



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL-ESTRUCTURAS

PRESENTA:

EMMA NEREIDA SOTO BARRAZA

TUTOR:

DR. SERGIO M. ALCOCER MARTINEZ DE CASTRO

Febrero 2008





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo
Secretario: M.I. Jorge Arturo Ávila Rodríguez
Vocal: Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
1^{er.} Suplente: Dr. Oscar López Bátiz
2^{do.} Suplente: M.I. Octavio García Domínguez

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro

INDICE

Resumen

1. Introducción	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos y alcance	2
2. Daños en las estructuras de concreto después de un sismo	
2.1 Introducción	3
2.2 Tipos de edificios	4
2.2.1 Muros de carga de mampostería sin reforzar	4
2.2.2 Muros de carga de mampostería con refuerzo	5
2.2.3 Marcos de concreto resistente a momentos	5
2.2.4 Pisos de losa nervada	5
2.2.5 Losas de vigas-bloque	6
2.2.6 Otros elementos que resisten las fuerzas laterales	6
2.3 Daños ocasionados por sismos pasados	6
2.3.1 Daños observados durante el sismo de Northridge, California	6
2.3.2 Daños observados durante el sismo de 1985 en la ciudad de México	8
2.3.2.1 Daño en vigas	9
2.3.2.2 Daño en columnas	9
2.3.2.3 Daño en losas	9
2.3.2.4 Daño en uniones viga-columna	9
2.3.2.5 Daño en muros de concreto	9
2.3.2.6 Otros daños	10
2.4 Daños no estructurales	10
2.5 Daños estructurales	13
3. Evaluación del desempeño sísmico	
3.1 Generalidades del diseño sísmico	14
3.2 Niveles de desempeño estructural	14
3.3 Rehabilitación sísmica basada en un control de desplazamientos (enfoque FEMA)	15
3.3.1 Diseño por desplazamientos	15
3.3.2 Proceso de evaluación del desempeño sísmico	17
3.3.3 Objetivos del diseño de la rehabilitación	18
3.3.4 Niveles de desempeño sísmico	20
3.3.5 Métodos de rehabilitación	22
3.4 Modos de comportamiento y falla inaceptables	23
3.5 Evaluación de daños	24
3.5.1 Inspección preliminar	24
3.5.2 Evaluación de la estructura	25
3.6 Sistema de evaluación de daños en casos de emergencia (enfoque japonés)	28
3.7 Estrategias de rehabilitación	30
3.7.1 Selección de la estrategia de rehabilitación	30
4. Técnicas de rehabilitación	
4.1 Introducción	33
4.2 Principios generales para mejorar el funcionamiento sísmico de una estructura	34
4.3 Técnicas constructivas de rehabilitación sísmica	35
4.4 Metodología de reparación	36

4.5 Selección de los materiales	36
4.5.1 Resinas	37
4.5.2 Concreto	37
4.5.2.1 Concreto colado en obra	37
4.5.2.2 Concreto lanzado	38
4.5.2.2.1 Concreto lanzado con humo de sílice	40
4.5.2.2.2 Concreto lanzado con ceniza volante	41
4.5.2.2.3 Concreto lanzado con escorias de alto horno	41
4.5.2.2.4 Concreto lanzado con fibras	42
4.5.2.3 Concreto con resinas	42
4.5.3 Morteros y lechadas	43
4.5.4 Elementos de acero	43
4.6 Rehabilitación a nivel estructura	43
4.6.1 Muros estructurales de concreto reforzado	44
4.6.2 Contravientos de acero	48
4.6.3 Cables	50
4.6.4 Aislamiento sísmico	50
4.6.5 Reforzamiento de la cimentación	50
4.7 Rehabilitación a nivel elemento	51
4.7.1 Encamisado de concreto	51
4.7.2 Encamisado con elementos de acero	52
4.7.3 Postensión	52
4.8 Revisar el desempeño de la estructura rehabilitada	52
5. Inyección	
5.1 Tipos de resinas	53
5.1.1 Resinas de poliéster	53
5.1.2 Resinas de poliuretano	54
5.1.3 Resinas acrílicas	54
5.2 Resinas epóxicas	55
5.2.1 Generalidades	56
5.2.2 Clasificación de las resinas	56
5.2.3 Propiedades de las resinas epóxicas	57
5.2.4 Aplicaciones de las resinas epóxicas	58
5.2.5 Selección de la resina epóxica	58
5.2.2 Componentes de una formulación epóxica	59
5.2.2.1 Endurecedores o agentes de curado	57
5.2.2.2 Cargas	58
5.3 Inyección de grietas	61
5.3.1 Generalidades	61
5.3.2 Clasificación de las grietas	62
5.3.3 Evaluación de las grietas	63
5.3.3.1 Determinar la localización y extensión del agrietamiento	63
5.3.3.2 Selección del procedimiento de reparación	64
5.3.4 Programa de reparación de grietas	64
5.3.5 Técnicas de reparación de grietas	65
5.3.6 Inyección epóxica	65
5.3.7 Métodos de inyección	67
5.3.8 Factores que influyen en la penetración de la resina epóxica	68
5.3.9 Procedimiento general de inyección	68
5.4 Ficha técnica	82
6. Encamisado	
6.1 Generalidades	85
6.2 Encamisado de concreto reforzado	85

6.2.1 Encamisado de columnas	88
6.2.2 Encamisado de vigas	89
6.3 Encamisado con elementos de acero	91
6.3.1 Encamisado de columnas	91
6.3.2 Encamisado de vigas y losas	92
6.4 Encamisado con láminas sintéticas reforzadas con fibras (FRP)	92
6.4.1 Tipos de fibras	94
6.4.2 Proceso constructivo general de las FRP	96
6.5 Estudios experimentales de encamisados de concreto en columnas	98
7. Comentarios finales y conclusiones	101
Referencias	103

RESUMEN

Este trabajo discute algunas de las técnicas de rehabilitación que se utilizan para reparar y/o reforzar estructuras de concreto que han sido dañadas o no, por sismos. El objetivo de esta investigación es proporcionar una fuente de información en la evaluación y rehabilitación de estructuras de concreto, conocer las técnicas de rehabilitación utilizadas, así como las ventajas y desventajas que presentan cada una de ellas. Esto es de importancia particular puesto que existe una diferencia sustancial entre la complejidad del diseño de la rehabilitación con respecto al diseño de una estructura nueva.

ABSTRACT

This work discusses some of the rehabilitation techniques are used for strengthening and/or repair concrete structures that have been damaged or not by earthquakes. The aim of this investigation is to provide a source of information for the evaluation and rehabilitation of concrete structures to know the rehabilitation techniques used as well as their advantages and disadvantages. This is of particular importance because there is a substantial difference between the complexity of the design of the rehabilitation with respect to the design of a new structure.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad en el proceso de diseño se plantea que toda estructura sea capaz de resistir acciones sísmicas severas sin que se presente el colapso en la estructura.

El objetivo principal de un proyecto de rehabilitación es restaurar y mejorar la capacidad estructural de una estructura. El aspecto económico juega un papel importante en decidir si se rehabilita una estructura dañada o no.

El éxito de un proyecto de rehabilitación dependerá de la calidad del trabajo ejecutado, conforme a los planos y las especificaciones.

1.1 Antecedentes

La importancia del desarrollo de métodos adecuados de rehabilitación es el conocer cuál será el comportamiento de las estructuras después que han sido rehabilitadas. A continuación se presentan algunas definiciones importantes:

Reparar (Repair): Es el conjunto de acciones y procedimientos que hacen que un edificio existente que presenta daños, recupere las características originales de la estructura. Consiste en reemplazar o corregir los materiales, componentes o elementos deteriorados, dañados o defectuosos de una estructura. Es toda operación para recuperar el funcionamiento estructural del elemento o estructura dañada a su desempeño original.

Reforzar (Strengthening): Es el proceso de incrementar la capacidad de la estructura, aumentando elementos o añadiendo nuevos. En el refuerzo de una estructura (con o sin daño) se mejoran las características estructurales sobre las originales. Es toda operación para incrementar el desempeño estructural del elemento por encima de su desempeño original.

Rehabilitar (Retrofitting): Significa hacer un cambio a la estructura para que cumpla con sus funciones nuevamente. No sólo se refiere al aspecto estructural, sino también a las funciones sociales y económicas para las que fue construida. Es el proceso de reparación o modificación de una estructura a una condición útil deseada. Es una expresión general utilizada para reparar, reforzar o restaurar.

Reestructurar: Implica un cambio en el sistema estructural, ya sea de una manera parcial o total. La estructura puede o no estar dañada.

Preservar: Es el proceso de mantenimiento de la estructura en sus condiciones actuales y para contrarrestar un deterioro adicional.

Restaurar: Es el proceso de restablecer el aspecto, la forma, y los materiales de una estructura a lo que anteriormente tenía.

Rehabilitación Sísmica: Está definida como una mejora en el funcionamiento sísmico de los elementos estructurales y no estructurales del edificio corrigiendo las deficiencias identificadas en una evaluación sísmica.

1. 2 Objetivos y alcance

El propósito de este trabajo de investigación es presentar algunas técnicas de rehabilitación que se utilizan para reparar estructuras de concreto, enfocándose sobre todo a la técnica de inyección de resinas epóxicas y al encamisado de columnas, las ventajas y desventajas que presentan y comparar algunos estudios experimentales sobre encamisados de columnas que se han realizado.

2. DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO DESPUÉS DE UN SISMO

Muchas estructuras localizadas en zonas sísmicas son inadecuadas si se revisan bajo reglamentos actuales de diseño sísmico. Además, sismos recientes han subrayado la importancia de mitigar el riesgo sísmico.

La rehabilitación sísmica de estructuras existentes es uno de los métodos más eficaces para reducir este riesgo. Sin embargo, el desempeño sísmico de la estructura no se puede mejorar rehabilitándola a menos que el ingeniero seleccione una técnica apropiada basada en una evaluación sísmica de la estructura.

2.1 Introducción

Comúnmente, en varias partes del mundo, los edificios que fueron construidos antes de los años 70 poseen deficiencias significativas en su configuración estructural y en su detallado (fig. 2.1) ya que no existían normas de diseño sísmico en aquella época. Uno de los errores más frecuentes es la discontinuidad del refuerzo longitudinal en vigas y columnas, además de una amplia separación del refuerzo transversal (Moehle, 2000).

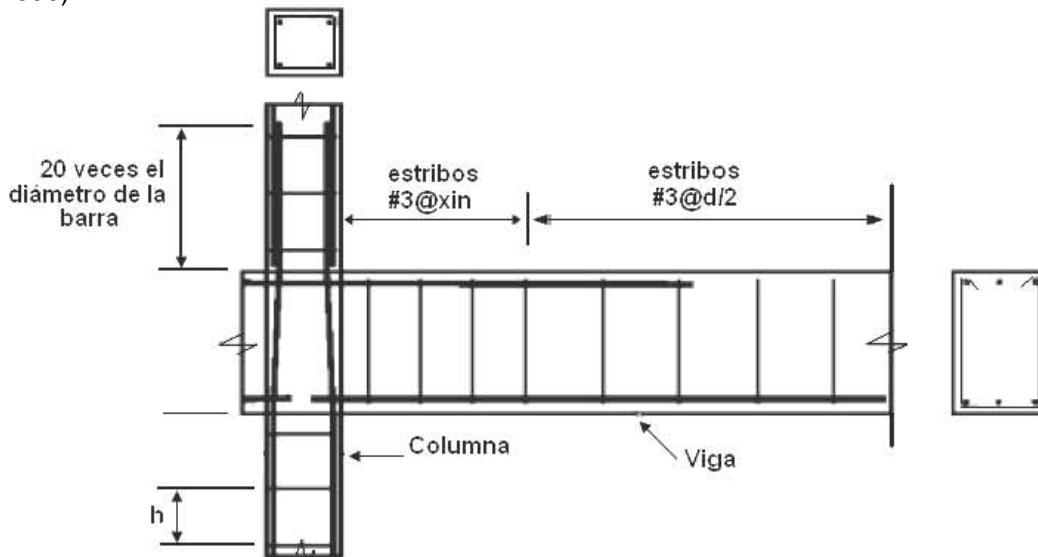


Fig. 2.1 Detallado común de edificios de concreto reforzado antes de 1976 (Moehle, 2000)

Debido a las deficiencias antes mencionadas, se han observado daños y pérdidas como consecuencia de los últimos sismos.

El sismo de 1985 en la ciudad de México, el de Loma Prieta, California, en 1989, y el de Northridge, California, en 1994, son un ejemplo de sismos en los cuales, las estructuras en cuestión han sido afectadas.

El sismo de Loma Prieta, ocurrido el 17 de octubre de 1989, de una magnitud M6.9, causó pérdidas significativas; más de 7 mil millones de dólares en daños, 62 muertos y 3757 personas lesionadas (Benuska, 1990).

El sismo de Northridge ocurrió el 17 de enero de 1994 y tuvo una magnitud M6.7 en escala Richter. Este sismo mostró la aceleración más alta nunca antes registrada. Los daños alcanzaron un valor de 20 mil millones de dólares, 57 muertos, y 5000 personas lesionadas (Osteraas y Somers, 1996).

Mientras que la mayoría de las estructuras dañadas en el sismo de Loma Prieta fueron edificios de mampostería sin refuerzo, el sismo de Northridge dañó cinco tipos de estructuras. Entre ellas estaban algunos ejemplos característicos de estructuras no dúctiles de concreto reforzado, donde el daño incluía fallas en columnas y vigas, agrietamiento por cortante en muros, y fallas en conexiones viga-columna y losa-columna.

El sismo de la ciudad de México ocurrido el 19 de septiembre de 1985, con una magnitud M8.1, produjo una extensa destrucción en una zona bien delimitada de la ciudad. El sismo se generó en la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica localizada en la costa del Pacífico. Se registraron alrededor de 10,000 muertes. Una estimación total de los daños fue de 4 mil millones de dólares.

La mayoría de los edificios colapsados o dañados fue marcos de concreto reforzado y estructuras con losa nervada, los cuales demostraron ser los más vulnerables. Los casos de colapso o daño serio se limitaron a edificios con más de cuatro niveles de altura. Los más vulnerables fueron los edificios de 7 a 15 niveles.

2.2 Tipos de edificios

Los tipos de edificios en la ciudad de México se pueden clasificar dentro de los siguientes seis grupos (Fundación ICA, 1988):

2.2.1 Muros de carga de mampostería sin reforzar

Son estructuras formadas por muros gruesos de adobe, ladrillo o piedra. El sistema de piso consiste en vigas de madera o de acero. Este tipo corresponde a construcciones viejas en las cuales los muros tienen un espesor mayor de 50 cm y alturas de entrepiso muy grandes. Frecuentemente se encuentra agrietamiento en los muros debido a asentamientos diferenciales en suelos blandos. Estos edificios pueden tener alturas mayores de cuatro niveles (fig. 2.2).

Un problema grave de este sistema es la carencia de un diafragma rígido para transferir las cargas laterales en los elementos resistentes, que puede ocasionar una mala distribución de las fuerzas cortantes laterales. Tienen un periodo natural de vibración menor que 0.5 segundos haciéndolo menos susceptible a la excitación dinámica característica de los depósitos de suelo blando de la ciudad de México.

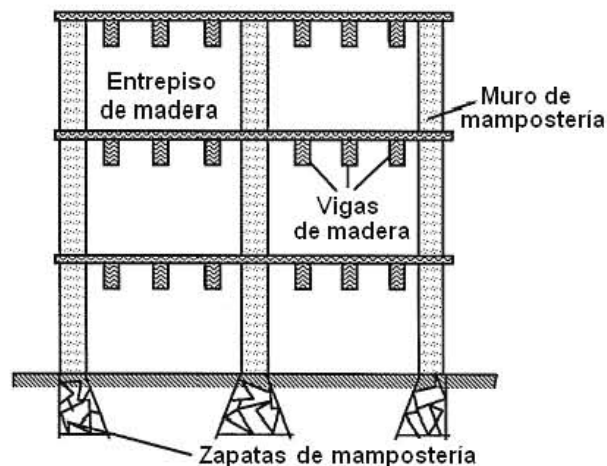


Fig. 2.2 Muros de carga de mampostería sin reforzar (Aguilar et al., 1996)

2.2.2 Muros de carga de mampostería con refuerzo

Son muros de ladrillo, normalmente con espesores entre 10 y 14 cm. El sistema de piso usualmente son losas de concreto reforzado coladas en el lugar o prefabricadas, apoyadas directamente sobre el muro (fig. 2.3).

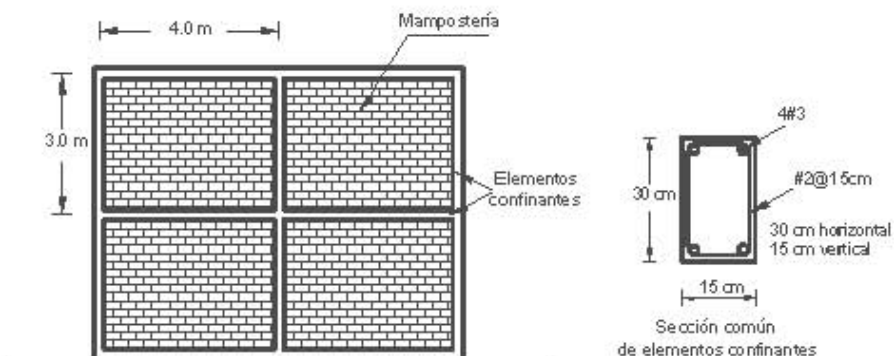


Fig. 2.3 Arreglo común de muros de mampostería confinada (Aguilar et al., 1996)

Estas estructuras son una versión moderna de los edificios de mampostería sin reforzar. El sistema de piso de concreto reforzado forma un diafragma rígido que distribuye las fuerzas laterales a los muros en ambas direcciones. Este tipo se utiliza para edificios mayores de cuatro niveles de altura. Se utilizan principalmente en edificios de apartamentos y casas. La densidad de estos muros es relativamente alta, por lo que su rigidez lateral es grande. Estas estructuras no sufrieron daños severos durante el sismo de 1985.

