condiciones temporales

8.3.1 Para la evaluación estructural y diseño de las medidas temporales se usarán las cargas y factores de carga establecidos en las NTC-Acciones.

8.4 Protección ambiental

8.4.1 El proyecto ejecutivo establecerá la responsabilidad del constructor de implantar medidas de remediación, de información y de control de los residuos de la construcción.



Capítulo 9

Aseguramiento de la calidad

9.1 Alcance

9.1.1 Se deberá cumplir con la sección 4.2 de las N-Rehabilitación.

9.1.2 Se observarán las consideraciones de supervisión establecidas en el capítulo 6 de esta Guía técnica para cada técnica de rehabilitación, las cuales se deben incluir en el proyecto ejecutivo elaborado por el proyectista y el constructor, cuando corresponda, y aprobado por el corresponsable y el director.

9.1.3 Adicionalmente, se deben satisfacer los requisitos de los incisos 9.2 a 9.6 de esta Guía técnica para lograr un adecuado aseguramiento de la rehabilitación de un plantel escolar.

9.1.4 Los requisitos de los incisos 9.2 a 9.6 de esta Guía técnica se deben considerar como mínimos a satisfacer.

9.2 Supervisión

9.2.1 Se supervisarán los trabajos de rehabilitación según se establezca en el Reglamento y en el proyecto ejecutivo. El alcance de la supervisión de una estructura por rehabilitar es distinto del alcance de una estructura nueva. El proyecto ejecutivo detallará los requisitos específicos durante las etapas de rehabilitación. Esta supervisión será contratada por el propietario.

9.2.2 Al menos, el alcance de la supervisión incluirá los conceptos comprendidos entre los incisos a y j siguientes:

a. Tipo, calidad y ubicación de los materiales usados en la rehabilitación.
b. Proceso de cimbrado, descimbrado y apuntalamiento.
c. Demolición del concreto y preparación de la superficie del concreto y de las barras de refuerzo.
d. Colocación del refuerzo, anclas y conectores.
e. Mezclado, colocación, compactación y curado de materiales de rehabilitación.
f. Secuencia de construcción y conexión de nuevos elementos.
g. Instalación y ensaye de anclas y conectores post-instalados.
h. Tensado de cables.
i. Revisión e informe de cargas de construcción sobre pisos, vigas, columnas y muros.
j. Evaluación general de la obra.

Los resultados de la supervisión serán informados al corresponsable, al director y al propietario. Además, se indicarán en la bitácora del proyecto.

9.2.3 La rehabilitación se supervisará para verificar la calidad de los materiales y de la mano de obra, así como el cumplimiento del proyecto ejecutivo. La obra será revisada por el director, quien decidirá la necesidad de involucrar a revisores especializados, al proyectista y al corresponsable.

9.2.4 La supervisión consistirá en las actividades comprendidas entre a y d:

a) Revisar los trabajos en obra y el proyecto ejecutivo.
b) Comparar los trabajos ejecutados en la obra con el proyecto ejecutivo.
c) Documentar si los trabajos cumplen o no con lo proyectado.
d) Constatar si las correcciones fueron hechas y verificadas por el constructor o si siguen siendo necesarias.

9.2.5 Aquellos componentes, procesos y procedimientos que no cumplan con lo señalado en el proyecto ejecutivo o con las correcciones indicadas por la supervisión, serán incluidos en el informe que se entregue al director, al corresponsable y al propietario.

9.2.6 Si durante la supervisión del proyectista, corresponsable, o revisor especializado, se identifican condiciones no anticipadas, se deberá informar al director para que determine las medidas a implantar.

9.2.7 El proyecto ejecutivo establecerá los requisitos de supervisión antes de colocar materiales que impidan o bloqueen una revisión visual.

9.3 Prueba de materiales de rehabilitación

9.3.1 En el proyecto ejecutivo se establecerán el tipo y frecuencia de pruebas de materiales. Se deberá cumplir con lo requerido en las NTC-Acero, NTC-Concreto, NTC-Mampostería y en esta Guía técnica, según corresponda.

9.4 Visitas del proyectista

9.4.1 El proyectista de la rehabilitación deberá visitar la obra durante la ejecución de las reparaciones, recimentación, reforzamiento, rigidización, según aplique, para verificar que la estructura existente es como la supuesta en diseño y que el proyecto ejecutivo es adecuado para cumplir con los Objetivos de la Rehabilitación.

9.4.2 Si como resultado de las visitas del proyectista es necesario modificar el diseño original, se deberán documentar los cambios, informar al corresponsable y al director y, con el visto bueno de ellos, proceder a la modificación. El propietario, el constructor y los revisores especializados deberán ser informados de dicha modificación, por escrito, por parte del proyectista.

9.5 Plan de aseguramiento de la calidad de la construcción

9.5.1 General

9.5.1.1 El proyectista, en consulta con el constructor, deberá preparar un Plan de Aseguramiento de la Calidad de la Construcción (PACC) para ser aprobado por el director y el corresponsable. En él se deben incluir, al menos, los conceptos a a f descritos a continuación:

a. Lista de elementos y componentes sujetos de requisitos especiales para el aseguramiento de la calidad.
b. Procedimientos requeridos de control de calidad del constructor.
c. Revisión de los informes del constructor y subcontratistas.
d. Revisión de los informes de supervisión y prueba de materiales.
e. Procedimientos para la modificación del proyecto ejecutivo que reflejen las condiciones de campo no previstas y descubiertas durante la construcción.
f. Requisitos especiales de supervisión y control de calidad de materiales.

9.6 Requisitos de aseguramiento de la calidad de la construcción

9.6.1 Del proyectista

El proyectista deberá visitar la obra para constatar el cumplimiento de las condiciones supuestas en el proyecto ejecutivo. Al menos, deberá visitar la obra durante la colocación del concreto o de elementos de acero de componentes críticos para la rehabilitación (muros, contraventeos, encamisados). El proyectista deberá informar por escrito al director y al corresponsable cualquier deficiencia nueva o que no se haya atendido.

9.6.2 Del corresponsable

El corresponsable deberá visitar la obra para constatar que la ejecución es consistente con el proyecto ejecutivo. Deberá inspeccionar la obra antes de la colocación del concreto o de elementos de acero de componentes críticos para la rehabilitación: el corresponsable deberá informar por escrito al director de cualquier deficiencia nueva o que no se haya atendido.

9.6.3 Del supervisor

El supervisor será responsable del cumplimiento de todo lo indicado en el proyecto ejecutivo, así como de las indicaciones del director y del corresponsable durante la obra de rehabilitación.

9.6.4 De laboratorios acreditados

El director será responsable de verificar que los requisitos especiales de control de calidad de los materiales, señalados en el PACC, se cumplan por

un laboratorio acreditado y reconocido por un organismo nacional de certificación.

9.6.5 Del director

El director deberá recabar los informes de obra preliminares, con las deficiencias y su solución. Todas las deficiencias serán asentadas en bitácora para la pronta ejecución del constructor. Al término de la construcción, el director entregará un informe final al Instituto y al propietario indicando el nivel de cumplimiento del PACC.

9.6.6 Del constructor

El constructor será responsable del cumplimiento de todo lo indicado en el proyecto ejecutivo, así como de las indicaciones del director y del corresponsable durante la obra de rehabilitación.



Glosario

A continuación, se incluyen las definiciones de los términos más usados en la inspección, evaluación y rehabilitación de edificaciones.

Acciones
Todos los fenómenos que inducen en una estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones. Generalmente denominadas cargas. El término acciones es más amplio, ya que incluye cambios de temperatura, hundimientos, viento, sismo, entre otros.

Alambre
Hilo de metal obtenido por trefilado, con diámetro de 6.35 mm o menor.

Albergue
Instalación que se establece para brindar resguardo a las personas que se han visto afectadas en sus viviendas por los efectos de fenómenos perturbadores y en donde permanecen hasta que se da la recuperación o reconstrucción de sus viviendas.

Amortiguamiento

Propiedad de la estructura para disipar la energía introducida por el movimiento sísmico.

Aplanado

Recubrimiento de mortero sobre un elemento de mampostería. Sinónimos de revoque, enlucido y enjarre.

Aplastamiento

Desmoronamiento local de la piedra, mampostería o concreto debido a esfuerzos de compresión que exceden la resistencia del material a este efecto.

Arcilla

Material mineral de partículas muy finas compuesto principalmente por agregados de silicatos de aluminio hidratados, el cual posee propiedades plásticas.

Asentamiento

Deformación vertical que experimenta una estructura por deformaciones del terreno situado bajo ésta.

Autoridad local educativa

Término usado en esta Guía técnica en referencia a la entidad responsable de la infraestructura física educativa en un municipio o en una entidad federativa.