2.2.3 Marcos de concreto resistente a momentos

Los marcos de concreto reforzado consisten de vigas y columnas como parte del sistema que resiste las fuerzas verticales y laterales. El sistema de piso es una losa de concreto reforzado en dos direcciones apoyado directamente en las vigas del marco o en las vigas interiores. Generalmente su espesor es de 10 a 15 cm, y las losas son coladas in situ. Toda la fuerza lateral es resistida por las vigas y las columnas que forman el marco.

El periodo natural de estos edificios de 10 a 15 niveles es cerca de 2 segundos, el cual es cercano al periodo del suelo. Es por ello que los edificios en ese intervalo de altura sufrieron mucho daño durante el sismo de 1985.

2.2.4 Pisos de losa nervada

Consisten en columnas de concreto reforzado que soportan la losa nervada con un espesor promedio de 25 a 45 cm. La losa nervada tiene una zona rígida (sólida) en la conexión losa-columna que proporciona una transferencia de momentos y cortante de la losa nervada a la columna (fig. 2.4).

Este sistema fue muy popular en el Distrito Federal debido a la facilidad de construcción. Sin embargo, la profundidad total de los sistemas de piso generalmente es menor que la de los edificios con losas y vigas más anchas, por lo que se utiliza una mayor cantidad de refuerzo. El peso y el costo del edificio aumentan. Un peralte de losa tan pequeño crea problemas de excesiva flexibilidad lateral del edificio bajo cargas laterales.

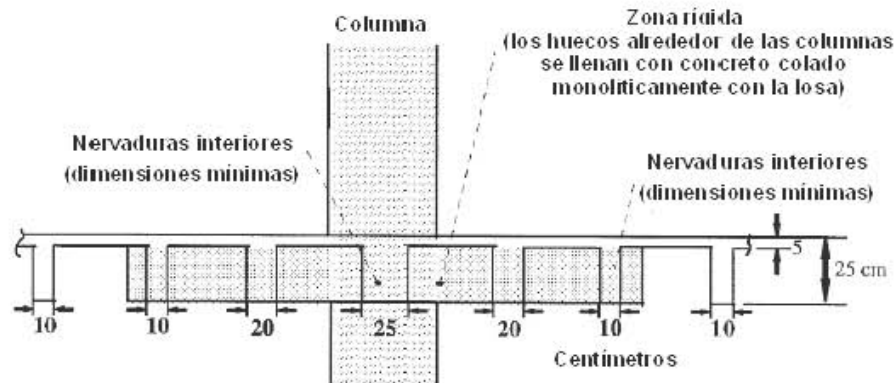


Fig. 2.4 Sección común de una losa nervada (Aguilar et al., 1996)

2.2.5 Losas de vigas-bloque

Este sistema ha llegado a ser muy popular en México debido a su economía y facilidad de construcción. Consiste en vigas prefabricadas que se utilizan de soporte para los bloques huecos de cemento-arena con espacios entre las vigas. Se cuela una losa de concreto reforzado de 5 cm en la parte superior de las vigas y los bloques forman un diafragma rígido que puede transmitir las fuerzas a los elementos que soportan las cargas laterales. Los costos se reducen porque la losa se puede colar directamente encima de las vigas y los bloques, sin un cimbrado o apuntalamiento.

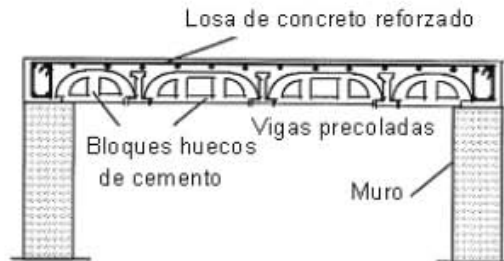


Fig. 2.5 Sistema de losa viga-bloque (Aguilar et al., 1996)

2.2.6 Otros elementos que resisten las fuerzas laterales

Consisten en marcos de concreto o acero, con contravientos y/o muros de concreto o mampostería, en una o dos de sus direcciones principales. Generalmente, los muros forman cajas rígidas alrededor de elevadores o escaleras. Tienen buen desempeño sísmico.

2.3 Daños ocasionados por sismos pasados

A continuación se presentan algunos daños ocasionados por los sismos de Northridge, California y el de la ciudad de México.

2.3.1 Daños observados durante el sismo de Northridge, California

Las figuras 2.6 y 2.7 muestran ejemplos de columnas de concreto reforzado dañadas durante el sismo de Northridge.

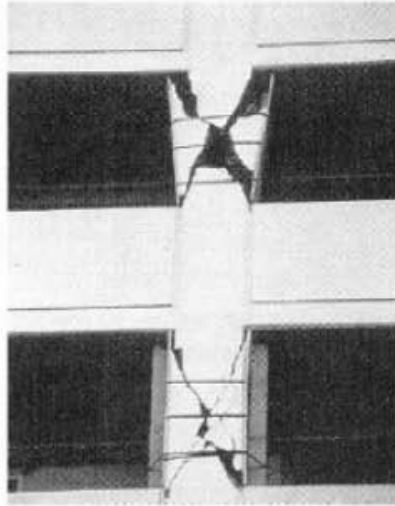


Fig. 2.6 Comportamiento común en columnas cortas, debido al agrietamiento por cortante diagonal (Osteraas y Somers, 1996)

En la figura 2.6 se muestra el daño en las columnas de un edificio de 15 niveles. El sistema lateral consistía en marcos a momento no dúctiles. En la dirección longitudinal la altura de las columnas fue reducida por la presencia de un pretil para balcón adosado a la columna ocasionando daño por cortante (columna corta) en muchas de las columnas del nivel inferior.

En la figura 2.7 se muestra el daño en una columna que no tiene el detallado adecuado para lograr un comportamiento dúctil; la separación entre estribos es alta y la cuantía de refuerzo baja. Los daños fueron debido a una falla por cortante en las columnas y pandeo del refuerzo longitudinal.

Durante el sismo de Northridge se observó agrietamiento por cortante en uniones viga-columna y en muros de cortante. En las figuras 2.8 y 2.9 se muestran ejemplos de agrietamiento por cortante en muros y fallas en uniones viga-columna, respectivamente.

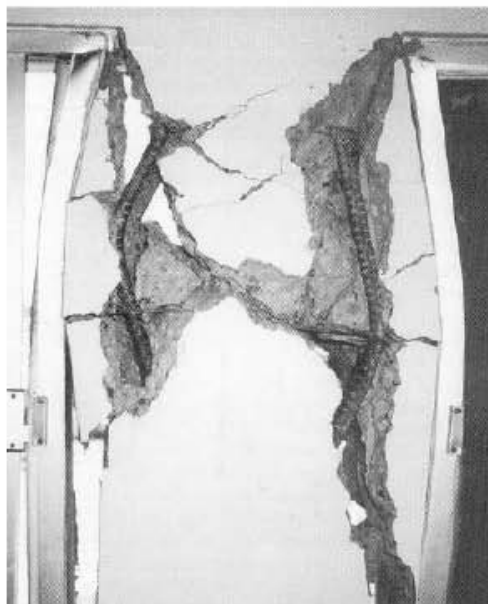


Fig. 2.7 Daño en columnas no dúctiles (Osteraas y Somers, 1996)

El sismo de Northridge causó daños en muros de cortante de este edificio. Aparecieron grietas diagonales en el primer piso y grietas muy estrechas en los pisos dos y tres. El patrón de agrietamiento en ventanas fue en forma de X.

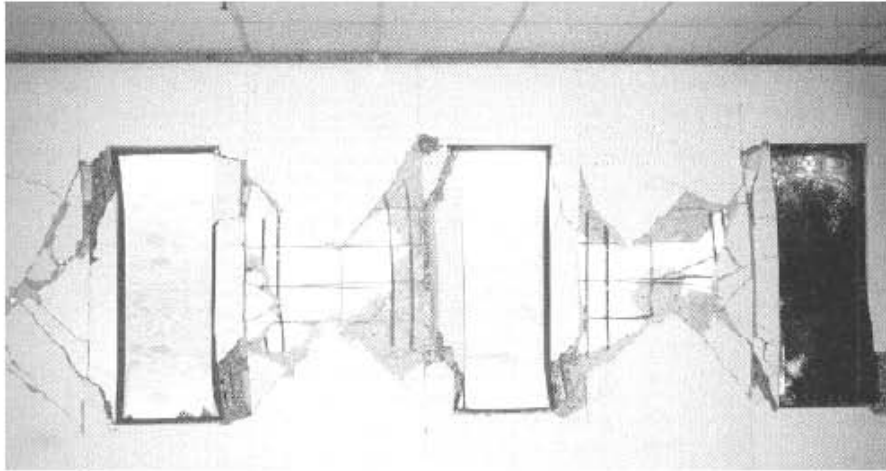


Fig. 2.8 Daño en muros de cortante de concreto (Osteraas y Somers, 1996)

Las estructuras construidas antes de 1976 no fueron diseñadas adecuadamente para resistir los efectos sísmicos; vigas, columnas y conexiones fueron fácilmente dañadas en sismos pasados. Por lo tanto, es necesaria la rehabilitación de dichas estructuras para mejorar su desempeño sísmico.



Fig. 2.9 Falla en uniones (Thermou y Elnashai, 2002)

2.3.2 Daños observados durante el sismo de 1985 en la ciudad de México

La mayoría de los edificios dañados durante el sismo de 1985 fue de mediana altura (de 6 a 15 pisos). Ya que su periodo natural es muy cercano al periodo dominante del suelo, la respuesta dinámica de esas estructuras se amplificó debido a la resonancia. En edificios de 16 niveles raramente se tiene un periodo natural inicial debajo de 1.8 segundos (Rosenblueth y Meli, 1986). Las estructuras que más daño sufrieron fueron los marcos de concreto resistentes a momento y los pisos de losa nervada. Los edificios utilizados como hospitales y oficinas fueron los más dañados.

Muy pocas estructuras de acero resultaron seriamente dañadas porque este material generalmente se utiliza para edificios más altos en los cuales la respuesta dinámica durante el sismo es más baja que la de los edificios de mediana altura. Los muros estructurales de mampostería tuvieron un buen desempeño sísmico ya que generalmente son menores de cinco niveles.

A continuación se presentan algunos daños observados en edificios durante el sismo de 1985 en la ciudad de México (Aguilar et al., 1996).

2.3.2.1 Daño en vigas

Las fallas más observadas en vigas fueron:

- *Agrietamiento diagonal* cerca de la conexión viga-columna
- *Aplastamiento del concreto* cerca de la conexión debido a las grandes fuerzas de flexión inducidas por el sismo
- *Desconchamiento del concreto*, como consecuencia del pandeo del refuerzo longitudinal o porque se excedió la capacidad del concreto.

2.3.2.2 Daño en columnas

En general, las fallas en columnas han causado los daños más significativos en las estructuras de concreto reforzado. Las fallas más observadas durante el sismo de 1985 fueron:

- *Agrietamiento diagonal* a la mitad de su altura debido a las fuerzas de cortante. Las grietas formaron patrones cruzados debido a las deformaciones cíclicas a las que estuvieron sujetas las columnas
- Algunas columnas sufrieron un severo *deterioro en el concreto* por el gran número de ciclos de deformaciones inelásticas a que fueron sometidas, y una *pérdida de capacidad vertical* debido a un inadecuado detallado del refuerzo transversal
- Otra causa común de falla en columnas es la llamada falla por *columna corta*. La contribución de los muros no estructurales a la rigidez lateral del edificio fue perjudicial en los casos donde el muro se extendió parcialmente por la altura del entrepiso entre la columna ya que redujo la longitud libre de la columna e incrementó su rigidez efectiva y, por lo tanto, atrajo más fuerza cortante.

2.3.2.3 Daño en losas

La mayoría de los daños registrados en estos elementos fue debido a:

- En muchos casos se desarrollaron *grietas por tensión diagonal* en la losa alrededor de los apoyos y sugieren una falla incipiente por *punzonamiento*
- Las *grietas por cortante* en losas nervadas fue muy común.

2.3.2.4 Daño en uniones viga-columna

Los daños que se presentaron fueron:

- *Agrietamiento y desconchamiento del concreto* en uniones donde no existía refuerzo transversal. Un inadecuado confinamiento en las uniones agravado por la práctica de utilizar paquetes de barras longitudinales en las esquinas de la columna lo cual incrementó el desconchamiento en la unión.

2.3.2.5 Daño en muros de concreto

En estos elementos los daños observados fueron los siguientes:

- *Agrietamiento inclinado*: Fueron comunes los patrones de grietas inclinadas en edificios en los cuales los muros restringían el movimiento lateral. Las fuerzas cortantes asociadas con las deflexiones laterales del edificio ocasionaron la formación de dichas grietas

- *Desprendimiento del concreto en la base*, particularmente en los extremos de los muros.

2.3.2.6 Otros daños

También se presentaron otros tipos de daño como los siguientes:

- *Golpeteo de edificios*: Fue muy común durante el sismo de 1985 debido a la proximidad con los edificios adyacentes. Mucho del daño ocasionado en columnas se le puede atribuir al golpeteo, especialmente cuando los niveles de la losa de dos edificios adyacentes no coincidieron.
- *Problemas de configuración estructural*: Fueron la mayor causa de falla. La mayoría de los problemas de configuración está asociada con la contribución de los elementos no estructurales a la respuesta del edificio, especialmente en los edificios de esquina. De los edificios que sufrieron daño severo o colapsaron, el 42% era edificio de esquina
- *Cambios en la rigidez o masa del edificio*: Fue también un factor de contribución al daño observado. Los cambios en rigidez son debido a cambios drásticos en la configuración estructural (discontinuidades en los muros, localización de columnas, etc.), o a la localización y número de muros rellenos. Cambios bruscos de masa son debidos a las cargas, las cuales son considerablemente mayores que las utilizadas en el diseño original.

En las tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se presentan los modos de falla observados en el sismo de 1985, obtenidos de la zona más afectada de la ciudad de México y las posibles causas que los originaron, así como estadísticas de los daños.

Tabla 2.1 Tipos de daños (Meli, 1987)

Modo de falla observado	% de casos
Cortante en columnas	16
Compresión excéntrica en columnas	11
Tipo de falla no identificada en columnas	16
Cortante en vigas	9
Cortante en losas nervadas	9
Flexión en vigas	2
Uniones viga-columna	8
Cortante y flexión en muros de cortante	1.5
Otras causas	7
No fue posible identificar	25

2.4 Daños no estructurales

Generalmente, los daños a elementos no estructurales se deben a la unión inadecuada de estos elementos con la estructura, o a una falta de rigidez de la misma. Los daños no estructurales más comunes son:

- a) Aplastamiento de las uniones entre la estructura y los elementos divisorios
- b) Agrietamiento de los elementos divisorios de mampostería
- c) Vidrios rotos
- d) Desprendimiento de aplanados, recubrimientos y elementos de fachadas
- e) Desprendimiento de plafones, tuberías e instalaciones diversas dañadas.

Tabla 2.2 Causas más comunes de falla de edificios durante el sismo de 1985 (Alcocer, 1995)

Características observadas	% de casos
Pronunciada asimetría en rigidez	15
Edificios en esquina	42
Primer piso débil	8
Columnas cortas	3
Masa excesiva	9
Asentamientos diferenciales previos	2
Pobre desempeño de la cimentación	13
Golpeteo	15
Daño sísmico previo	5
Punzonamiento en losas nervadas	4
Falla en el piso superior	38
Falla en los pisos intermedios	40

Tabla 2.3 Estadísticas de daños en edificios de concreto reforzado (Meli, 1985; Rosenblueth y Meli, 1986)

Tipo	Daño	Año de construcción			Número de niveles			Total
		<1957	57-76	>1976	< 5	6-10	≥11	
Marcos	Colapso	27	51	4	27	46	9	82
	Severo	16	23	6	10	28	7	45
Losas nervadas, placas planas	Colapso	8	62	21	36	49	6	91
	Severo	4	22	18	5	26	13	44
Total		55	158	49	78	149	35	262

En la fig. 2.10 se observan algunos edificios dañados durante el sismo de 1985.