Auxilio

Respuesta de ayuda a las personas en riesgo o las víctimas de un siniestro, emergencia o desastre, por parte de grupos especializados públicos o privados, o por las unidades internas de protección civil, así como las acciones para salvaguardar los demás agentes afectables.

Aviso de Seguridad Estructural y Uso del Edificio

Cartel de papel que se coloca en los edificios evaluados por los inspectores. En esta Guía se usa Aviso como su equivalente. Pueden ser: verde o "Uso Permitido", amarillo o "Acceso y Uso Restringidos", o rojo o "Acceso Prohibido".

Barra de refuerzo

Elemento de acero, con sección transversal nominal uniforme, utilizado para reforzar el concreto o la mampostería con diámetro mayor que 6.35 mm.

Bloque

Pieza de mampostería cuyo largo nominal es 400 mm o mayor, en módulos de 100 mm y cuya altura nominal es de 200 mm (incluyendo la junta de mortero). Generalmente, se fabrica de concreto y puede ser macizo, multiperforado o hueco.

Bovedilla

Elemento que se apoya entre viguetas, a modo de cimbra perdida, para aligerar el sistema de piso. Puede ser de concreto vibrocomprimido, arcilla, poliestireno u otros materiales.

Brigadas (de Inspección)

Para fines de esta Guía técnica, equipos conformados para evaluar la infraestructura física educativa.

Cadena

Véase “dala”.

Capacidad de deformación inelástica

Propiedad de un elemento o de la estructura, en su conjunto, para disipar energía inelásticamente cuando ésta se deforma lateralmente más allá del límite elástico y sin una caída significativa de su capacidad resistente.

Capacidad de desplazamiento global

Máximo desplazamiento que toda la estructura puede tolerar dentro de un nivel de desempeño específico. Este límite normalmente depende de la distorsión admisible de los elementos estructurales, de un grupo de ello, o bien, de un subsistema estructural.

Capacidad estructural

Habilidad de una estructura, en términos de resistencia, rigidez, capacidad de deformación y amortiguamiento para funcionar ante las acciones impuestas.

Carga muerta

Es la carga que actúa en forma permanente sobre la estructura, y que se debe al peso de todos los componentes del edificio.

Carga viva

Incluye las acciones derivadas del uso del edifico y que pueden variar en forma importante en el tiempo, distinguiéndose así de la carga muerta. Incluye mobiliario, equipo, personas y vehículos.

Castillo

Elemento estructural vertical, de concreto reforzado, colocado en los bordes del muro y de sus huecos. En muros reforzados se ligan con las dalas para proporcionar confinamiento. Pueden ser internos o externos en relación al muro.

Castillo interno

Castillo construido en el interior de piezas huecas de un muro.

Castillo externo

Castillo que se construye por fuera de las piezas del muro. Se requiere de una cimbra para ser colado.

Celda

Espacio vacío que atraviesa la pieza de mampostería por lo menos en 95% de su altura con el fin de aligerarla y eventualmente alojar los elementos de refuerzo, tuberías e instalaciones.

Cimentación

Parte de la estructura que está en contacto con el suelo y sirve para transmitir a éste las cargas generadas por la edificación.

Claro

Dimensión horizontal entre las caras internas de dos apoyos de una viga o losa.

Colado

Proceso en el cual una mezcla fresca de concreto, o mortero, es colocada en un molde o cimbra, donde se le deja endurecer (fraguar).

Columna

Elemento estructural vertical con sección transversal pequeña comparada con su altura. Es un elemento principal de soporte de las cargas de la cubierta y de los pisos intermedios de un edificio. Trabaja principalmente a esfuerzos de flexocompresión.

Componente (estructural)
Miembro de una estructura, como viga, columna o muro que forma parte de un elemento estructural.

Comportamiento no lineal
Cuando la relación entre las deformaciones y la carga aplicada deja de ser proporcional y que genera deformaciones permanentes, lo que equivale a una progresiva pérdida de rigidez y es indicio de algún tipo de daño.

Compresión
Estado de esfuerzos que produce un acortamiento de las fibras de la sección transversal de un elemento estructural paralelas a su eje. Es el estado de esfuerzos opuesto al de tensión.

Concreto de baja contracción
Producto químico en polvo a base de cemento, agregados finos y gruesos y aditivos que al mezclarse con agua produce un mortero sin contracciones, de alta resistencia a la compresión.

Continuidad
Condición de conexión entre dos elementos estructurales en que se impiden los movimientos relativos entre ellos.

Contrafuertes
Elemento estructural vertical o inclinado que tiene la función de proveer estabilidad lateral, absorbiendo los empujes laterales o el coceo de una cubierta. Generalmente es un muro transversal exterior a la construcción principal.

Contratrabe
Viga de concreto reforzado, construida para reforzar y rigidizar la cimentación.

Contraventeo
Elemento metálico inclinado colocado para incrementar la rigidez lateral de las estructuras.

Corrosión
Deterioro de un material provocado por reacción química o electroquímica. En el caso de un metal, se identifica como oxidación. La corrosión implica pérdida de la sección transversal del elemento metálico.

Corrugado
Surcos o resaltos sobre una superficie, normalmente siguiendo un patrón determinado. Se usa en barras, alambres y láminas de acero para refuerzo de concreto.

Cortante
Un tipo de esfuerzo o deformación que tiende a producir un corrimiento de fibras adyacentes y la consiguiente distorsión de la sección transversal del elemento.

Cuantía de refuerzo
Relación del área del refuerzo entre el área del concreto o mampostería en cualquier sección de un elemento.

Cuatrapeado
Aparejo en el que se colocan los elementos de manera alternada; *i. e.,* colocación de las piezas con sus extremos verticales alternados respecto a la hilada inferior.

Dala

Elemento horizontal de concreto reforzado, colocada sobre el muro (dala de cerramiento), debajo de él (dala de desplante) o alrededor de huecos. En muros, se conecta a los castillos para proporcionar confinamiento.

Daño

Evidencia física de las deformaciones inelásticas de un componente estructural causadas por el sismo.

Deformación

Cambio en la forma o en las dimensiones debido a los esfuerzos a que está sometido el elemento estructural.

Demanda

Magnitud de la acción que obra sobre una estructura y que debe ser resistida para un nivel de desempeño específico.

Dentado

Corte en forma de diente o cuña en las piezas del borde vertical de un muro de mampostería para realizar la unión con el castillo. Como alternativa en piezas industrializadas, se deja sobresaliendo una de cada dos hiladas para formar un dentado rectangular en el borde que llevará el castillo.

Desastre

Resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y o extremos, concatenados o no, de origen natural, de la actividad humana o aquellos provenientes del espacio exterior, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada, causan daños y que por su magnitud exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada. Sinónimo de calamidad.

Desplomo

Desviación con respecto a la vertical de un elemento, normalmente se refiere a un muro o a una columna. Sinónimo de inclinación.

Diafragma

Elemento estructural diseñado para soportar esfuerzos cortantes paralelos a su plano. Placa, muro u otra estructura rígida en su plano, que evita la distorsión de un piso o marco.

Dintel

Elemento de soporte horizontal ubicado sobre aberturas de muros, como puertas o ventanas.

Distorsión de entrepiso

Rotación del eje vertical del entrepiso. Se puede obtener dividiendo el desplazamiento lateral relativo a nivel de losas, entre la altura del entrepiso.

Elemento estructural

Unidad básica constitutiva de una estructura, capaz de soportar y transmitir las cargas a sus apoyos u otros elementos a los que está conectada (arco, viga, columna, bóveda, losa, entre otros).

Emergencia

Situación anormal que puede causar un daño a la sociedad y propiciar un riesgo excesivo para la seguridad e integridad de la población en general, generada o asociada con la inminencia, alta probabilidad o presencia de un agente perturbador.

Empotramiento

Apoyo rígido de un elemento estructural de modo que impide la rotación y el desplazamiento en el extremo del elemento.

Escalonamiento

Mecanismo por medio del cual la superficie inclinada de un talud natural manifiesta diferencias de elevación, originando un perfil inclinado con discontinuidades verticales. También, el desplazamiento vertical relativo en una falla superficial.

Esfuerzo

Fuerza por unidad de área. Los esfuerzos normales a la superficie son de compresión y de tensión y los paralelos a ella son esfuerzos cortantes.

Estable (estabilidad)

Condición de equilibrio que no es alterada por pequeños cambios en el estado de esfuerzos y deformaciones.

Estrategias de rehabilitación

Conjunto de técnicas de rehabilitación seleccionadas para eliminar o mitigar las deficiencias o daño de la estructura.

Estribo

Barras o alambres de refuerzo con forma cerrada colocadas perpendicularmente al sentido longitudinal de un elemento de concreto con el objetivo de resistir fuerza cortante y confinar el núcleo del elemento.