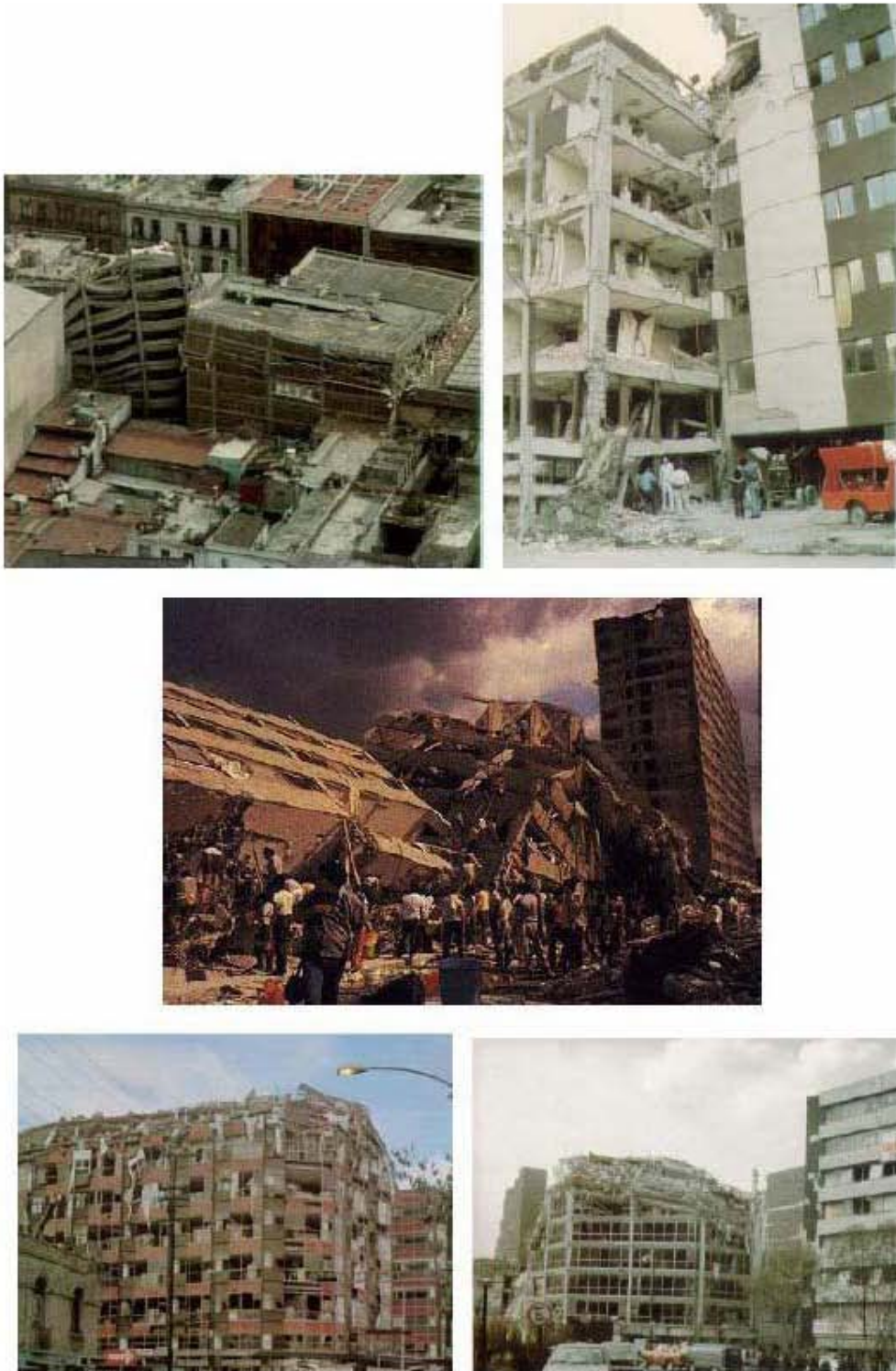


Fig. 2.10 Edificios dañados durante el sismo de 1985 en la ciudad de México

2.5 Daños estructurales

En la tabla 2.4 se resumen los daños estructurales más comunes sobre los que se deberá hacer énfasis durante la inspección.

**Tabla 2.4 Daños estructurales y sus causas más comunes
(Modificado de Iglesias et al., 1985)**

Elemento estructural	Tipo de daño	Causa más común
Columnas	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas inclinadas - Grietas verticales - Desprendimiento del recubrimiento - Aplastamiento del concreto - Pandeo del acero de refuerzo 	<ul style="list-style-type: none"> - Cortante - Flexocompresión - adherencia - Flexocompresión - Flexocompresión - Flexocompresión
Vigas	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas inclinadas - Roturas de estribos - Grietas verticales - Rotura del refuerzo - Aplastamiento del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> - Cortante o Torsión - Cortante o Torsión - Flexión - Flexión - Flexión
Unión viga-columna	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas inclinadas - Falla por adherencia del refuerzo de vigas 	<ul style="list-style-type: none"> - Cortante
Sistemas de piso	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas alrededor de columnas en losas o placas planas - Grietas longitudinales 	<ul style="list-style-type: none"> - Penetración - Flexión
Muros de concreto	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas inclinadas - Grietas horizontales - Aplastamiento del concreto - Pandeo del acero de refuerzo 	<ul style="list-style-type: none"> - Cortante - Flexocompresión o deslizamiento - Flexocompresión o deslizamiento - Flexocompresión o deslizamiento
Muros de mampostería	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas inclinadas - Grietas verticales en las esquinas y en el centro - Grietas horizontales 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexión - Volteo - Deslizamiento

3. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO

Para seleccionar un método apropiado de rehabilitación, es necesario evaluar el desempeño sísmico y las condiciones de la estructura existente. De acuerdo con esta evaluación, se podrá elegir la técnica más adecuada y optimizar el desempeño sísmico de la estructura. Primero se deben identificar las deficiencias con una evaluación sísmica de la estructura.

La evaluación sísmica consiste en recopilar información del edificio (cómo fue construido) y obtener los resultados de un análisis estructural basado en los datos obtenidos.

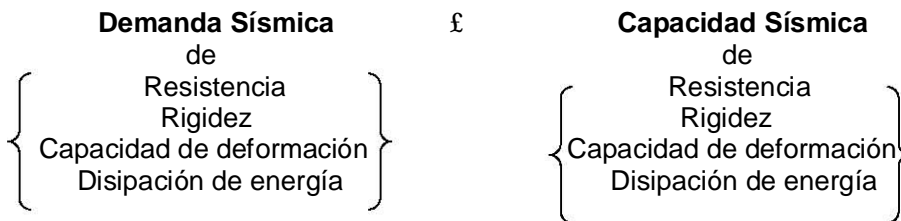
3.1 Generalidades del diseño sísmico

Una estructura de concreto reforzado generalmente desarrolla comportamiento plástico durante excitaciones sísmicas severas. Éste tiende a concentrarse en zonas específicas.

Los estudios experimentales han permitido mejorar nuestro entendimiento del fenómeno sísmico y del detallado que debemos utilizar para fomentar un mejor desempeño estructural. A partir de lo observado, en una estructura sismorresistente de concreto reforzado es conveniente:

- Fomentar un comportamiento a flexión
- Controlar las fuerzas axiales y de cortante

Para lograr un comportamiento plástico estable en elementos de concreto reforzado es necesario fomentar un comportamiento dominado por flexión. Pero además, se requiere detallar adecuadamente el elemento estructural y controlar sus demandas de deformación plástica (amplitud y número de ciclos).



El nivel de daño o degradación que sufren los elementos estructurales y no estructurales dependen de los valores del desplazamiento lateral (deformación plástica), velocidad y aceleración. Conforme mayor sea la demanda de deformación plástica, mayor será el nivel de daño.

3.2 Niveles de desempeño estructural

La filosofía de diseño sismorresistente presentada en el ATC-3-06 considera tres niveles de desempeño estructural para resistir sismos. Las estructuras deben:

- Resistir sin daño niveles menores de movimiento sísmico (*estado límite de servicio*)
- Resistir sin daño estructural, aunque posiblemente con algún tipo de daño no estructural, niveles moderados de movimiento sísmico (*estado límite de daño*)
- Resistir sin colapso, aunque con algún tipo de daño estructural y no estructural, niveles mayores de movimiento sísmico (*estado límite de seguridad*).

Las estructuras que han sido expuestas a los primeros dos niveles de daño usualmente son consideradas como reparables. Desde un punto de vista económico, es más deseable reparar algo de daño que construir una estructura nueva.

3.3 Rehabilitación sísmica basada en un control de desplazamientos (enfoque FEMA)

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés), de los Estados Unidos de América tiene como objetivo preparar al país ante desastres naturales (huracanes, sismos, tornados, etc.) y los provocados por el hombre (incendios, terrorismo, etc.). En México, su similar es la Coordinación General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación.

La FEMA maneja la respuesta federal de EUA y la labor de recuperación después de un desastre nacional. También realiza actividades de prevención, trabaja con oficiales en el manejo de emergencias estatales y locales, y administra el programa del seguro nacional contra inundaciones. La FEMA forma parte del Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos de América. En nuestro caso nos enfocaremos en lo referente a sismo. Específicamente en su apartado de rehabilitación sísmica.

En 1997 se publicaron las *Guías para la rehabilitación sísmica de edificios* (FEMA 273). El *FEMA 273* proporciona guías para evaluar el desempeño sísmico de estructuras existentes y determinar los métodos necesarios de rehabilitación para alcanzar los objetivos de diseño. Los objetivos de diseño que se plantean en el FEMA 273 se discutirán más adelante (ver 3.3.3). En la tabla 3.1 se presenta el proceso de rehabilitación planteado en el FEMA 273.

3.3.1 Diseño por desplazamientos

En general, el diseño por desplazamientos consiste en los siguientes pasos:

- 1.- Realizar un análisis estático no lineal de la estructura para definir la curva P vs. δ (fig. 3.1).
- 2.- Estimar la demanda máxima de desplazamiento (δ_{max}) que induce en la estructura la excitación sísmica deseada (fig. 3.2).
- 3.- Revisar, en función de δ_{max} , si el estado de daño en los elementos estructurales es consistente con los objetivos de diseño (fig. 3.3).

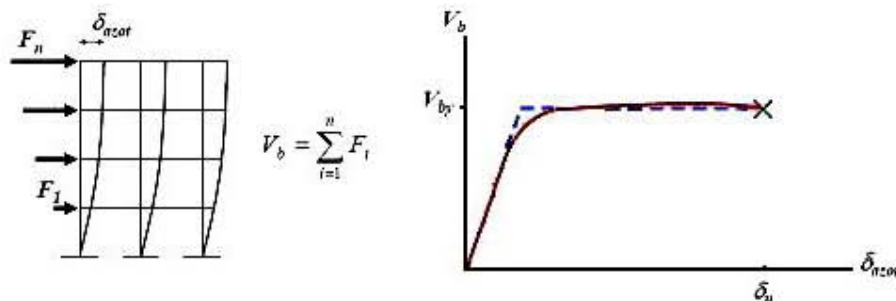
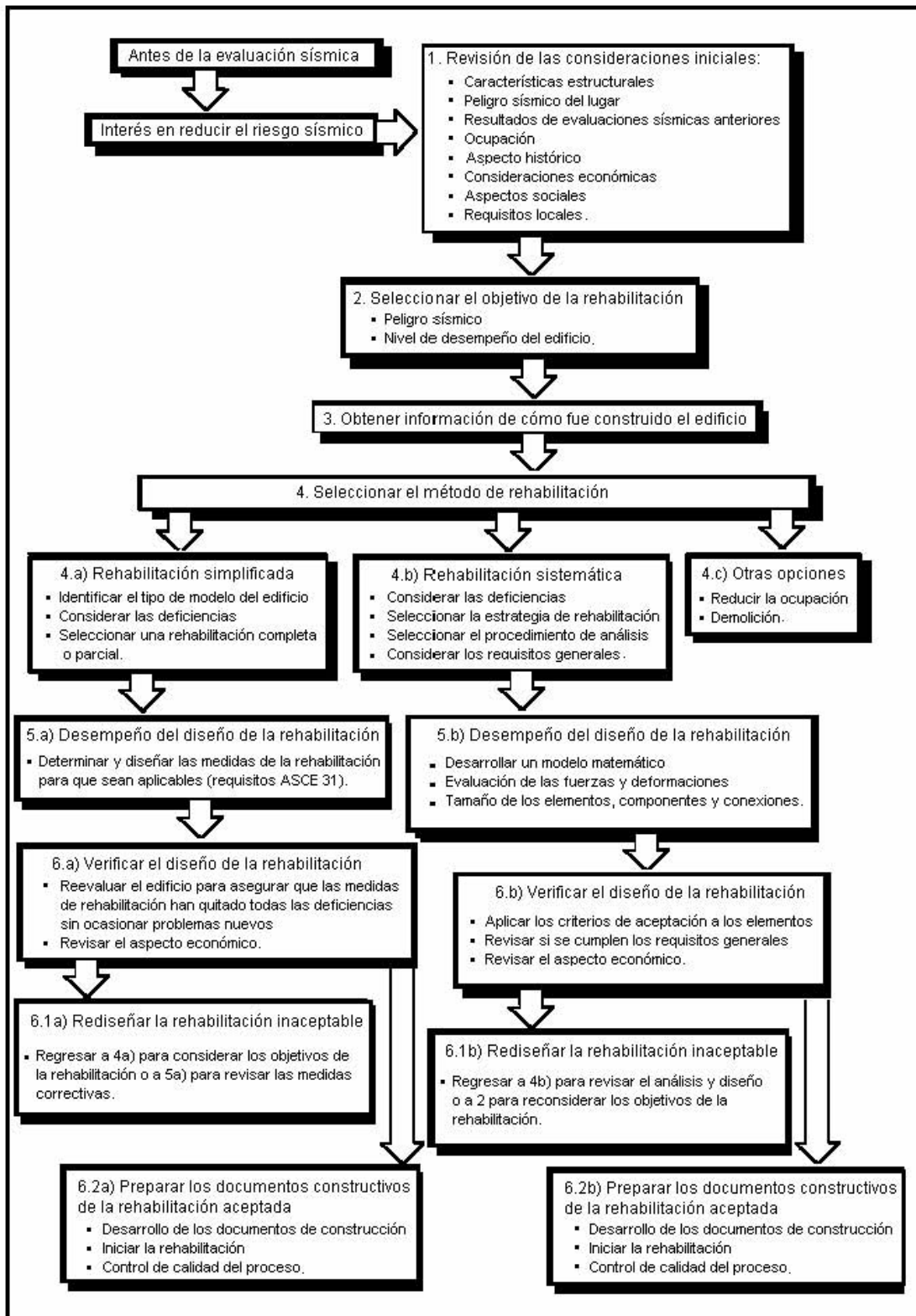


Fig. 3.1 Análisis estático no lineal (Pushover)

Tabla 3.1 Proceso de rehabilitación planteado por el FEMA 273



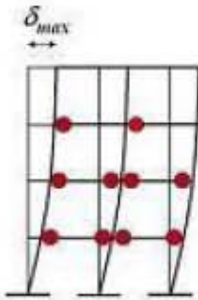


Fig. 3.2 Estimar el desplazamiento máximo (análisis dinámico)



Fig. 3.3 Evaluación del nivel de daño

3.3.2 Proceso de evaluación del desempeño sísmico

La filosofía de diseño por desplazamientos presentada en el FEMA 273 consiste en general en tres pasos:

- 1.- Definir el objetivo de desempeño, incorporando el nivel de peligro sísmico
- 2.- Estimar las demandas sísmicas del sistema y sus elementos
- 3.- Verificar si se cumplieron los objetivos de diseño propuestos al inicio.

De éstos, el segundo paso es de vital importancia puesto que una estimación exacta del desempeño previsto es esencial para determinar si el diseño final es conveniente.

El *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building FEMA 273* y la *American Society of Civil Engineers ASCE 41* presentan dos métodos de análisis para estimar las demandas sísmicas del sistema y sus elementos, los cuales se clasifican en procedimiento lineal y no lineal, y a su vez cada uno se subdivide en estático y dinámico quedando como sigue:

- Estático lineal
- Dinámico lineal
- Estático no lineal (análisis push-over)
- Dinámico no lineal

Utilizando cualquiera de estos procedimientos de análisis se puede evaluar el desempeño sísmico de una estructura y encontrar las deficiencias o los elementos vulnerables. Los resultados de estos análisis proporcionan la información suficiente para seleccionar las técnicas de rehabilitación apropiadas.

Los métodos de análisis lineal intentan proporcionar una estimación conservadora de la respuesta y funcionamiento del edificio ante un sismo, aunque no siempre son exactos. Puesto que la respuesta real de los edificios ante sismos generalmente no es lineal, los métodos de análisis no lineal proporcionan una representación más exacta de la respuesta y desempeño del edificio. Por lo que se obtiene una mejor idea del

comportamiento del edificio cuando se hace un análisis no lineal. A continuación se explican ambos procedimientos.

1.- Procedimientos lineales

Los métodos de análisis lineal mencionados en el FEMA 273 se subdividen en estático lineal y dinámico lineal. Es difícil obtener resultados exactos para estructuras que experimentan una respuesta no lineal con métodos lineales. Por lo tanto, no es conveniente utilizar los métodos lineales para estructuras irregulares.

Los métodos estático y dinámico lineal son recomendables para edificios regulares.

2.- Procedimientos no lineales

Los procedimientos estáticos y dinámicos no lineales se aplican para edificios altos.

Análisis estático no lineal (Pushover): Es un análisis plástico bajo deformación monótonamente creciente. En este análisis, las cargas laterales actuantes en la estructura, de magnitud relativamente constante, son incrementadas gradualmente hasta alcanzar el desplazamiento objetivo. Un análisis estático no lineal presenta las siguientes características:

- Formación de un mecanismo plástico
- Se considera la resistencia última de la estructura
- Existe una secuencia en la formación de las articulaciones plásticas
- La magnitud de las rotaciones plásticas en las articulaciones está en función del desplazamiento objetivo
- Zona crítica para $P-\Delta$.

3.3.3 Objetivos del diseño de la rehabilitación

Según lo señalado en el FEMA 273, el objetivo de la rehabilitación es establecer los límites deseados de daño o pérdida (nivel de desempeño) para una demanda sísmica dada. El objetivo de la rehabilitación será establecido de común acuerdo entre el dueño y el ingeniero en casos voluntarios de rehabilitación, o por dependencias públicas en programas obligatorios.

El objetivo de la rehabilitación determinará, en gran parte, el costo y la viabilidad de cualquier proyecto de rehabilitación, y la ventaja que se obtendrá en términos de seguridad, reducción de daños materiales, y de interrupción de uso en sismos futuros. En el FEMA 156 y 157 se discuten los costos de construcción de un proyecto de rehabilitación sísmica.

En otras palabras, el objetivo del diseño de la rehabilitación está descrito por el estado de daño resultante de la demanda sísmica definida o por el movimiento del suelo (fig. 3.4). En la tabla 3.2 se presentan las excitaciones sísmicas de interés y los objetivos de diseño.