Estudio de mecánica de suelos

Informe escrito que contiene las características geológicas y geotécnicas del sitio donde se encuentre el edificio por rehabilitar, campaña de exploración, ensayes, determinación de las características mecánicas del material que compone el subsuelo, investigaciones geofísicas en su caso, y toda la información necesaria a fin de que el ingeniero geotécnico proponga la forma de resistir las nuevas acciones y la solución de la cimentación de la estructura rehabilitada para las condiciones del terreno, incluyendo la recimentación, la excavación y las medidas de contención, estabilización del terreno y protección a colindancias.

Evaluación de la seguridad estructural

Proceso de identificación de daños, jerarquización del nivel de vulnerabilidad de elementos estructurales y no estructurales, y de determinación del nivel de seguridad de la edificación completa.

Evaluación Intermedia

Inspección con duración aproximada de una a cuatro horas por edificio para identificar el sistema estructural y el nivel de daño, así como para calcular, de manera aproximada, la capacidad de la estructura. Se aplica en edificios con dudas con respecto a su capacidad (aviso amarillo o “Acceso y Uso Restringidos” tras habérsele practicado una Evaluación Rápida) o para identificar si se requiere una Evaluación Profunda.

Evaluación Profunda

Investigación detallada de la estructura, conducida por ingenieros estructurales, la cual implica el uso e interpretación de planos de diseño y construcción, datos sobre el daño y nuevos cálculos estructurales. Se aplica para evaluar edificios en duda, determinar la extensión e impacto del daño, así como para determinar cómo estabilizar (apuntalar y/o arriostrar) y rehabilitar la estructura.

Evaluación Rápida

Inspección con duración aproximada de 20 minutos por edificio para lograr una evaluación general del daño y de la seguridad, para identificar y clasificar el tipo de Aviso (verde, amarillo o rojo), así como para identificar aquellos edificios que requieren una Evaluación Intermedia o restricciones para su acceso y uso.

Falla (geológica)

Superficie de rotura de una roca a lo largo de la cual ha habido movimiento diferencial.

Fenómeno natural perturbador

Agente perturbador producido por la naturaleza.

Flexión

Un tipo de deformación en la cual las secciones transversales de un elemento estructural que eran inicialmente paralelas se inclinan unas hacia las otras. También se denomina así a la acción estructural que produce dicho efecto.

Fluencia

Estado de un material o elemento estructural en que éste pierde totalmente rigidez y se deforma plásticamente. Se llaman esfuerzos de fluencia y fuerza de fluencia a las condiciones para las que se produce este fenómeno, y que se consideran como límite para la resistencia de una estructura.

Fluido

Material que ofrece poca o nula resistencia a las fuerzas que tienden a cambiarlo de forma.

Gestión Integral de Riesgos

Conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, considerándolos por su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción que involucra a los tres niveles de gobierno, así como a los sectores de la sociedad, lo que facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados al logro de pautas de desarrollo sostenible, que combatan las causas estructurales de los desastres y fortalezcan las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad. Involucra las etapas de: identificación de los riesgos y/o su proceso de formación, previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción.

Grieta

Abertura o hendidura que se presenta en un elemento estructural cuando los esfuerzos de tensión exceden la resistencia a este efecto. El término fisura es equivalente, aunque suele emplearse para identificar una grieta de pequeña abertura.

Grupos voluntarios

Las personas morales o las personas físicas que se han acreditado ante las autoridades competentes, y que cuentan con personal, conocimientos, experiencia y equipo necesarios para prestar de manera altruista y comprometida, sus servicios en acciones de protección civil.

Habitabilidad

Habilidad del edificio para ser ocupado.

Hilada

Serie de piezas de tabiques o bloques colocados horizontalmente.

Histéresis

Curva esfuerzo-deformación que describe el comportamiento de un espécimen que es esforzado más allá de su intervalo elástico en ciclos alternados de tensión y compresión. También conocido como “curva histerética”.

Inestabilidad de laderas naturales

Conocidas también como deslizamiento del terreno, o de tierra, implica movimiento de rocas y/o suelo por la acción de la gravedad. Los deslizamientos de tierra sucedidos en el pasado son responsables de las características topográficas del paisaje natural actual.

Inmueble

Terreno y construcciones que en él se encuentran.

Intemperismo

Proceso fisicoquímico de descomposición o desgaste como respuesta a la exposición a agentes de la intemperie, como son el agua, la humedad o las variaciones de temperatura.

Intensidad del daño

Nivel relativo de la gravedad del daño en un elemento o componente estructural. Usualmente se clasifica como nulo, ligero, moderado y severo.

Junta

En muros de mampostería es la separación, tanto vertical como horizontal, entre tabiques o bloques, que se rellena con mortero aglutinante o de pega.

Ladera

Costado de un terraplén o de una montaña.

Ladera natural

Costado de una montaña, representado por la falda del cerro.

Ladrillo

Véase “Tabique”.

Licuación de suelos

Consiste en la pérdida de resistencia de suelos arenosos, con partículas de tamaño uniforme y que se encuentran saturados. Ocurre como consecuencia de las vibraciones del terreno natural que origina el paso de ondas sísmicas durante la ocurrencia de un temblor.

Lindero

Límite de una propiedad.

Losa

Elemento estructural plano horizontal para cubrir un claro.

Mampostería

Construcción compuesta, integrada por piezas de origen pétreo, naturales o artificiales, que por lo general son lo suficientemente pequeñas como para ser manejadas por una persona y que son unidas entre sí con mortero aglutinante.

Marco (resistente a momento)

Un conjunto de elementos estructurales lineales, vigas y columnas conectados en sus uniones.

Marco con muros diafragma

Marco de concreto o acero con muros de concreto o mampostería colocados entre vigas y columnas.

Mecanismo lateral inelástico

Mecanismo plástico desarrollado en un elemento o conjunto de ellos ante la acción combinada de cargas verticales y laterales. Es único para el patrón de cargas laterales especificado.

Mitigación

Es toda acción orientada a disminuir el impacto o daños ante la presencia de un agente perturbador sobre un agente afectable.

Modo de comportamiento

Tipo de daño predominante en un componente estructural en particular. Depende de las magnitudes relativas del cociente entre las cargas aplicadas y la resistencia a carga axial, momento flexionante y fuerza cortante.

Momento flexionante

Un momento o par de fuerzas que induce flexión en la sección transversal de un elemento.

Monolítico

Compuesto de un solo gran bloque de piedra, lo que se simula con el material en un colado de concreto. También estructura en que no hay discontinuidades entre sus elementos.

Mortero

Mezcla de cementante y agua con agregado fino.

Mortero fluido sin contracción

Producto químico en polvo a base de cemento, agregados minerales y aditivos que al mezclarse con agua produce un mortero sin contracciones, de alta resistencia a la compresión. Sinónimo de grout.

Muro acoplado

Muro en el cual los segmentos verticales están unidos, en uno o más pisos, mediante vigas de acoplamiento.

Muro de carga

Se denomina así a un muro estructural, de mampostería o concreto, con la función de soportar parte del peso del edificio, además de su propio peso.

Muro de cortante

Muro de concreto o mampostería conectado al piso adyacente y que resiste las fuerzas laterales en su plano.

Muro estructural

Es el elemento del que depende parte de la estabilidad de la edificación, contribuyendo a la resistencia a cargas laterales y/o verticales.

Muro no estructural

Es un muro del que no depende la estabilidad de la edificación, pero que debe soportar las acciones para la estabilidad propia (viento, sismo, empujes por carga viva, entre otros). Ejemplos son muros divisorios, pretiles, bardas.

Nivel de desempeño

Estado de daño hipotético usado para establecer objetivos de desempeño sísmico. Los niveles de desempeño más comunes son Prevención de colapso, Protección a la vida y Ocupación inmediata.

Objetivo de la Rehabilitación

Selección del nivel de desempeño esperado para los sismos de diseño.

Ocupación inmediata

Nivel de desempeño en el cual un edificio exhibe daño mínimo o nulo en sus elementos estructurales y daño menor en sus componentes no estructurales.

Pandeo

Flexión súbita de un elemento que se despega de su eje original, perdiendo drásticamente su rigidez y capacidad de resistir cargas.

Parapeto

Véase “pretil”.

Patín

Proyección horizontal en un extremo de la sección de un elemento, con lo que se proporciona un notable incremento de momento de inercia y de capacidad para resistir momentos flexionantes.

Peligro

Probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo y en un sitio determinado.

Peralte

Altura (peralto).

Peso propio

Las cargas debidas al peso de los elementos estructurales.

Preparación

Actividades y medidas tomadas anticipadamente para asegurar una respuesta eficaz ante el impacto de un fenómeno perturbador en el corto, mediano y largo plazos.