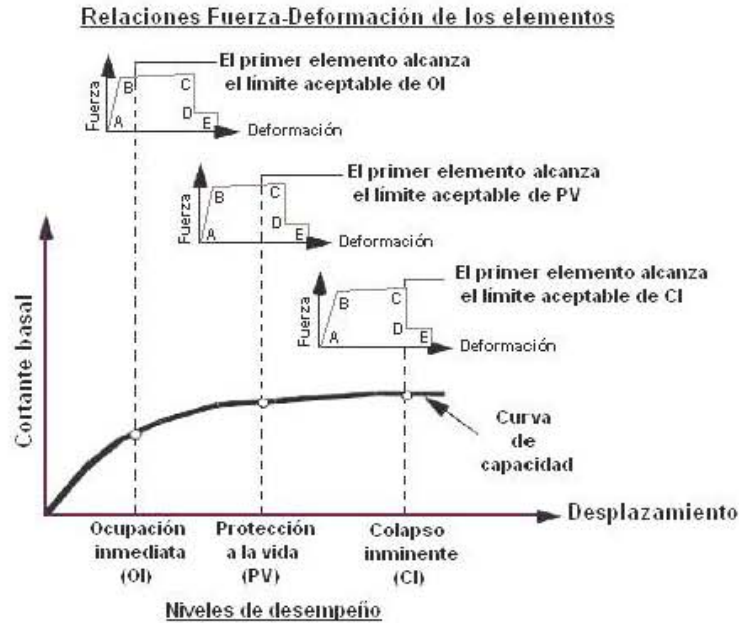


Fig. 3.4 Definición de los objetivos de diseño

Tabla 3.2 Objetivos de la rehabilitación sísmica (FEMA 273)

Niveles de peligro sísmico	Niveles de desempeño sísmico			
	Funcional (1-A)	Ocupación inmediata (1-B)	Protección a la vida (3-C)	Colapso inminente (5-E)
50%/50 años (Sismo leve)	a	b	c	d
20%/50 años (Sismo moderado)	e	f	g	h
BSE-1 (10%/50 años) (Sismo severo)	i	j	k	l
BSE-2 (2%/50 años) (Sismo extremo)	m	n	o	p

k + p = BSO

k + p + (a, e, i, m ó b, f, j ó n) = incremento de los objetivos

o = incremento de los objetivos

k ó p sola = objetivos limitados

c, g, d, h = objetivos limitados

Donde:

Sismo de seguridad básica 1 (por sus siglas en inglés BSE-1) = Es un sismo severo con probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años y alcanza dos tercios del sismo máximo considerado (MCE).

Sismo de seguridad básica 2 (por sus siglas en inglés BSE-2) = Es un sismo extremo con probabilidad de ocurrencia de 2% en 50 años. Es el sismo máximo considerado (MCE).

Objetivo de seguridad básica (por sus siglas en inglés BSO) = Es un objetivo de la rehabilitación en el cual el nivel de desempeño de protección a la vida se alcanza para

la demanda sísmica de BSE-1 y el nivel de desempeño de colapso inminente se alcanza para el BSE-2.

Sismo máximo considerado (por sus siglas en inglés MCE) = Es un nivel de peligro sísmico extremo utilizado en la formación de los objetivos de la rehabilitación (ver el sismo de seguridad básica 2).

Objetivo limitado: Es cuando un objetivo de la rehabilitación proporciona un desempeño inferior al BSO. Un objetivo limitado puede consistir en una rehabilitación parcial. Se permite cuando las medidas de rehabilitación no generan irregularidades estructurales o no agrava las existentes, cuando no reducen la capacidad de la estructura de resistir las fuerzas laterales y deformaciones, cuando no incrementa las fuerzas sísmicas en algún elemento que no tiene suficiente capacidad para resistirlas, etc.

3.3.4 Niveles de desempeño sísmico

Los niveles de desempeño de un edificio se obtienen combinando los niveles de desempeño estructural con el no estructural. En el estructural se describe el estado límite de daño de los sistemas estructurales (vigas, columnas, losas, etc.) y el no estructural describe el estado límite de daño de los sistemas no estructurales (sistemas mecánicos, eléctricos, arquitectónicos, etc.). En esta metodología se utilizan tres niveles de desempeño estructural y cuatro niveles de desempeño no estructural formándose los cuatro niveles de desempeño básicos de un edificio.

Los tres niveles y los dos intervalos de desempeño estructural consisten en:

- S-1: Nivel de desempeño de ocupación inmediata
- S-2: Intervalo de desempeño de control de daños (entre los niveles de desempeño protección a la vida y ocupación inmediata)
- S-3: Nivel de desempeño de protección a la vida
- S-4: Intervalo de desempeño de protección limitada (entre los niveles de desempeño protección a la vida y colapso inminente)
- S-5: Nivel de desempeño de colapso inminente.

Los cuatro niveles de desempeño no estructural son:

- N-A: Nivel de desempeño funcional
- N-B: Nivel de desempeño de ocupación inmediata
- N-C: Nivel de desempeño de protección a la vida
- N-D: Nivel de desempeño de peligro reducido

El FEMA 273 propone cuatro niveles de desempeño sísmico de un edificio:

- Colapso inminente (CI)
- Protección a la vida (PV)
- Ocupación inmediata (OI)
- Funcional (F)

A continuación se describen los cuatro niveles de desempeño sísmico según el enfoque FEMA:

1.- Nivel funcional (1-A): Se obtiene con la combinación del nivel estructural de ocupación inmediata (S-1) con el nivel funcional no estructural (N-A). El edificio en general mantiene sus funciones (fig. 3.5); daños muy pequeños (S1+NA).

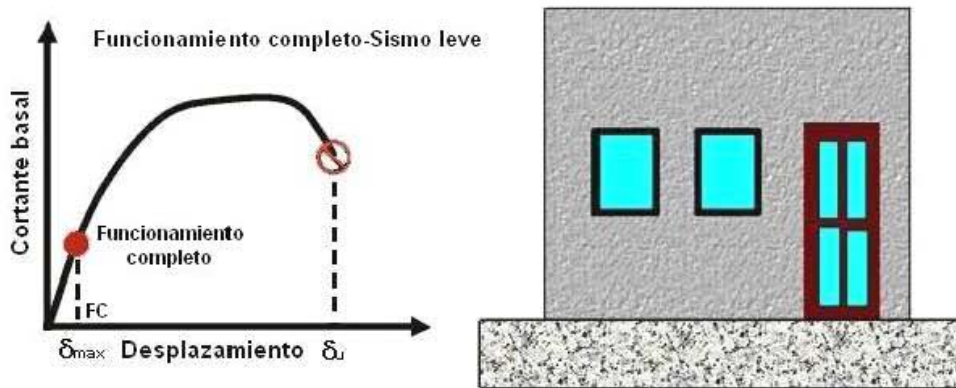


Fig. 3.5 Nivel funcional

2.- Nivel de ocupación inmediata (1-B): Se obtiene con la combinación del nivel estructural (S-1) y no estructural (N-B) de ocupación inmediata. Se mantienen las funciones del edificio; se espera daño mínimo (fig. 3.6) o ninguno en los elementos estructurales y solamente daño menor en los elementos no estructurales (S1+NB).

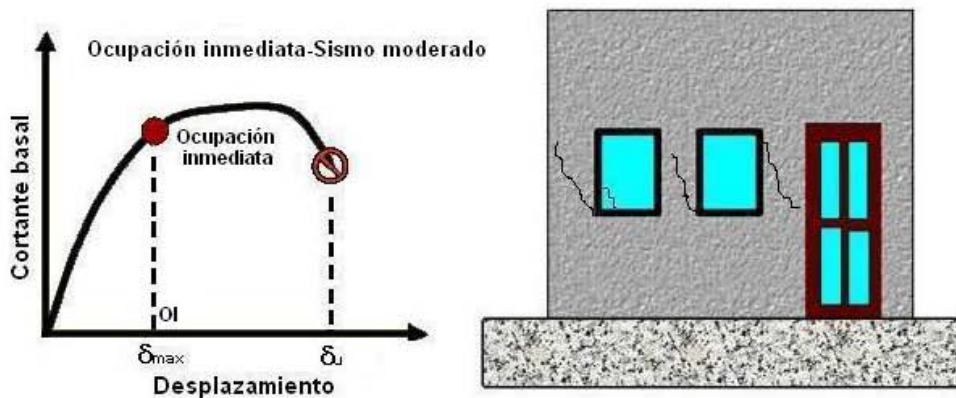


Fig. 3.6 Nivel de ocupación inmediata

3.- Nivel de protección a la vida (3-C): Se obtiene con la combinación del nivel estructural (S-3) y no estructural (N-C) de protección a la vida. Los edificios con este nivel pueden experimentar daño estructural y no estructural extenso en sus elementos y la reparación es económicamente impráctica (fig. 3.7). Se debe proteger a los ocupantes y transeúntes de sufrir alguna lesión o pérdida de vida. La estructura sigue siendo estable y el daño no estructural es controlado (S3+NC).

4.- Nivel colapso inminente (5-E): Se obtiene con la combinación del nivel estructural de colapso inminente (S-5) y con consideraciones de vulnerabilidad no estructurales (N-E). Se debe evitar el colapso total. El edificio apenas continúa en pie; cualquier otro daño o pérdida es aceptable (S5+NE). Se presenta daño extenso en los elementos no estructurales. En general estos edificios tienen pérdidas económicas completas (fig. 3.8).

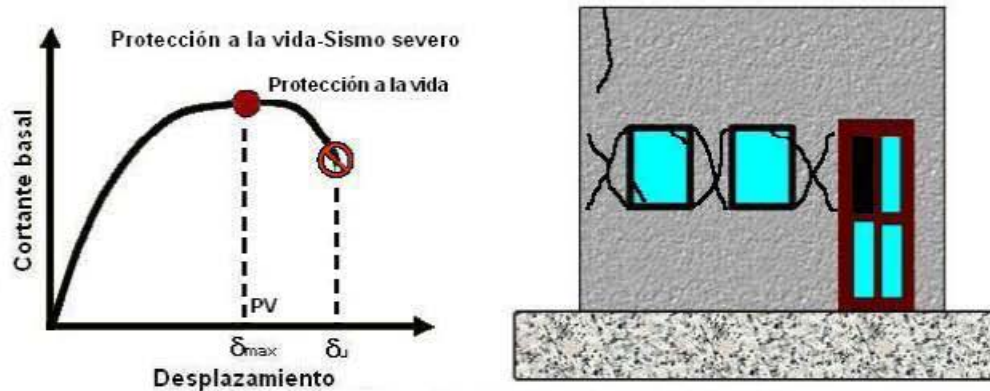


Fig. 3.7 Nivel de protección a la vida

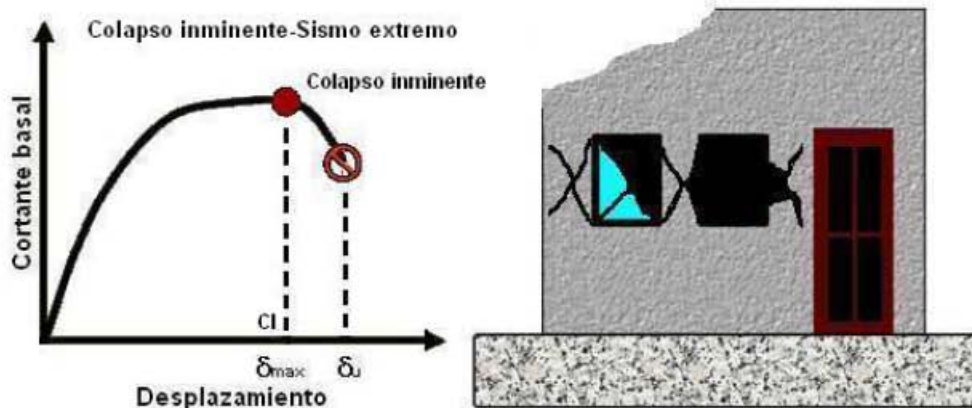


Fig. 3.8 Nivel de colapso inminente

3.3.5 Métodos de rehabilitación

El estándar de rehabilitación sísmica creado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés) en el documento ASCE 41/SEI 41-06 es lo más reciente en lo que se refiere a la metodología de rehabilitación sísmica de edificios basada en el desempeño, que empezó con el proyecto ATC-33 (The Applied Technology Council) y que en 1997 se publicó con el nombre de FEMA 273.

Y en el año 2000 se creó el documento FEMA 356 *Preestandar y comentarios para la rehabilitación sísmica de edificios* como resultado del trabajo en conjunto de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. El FEMA 356 nace de un esfuerzo por traducir las *guías para la rehabilitación sísmica de edificios FEMA 273* en un estándar de uso nacional.

La preparación de este documento fue emprendida originalmente con dos principales objetivos. El primero era fomentar un uso más amplio de las guías para la rehabilitación sísmica de edificios, FEMA 273, convirtiéndola en una referencia y recurso obligatorio. De esta forma los ingenieros tendrían a su disposición un documento de referencia más específico para hacer edificios resistentes a sismos. El segundo objetivo era proporcionar una base para un estándar reconocido a nivel nacional.

En el FEMA 273 y el ASCE 41 se plantean dos métodos de rehabilitación:

- Rehabilitación Simplificada
- Rehabilitación Sistemática.

a) Rehabilitación Simplificada

La rehabilitación simplificada se utiliza en edificios pequeños con una configuración regular, particularmente en zonas sísmicas moderadas o bajas. Este método no es aplicable a todos los edificios y se puede utilizar para alcanzar solamente los objetivos limitados de la rehabilitación.

La rehabilitación simplificada hace un nivel de análisis y diseño adecuado para edificios pequeños y regulares donde no se requiere un procedimiento analítico avanzado y alcanza un nivel de desempeño de protección a la vida para un nivel de peligro sísmico de BSE-1.

Este método es menos complicado que la rehabilitación sistemática, pero su uso es limitado por ciertas condiciones como la altura del edificio y la zona sísmica. Con frecuencia requiere una evaluación menos detallada o un análisis parcial para un nivel de desempeño específico.

El procedimiento que se sigue cuando se utiliza este método es:

- Identificar el tipo de modelo del edificio
- Considerar las deficiencias
- Seleccionar una rehabilitación completa o parcial.

b) Rehabilitación Sistemática

La rehabilitación sistemática se puede utilizar para cualquier edificio y se debe revisar cada elemento estructural existente. Se enfoca en un comportamiento no lineal en la respuesta de la estructura. Es un proceso iterativo, similar al diseño de un edificio nuevo. Se desarrolla un modelo matemático para el diseño preliminar. Se utilizan los procedimientos lineales y no lineales mencionados anteriormente, ya sean estáticos o dinámicos.

Este método se utiliza cuando no se puede utilizar una rehabilitación simplificada. Es muy completo y contiene todos los requisitos para alcanzar cualquier nivel de desempeño especificado.

El procedimiento a seguir cuando se utiliza este método es:

- Considerar las deficiencias
- Seleccionar la estrategia de rehabilitación
- Seleccionar el procedimiento de análisis
- Considerar los requisitos generales.

En la tabla 3.1 se presenta un diagrama de flujo del proceso de rehabilitación con el enfoque FEMA, y se mencionan los pasos a seguir cuando se utilizan estos métodos de rehabilitación.

3.4 Modos de comportamiento y falla inaceptables

Pueden considerarse como inaceptables los siguientes modos de comportamiento y falla:

- Pandeo local de los elementos estructurales
- Pandeo global de los elementos estructurales
- Fractura del acero longitudinal
- Aplastamiento del concreto
- Falla por cortante
- Formación simultánea de la articulación plástica en los extremos de la columna
- Falla en conexiones o nudos
- Falla por adherencia y anclaje.

3.5 Evaluación de daños

El primer paso para plantear la posible reparación de una estructura es hacer un reconocimiento de los daños existentes en ella. La información que con esto se pueda reunir servirá para el desarrollo de las siguientes actividades:

- a) Evaluación preliminar de la estructura, que permita definir si se requiere su demolición inmediata o si procede considerar su reparación.
- b) Determinar la estrategia y los detalles de la rehabilitación temporal.

Así, en esta primera etapa del proceso de reparación, se deberá definir si se justifica intentar ésta o si por el peligro de un derrumbe inmediato que pueda afectar otras construcciones, vías de circulación vecinas, etc., es necesaria la demolición.

3.5.1 Inspección preliminar

La inspección preliminar consiste en una revisión ocular de toda la estructura para lograr identificar los daños existentes, así como para poder comprender el sistema estructural y su comportamiento ante un sismo.

Para una correcta evaluación de los daños y sus causas es necesario identificar el sistema estructural utilizado en el edificio en estudio. Deberá, por lo tanto, investigarse cuál fue el sistema empleado: marcos rígidos con o sin contravientos, con sistemas de piso de vigas y losas; muros de concreto reforzado; muros de mampostería con o sin contravientos; elementos precolados; o alguna combinación de los sistemas anteriores.

También es importante tomar nota del sistema de cimentación utilizado zapatas aisladas o corridas, pilotes de fricción o de apoyo directo, o alguna combinación de estos sistemas.

Para localizar los daños y cuantificarlos, durante la inspección será necesario revisar los desplomos y efectuar mediciones sobre los elementos más dañados, lo que puede implicar retirar parte de los acabados.

Para sistematizar el acopio de información, es indispensable utilizar formas prediseñadas para tal efecto. Estas formas deben incluir los siguientes conceptos:

- a) Identificación del edificio
- b) Identificación del sistema estructural
- c) Identificación de daños en elementos estructurales
- d) Identificación de daños en elementos no estructurales
- e) Identificación de problemas de estructuración
- f) Identificación de problemas en la cimentación
- g) Estimación de la posible causa de los daños.

En el ACI 364 se presenta la metodología de una inspección preliminar, que puede implicar uno o más de los siguientes pasos, dependiendo del tamaño y de la complejidad del proyecto:

- a) Revisión de planos, especificaciones, y observaciones del sitio.
- b) Revisar las condiciones del lugar.
- c) Medidas geométricas de los elementos, deflexiones, desplazamientos, grietas, y otros daños.
- d) Pruebas no destructivas.

e) Realizar retiros exploratorios cuando hay evidencia sustancial de deterioro o una señal de falla seria, cuando se sospechan defectos ocultos, o cuando se tiene información escasa.

f) Muestreo, pruebas, y análisis.