Pretil

Muro no estructural de poca altura, usualmente no mayor que 1 m, el cual se forma por la continuación de las paredes exteriores sobre la azotea o bajo una ventana. Sinónimos: parapeto, antepecho de ventana.

Prevención

Conjunto de acciones y mecanismos implantados con antelación a la ocurrencia de los agentes perturbadores con la finalidad de conocer los peligros o los riesgos, identificarlos, eliminarlos o reducirlos; evitar o mitigar su impacto destructivo sobre las personas, bienes, infraestructura, así como anticiparse a los procesos sociales de construcción de éstos.

Prevención de colapso

Nivel de desempeño en el cual el edificio, si bien está de pie, tiene un daño muy extendido y posee una rigidez y resistencia residuales pequeñas.

Previsión

Tomar conciencia de los riesgos que pueden causarse y las necesidades para enfrentarlos a través de las etapas de identificación de riesgos, prevención, mitigación, preparación, atención de emergencias, recuperación y reconstrucción.

Propietario o poseedor

Persona física o moral que tiene la propiedad o posesión jurídica de un bien inmueble, donde se pretende hacer la revisión de las construcciones existentes.

Protección a la vida

Nivel de desempeño en el cual el edificio exhibe daño extendido a los componentes estructurales y no estructurales, permanece estable y tiene suficiente capacidad estructural de reserva.

Proyectista

Persona física con cédula profesional encargada de realizar el proyecto estructural o de rehabilitación de acuerdo con el reglamento de construcciones local.

Proyecto ejecutivo de obra

Conjunto de planos, memorias descriptivas y de cálculo, catálogo de conceptos, normas y especificaciones que contiene la información y define el proceso de la rehabilitación de un inmueble.

Puntal

Elemento estructural de sección transversal pequeña que se introduce en una estructura para resistir cargas de compresión. A diferencia de una columna, puede ser inclinado y frecuentemente forma parte de una armadura.

Recimentación

Modificación de la cimentación para resistir las nuevas acciones.

Reconocimiento preliminar

Recorrido realizado en equipos, por tierra o por aire, inmediatamente después de la ocurrencia de un sismo para determinar el tipo y extensión del daño en la infraestructura física educativa de una zona con objeto de planear y jerarquizar la evaluación de edificios. Normalmente, este recorrido dura unas cuantas horas y no se espera que se evalúen edificios en particular.

Reconstrucción

Acción transitoria orientada a alcanzar el entorno de normalidad social y económica que prevalecía entre la población antes de sufrir los efectos producidos por un agente perturbador en un determinado espacio o jurisdicción. Este proceso debe buscar, en la medida de lo posible, la reducción de los riesgos existentes, asegurando la no generación de nuevos riesgos y mejorando para ello las condiciones preexistentes.

Recuperación

Proceso que inicia durante la emergencia, consistente en acciones encaminadas al retorno a la normalidad de la comunidad afectada.

Recursos

Personal, equipos, brigadas, suministros e instalaciones disponibles o potencialmente disponibles para la coordinación de la evaluación de la infraestructura física educativa.

Reforzamiento

Incremento de la capacidad para resistir cargas de una estructura, de un sistema, de un componente o de un elemento estructural.

Refuerzo

Elementos como barras, alambres, hebras, fibras u otros que son embebidos o anclados con un elemento estructural para que juntos resistan las fuerzas del sistema.

Rehabilitación

Proceso de intervención estructural para recuperar las condiciones originales (reparación) o para mejorar el comportamiento de elementos y sistemas estructurales para que la edificación cumpla con los requisitos de seguridad contra colapso y de limitación de daños establecidos en el Reglamento; incluye a la recimentación, reforzamiento, reparación y rigidización.

Reparación

Reemplazo o corrección de materiales, componentes o elementos de una estructura que se encuentran dañados o deteriorados con el fin de recuperar su capacidad original.

Resiliencia

Capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos.

Resistencia

Máxima carga que un elemento estructural puede soportar antes de llegar a un estado de falla.

Resistencia de diseño

Producto de la resistencia nominal, calculada a partir de normas técnicas complementarias, y el factor de resistencia correspondiente.

Resistencia requerida o última

Producto de la acción interna debida a cargas permanentes, variables y accidentales, y de sus factores de carga correspondientes.

Resumen de Avisos

Cartel que se coloca en cada una de las puertas de entrada al plantel escolar y que incluye un resumen de la calificación de cada edificio.

Revisión de la seguridad estructural

Comprobación de los estados límite de falla y de servicio de la estructura.

Riesgo

Daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador.

Rigidez

Oposición de un material o elemento estructural a ser deformado. Carga necesaria para producir una deformación unitaria.

Rigidización

Adición de elementos, componentes o sistemas para reducir los desplazamientos y las deformaciones.

Segmento (de muro)

Parte de un muro delimitado por aberturas. Puede ser vertical u horizontal. El segmento horizontal se suele llamar viga de acoplamiento.

Seguridad estructural

Nivel de cumplimiento de los estados límite de falla y de servicio de una estructura establecidos en el reglamento de construcciones local y sus normas técnicas complementarias.

Simulacro

Representación mediante una simulación de las acciones de respuesta previamente planeadas con el fin de observar, probar y corregir una respuesta eficaz ante posibles situaciones reales de emergencia o desastre. Implica el montaje de un escenario en terreno específico, diseñado a partir de la identificación y análisis de riesgos y la vulnerabilidad de los sistemas afectables.

Sismo

Fracturamiento repentino de una porción de la litósfera terrestre (cubierta rígida del planeta) como consecuencia de la acumulación de esfuerzos de deformación. La energía liberada por el rompimiento se propaga en forma de ondas sísmicas, hasta grandes distancias.

Sistema estructural

Conjunto de elementos o componentes estructurales de todo el edificio.

Subsistema estructural

Conjunto de elementos o componentes estructurales de parte de un edificio, con una función determinada (por ejemplo, muro acoplado, marco).

Suelo

Material que se forma en la superficie de la Tierra como resultado de procesos orgánicos. El suelo varía según el clima, la vida animal y vegetal, el tiempo, la pendiente del terreno y el material rocoso del que se deriva.

Tabicón

Tabique macizo compuesto de concreto.

Tabique

Pieza para mampostería de forma prismática rectangular, de dimensiones menores que el bloque, fabricado con arcillas, comprimidas o extruidas, mediante un proceso de cocción o de concreto. Puede ser macizo, hueco o multiperforado. Al tabique macizo de arcilla se le conoce comúnmente como ladrillo.

Talud

Inclinación del paramento de un muro o de un terreno.

Talud artificial

Superficie inclinada que unen los desniveles del terreno, producto de actividades de construcción, ya sea por corte o relleno o construcción de un terraplén artificial.

Tensión

Esfuerzo principal que produce el alargamiento de un elemento estructural o de las fibras de su sección transversal paralelas a su eje.

Tensor

Barra o cable que, trabajando en tensión, se coloca para restringir el alargamiento entre dos puntos de una estructura.

Torsión

Estado de esfuerzos que tiende a producir rotación de la sección transversal de un elemento. En relación a estructura completa, es la rotación de los sistemas de pisos y techo alrededor del eje vertical durante la vibración por el efecto de sismos.

Viga

Elemento estructural de eje recto que cubre un claro horizontal y en que el peso propio y las cargas externas inducen principalmente momentos flexionantes y fuerzas cortantes. Sinónimo de trabe.

Viga de acoplamiento

Elemento que une dos muros. También llamado segmento horizontal del muro.

Vigueta

Viga de tamaño relativamente angosto apoyadas sobre vigas o muros, con poca separación, para soportar bovedillas de losas de entrepiso o cubierta.

Voladizo

Viga o losa empotrada en un extremo y libre en el otro.

Vulnerabilidad

Susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales.

Zapata

Elemento estructural de la cimentación que transmite las cargas directamente al suelo, generalmente tiene una forma ensanchada hacia la parte de contacto con el terreno para distribuir las cargas en una superficie más amplia. Puede ser aislada, corrida o de borde o lindero.

Zona de desastre

Espacio territorial determinado en el tiempo por la declaración formal de la autoridad competente, en virtud del desajuste que sufre en su estructura social, impidiéndose el cumplimiento normal de las actividades de la comunidad. Puede involucrar el ejercicio de recursos públicos a través del Fondo de Desastres.



Apéndice

A. Investigación de estructuras de concreto y mampostería para fines de rehabilitación

A.1 General

En la sección 4.2 de esta Guía técnica se requiere al proyectista, con la participación del director y del corresponsable si el nivel de daño lo amerita, la investigación del edificio por rehabilitar. En este apéndice se presentan consideraciones y recomendaciones para lograr una inspección en campo eficaz que permita entender los principales modos de comportamiento que rigen el desempeño de la estructura, así como los tipos e intensidad de daños causados por el sismo u otras acciones.