Los resultados de la investigación preliminar se deben resumir en un informe que incluya al menos, los siguientes aspectos:

- Revisión de la capacidad estructural
- Viabilidad del proyecto
- Problemas estructurales
- Requisitos de reforzamiento
- Investigación adicional.

En la tabla 3.3 se presentan algunos criterios para la clasificación y evaluación preliminar de los daños de una estructura.

3.5.2 Evaluación de la estructura

El objetivo de la evaluación es determinar si la estructura dañada es reparable; es decir, si es posible recuperar parte de la inversión que representaba antes del sismo. En general, esto será así cuando el costo de la reparación sea razonablemente menor del que implica demoler y volver a construir una estructura.

Para realizar la evaluación definitiva de la estructura y el proyecto de reparación, además de identificar los daños, conviene contar con información adicional sobre el diseño original del edificio, su proceso de construcción, usos y adaptaciones que haya tenido durante su vida útil.

La magnitud del daño en elementos estructurales se podrá clasificar en cinco niveles de acuerdo con las NTC Mampostería (ver tabla 3.4).

Esta información se puede agrupar en los siguientes conceptos:

- a) Planos estructurales
- b) Planos arquitectónicos
- c) Planos de instalaciones
- d) Memorias de cálculo
- e) Estudio de mecánica de suelos
- f) Normas de diseño utilizadas
- g) Normas de diseño vigentes para la reparación
- h) Bitácora de construcción
- i) Informes de control de calidad de los materiales empleados
- j) Uso actual de la estructura
- k) Remodelaciones o reparaciones previas.

Cuando no se tenga disponible la información anterior, será necesario reconstruirla a partir de la propia estructura.

Los principales conceptos que se requieren revisar son los siguientes:

- Los planos estructurales, arquitectónicos y de instalaciones
- Las características de los materiales
- El estudio de mecánica de suelos.

Para poder evaluar el estado de una estructura dañada, es necesario conocer su capacidad sismorresistente inicial y con base en ella, tratar de comprender su comportamiento durante el sismo y las causas de los daños que se hayan presentado.

**Tabla 3.3 Clasificación y evaluación preliminar de daños
(Iglesias et al., 1985)**

Tipo de daño	Descripción	Evaluación preliminar
No estructural	Daños únicamente en elementos no estructurales.	No existe reducción en la capacidad sismorresistente. No se requiere desocupar. La reparación consistirá en la restauración de los elementos no estructurales.
Estructural ligero	Grietas menores que 0.5 mm de ancho en elementos de concreto. Fisuras y caídas de aplanados en paredes y techos. Grietas menores que 3 mm en muros de mampostería.	No existe reducción en la capacidad sismorresistente. No se requiere desocupar. La reparación consistirá en restaurar los elementos dañados.
Estructural fuerte	Grietas de 0.5 mm a 1 mm de anchura en elementos de concreto. Grietas de 3 mm a 10 mm en muros de mampostería.	Existe una reducción importante en la capacidad sismorresistente. Debe desocuparse y mantener un acceso controlado. Es necesario realizar un proyecto de reparación de la estructura.
Estructural grave	Grietas mayores que 1 mm de ancho en elementos de concreto. Desprendimiento del recubrimiento en columnas. Aplastamiento del concreto, rotura de estribos y pandeo del refuerzo en columnas y muros de concreto. Agrietamiento de losas planas alrededor de las columnas. Aberturas en muros de mampostería. Desplomos en columnas y en el edificio de más de 1:100 de su altura.	Existe una reducción importante en la capacidad sismorresistente. Debe desocuparse y suprimirse el acceso y la circulación en todo el perímetro. Es necesario proteger la calle y los edificios vecinos mediante rehabilitación temporal, o proceder a una demolición urgente. De ser posible deberá recurrirse a una evaluación definitiva que permita decidir si procede la demolición o bien un refuerzo generalizado de la estructura.

Tabla 3.4 Clasificación de daños estructurales según las NTC de Mampostería de 2004

Tipo de daño	Descripción del daño
Insignificante	Los daños no afectan la capacidad estructural del elemento. La reparación es de tipo superficial.
Ligero	Se afecta ligeramente la capacidad estructural. La reparación es sencilla para la mayor parte de los elementos dañados.
Moderado	La rehabilitación dependerá del tipo de elemento. Se afecta medianamente la capacidad estructural.
Severo	El proceso de rehabilitación implica reforzar y/o reemplazar algunos elementos. Se afecta significativamente la capacidad estructural.
Muy grave	El proceso de rehabilitación implica reforzar y/o reemplazar la mayoría de los elementos, o incluso la demolición total o parcial de la estructura, ya que su desempeño no es confiable.

Debe resaltarse la necesidad de localizar los puntos débiles de la estructura. Los más comunes suelen ser los siguientes:

- a) Columnas cortas debidas a muros de altura incompleta
- b) Cambios bruscos de rigidez y de estructuración en elevación
- c) Torsión excesiva por una distribución inadecuada de la rigidez en planta
- d) Conexiones losa plana-columna
- e) Incompatibilidad de deformaciones entre marcos y muros diafragma
- f) Conexiones excéntricas viga-columna.

Una evaluación estructural general debe considerar los siguientes aspectos (De la Torre, 1995):

- Reconocer hundimientos y desplomos generales, observar grietas, ondulaciones, etc
- Identificar el sitio con respecto a la zonificación del reglamento de construcciones
- Identificar la presencia de edificaciones o instalaciones importantes como Metro, drenaje profundo, pozos, torres de transmisión, edificios altos con pilotes de punta
- Reconocer posibles movimientos en juntas de colindancia, rotura, y golpes entre edificios
- Verificar el tipo de cancelería, sus movimientos, fractura de vidrios, recubrimientos, plafones y funcionamiento de elevadores
- Verificar fisuras en cubos de escalera, fisuras de recubrimiento, muros y rampas
- Investigar el uso futuro del edificio y las posibilidades de adecuarlo al nuevo reglamento.

Desde luego, existen daños que no afectan la integridad mecánica de la estructura y cuya reparación puede hacerse sin necesidad de entrar en un análisis estructural. Sin embargo, cuando existe sospecha de que la estabilidad estructural pueda estar en riesgo, se hace indispensable adelantar una evaluación estructural, mediante un análisis lineal o no lineal.

Tomando en consideración el informe preliminar y toda la información recabada en la inspección detallada, se elabora un informe cuya estructura básica puede ser la siguiente:

- Presentación (objetivos y alcance de la investigación)
- Descripción de la estructura
- Documentación del problema
- Levantamiento de daños
- Localización de muestras y determinación de pruebas
- Resultados de las pruebas
- Análisis y evaluación de las pruebas
- Evaluación estructural
- Diagnóstico de los daños
- Pronóstico sobre el comportamiento de la estructura
- Recomendaciones
- Precauciones de seguridad.

3.6 Sistema de evaluación de daños en casos de emergencia (enfoque Japonés)

Se presenta un breve resumen del sistema de evaluación de daños en casos de emergencia establecido por el Ministerio de Construcción del Japón. Fue establecido en 1991 (Ohkubo, 1995), y comprende las siguientes tres etapas:

a) Evaluación para restringir la entrada: Se aplica para emitir un juicio sobre la seguridad del edificio, en las evaluaciones realizadas después del sismo. Su objetivo es evitar una pérdida mayor de vidas humanas. Se identifican los edificios que presenten posibilidades de riesgo, se señalan y restringen las entradas. La revisión se realiza a un nivel no muy detallado y principalmente en edificios grandes; lo más importante es hacerlo de inmediato. Se realiza dentro de uno o dos días después del sismo, observando el edificio.

La tabla 3.5 presenta los puntos que se deben inspeccionar para evaluar los riesgos presentados después del sismo.

Los resultados de esta evaluación se expresan en los siguientes conceptos:

- 1.- Total o parcialmente colapsado
- 2.- Grandes asentamientos o inclinaciones
- 3.- Gran número de grietas o pandeo del refuerzo
- 4.- Posibles desprendimientos
- 5.- Condiciones geotécnicas o topográficas
- 6.- Otras condiciones de inseguridad.

b) Evaluación de riesgos de emergencia: Se lleva a cabo dentro de la semana siguiente al sismo. Tiene como objetivo establecer un juicio sobre el grado de riesgo que implica el uso de un edificio dañado y conocer si el edificio se puede utilizar como refugio. La evaluación se realiza a un nivel más detallado que el anterior (tabla 3.6). Se realiza observando el edificio, las fachadas exteriores y obteniendo el número de columnas dañadas (tabla 3.7).

Tabla 3.5 Puntos y objetivos de la inspección para la evaluación de riesgos

Puntos a inspeccionar	Objetivo de la investigación	
	Edificios privados	Edificios públicos
Daños estructurales	Exterior	Exterior e Interior
Objetos desprendibles	Exterior	Exterior e Interior
Instalaciones	-----	Electricidad, gas, suministro de agua, servicios higiénicos
Riesgo debido a los edificios colindantes	Edificios o estructuras colindantes	Edificios o estructuras colindantes

Los resultados que se obtengan se clasifican en: seguro, precaución e inseguro.

Tabla 3.6 Evaluación de riesgos en edificios

	Daño estructural			
	Seguro	Precaución	Inseguro	
Objetos desprendibles volcables	Seguro	Utilizable	Utilizable con precaución	Entrada prohibida
	Precaución	Utilizable con precaución	Utilizable con precaución	Entrada prohibida
	Inseguro	Entrada parcialmente prohibida	Entrada parcialmente prohibida	Entrada prohibida

Tabla 3.7 Niveles de daño en columnas de concreto reforzado

Nivel de daño	Condiciones de los daños
5	- Pandeo del acero de refuerzo - Deformación vertical reconocible a simple vista - Rotura a compresión en el corazón del concreto.
4	- Aplastamientos importantes en el concreto con exposición del refuerzo - Desconchamiento del recubrimiento del concreto.
3	- Aplastamientos locales del recubrimiento de concreto - Ancho de grietas de 1-3 mm.
2	- Grietas visibles (ancho de 0.2-1.0 mm).
1	- Fisuras menores de 0.2 mm.

c) Clasificación de daños: Se realiza en la etapa de reconstrucción. Tiene el propósito de saber si un edificio dañado puede ser utilizado nuevamente de forma permanente y si se requiere un reforzamiento estructural. Se realiza inspeccionando los elementos estructurales interiores y exteriores y estimando el nivel de daño. Los resultados de la evaluación se clasifican en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Resultados de la evaluación

Clasificación del nivel de daño	Grado de intensidad sísmica en la que se han producido los daños		
	Aceleración del suelo (cm/s ²)		
	<25-80	80-250	>250-400
Colapsado	Demolición	Demolición	Demolición
Severo	Demolición o refuerzo	Demolición o refuerzo	Refuerzo o reparación
Medio	Demolición o refuerzo	Se requiere una inspección detallada	Refuerzo o reparación
Pequeño	Se requiere una inspección detallada	Reparación	Reparación
Leve	Reparación	Reparación	Reparación

3.7 Estrategias de rehabilitación

El objetivo de una rehabilitación sísmica (Sugano, 1981) es:

- 1.- Incrementar la resistencia
- 2.- Incrementar la ductilidad
- 3.- Una combinación adecuada de las dos anteriores.

Una combinación de resistencia y ductilidad involucra un balance adecuado entre ambas. Proporcionar un incremento de resistencia es lo más común para edificios de altura media a baja. Incluso si se proporciona ductilidad, se requiere una resistencia adecuada para reducir los desplazamientos inelásticos. Es muy importante reducir las excentricidades ocasionadas por la distribución irregular de la rigidez en el edificio.

Generalmente, los elementos nuevos que se agregan a la estructura son para incrementar la resistencia, o los elementos de la estructura reforzados con materiales nuevos son para incrementar la ductilidad.

Existen dos formas básicas para seleccionar la estrategia más adecuada de rehabilitación:

- 1) Disminuyendo las demandas sísmicas
- 2) Aumentando la resistencia del edificio.

Los factores que intervienen en la selección de la estrategia de rehabilitación adecuada son los siguientes (ACI 369):

- La función de los elementos que soportan y transfieren las cargas verticales o laterales
- El tipo y edad de la estructura
- El tipo y grado de daño
- Requisitos arquitectónicos
- Uso, acceso, y vida de servicio restante de la estructura
- Costo de la rehabilitación
- Objetivo de la rehabilitación
- Compatibilidad de los materiales y su impacto en el funcionamiento estructural del sistema.

3.7.1 Selección de la estrategia de rehabilitación

Para situaciones más complejas se permiten una o más de las siguientes estrategias de rehabilitación (FEMA 273):

- a) Modificación local de los elementos
- b) Remoción o reducción de las irregularidades existentes
- c) Rigidez global de la estructura
- d) Reforzamiento global de la estructura
- e) Reducción de la masa
- f) Aislamiento sísmico
- g) Disipación de energía suplemental
- h) Otras estrategias de rehabilitación.

En la tabla 3.9 se presenta un ejemplo de una matriz de diversas estrategias de rehabilitación para un edificio de oficinas de ocho niveles con marcos y muros de concreto.

La tabla 3.10 ilustra los daños comunes encontrados en edificios de concreto reforzado después de sufrir los efectos de un sismo, así como los métodos de rehabilitación propuestos.

Tabla 3.9 Ejemplo de una matriz de rehabilitación (Niewiarowski, 1995)

Alternativas de rehabilitación	Restricciones de diseño						Escala 0:Adecuado 1: Pobre 2:Regular 3:Satisfactorio 4:Muy bueno
	Objetivo principal protección a la vida	Objetivo secundario control de daños	Costo	Programa	Impacto arquitectónico	Interrupción en el uso	
Incrementar la resistencia (Contravientos de acero)	3	2	4	3	3	3	No se satisfacen adecuadamente los objetivos de desempeño.
Incrementar la rigidez (Muros de cortante de concreto)	4	3	3	3	2	3	Es la mejor solución. Satisface adecuadamente los objetivos de desempeño.
Cambiar la respuesta del edificio (Aislamiento sísmico)	4	3	1	2	3	2	Es demasiado costoso.
Construcción exterior solamente	-	-	3	4	2	4	Podría ser una buena estrategia secundaria.

Tabla 3.10 Estrategias de rehabilitación para los daños más comunes que sufre una estructura de concreto después de un sismo (ACI 369)

Tipo de elemento	Mecanismo de daño	Método de rehabilitación
Vigas	<ul style="list-style-type: none"> - Agrietamiento - Desconchamiento - Aplastamiento - Pérdida de adherencia - Articulación plástica o fluencia del acero - Deformación permanente - Cortante 	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección epóxica en las grietas - Lechada epóxica en las grietas, en el concreto aplastado o desconchado. - Encamisado - Colocar hojas de FRP - Refuerzo externo - Reencaminado con tendones presforzados - Reemplazo del concreto y acero dañado.
Columnas	<ul style="list-style-type: none"> - Agrietamiento - Pérdida de adherencia - Articulación plástica - Deformación inelástica - Desconchamiento o Aplastamiento - Fluencia del acero - Cortante - Pandeo 	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección epóxica en las grietas - Lechada epóxica en las grietas, en el concreto aplastado o desconchado. - Encamisado - Colocar hojas de FRP - Refuerzo externo - Reemplazo de elementos - Reemplazo del concreto y acero dañado.
Losas	<ul style="list-style-type: none"> - Agrietamiento - Esfuerzo cortante - Deformación inelástica - Fluencia del acero - Pérdida de adherencia - Pérdida de presfuerzo 	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección epóxica en las grietas - Lechada epóxica en las grietas, en el concreto aplastado o desconchado. - Colocar hojas de FRP (en la parte inferior de la losa) - Refuerzo externo (en la parte inferior de la losa) - Adición de elementos al marco - Reemplazo del concreto y acero dañado.
Muros de carga	<ul style="list-style-type: none"> - Agrietamiento - Fluencia del acero - Pandeo - Deformaciones fuera del plano - Pérdida en la conexión - Aplastamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección epóxica en las grietas - Lechada epóxica en las grietas, en el concreto aplastado o desconchado. - Colocar hojas de FRP (en toda el área disponible) - Refuerzo externo (en toda el área disponible) - Reparaciones con concreto lanzado - Reemplazo del concreto y acero dañado.

Nota: La elección de la técnica de rehabilitación más adecuada dependerá del grado de daño y de la función que tenga el elemento.

4. TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN

La rehabilitación de un edificio se puede llevar a cabo después de un evento sísmico que haya ocasionado daños, en cuyo caso, el trabajo se efectúa para mejorar el comportamiento estructural de los elementos dañados. También se puede efectuar en estructuras no dañadas como anticipación de futura actividad sísmica.

Uno de los factores claves que rige el desempeño es la ductilidad o la falta de ella en la estructura existente. Generalmente las razones por las que se pierde ductilidad son las siguientes (Ohkubo, 1991):

- Pandeo del refuerzo a compresión
- Falla por cortante
- Falla por adherencia.

Existe un amplio número de técnicas de rehabilitación sísmica disponibles, dependiendo del tipo y condición de la estructura. Por lo tanto, la selección del tipo de rehabilitación es un proceso complejo.

Las técnicas de rehabilitación descritas en este capítulo han sido utilizadas para reparar daños sísmicos en estructuras de la ciudad de México. En la mayoría de los casos, la solución se obtiene con una combinación de varias técnicas. Los objetivos que se buscan obtener son incrementar la resistencia, la rigidez, o la ductilidad de los elementos críticos.

Los siguientes factores afectan la elección de la técnica de rehabilitación (Thermou y Elnashai, 2002):

- Costo contra importancia de la estructura
- Disponibilidad de mano de obra
- Duración del trabajo/interrupción en el uso
- Objetivos de diseño
- Reversibilidad de la rehabilitación
- Funcionalidad y estética compatibles con el edificio existente
- Control de calidad
- Significado histórico y/o político
- Compatibilidad estructural con el sistema del edificio existente
- Irregularidades de rigidez, resistencia y ductilidad
- Suficiente rigidez local, resistencia y ductilidad
- Control de daños en elementos no estructurales
- Capacidad de la cimentación
- Disponibilidad de la tecnología y materiales de reparación.

4.1 Introducción

Los sistemas de rehabilitación que se pueden aplicar para cada caso en particular dependerán de las características de la estructura y los problemas que presente (capacidad resistente insuficiente, baja rigidez, ductilidad inadecuada, etc.).

En la rehabilitación sísmica de estructuras, la resistencia lateral con frecuencia es proporcionada por la modificación y/o adición de elementos solamente en ciertas partes de la estructura. Los elementos restantes de la estructura usualmente no son reforzados (Pincheira, 1993).

Los elementos modificados o agregados pueden ser diseñados para resistir grandes deformaciones laterales. En contraste, los elementos restantes no reforzados pueden sufrir daños sustanciales si no se controlan los desplazamientos laterales.

Consecuentemente, se sugiere que el diseño del proyecto de rehabilitación se base en un control de desplazamientos en lugar de solamente en consideraciones de resistencia (Pincheira, 1993).

Generalmente, existen dos formas de aumentar la capacidad sísmica de estructuras existentes (Bai, 2003):

1) Rehabilitación a nivel estructura: Implica modificaciones globales al sistema estructural (fig. 4.1). Las modificaciones globales comúnmente incluyen la adición de muros estructurales y contravientos de acero. En este enfoque, se aumenta la ductilidad del sistema estructural para satisfacer sus estados límites específicos.

2) Rehabilitación a nivel elemento: Es una modificación a nivel elemento (fig. 4.2) que incluye métodos como encamisados de concreto, acero, o de láminas sintéticas reforzadas con fibras (FRP).

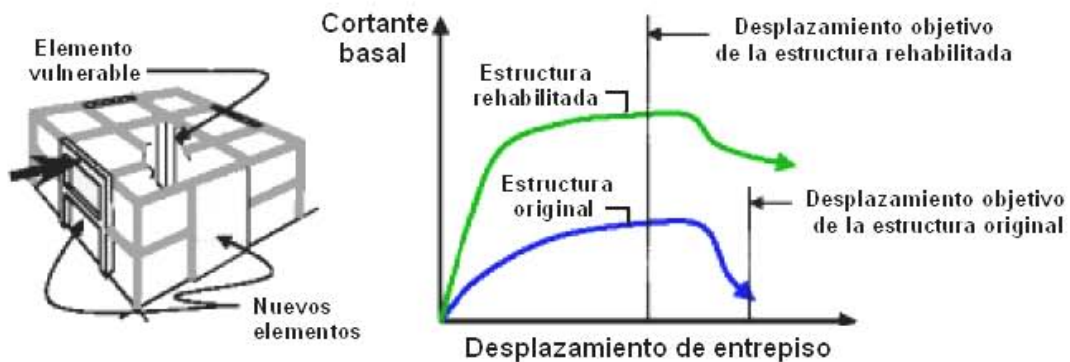


Fig. 4.1 Modificación global del sistema estructural (Moehle, 2000)

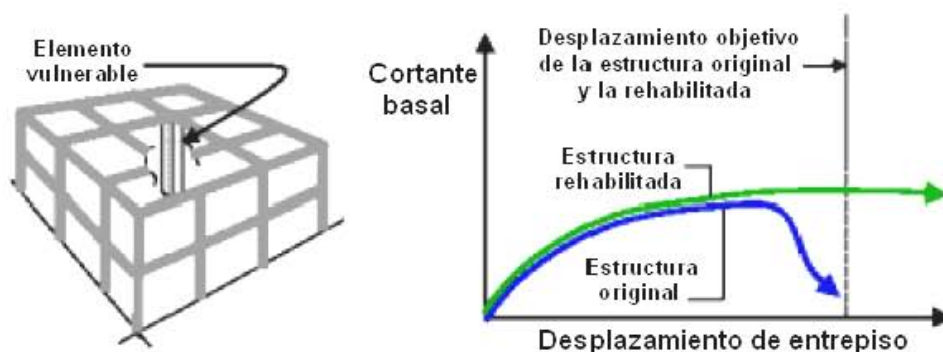


Fig. 4.2 Modificación local de elementos estructurales (Moehle, 2000)

4.2 Principios generales para mejorar el funcionamiento sísmico de una estructura

La resistencia sísmica de una estructura debe incluir la suficiente resistencia lateral para soportar el mayor evento posible, o la suficiente ductilidad combinada con una adecuada resistencia.

Los tres principios fundamentales (fig. 4.3) de cualquier técnica de rehabilitación sísmica son (Sugano and Endo, 1983):

- 1.- Incrementar la resistencia con respecto a las cargas laterales
- 2.- Incrementar la ductilidad
- 3.- Una combinación de las dos características anteriores.

4.3 Técnicas constructivas de rehabilitación sísmica

Las siguientes técnicas (fig. 4.4) se han utilizado para incrementar la resistencia y/o la ductilidad de una estructura (Sugano, 1981):

a) Técnicas para incrementar la resistencia

- 1.- Muros de relleno
- 2.- Muros patín
- 3.- Contravientos
- 4.- Estructura exterior adicionada a una estructura existente (contrafuertes).

b) Técnicas para incrementar la ductilidad

- 1.- Encamisado de acero
- 2.- Encamisado con soleras y ángulos
- 3.- Encamisado con malla electrosoldada.

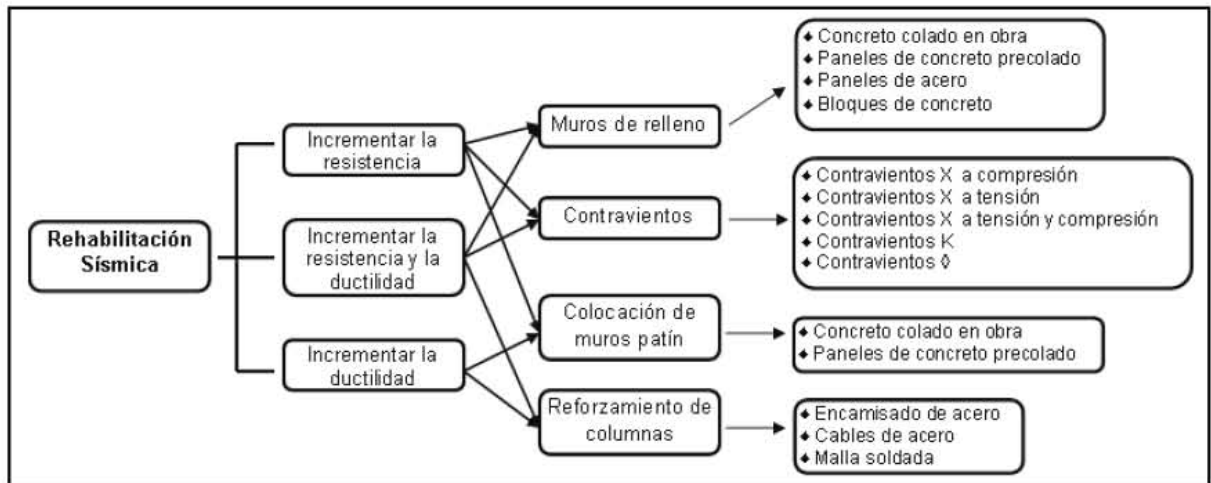


Fig. 4.3 Técnicas de rehabilitación sísmica (Sugano y Endo, 1983)

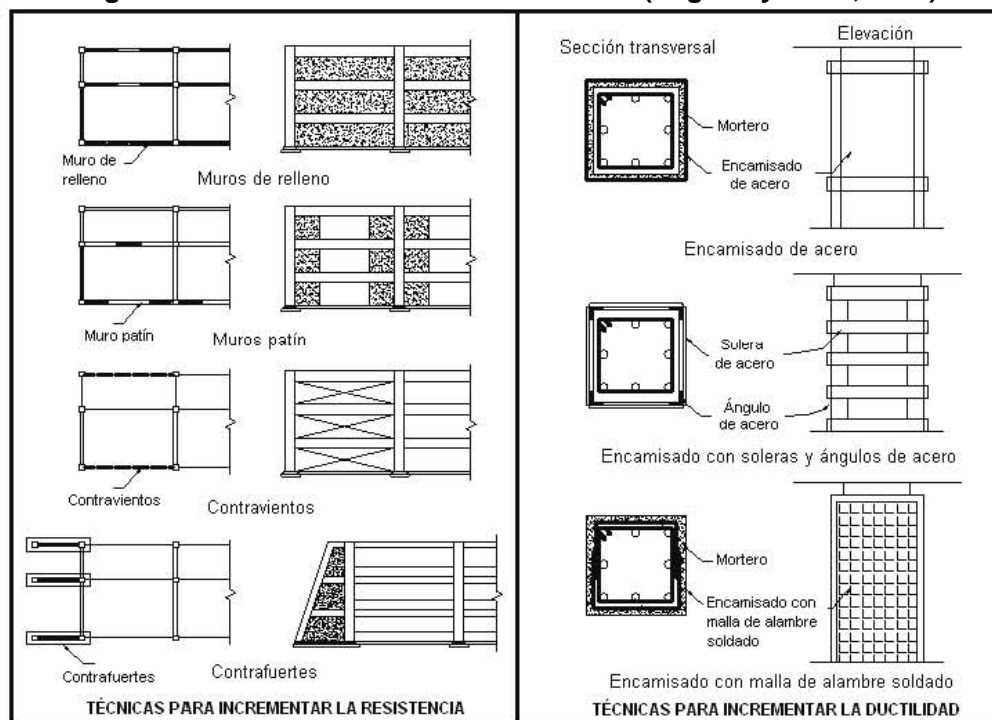
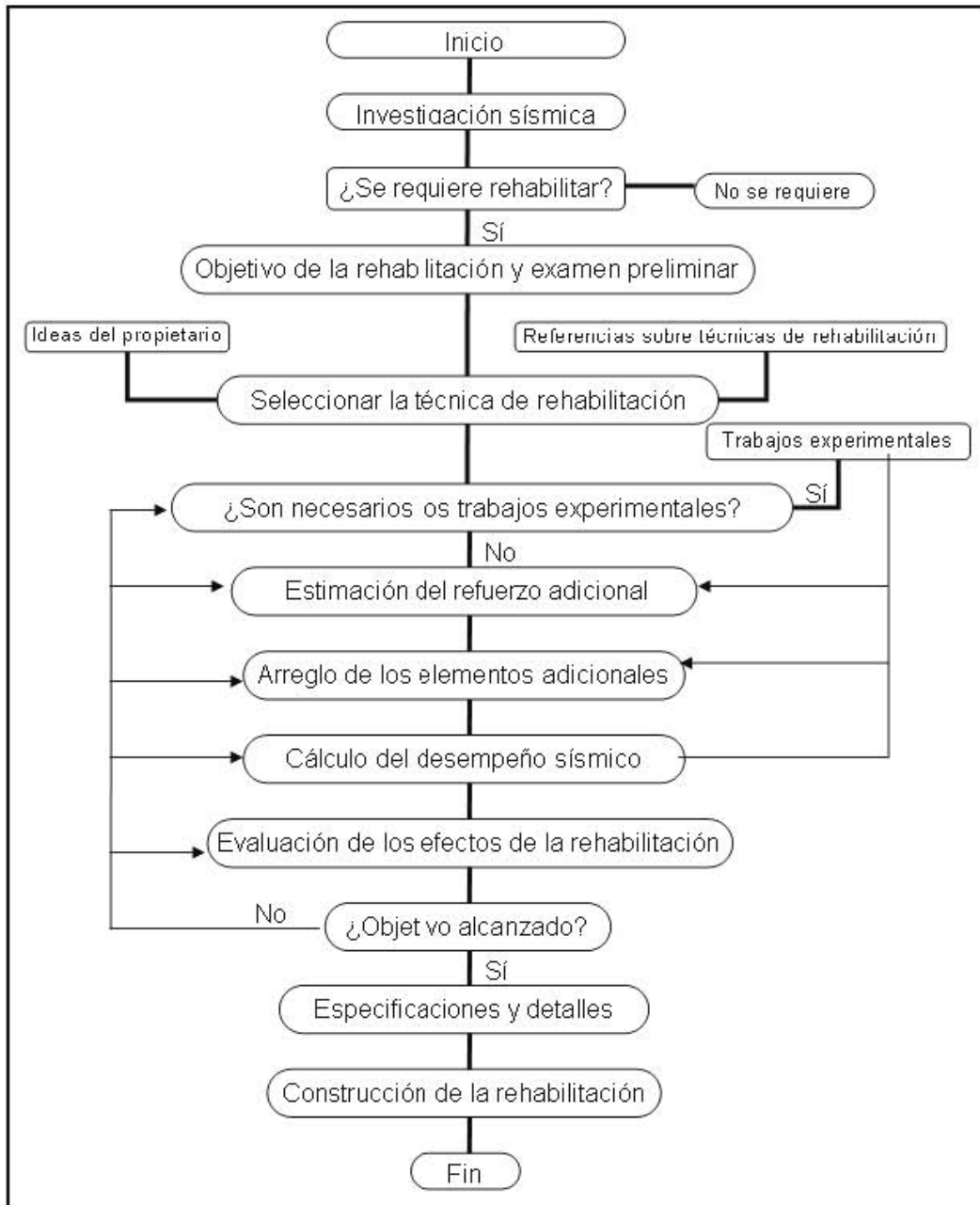


Fig. 4.4 Técnicas constructivas de rehabilitación sísmica (Sugano, 1981)

4.4 Metodología de reparación

La rehabilitación de un edificio puede lograrse a través de un procedimiento similar al sugerido por Ohkubo (1991) que se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Diagrama de flujo general de un proceso de rehabilitación (Ohkubo, 1991)



4.5 Selección de los materiales

La selección del material más adecuado para el programa de rehabilitación generalmente es el paso más importante. Los materiales más utilizados son las resinas, concreto, mortero y lechadas, así como acero de refuerzo (Breña, 1990).

Los materiales utilizados deben tener las siguientes características (Aguilar et al., 1996):

- Las propiedades de los materiales de reparación tienen que ser similares a las propiedades del material existente para evitar sobrecargas en los materiales viejos
- En el caso donde se utilice concreto nuevo para reparar al elemento, la resistencia a compresión del concreto debe ser al menos igual a la del concreto existente
- La resistencia a compresión y a cortante deben ser adecuadas para resistir los esfuerzos aplicados
- El coeficiente de expansión térmica debe ser similar al concreto original para minimizar los esfuerzos por temperatura
- El material de reparación debe ser de calidad
- Se debe promover compatibilidad entre los materiales utilizados en la rehabilitación.

4.5.1 Resinas

Las resinas generalmente son utilizadas en la reparación de grietas o para reemplazar pequeñas cantidades de concreto dañado. También se utilizan para anclar o para unir elementos nuevos de acero y concreto. Las resinas son un sistema compuesto por una resina (epóxica, poliéster, acrílica, poliuretano, etc.) y un catalizador. Cuando los dos componentes se mezclan, la resina cambia de un estado plástico a un estado endurecido. En el estado plástico, las resinas pueden variar en color, viscosidad, tiempo de fraguado, temperatura mínima de curado, y en el grado de sensibilidad a la humedad (Aguilar et al., 1996).

Después de que la resina ha curado, las principales variaciones en su desempeño son resistencia y rigidez. Las resistencias a compresión, tensión y flexión son generalmente mayores que los valores alcanzados por el concreto (Breña, 1990).

Cabe señalar que, en general, las propiedades de las resinas se deterioran a temperaturas mayores que 100° C y el proceso de endurecimiento se suspende a temperaturas debajo de 10° C. Si la humedad está presente, se recomienda el uso de resinas insensibles a ella (Aguilar et al., 1996).

Ventajas de las resinas

Algunas propiedades de las resinas que la hacen útil como material de reparación son (Breña, 1990):

- Resistencia contra ataques de ácidos, y solventes
- Tienen una excelente adherencia al concreto, mampostería y acero
- Baja contracción y buena durabilidad
- Alta resistencia.

Limitaciones de las resinas

- Pierden integridad a temperaturas arriba de 100°C.
- El tiempo disponible para colocar la resina después de que ha sido mezclada es muy corto.

En el capítulo 5 se discute ampliamente el tema de resinas epóxicas, así como la inyección de grietas con resinas epóxicas.

4.5.2 Concreto

4.5.2.1 Concreto colado en obra

El concreto es ampliamente utilizado como material de reparación para reemplazar secciones dañadas, ya que incrementa la capacidad del elemento. Sin embargo, para

obtener un comportamiento satisfactorio de la estructura reparada se debe lograr una acción monolítica entre el material nuevo y el viejo. Los cambios de volumen o contracción del concreto son unos de los principales problemas que se presentan cuando se utiliza este material, ya que existe pérdida de contacto entre las superficies del material nuevo y el viejo que impiden que se transfieran adecuadamente los esfuerzos. La contracción se puede controlar con el uso de aditivos estabilizadores de volumen en la mezcla y con membranas de curado (Breña, 1990).

4.5.2.2 Concreto lanzado

El concreto lanzado es un mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie. La fuerza del chorro, que produce un impacto sobre la superficie, compacta el material. Normalmente tiene un revenimiento igual a cero y puede sostenerse por sí mismo sin escurrirse. El ACI 506 los clasifica en los siguientes:

Concreto lanzado vía húmeda: Es el método en el cual todos los materiales, incluyendo el agua, se mezclan antes de ser introducidos en la manguera de transporte. Si se usa acelerador, se adiciona en la boquilla.

Concreto lanzado vía seca: Es el proceso en el cual la mayoría del agua de mezclado se adiciona en la boquilla. Los aditivos más usuales para el concreto lanzado seco son los acelerantes e impermeabilizantes integrales en polvo.