Como complemento a este apéndice, se recomienda revisar las recomendaciones en INIFED (2020a y 2020b).

A.2 Grieta

La clasificación de la intensidad o magnitud de daño en componentes estructurales de esta Guía técnica requiere que el inspector o proyectista distingan entre grietas por flexión y por cortante, que puedan identificar grietas verticales en zonas a compresión en muros y columnas, y que sean capaces de diagnosticar grietas que puedan indicar algún deslizamiento a lo largo del traslape de barras de refuerzo.

En la aplicación de esta Guía técnica se requiere medir el ancho de las grietas, el cual es un factor para evaluar la severidad del daño por sismo en una estructura de concreto o de mampostería. En el presente documento se usan, indistintamente, "ancho de grieta" y "espesor de grieta".

A.2.1 Grietas por flexión y por tensión diagonal

Las grietas por flexión son aquellas que se desarrollan perpendicularmente a los esfuerzos de tensión por flexión. En el caso de segmentos de muro o en columnas, las grietas por flexión son horizontales; en vigas, son verticales. Las grietas por flexión inician en la fibra extrema de la sección y se propagan hacia el interior, en dirección del eje neutro. En el caso de elementos sujetos a desplazamientos cíclicos, a menudo las grietas por flexión se encuentran formando una sola grieta que atraviesa el peralte de la sección.
Las grietas por cortante son resultado de los esfuerzos por tensión diagonal al aplicarse las fuerzas de cortante. Estas grietas son inclinadas, formando ángulos entre 35 y 70 grados con respecto a la horizontal. El ángulo de agrietamiento depende de los esfuerzos normales y de la geometría del elemento. En el caso de componentes sujetos a desplazamientos cíclicos, como los impuestos por el sismo, es frecuente que se crucen formando un patrón en forma de letra X.

En ocasiones, las grietas por flexión se conectan con las grietas inclinadas. Un caso característico es en muros, en los cuales las grietas horizontales a cierta altura se inclinan conforme se propagan hacia el centro del muro. En estos casos, se deben medir las grietas por flexión y por cortante de forma separada.

Se debe tener presente que, en un inicio, las grietas se pueden explicar mediante las relaciones de esfuerzos representadas en el círculo de Mohr. Conforme aumenta el agrietamiento, los patrones y la orientación de los esfuerzos son afectados por el acero de refuerzo del elemento.

A.2.2 Profundidad total o parcial de grietas

La clasificación del daño en edificios de concreto y mampostería de esta Guía técnica supone que las grietas por flexión y por cortante se extienden en todo el espesor (en el caso de muros) o ancho (en vigas y columnas). Además, se considera que el espesor de la grieta es similar en caras opuestas del elemento. Es probable que las cargas inducidas por sismo en el plano y fuera del plano del elemento ocasionen que las grietas estén abiertas en una cara y queden cerradas o con menor espesor en la cara opuesta. En esos casos, una opción aceptable es usar el promedio del

espesor de las grietas medidas en caras opuestas. Otra opción, más conservadora, es usar la grieta con el mayor espesor.

A.2.3 Agrietamiento como precursor del desconchamiento

El agrietamiento en las zonas a compresión es precursor del desconchamiento del concreto o la mampostería. Dichas grietas son paralelas a los esfuerzos principales a compresión. Se desarrollan cuando las deformaciones unitarias a compresión en el concreto o mampostería son superiores a deformaciones entre 0.003 y 0.005. Tal agrietamiento es indicativo de una intensidad mayor del daño por clasificarse en la presente Guía técnica. Este agrietamiento ocurre en los extremos de las zonas de articulación plástica en modos de comportamiento controlados por flexión y en fallas por aplastamiento diagonal (del alma del muro o en columnas o vigas) en comportamientos controlados por fuerza cortante.

En el caso de elementos que se comportan a flexión, estas grietas son verticales en muros y columnas, y horizontales en vigas. Las grietas ocurren cerca de las fibras extremas a tensión. Ocurren con menor frecuencia en vigas, ya que su carga axial es baja.

El agrietamiento en zonas de compresión suele confundirse con grietas asociadas a deslizamiento de traslapes. Algunas diferencias entre ellas son:

Grietas precursoras de desconchamiento en zonas a compresión	Grietas por falla de adherencia o por deslizamiento de traslapes
• Ocurren ante deformaciones de compresión elevadas. • Son usualmente cortas. • Aparecen en las fibras extremas de una sección, comúnmente dentro del recubrimiento de concreto.	• Aparecen en la ubicación de refuerzo longitudinal susceptible a fallas por adherencia o por deslizamiento de barras traslapadas. Es el caso de barras de grandes diámetros o traslapes con longitudes insuficientes. • Tienden a ser relativamente largas y rectas, siendo paralelas a las barras. Se originan junto al refuerzo y se propagan hacia la superficie de concreto.

El agrietamiento inclinado en el alma de un muro o hacia el centro de la altura de una columna puede ser precursor de una falla por compresión diagonal. A diferencia de las grietas por tensión diagonal, estas grietas no se abren mucho. Conforme aumenta el daño, las grietas evolucionan en un desconchamiento del concreto o mampostería. Esto es producto de la reducción de la resistencia a la compresión del concreto o de la mampostería en presencia de deformaciones transversales a tensión.

A.2.4 Grietas de adherencia en zonas de traslapes

Si los traslapes tienen longitudes insuficientes para desarrollar las fuerzas de tensión en el acero de refuerzo, las barras traslapadas deslizan entre sí. La evidencia de

este deslizamiento son grietas longitudinales, paralelas al traslape, que se forman adyacentes al refuerzo y migran hacia la superficie del concreto. Este agrietamiento coincide con la ubicación de los traslapes de refuerzo.

A.2.5 Espesores de grieta

En esta Guía técnica, la intensidad del daño en estructuras de concreto y mampostería se clasifica dependiendo del ancho de grieta. Es por ello que, para definir el nivel de daño y sus consecuencias en la capacidad de la estructura, se debe medir el máximo espesor de las grietas.

Cuando se tienen muchas grietas hay que considerar la grieta con el mayor espesor del tipo considerado (es decir, por flexión o por cortante) para definir el nivel de daño.

El máximo espesor de una grieta puede ser considerablemente mayor que el promedio del ancho de grietas paralelas. Si bien el espesor promedio puede ser un mejor indicador de la deformación unitaria promedio en el refuerzo, el ancho máximo es considerado como una mejor referencia de la máxima deformación en el refuerzo y, en general, de la intensidad de daño. La concentración de deformación en una o dos grietas de gran espesor indica un modo de comportamiento indeseable y daño más serio que cuando la deformación tiene una distribución más uniforme y se observan varias grietas paralelas menos anchas, lo cual indica un mejor desempeño sísmico.

La clasificación del daño en función del espesor de grietas se basa en comparar el daño medido en experimentos de elementos de concreto y mampostería. Se reconoce que el ancho residual de la grieta, medido después de un sismo, puede ser menor que el máximo espesor que puede ocurrir durante el sismo.

A.3 Planeación de la investigación

El éxito de la investigación en campo depende de una planeación cuidadosa de los aspectos por revisar. Es probable que la investigación requiera varias visitas, de modo de contar con la información completa necesaria.

A.3.1 Equipamiento y herramientas de los inspectores

En la tabla A.3.1 se enlistan los equipos y herramientas que deben usar los inspectores.

A.4 Procedimiento sugerido para la investigación

A continuación, se presenta un procedimiento sugerido para ejecutar la inspección en campo con fines de rehabilitación. El alcance, detalle y orden sugerido se podrán modificar según las condiciones particulares del edificio por rehabilitar.

La inspección se realizará desde el piso inferior a los niveles superiores. Antes de ingresar a cada nivel deberá tomarse una fotografía general del nivel con una referencia que identifique el número de piso.

Tabla A.3.1
Equipo y herramientas del inspector

Objetos personales	
Esenciales	• Identificación personal. • Identificación oficial o de la entidad que representa. • Anteojos, anteojos de seguridad. • Casco de seguridad. • Botas o zapatos con protección en la punta. • Chaleco de seguridad con cintas reflectantes y/o colores altamente visibles. • Ropa y equipo contra lluvia. • Tapabocas contra polvo. • Guantes de tela. • Guantes desechables. • Mochila.
Sugeridos	• Cantimplora, termo. • Crema con protector solar. • Repelente de moscos. • Antivenenos para mordedura de serpientes y picadura de alacranes.
Equipo de campo	
Esenciales	• Linterna con baterías de repuesto. • Localizador GPS. • Cámara electrónica con baterías extra. • Flexómetro. • Distanciómetro láser. • Binoculares. • Navaja multiusos.
Sugeridos	• Portapapeles. • Papel, block de notas con protector contra agua. • Bolígrafos, lápices. • Radio portátil. • Laptop o tableta electrónica. • Brújula.

Se propone, como lista indicativa, lo siguiente:

1. **Hacer fotografías de fachadas frontales, posteriores y laterales, de ser posible.**
2. **Revisar las colindancias de la edificación.**
   - 2.1. Medir la colindancia.
   - 2.2. Verificar si tiene tapajuntas.
   - 2.3. Revisar si la junta está limpia o existen obstrucciones.
   - 2.4. Evaluar si es propenso a golpeteo.
   - 2.5. Medir, a ojo, la altura de edificios vecinos.
   - 2.6. Verificar si las losas de edificios vecinos coinciden con las del edificio evaluado o con sus columnas.
3. **Revisar problemas geotécnicos, con su documentación fotográfica.**
   - 3.1. Hundimientos (falla rotacional generalizada, por punzonamiento, local, desplazamiento horizontal).
   - 3.2. Emersión.

3.3. Inclinación.
3.4. Agrietamiento en suelos.
3.5. Cimentaciones con filtraciones de agua o inundadas.
3.6. Desplazamiento lateral causado por licuación.
3.7. Inestabilidad de laderas (caídos, flujos).
3.8. Árboles inclinados o emergidos.
3.9. Movimientos del terreno adyacente a fallas superficiales.

4. Confirmar información del proyecto original.

4.1. Fecha de construcción.
4.2. Diseñador.
4.3. Planos estructurales, arquitectónicos, memorias (solicitar la información).
4.4. Verificar el uso del edificio en nivel uno (PB), niveles intermedios y nivel superior.
4.5. Sistema estructural (especificar si hay variaciones del sistema estructural en elevación).

5. Identificar vulnerabilidades.

5.1. Identificar la posición en manzana (esquina, medio, aislado).
5.2. Identificar:
5.2.1. Sistema estructural resistente a cargas gravitacionales (SERCG).
5.2.2. Sistema estructural resistente a fuerzas laterales (SERFL).
5.2.3. Tipo de cimentación y la profundidad.
5.2.4. Tipo de sistema de piso. Prestar atención a la posible presencia de losas planas macizas o aligeradas.
5.3. Hacer un croquis de todas las plantas donde se identifique la ubicación de los elementos sismo-resistentes y su posición respecto a ejes ortogonales principales.
5.3.1. Medir largo y ancho de todas las plantas.
5.3.2. Medir altura total del edificio, altura del primer nivel y alturas de entrepisos.
5.3.3. Contar el número de niveles sobre nivel de banqueta.
5.3.4. Contar el número de sótanos y profundidad de sótanos.
5.3.5. Medir dimensiones de los elementos estructurales en todos los niveles en forma aleatoria (columnas, vigas, castillos, dalas, losas, muros de carga, muros divisorios, muros diafragma).
5.3.6. Identificar características y, en su caso, determinar las propiedades de los materiales de los elementos estructurales (columnas, vigas, castillos, dalas, losas, muros de carga, muros divisorios, muros diafragma) como se establece en el capítulo 3 de la Guía técnica.
5.4. Existencia de mecanismo de transmisión de cargas directo.
5.4.1. Revisar que:
5.4.1.1. Diafragmas horizontales puedan transmitir fuerzas a elementos verticales.
5.4.1.2. Los elementos verticales del SERFL puedan transmitir las fuerzas a la cimentación.
5.4.1.3. La cimentación transmite las fuerzas al suelo.

5.5. Irregularidades verticales.
- 5.5.1. Identificar cambios de rigideces en entrepisos contiguos.
- 5.5.2. Revisar la existencia de planta baja débil.
- 5.5.3. Revisar si existen marcos o muros que no llegan a la cimentación.
- 5.5.4. Revisar la distribución del peso en cada nivel e identificar concentraciones en un piso.
- 5.5.5. Revisar si el edificio cuenta con cisternas o tanques elevados de agua (tinacos) o gas en la azotea.
- 5.5.6. Identificar cambios de geometría en elevación (recesos, discontinuidades).
- 5.5.7. Revisar la existencia de un mezanine.
- 5.5.8. Identificar si hay columnas/muros con diferentes alturas en un mismo nivel o no son continuos de un piso a otro.
- 5.5.9. Revisar la ocurrencia posible de “columnas cortas”.

5.6. Irregularidades en planta.
- 5.6.1. Revisar la distribución en planta de elementos verticales de SERFL.
- 5.6.2. Medir el largo y ancho de entrantes y salientes (balcones, losas en voladizo).
- 5.6.3. Medir el largo y ancho de cubos de luz, elevadores y escaleras. Identificar el material constructivo.
- 5.6.4. Medir aberturas en niveles de piso y revisar si sus posiciones difieren entre un piso y otro.
- 5.6.5. Revisar cambios de geometría de plantas en elevación.
- 5.6.6. Levantar información para una posterior revisión del sistema de piso como diafragma rígido.

5.7. Falta de redundancia.
- 5.7.1. Estructuración de péndulo invertido.
- 5.7.2. Existencia de un elemento o subsistema ostensiblemente más resistente que el resto, en la planta.

5.8. Falta de capacidad de deformación inelástica.
- 5.8.1. Fenómeno de “columna corta”.
- 5.8.2. Sistema de columnas débiles – vigas fuertes.

6. Evaluar daños.

• Asignar clave a los elementos estructurales. Ejemplo: E3S-N1, donde:
» E3 es la posición respecto a los ejes ortogonales, considerando los números en dirección X (3, en este caso) y las letras en dirección Y (E, en este ejemplo).
» Siendo N es el norte geográfico, se debe identificar las caras norte (N), sur (S), este (E) y oeste (O) para cada elemento y hacer las mediciones en cada cara.
» N1 es el número de nivel. El nivel 3, por ejemplo, corresponde al que tiene como techo a la tercera losa contada a partir del nivel de banqueta.

• Observar, medir y registrar los atributos siguientes:

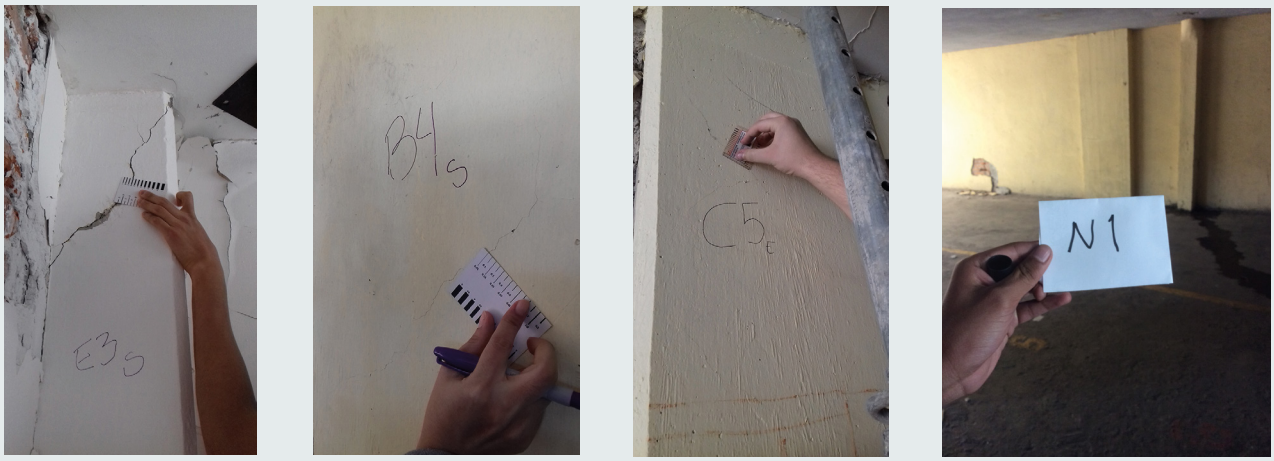


Figura A.1
Ejemplos de identificación de caras de elementos estructurales (columnas) y de medición del espesor de grietas usando comparadores manuales. Fuente: archivo personal de Rubén Bautista (2018).

6.1. Fallas en cimentación.
6.2. Golpeteo.
6.3. Colapso parcial.
6.4. Medir las deflexiones laterales de cada entrepiso si son evidentes.
6.5. Daños en elementos estructurales tipo columnas, vigas, vigas de acoplamiento, castillos y dalas, incluyendo en elementos estructurales de la cimentación.
  6.5.1. Acero expuesto.
  6.5.2. Acero pandeado.
  6.5.3. Aplastamiento del concreto.
  6.5.4. Pandeo de la columna.
  6.5.5. Medir grietas.
6.6. Daños en muros de carga y diafragma.
  6.6.1. Acero expuesto.
  6.6.2. Acero pandeado.
  6.6.3. Aplastamiento del concreto.
  6.6.4. Pandeo del muro.
  6.6.5. Volteo del muro.
  6.6.6. Medir grietas.
6.7. Daños en conexiones.
  6.7.1. Acero expuesto.
  6.7.2. Acero pandeado.
  6.7.3. Aplastamiento del concreto.
  6.7.4. Medir grietas.
6.8. Daños en losas.
  6.8.1. Acero expuesto.
  6.8.2. Acero pandeado.