Propiedades del concreto lanzado

Las propiedades de este material son las siguientes (ACI 506):

- Alta adherencia, superior a cualquier material aplicado a mano
- Alta resistencia a compresión, por el método de colocación e impacto de una partícula sobre otra y la baja relación agua-cemento
- Resistencia a la absorción, su densidad y compactación permite la defensa de álcalis, ácidos y sales
- Se utiliza el mínimo de cimbra
- Permite obtener una gran variedad de texturas.

Las limitantes que presenta son:

- Requiere equipo y personal especializado
- El éxito del proceso dependerá de la habilidad y experiencia del trabajador
- Se presentan dos problemas: el rebote y rocío, aunque en la actualidad ambos problemas han disminuido considerablemente con el uso de aditivos químicos y otros materiales cementantes como el humo de sílice.

Rebote

El rebote es el agregado que no se adhiere a la superficie y cae lejos del material fresco. Es indudablemente la principal característica del concreto lanzado, pero necesaria para su correcta aplicación (Breña, 1990).

Sus causas son numerosas y muy variadas, puede deberse a la composición de los agregados, el diseño de la mezcla, la superficie de aplicación, la presión de proyección, la habilidad del lanzador, el espesor de la capa, la cantidad de aditivo acelerante y otros factores que afectan la cantidad del material de rebote. El 90% del rebote ocurre durante el 2% de la colocación del material (ACI 506).

Rocío o salpicado

El rocío o salpicado resulta de aplicar una gran cantidad de aire presurizado dando como resultado una mezcla con grandes cantidades de aire. Son partículas de

agregado fino y cemento que se adhieren a las superficies cercanas durante los trabajos de concreto lanzado (Breña, 1990).

Control del rebote y del rocío

Ambas condiciones deterioran la durabilidad del concreto lanzado por la creación de cavidades que promueven la infiltración de agua dentro del material.

En la actualidad ambos problemas han disminuido considerablemente con el uso de aditivos químicos. Los aditivos más utilizados en la fabricación de concreto son los reductores de agua y los acelerantes de fraguado. Los acelerantes y el humo de sílice disminuyen el rebote en el concreto lanzado.

El lanzador debe estar consciente en todo momento del rebote o del rocío. Adelantándose y construyendo una cama de pasta que absorba los agregados, es una forma de controlar el rebote y el rocío. El uso de una lanza de aire ayuda a dispersar el rebote. En la colocación entre capas puede ser necesario raspar y cepillar para obtener una superficie rugosa.

Acelerantes

Los aditivos acelerantes han sido empleados por muchos años, pero esto no indica que todos los concretos lanzados deban de usarlos. Algunos de los beneficios que brindan son:

- Desarrollo de resistencias tempranas
- Incremento del espesor de capa, logrando construirla en una sola pasada incrementando con ello la productividad
- Disminución del tiempo de fraguado del concreto
- Disminución del rebote.

Existen diversos tipos de acelerantes para concreto lanzado en el mercado:

- Silicato de sodio (*waterglass*)
- Silicatos modificados
- Aluminatos (sodio o potasio, o combinados)
- Libres de álcalis.

La mayoría de los aceleradores tiene efectos adversos sobre las propiedades del concreto como es la reducción en la resistencia final, comparada con un concreto sin acelerante. Por ello se debe controlar el uso de aditivos acelerantes.

Aplicaciones del concreto lanzado

Estas son múltiples y muy variadas, por lo que se mencionan solamente algunas de ellas. En edificación se utiliza en el recubrimiento de paneles de poliestireno, cubiertas laminadas, paraboloides, domos geodésicos y muros de contención; depósitos de agua, albercas, rehabilitación de estructuras dañadas por sismo, fuego o agentes químicos; silos, canales, estabilización de taludes, túneles, y concreto arquitectónico con color integral (ACI 506).

El concreto lanzado como sistema de reparación se utiliza en muros de concreto y mampostería y para encamisar elementos de concreto. Este procedimiento se puede utilizar para reparar superficies horizontales, verticales, diagonales y otras (Breña, 1990).

Principales diferencias del concreto lanzado con el concreto tradicional

Las principales diferencias del concreto lanzado con el concreto tradicional son las siguientes (ACI 506):

- Se coloca y compacta por impacto de manera simultánea, en vez de colocarse primero y luego compactarse por vibración, como es el caso del concreto tradicional
- El tamaño máximo del agregado es de 3/8" (10 mm)
- La relación agua/cemento es por lo regular baja (0.4)
- Tiene mayor adherencia a diversos materiales
- Requiere una cantidad mayor de cemento: de 360 a 500 kg/m³
- Su composición es diferente de la que sale de la boquilla debido al rebote contra la superficie.

Situaciones en las cuales el concreto lanzado presenta ventajas sobre el concreto tradicional

Los casos en los cuales el concreto lanzado tiene ventajas sobre el tradicional son (ACI 506):

- Cuando el costo de la cimbra es elevado o se requieren cimbras con formas imprácticas
- Cuando se puede reducir el número de cimbras o eliminarlas
- Cuando el acceso al área de trabajo es difícil
- Cuando se requieren espesores variables, o es necesario la aplicación en capas delgadas
- Cuando los métodos tradicionales de colocación no sean posibles
- Cuando se hacen reparaciones sobrecabeza.

Con la incorporación de materiales cementantes suplementarios, tales como ceniza volante, humo de sílice, y puzolanas se han creado nuevos cementos que han tenido gran aceptación en los trabajos de reparación. A continuación se mencionan algunos de ellos cuya norma mexicana es NMX-C-146-ONNCCE.

4.5.2.2.1 Concreto lanzado con humo de sílice

El humo de sílice es un subproducto de la industria metalúrgica que proviene de la reducción de cuarzo por carbón en hornos de arco eléctrico. Se obtiene al ser recuperado de los gases del horno que salen por la chimenea. En un principio su recuperación fue por razones ecológicas y tiempo después se descubrió su utilidad para el concreto. Es también conocido como microsílíce.

El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. Está disponible en polvo densificado o en forma de material acuoso.

Su composición química tiene entre 85 y 98% de sílice. Es muy superior a otras puzolanas, como la ceniza volante, cuyo contenido de sílice es de 40 a 60%. En el caso del cemento, este contenido alcanza de 17 a 25%.

La norma americana para el humo de sílice es la ASTM C 1240. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, colocación y curado del concreto con este material.

Una dosificación de microsílíce entre 5-15% del peso del cemento en la mezcla, presenta las siguientes ventajas:

- Mejor adherencia y cohesión del concreto en estado plástico
- Mayor espesor de las capas de concreto lanzado en una pasada con poco o ningún tipo de acelerador
- Mejor resistencia al lavado cuando el concreto fresco se aplica sobre zonas con filtraciones de agua o húmedas

- Reducción del rebote incrementando la productividad
- La impermeabilidad del concreto es mayor
- Mayor resistencias a compresión y flexión
- Mayor resistencia a ciclos de hielo y deshielo, reduce la penetración de cloruros e incrementa la resistencia al ataque químico.

Ventajas del humo de sílice en el concreto lanzado

Al utilizar el humo de sílice en el concreto lanzado se obtienen diversas ventajas, entre las que se cuentan las siguientes:

En el concreto fresco

- Disminución del rebote aproximadamente en 20% aún sobre cabeza, logrando una mayor economía al disminuir el desperdicio de material
- Aumento de la cohesión de la mezcla al lograr con una aplicación espesores de capa mayores, lo cual evita la necesidad de varias capas subsecuentes para llegar al espesor requerido, reduciendo así el costo de la aplicación
- Reducción del sangrado del concreto.

En el concreto endurecido

- Mayor densidad
- Incremento de la resistencia a compresión
- Incremento en la impermeabilidad del concreto
- Incremento en la resistencia a los sulfatos
- Mayor durabilidad
- Mayor resistencia a la corrosión.

4.5.2.2.2 Concreto lanzado con ceniza volante

La ceniza volante (fly ash) es un residuo puzolánico finamente dividido resultado de la combustión del carbón bituminoso molido o pulverizado, el cual es transportado desde la cámara de combustión a través del horno por los ductos de humo.

Las cenizas volantes utilizadas en el concreto deben cumplir con la norma ASTM C 618. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre 5 y 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente y la composición de la ceniza volante y del desempeño requerido del concreto. Las características de la ceniza volante pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema. Las cenizas de Clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un bajo contenido de calcio. Las cenizas de Clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen propiedades puzolánicas.

Este material se utiliza en las mezclas húmedas de concreto lanzado, por las mismas razones que se emplea en el concreto tradicional:

- Mejora la trabajabilidad y el bombeo de la mezcla, aún con fibras
- Reduce el calor de hidratación del concreto, disminuyendo el riesgo de agrietamiento térmico en secciones de gran espesor
- Reduce las reacciones álcali agregado
- Incrementa la resistencia al ataque de sulfatos.

4.5.2.2.3 Concreto con escorias de alto horno

Las escorias de alto horno (slag) son un material cementante no metálico producido en un alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. La escoria líquida es enfriada rápidamente para formar gránulos, que son molidos hasta tener una finura similar a la del cemento pórtland. Consisten esencialmente en silicatos y

aluminosilicatos de calcio y otras bases que se desarrollan en la fundición simultáneamente con el hierro en los altos hornos.

Este nuevo componente confiere al cemento mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia, rigidez y durabilidad contra los efectos de agentes químicos, sulfatos y agua de mar que pueden llegar a dañar el concreto.

Las escorias molidas de alto horno utilizadas como material cementante deben cumplir la norma ASTM C 989. En esta especificación se definen tres grados de escorias: 80, 100 y 120. Las escorias molidas de alto horno tienen por sí mismas propiedades cementantes pero éstas son mejoradas cuando se utilizan con cemento pórtland. Las escorias se utilizan entre el 20 y el 70% en peso de los materiales cementantes.

Características generales de las escorias de alto horno

Las escorias que se utilizan en la fabricación de cemento, deben cumplir tres requisitos:

- Provenir de alto horno donde se procese mineral de hierro y es por ello que se les llama escoria siderúrgica
- Deben ser básicas, esto es, que el contenido de elementos básicos tiene que ser superior al contenido de los elementos ácidos
- Debe ser granulada, es decir, se debe enfriar bruscamente a la salida del alto horno dejándola en estado vítreo.

Si alguna de estas condiciones no se cumple, no sirve para fabricar cemento.

4.5.2.2.4 Concreto lanzado con fibras

El concreto lanzado con fibras se desarrolló para soporte de roca y túneles, pero pronto encontró aplicación en el área de reparación. El concreto tradicional al igual que el concreto lanzado sin fibras, es un material frágil que no resiste los esfuerzos de tensión, presentando agrietamientos.

El uso de fibras en concreto lanzado se ha venido incrementando cada día. Las hay de acero, polipropileno y fibra de vidrio, pero de los tres materiales, la fibra de acero tiene mayor uso ya que reduce la propagación de grietas, incrementa la resistencia a flexión y mejora la ductilidad, dureza y resistencia al impacto.

Las características más importantes en el comportamiento del concreto lanzado con fibra son:

- Incrementa la resistencia al ataque de sulfatos
- Incrementa la relación entre la longitud y su diámetro equivalente (l/d)
- Incrementa el volumen en el concreto
- Incrementa la forma geométrica.

La adición de fibras proporciona al concreto propiedades especiales, las cuales dependen de la cantidad y tipo de fibra (naturaleza del material, proceso de manufactura, dimensión, y forma). La razón principal de adicionar fibras al concreto tradicional y lanzado es proporcionarle ductilidad a un material frágil.

4.5.2.3 Concreto con resinas

El concreto con resina se obtiene sustituyendo el cemento, en la mezcla de concreto, por resinas (epóxicas, poliéster, acrílicas, etc.). Se utiliza para parchar áreas pequeñas de concreto dañado (Aguilar et al., 1996).

Las ventajas que presenta este material son:

- Alcanzan resistencias altas en periodos de tiempo corto
- Tienen una excelente adherencia cuando la superficie está limpia y seca.

Las limitaciones que tiene son las siguientes:

- Baja resistencia al calor
- Bajo módulo de elasticidad con respecto al cemento pórtland ordinario, lo cual reduce la rigidez del elemento reparado.

4.5.3 Morteros y lechadas

Son una mezcla de arena, cemento y agua que se utiliza para reparar grietas en el concreto dañado o en elementos de mampostería. Las lechadas se vacían o se inyectan dependiendo de la extensión y el acceso que se tenga a la zona dañada. Se sugiere el uso de lechadas epóxicas cuando existen esfuerzos cortantes altos, cuando se tienen contracciones bajas, y cuando se requiere una buena adherencia (Aguilar et al., 1996).

Es necesario utilizar cimbras o selladores para contener la lechada hasta que haya fijado. La cantidad de agua en el mortero influye en la trabajabilidad de la mezcla y la cantidad de contracción durante la hidratación.

4.5.4 Elementos de acero

Los elementos de acero se utilizan para reemplazar el acero dañado en los elementos de concreto. Para asegurar continuidad, se colocan empalmes, conexiones mecánicas, o soldaduras. Si se utilizan soldaduras, se debe controlar el proceso de calentamiento y enfriamiento para evitar cambios en las propiedades y modos de falla dúctiles. Los elementos que se agreguen deben tener protección contra la corrosión y la exposición al fuego (Aguilar et al., 1996).

Los ángulos y las placas de acero se utilizan para encamisar columnas y vigas. Las placas se adhieren con epóxicos a la superficie del elemento para incrementar su capacidad a flexión.

4.6 Rehabilitación a nivel estructura

La rehabilitación a nivel estructura se utiliza para incrementar la resistencia lateral de las estructuras existentes, las cuales incluyen (Bai, 2003):

- Muros patín
- Muros de cortante
- Muros de relleno
- Contravientos de acero
- Cables postensados
- Aisladores en la base.

Cuando se realizan modificaciones en el sistema que resiste las fuerzas laterales se requiere un análisis más detallado del comportamiento estructural antes y después de que se implemente un proyecto de rehabilitación, ya que se originan cambios en la respuesta dinámica de la estructura.

Si el periodo fundamental de la estructura se acerca al periodo predominante del suelo, es recomendable incrementar la rigidez de la estructura utilizando las técnicas descritas en esta sección.

Los cambios en el sistema que resiste las fuerzas laterales se pueden lograr con los siguientes aspectos (Aguilar et al., 1996):

- Introduciendo nuevos elementos a la estructura original, como muros de cortante, contravientos diagonales, columnas y trabes nuevas
- Eliminando elementos estructurales del proyecto original como muros, contravientos, etc., de modo que no participen para resistir fuerzas laterales
- Reduciendo las características de volteo y/o desplazamiento del conjunto.

4.6.1 Muros estructurales de concreto reforzado

Aunque ningún sistema estructural es inmune al colapso, los edificios con muros estructurales bien configurados han tenido un buen desempeño, tanto estructural como no estructural, durante sismos recientes. A continuación se presentan los más utilizados para rehabilitación de estructuras de concreto.

1.- Muros patín

Los muros patín son segmentos cortos de muros unidos a las caras laterales de la columna para mejorar su resistencia lateral. Se utilizan para incrementar la resistencia a cortante de la columna, cambiando el modo de falla a las vigas. La resistencia a cortante de la viga se debe examinar puesto que el claro libre de las vigas se reduce por la longitud del muro lateral.

Los muros patín pueden ser colados en obra o prefabricados. Esta técnica es la más apropiada cuando las vigas son excéntricas a las columnas ya que facilitan el paso del refuerzo transversal en la base de la columna.

2.- Muros de cortante

Este es uno de los métodos de rehabilitación más utilizados. Esta técnica es efectiva para controlar los desplazamientos laterales y para reducir el daño en el marco. Para reducir tiempo y costo se puede utilizar concreto lanzado o paneles prefabricados. El espesor del muro varía de 15 a 20 cm.

Los muros de cortante son comúnmente utilizados para eliminar rigideces excéntricas del edificio y para incrementar la capacidad de carga. La solución más factible se obtiene colocando los muros en el perímetro de la estructura para así reducir las posibles interferencias en el interior (fig. 4.5).

Este sistema de rehabilitación es adecuado solamente para estructuras de concreto, y con él se puede obtener un gran incremento en la capacidad de resistencia lateral, rigidez, y una ductilidad razonable si el muro es diseñado adecuadamente.

El ACI 369 menciona algunos de los aspectos más importantes que se presentan en edificios con muros de cortante y que deben disminuirse o eliminarse:

- Irregularidades torsionales significativas
- Sistemas de gravedad que no resisten desplazamientos de entrepiso
- Muros discontinuos
- Tamaño inadecuado de los muros
- Zonas de uniones con refuerzo pobre
- Cimentaciones inadecuadas
- Vigas de acoplamiento inadecuadas.

Los muros de cortante con una relación de esbeltez baja ($H/L \leq 2$) tienen un comportamiento dominado por corte. Deben diseñarse para resistencias elevadas, ya que su capacidad de deformación plástica y de disipación de energía es baja. Los muros esbeltos ($H/L \geq 2$) actúan esencialmente como vigas en voladizo; su carga axial es generalmente pequeña y dominan los efectos de flexión.