6.8.3. Medir grietas.
6.9. Daños en exteriores.
6.9.1. Vidrios.
6.9.2. Torres de anuncios.
6.9.3. Antenas de telecomunicaciones.
6.9.4. Acabados.
6.9.5. Fachadas.
6.9.6. Balcones.
6.9.7. Pretiles.
6.9.8. Tanques elevados.
6.9.9. Bardas.
6.9.10. Salidas de emergencias.
6.10. Daños en interiores.
6.10.1. Muros divisorios.
6.10.2. Plafones.
6.10.3. Lámparas.
6.10.4. Cubos de escaleras, elevadores, luz.
6.10.5. Instalaciones.
6.10.6. Fugas o derrames de materiales peligrosos.
6.11. Deterioro de los materiales.
6.11.1. Por edad.
6.11.2. Por falta de mantenimiento.
6.11.3. Por corrosión.

7. Rehabilitación previa del edificio.
7.1. Año(s) de rehabilitación.
7.2. Técnica(s) empleada(s).



Bibliografía

Aboutaha, R. S. (1994). *Seismic Retrofit of Non-Ductile Reinforced Concrete Columns Using Rectangular Steel Jackets* (Tesis doctoral). Universidad de Texas en Austin.

Aguilar, G. y Alcocer, S. M. (2001). *Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales.* Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED.

Aguilar, J., Breña, S., Del Valle, E., Iglesias, J., Picado, M., Jara, M. y Jirsa, J. (1996). *Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in Mexico City.* PMFSEL Informe No. 96-3, Ferguson Structural Engineering Laboratory, The University of Texas at Austin, pp. 38-43.

Alcocer, S. M. (1993). R/C Frame Connections Rehabilitated by Jacketing, *Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers,* 119(5), 1413-1431.

Alcocer, S. M. (2003). Rehabilitación de estructuras de mampostería. *Edificaciones de Mampostería para Vivienda* (pp. 455-560). México: Fundación ICA, A. C., Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda y Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Alcocer, S. M. (2019). *Rehabilitación de estructuras de mampostería. Edificaciones de Mampostería* (pp. 281-337). México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Limusa.

Alcocer, S. M. y Durán, R. (2002). Seismic Performance of a RC Building with Columns Rehabilitated with Steel Angles and Straps. Memorias de la Fifth American Concrete Institute International Conference, Cancún, México, pp. 531-552.

Alcocer, S. M. y Jirsa, J. O. (1991). *Reinforced Concrete Frame Connections Rehabilitated by Jacketing*. Informe PMFSEL 91-1, Universidad de Texas en Austin.

Alcocer, S. M. y Jirsa, J. O. (1993). Strength of Reinforced Concrete Frame Connections Rehabilitated by Jacketing. *ACI Structural Journal, American Concrete Institute,* 90(3), 249-261.

Alcocer, S. M., Muriá, D., Arce, J. C., Durán, R., Fernández, L., Ordaz, M., Arroyo, D., Jaime, M. A., Rodríguez, G. y Rodríguez, M. (2018). *Servicio de Asesoramiento para Apoyar la Recuperación de la Infraestructura Escolar en México Afectada por los Sismos de septiembre de 2017*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.

Alcocer, S. M. y Ruiz, J. (1998). Desempeño experimental de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas mediante el uso de malla de alambre. Revista de Ingeniería Sísmica, 59, 59-79.

Alcocer, S. M., Ruiz, J., Pineda, J. y Zepeda, J. A. (1996). Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh. Memorias de la 11 Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Art. No. 1471. Acapulco, México.

American Concrete Institute (ACI 222.2R) (2014). *Report on Corrosion of Prestressing Steels*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 224R) (2001). *Control of Cracking in Concrete Structures*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 228.2R) (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 318) (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 355.2) (2019). *Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 355.3R) (2011). *Guide for Design of Anchorage to Concrete - Examples using ACI 318 Appendix* D. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 355.4) (2011). *Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 440.2R) (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 440.6) (2017). *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement (Reapproved 2017)*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 440.8) (2013). *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Materials Made by Wet Layup for External Strengthening*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 423.4R) (2014). *Report on Corrosion and Repair of Unbonded Single-Strand Tendons*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI 562-19) (2019). *Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Concrete Institute (ACI SP-004) (2014). *Formwork for Concrete*. Farmington Hills, MI, EUA.

American Institute of Steel Construction (1997). *Steel Design Guide 10: Erection Bracing of Low-Rise Structural Steel Buildings*. EUA.

American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 41) (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings,* pp. 249-257, EUA.

American Society of Civil Engineers (ASCE/FEMA 356) (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings,* pp. 5-27, EUA.

American Society of Testing Materials (ASTM C1107) (2017). *Standard Specification for Packaged Dry, Hydraulic-Cement Grout (Nonshrink).* West Conshohocken, PA, EUA.

American Society of Testing Materials (ASTM C1583/C1583M) (2013). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method).* EUA.

American Society of Testing Materials (ASTM A563-15) (2015). *Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Nuts*. EUA.

American Society of Testing Materials (ASTM F3125/F3125M-19) (2019). *Standard Specification for High Strength Structural Bolts and Assemblies, Steel and Alloy Steel, Heat Treated, Inch Dimensions 120 ksi and 150 ksi Minimum Tensile Strength, and Metric Dimensions 830 MPa and 1040 MPa Minimum Tensile Strength.* EUA.

Archundia, H., Fernández, L., García, F., Guerrero, H., Peña, F. (2018). Efectos de los sismos de septiembre de 2017. Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Campeche.

Arnold, C. y Reitherman, R. (1991). *Manual de configuración y diseño sísmico de edificios*. México: Limusa.

Arquine (2018). *Escuela primaria Taksila Roots*. Recuperado de https://www.arquine.com/escuela-primaria-taksila-roots/

Bournas, D. (2019). *Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials: Case studies on Reinforced Concrete Buildings in south Europe*. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Reinforced-concrete-jacketing-of-a-column-and-its-supported-beams_fig3_330400086

Breña, S. F. (2010). Experimental behavior of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors- *Journal of Composites for Construction,* 14(2), 185-194.

Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CANACERO), NMX-B-290-CANACERO (2013). *Industria Siderúrgica-Malla Electrosoldada de Acero Liso o Corrugado para Refuerzo de Concreto-Especificaciones y Métodos de Prueba*. México.

Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CANACERO), NMX-B-457-CANACERO (2017). *Varilla corrugada de acero de baja aleación para refuerzo de concreto – especificaciones y método de prueba.* México.

Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CANACERO), NMX-B-172-CANACERO (2018). *Método de prueba mecánicos para productor de acero y hierro.* México.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2019). Comunicación personal.

Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) (1987). *Diseño Geotécnico* (Vol. 1). México: Secretaria de Obras. Departamento del Distrito Federal.

Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2017a). *Manual de Diseño Estructural de Cimentaciones de Obras Civiles* (MDOC). Ciudad de México.

Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2017b). *Manual de Diseño por Sismo de Obras Civiles* MDOC. México: Comisión Federal de Electricidad.

CONTECON URBAR (Ingenieros consultores) (2020). *Patologías del concreto.* Recuperado de https://www.contecon.net/servicios/patologia-de-estructuras/

Core and Cut (2020). Column Jacketing. Recuperado de http://coreandcut.com/index.php?module=services&id=6

COTCA (2020). *Estudios de daños y definición del estado actual.* Recuperado de http://cotca.com/patologia/

Crisafulli, F. J. (1997). *Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills* (Tesis de Doctorado). Universidad de Cantebury, Nueva Zelanda.

Cuadros, H. y Orozco, H. (2007). Intervención de estructuras con refuerzos FRP. V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda. Recuperado de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/si/si_04/te_01/ar_10.pdf

Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (CIEEU) (2013). *Guía Técnica de Operaciones de Apuntalamiento – GOA.* EUA.

Cuevas, A. (2019). Comunicación personal.

CYPE (2020). Generador de precios de rehabilitación. Recuperado de http://www.mexico.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Mamposteria/Reparaciones/EFY030_Reparacion_estructural_de_muros_de_.html

De Buen, O. (2017). *Estructuras de Acero para Edificaciones.* Fundación ICA. Ciudad de México, México.

De la Torre, O. (1995). Comunicación personal.