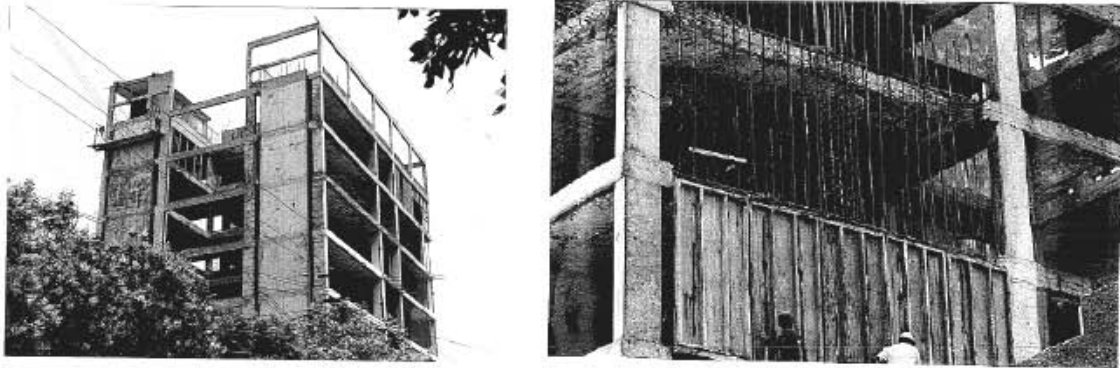


Fig. 4.5 Muros de cortante (Aguilar et al., 1996)

Se debe limitar la cantidad de acero de tensión para promover un comportamiento dúctil en el muro. El refuerzo longitudinal debe prolongarse en toda la altura del muro, pasando por la losa y alrededor de las vigas promoviendo con ello, un buen comportamiento a flexión. El refuerzo transversal debe confinar el concreto en la parte del muro sujeta a compresión para evitar una falla en esa zona y el pandeo del acero a compresión (Aguilar et al., 1996).

Es conveniente continuar el refuerzo por cortante en toda la altura del muro. Si esto no es posible, el muro debe estar conectado adecuadamente a las vigas, losas y columnas para asegurar una correcta transferencia de cortante. Se pueden utilizar conectores de cortante (fig. 4.6).

Un aspecto negativo de este sistema es el peso adicional que se le coloca a la estructura. Si el edificio es alto, el incremento en peso puede afectar la cimentación haciendo que trabaje bajo condiciones críticas puesto que estos muros toman la mayor parte del cortante sísmico, y las concentraciones de carga generadas también afectan la cimentación (Breña, 1990).

3.- Muros de relleno

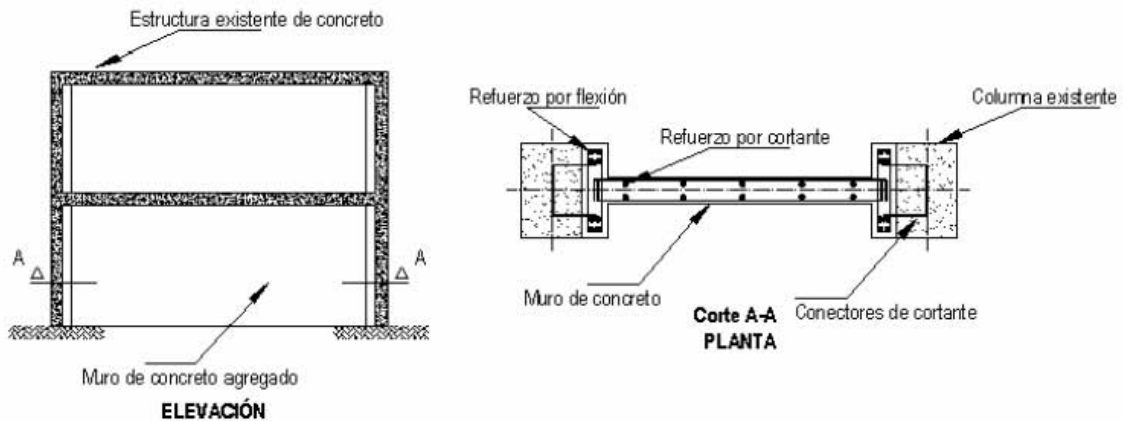
Es un método utilizado para proporcionar resistencia lateral a edificios en los cuales no se tiene suficiente resistencia sísmica. Está técnica es la más utilizada para eliminar la rigidez excéntrica del edificio o para incrementar la capacidad ante cargas laterales (Alcocer, 1995).

Consiste en agregar muros de relleno ya sea de mampostería o de concreto. El proceso de relleno es para rigidizar la estructura. La adición de muros de relleno a marcos existentes se puede lograr mediante diversas técnicas.

Probablemente la más común sea el colado en obra del nuevo muro, dentro de los límites de las vigas y columnas existentes. Los esfuerzos entre el muro adicional y el marco existente deben ser transmitidos a la conexión del elemento (fig. 4.7). La conexión al marco existente usualmente se hace por medio de cuñas o anclajes adhesivos (Aguilar et al., 1996). En México, los muros de relleno de concreto normalmente son colados en obra o con concreto lanzado, aunque también pueden ser de acero.

El uso de este tipo de muros ha demostrado efectividad en el control de los desplazamientos laterales en la estructura reparada. El comportamiento de los muros de relleno es similar al comportamiento del muro estructural mientras que se proporcione continuidad con los elementos del marco (vigas y columnas).

En este caso, las columnas actúan como elementos perimetrales y su capacidad axial debe ser suficiente para resistir las fuerzas de tensión y compresión provocadas por el muro (Alcocer, 1995).

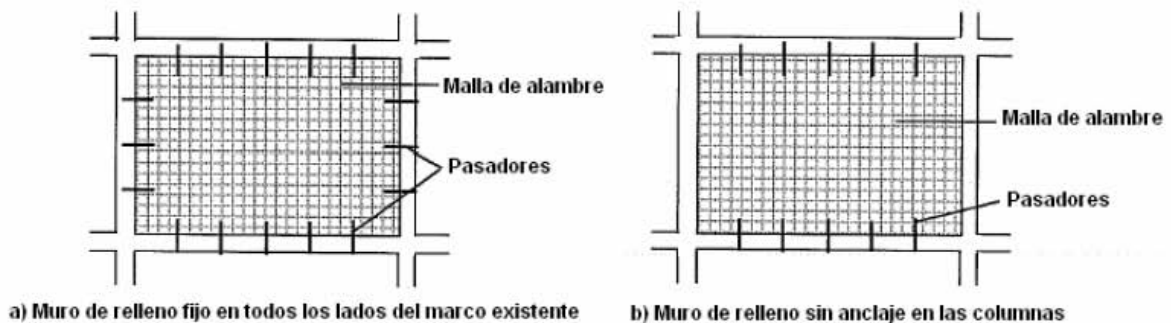


Si la resistencia a cortante de la columna no es adecuada para resistir las fuerzas cortantes rasantes, el muro de relleno se ancla solamente a las vigas (fig. 4.8b). Si el muro de relleno se utiliza en combinación con un encamisado completo de vigas y columnas, el refuerzo del muro se puede anclar efectivamente al refuerzo de los elementos encamisados.

Los muros de relleno son eficaces para reducir daños estructurales y no estructurales ya que limitan las deformaciones. La cimentación debe ser lo suficientemente segura para soportar el incremento de carga vertical causada por los muros adicionales.



Los edificios en los cuales la técnica de relleno es aplicada con efectividad son aquellos donde la resistencia lateral es baja o en los cuales la resistencia sísmica es controlada por una falla a cortante en los elementos. Sin embargo, esta técnica también es efectiva en edificios cuyo comportamiento sísmico es controlado por flexión (Sugano, 1981).



En la siguiente tabla Ohkubo (1991) presenta algunas ventajas de esta técnica de rehabilitación.

Tabla 4.2 Aspectos que se incrementan con los muros de relleno (Ohkubo,1991)

Casos	Estructura Original	Estructura Reforzada
1	Flexión pero poca ductilidad	Incremento de ductilidad
2	Flexión pero poca resistencia	Incremento en la resistencia a cortante
3	Falla por cortante, poca ductilidad	Incremento de ductilidad
4	Falla por cortante, poca capacidad	Incremento en la resistencia a cortante
5	Igual a 3 ó 4	Incremento de ductilidad y resistencia

Los problemas que pueden presentar estos muros son (Sugano, 1981):

- Dificultades de construcción e instalación
- Se interrumpe el uso y función del edificio por la colocación de los muros nuevos
- Los muros adicionales pueden ocasionar un considerable incremento en la carga muerta, por lo que podría requerirse el refuerzo de la cimentación.

Procedimiento de diseño de muros de relleno

El modelo analítico de estos muros se debe establecer considerando la rigidez relativa y resistencia del marco y del muro de relleno, así como el nivel de deformación y el daño asociado. Para niveles de deformación bajos, y para los casos donde el marco es relativamente flexible, se permite un modelado como muro de cortante. En otros casos, se permite un modelado usando una analogía como marco contraventeado (ASCE 41-06).

Durante el diseño se hace énfasis en el cortante y momento flexionante actuante en el muro, teniendo como consideración principal que el muro debe diseñarse para que fluya en la base. Es importante proveer al muro con suficiente capacidad a corte, para promover que fluya a flexión antes de fallar por cortante. Se recomienda diseñar el muro como si fuera un elemento a flexión o flexocompresión. De esta manera, se promueve un comportamiento dúctil del muro (ASCE 41-06).

Sugano (1981) propone el siguiente procedimiento de diseño para muros de relleno:

- 1.- Examinar la capacidad estructural del edificio.
- 2.- Determinar el tipo de resistencia sísmica del edificio, rigidez, ductilidad y otras combinaciones.
- 3.- Establecer el objetivo de la rehabilitación conforme a las políticas de diseño.
- 4.- Calcular los esfuerzos de diseño del muro y especificar la resistencia de los materiales.
- 5.- Calcular la longitud del muro suponiendo un espesor.
- 6.- Calcular el refuerzo longitudinal, transversal y por cortante necesario, y diseñar los elementos de conexión.
- 7.- Calcular la resistencia última del muro.

4.6.2 Contravientos de acero

Este sistema consiste en agregar contravientos de acero a la estructura existente. Estos marcos trabajan como una armadura vertical y se pueden colocar en el interior o en el exterior del edificio (fig. 4.9).

Este sistema proporciona resistencia lateral y ductilidad, por ser elementos que trabajan a carga axial. Con ellos se obtienen buenos resultados en la reparación de estructuras con daños sísmicos (Alcocer, 1995). En todos los proyectos de contravientos de acero, la consideración de diseño más importante es la transmisión de fuerzas entre el contraviento y la estructura de concreto.

Jain (1985) presentó un estudio analítico donde menciona que la configuración de contravientos en "X" desarrolla mejores características de respuesta que la configuración similar en "V".

Los contravientos inducen fuerzas axiales adicionales en columnas y vigas existentes. Dependiendo de la configuración y del tamaño del contraviento, estas fuerzas axiales pueden ser benéficas o perjudiciales a la resistencia y capacidad de deformación de los elementos del marco (ACI 369).

Existe una gran variedad de configuraciones que se pueden elegir para diversos niveles de funcionamiento. Dependiendo de la configuración original del edificio, el número, tipo, y tamaño del contraviento, se pueden diseñar para proporcionar diversos niveles de resistencia lateral y rigidez (ACI 369). Los contravientos diagonales son los más utilizados.

Tipos de contravientos

Generalmente se utilizan los siguientes tipos de contravientos de acero:

- Diagonales
- Contravientos en X
- Contravientos excéntricos.

Existen algunas variaciones o combinaciones para aplicar el sistema de contravientos de acero en marcos de concreto reforzado (Sugano, 1981):

- 1.- Utilizando un marco de acero especial para fijar los contravientos de acero dentro del marco de concreto existente.
- 2.- Sin utilizar un marco de acero especial.
- 3.- Utilizando tornillos de acero o soldaduras para colocar los contravientos directamente dentro del marco de concreto, está técnica es conocida como *técnica de junta directa*.
- 4.- Utilizando mortero o concreto en las juntas y anclajes para colocar los contravientos, llamada *técnica de junta indirecta*.

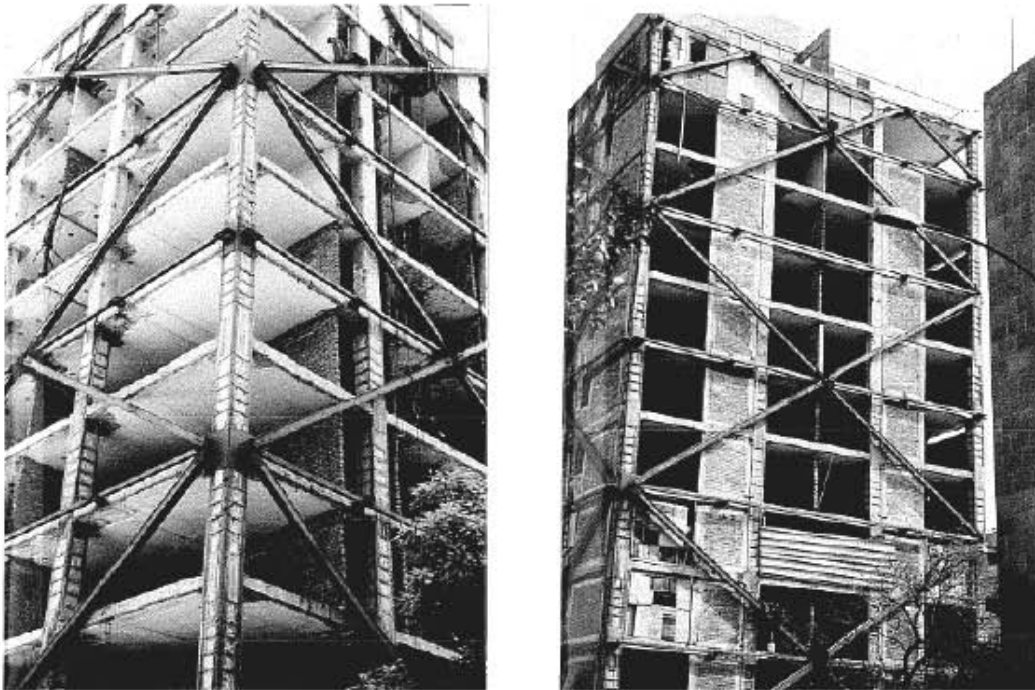


Fig. 4.9 Sistema de contravientos (Aguilar et al., 1996)

Características principales

La rehabilitación con contravientos de acero presenta las siguientes características:

- Casi no se incrementa el peso de la estructura, lo cual es muy importante para la cimentación.
- Rápida colocación de los contravientos con interrupción mínima en las funciones del edificio.
- Son útiles cuando se tienen limitaciones de espacio y masa en una estructura.
- Proporciona más fácilmente ventanas o aberturas que los muros de concreto.
- Está técnica es efectiva para aumentar la resistencia y la rigidez global de edificios existentes.
- No se requiere reforzar la cimentación ya que los contravientos generalmente son instalados entre los miembros existentes. Pero podría requerirse una evaluación de la cimentación en las zonas de contravientos. En algunos casos, se requiere reforzar localmente la losa para transmitir las fuerzas laterales a los elementos de contraviento.
- El momento flexionante que se genera en la conexión lo toma el concreto y los pernos de anclaje; el cortante se transmite usando ménsulas de concreto.
- La conexión entre el marco de concreto existente y los elementos de contraviento debe diseñarse cuidadosamente porque la conexión es vulnerable ante sismos, y se debe garantizar la transferencia de cortante.
- Las columnas deben ser continuas en toda la altura del edificio.
- Para marcos interiores deben hacerse unos agujeros en las losas, evitando las vigas existentes.
- La ubicación de los marcos debe ser lo más simétrica posible para evitar el efecto de torsión. El número de marcos dependerá de las magnitudes de las cargas aplicadas.
- El principal problema de esta técnica es el anclaje de los contravientos a la estructura de concreto existente. Se utilizan conexiones soldadas para unir los contravientos de acero con la estructura de concreto (fig. 4.10).

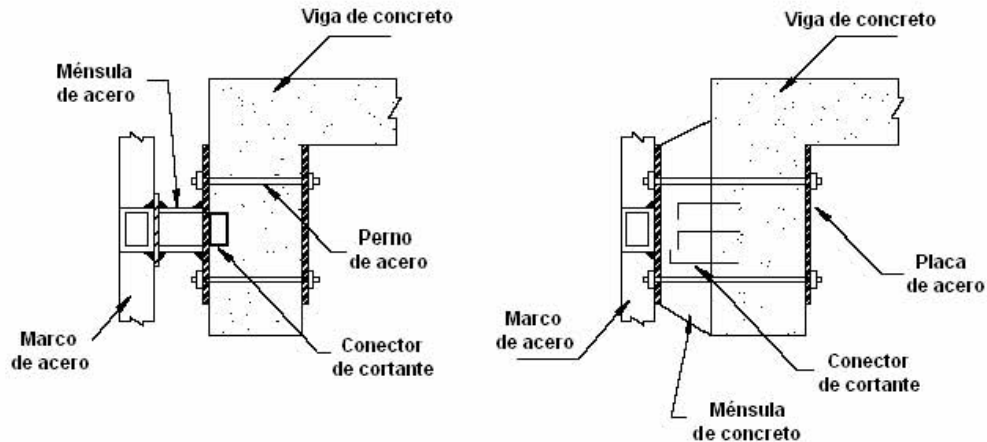


Fig. 4.10 Conexión de marcos de acero contraventeados

4.6.3 Cables

Los contravientos en tensión o cables de alta resistencia se utilizan para eliminar problemas asociados con el pandeo inelástico de los sistemas contraventeados. Con esta técnica se incrementa la rigidez de la estructura original. Una hipótesis común es esperar que la estructura reparada se comporte elásticamente. Sin embargo, se debe tener cuidado en no crear una estructura que entre en resonancia con el movimiento del suelo puesto que no hay disipación de energía por comportamiento inelástico (Breña, 1990).

4.6.4 Aislamiento sísmico

El objetivo de este tipo de rehabilitación es aislar la estructura del movimiento del suelo durante eventos sísmicos. Los aisladores están instalados entre la superestructura y la cimentación. Debido a que la mayoría de los aisladores tienen excelentes características de disipación de energía, esta técnica es la más eficaz para edificios relativamente rígidos con elevaciones bajas y cargas pesadas (ACI 369).

Este sistema debe tener las siguientes características (ASCE 91-06):

- Proporcionar la suficiente flexibilidad horizontal para incrementar el periodo del movimiento lateral bajo eventos sísmicos de moderados a intensos.
- Disipar energía