Del Rey, E., Ingham, J. M., Smith, S. T., Kanitkar, R. y Griffith, M. C. (2017), A design approach for FRP anchors in FRP-strengthened RC structures. The 13th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structure (FRPRCS-13). Anaheim, California, EUA.

Elwood, K. y Sarrafzadeh, M. (2019). *Performance of Earthquake-Damaged Beams and Effectiveness of Repair via Epoxy Injection.* Nueva Zelanda: University of Auckland.

Emmons, P. H., Vaysburd, A. M. y McDonald, J. E. (1993). Rational Approach to Durable Concrete Repairs. *Concrete International,* 15(9), 40-45.

Enshow Corporation (2016). *Steel Brace mounting.* Recuperado de https://retrofit.enshow.com/2016-05-13/

Esemag (2017). Long-Term rehabilitation of a 90-year-old water reservoir. Recuperado de https://esemag.com/storage-tanks/rehabilitation-reservoir-peterborough/amp/

Fardis M. et al. (2003). *Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings.* Fédération International du Béton (FIB), Lausanne, Suiza.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1992). *NEHRP Handbook of Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.* Washington, D.C.: FEMA. Recuperado de https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/1630

Federal Emergency Management Agency (FEMA-273) (1997). *Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings.* Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (FEMA-547) (2006). *Techniques for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.* Washington, D.C.

Fernández, M. (1981). *Las resinas epoxi en la construcción.* España: Instituto Eduardo Torroja, Universidad de Madrid.

Flores, L. E., Ríos, M. y Reyes, C. (2004). Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas. Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Acapulco, Gro, México.

Ghobarah. A., Aziz, T. y Biddah, A. (1996). Seismic rehabilitation of reinforced concrete beam-column connections. *Earthquake Spectra,* 12(4), 761-780.

González, O. et al. (2007). Resistencia a fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisa de acero. *Revista Ingeniería Sísmica,* 77, 53-70.

Grupo EMAC (2020). *Sistema para junta estructural.* Recuperado de: https://www.emac.es/ver/2751/sistema-para-junta-estructural.html

Grupo INL (2020). *Equipo para Inyección.* Recuperado de https://www.inl.cl/producto/jumper-i/

Horse Company China (2020). *Structural Strengthening Product.* Recuperado de https://www.horseen.com/product/six-structural-strengthening-system

Iglesias, J. et al. (1987). *Manual de reparación de estructuras de concreto y mampostería.* Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2017a). *Evaluación de condiciones estructurales de la infraestructura educativa a partir de visitas técnicas, y criterios para la determinación de la rehabilitación.* Ciudad de México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2017b). *Catálogo general de detalles para rehabilitación de estructuras con daños ligeros, sismos de septiembre de 2017.* Ciudad de México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2019a). *Daños en estructuras atípicas, en estados con alta vulnerabilidad sísmica.* México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2019b). *Daños en la INFE en estados con alta vulnerabilidad sísmica.* México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2020a). *Guía para la evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa* (Volumen 1). Ciudad de México.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) (2020b). *Introducción al Comportamiento Sísmico de Edificios para Fines de Evaluación Postsísmica* (Volumen 2). Ciudad de México.

Instituto Valenciano de la Edificación (IVE) (2019). *Intervención en estructuras de hormigón armado.* Recuperado de https://www.five.es/project/intervencion-en-estructuras-de-hormigon-armado/

International Concrete Repair Institute (ICRI 120.1) (S) (2009). *Lineamientos y recomendaciones para la seguridad en la industria de reparación de concreto.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 210.1R) (2016). *Guide for verifying field performance of epoxy injection of concrete cracks.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 210.3R) (2013). *Guide for Using In-Situ Tensile Pulloff Tests to Evaluate Bond of Concrete Surface Materials.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 210.4) (2009). *Guide for nondestructive evaluation methods for condition assessment, repair and performance monitoring of concrete structures.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 310.1R) (S) (2008). *Guía para la preparación de la superficie para la reparación de concreto deteriorado que resulta por la corrosión del acero de refuerzo.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 310.2R) (S) (2013). *Lineamientos técnicos para la selección y especificación de la preparación de la superficie de concreto para sellados, recubrimientos, revestimientos de polímeros y reparación de concreto.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 320.3R) (2012). *Guideline for inorganic repair material data sheet protocol.* St. Paul, MN, EUA.

International Concrete Repair Institute (ICRI 510-2) (2019). *Guide for use of penetrating surface applied corrosion inhibitors for corrosion mitigation of reinforced concrete structures.* St. Paul, MN, EUA.

International Federation for Structural Concrete (FIB) (2003). Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings. *Strength by adding a steel bracing system* (pp. 210-219). Lausanne, Suiza.

Jean, R. (2019). Comunicación personal.

León, F. (1991). *Reparación de elementos de concreto reforzado con alto grado de daño* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de https://repositorio.unam.mx/contenidos/93769

López, O. (1995). Comunicación personal.

Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology of Japan (MEXT) (2006). *Seismic retrofitting quick reference, examples of seismic retrofitting*. Tokio, Japón.

Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificaciones de Concreto Dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (N-Rehabilitación) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC-Cimentaciones) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero (NTC-Acero) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-Sismo) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias para la Revisión y Dictamen de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-Revisión) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-Criterios) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de Construcción y Edificación, S.C., NMX-C-169-ONNCCE (2010). *Industria de la Construcción - Concreto - Extracción de Especímenes Cilíndricos O Prismáticos de Concreto Hidráulico Endurecido*. México.

Peña, C. y Ehsani, M. (2008). Uso de las telas poliméricas reforzadas con fibras (FRP) para la rehabilitación y refuerzo de Infraestructura y edificaciones. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Recuperado de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_15/te_08/ar_05.pdf

Post Tensioning Institute (PTI DC80.2) (2010). *Guide for Creating Openings and Penetrations in Existing Slabs with Unbonded* PT. EUA.

Post Tensioning Institute (PTI DC80.3) (2010). *Guide for Evaluation and Repair of Unbonded PT Concrete Structures*. EUA.

Ramírez, A. (1996). *Estadística de edificios rehabilitados después del sismo de 1985* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de http://132.248.9.195/ppt1997/0240563/Index.html

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) (2017). Gobierno de la Ciudad de México.

Santoyo, E. y Miranda, G. (1997). *Micropilotes con funda bifuncional y reductores de deformabilidad del subsuelo*. TGC Geotecnia.

Santoyo, E. y Ovando, E. (2002). Paralelismo entre: la Torre de Pisa y la Catedral de México. Memorias del International Workshop ISSMGE-Technical Committee TC36: Foundation Engineering in Difficult Soft Soil Conditions. Ciudad de México.

Santoyo, E. y Segovia, J. A. (1995). *Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos*. TGC Geotecnia.

Secretaría de Economía (2015). NMX-R-079-SCFI Norma Mexicana Escuelas - Seguridad Estructural de la Infraestructura Física Educativa – Requisitos. México.

Secretaría de Educación Pública (2019). *Informe de los avances en la recuperación de edificios afectados por el sismo de 2017 y del comité para la reconstrucción y reparación de daños*

provocados por el sismo del 19 de septiembre de 2017 en el IPN. 30 de junio de 2019.

Servicios Técnicos de Ingeniería (2014). *Ensayo de esclerometría.* Recuperado de https://www.tecnoconengenharia.com.br/

Soto, E. (2008). *Rehabilitación de estructuras de concreto* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Tamez, E. (1988). *Pilotes de control en centrales telefónicas (Reto sísmico publicado por Teléfonos de México).* México.

Tamez, E., Santoyo, E. y Ovando, E. (1995). Procedimiento de subexcavación. *Catedral Metropolitana: corrección geométrica, informe técnico* (pp. 201-286). México: Asociación de Amigos de la Catedral Metropolitana de México.

Terán, A. (2009). Comunicación personal.

The Japan Building Disaster Prevention Association (2001). *Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings,* pp. 7-21.

Tokyo Metropolitan Urban Development Bureau (2013). *Building apartment. Earthquake resistant book. Introducing seismic retrofitting examples useful for buildings.* Recuperado de https://www.taishin.metro.tokyo.jp/pdf/info/Pamph/dl_006_1707.pdf

Vandoros, K. G. y Dritsos, S. E. (2006). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials,* 22(3), 264-276.

Vidaud, E. (2019). Comunicación personal.

Viramontes, C. (2020), Comunicación personal.

Zhang, H. W. y Smith S. T. (2011). Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates. Composites Part B: *Engineering*, 8(8), 3516-3527, Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong, China.

Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica,
se terminó de editar en la Ciudad de México en enero de 2021,
con un tiraje de 1,500 ejemplares.

En su diseño se utilizaron las familias tipográficas Montserrat de 10pts
y se imprimió en papel couché de 135 gramos.



GOBIERNO DE MÉXICO | EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM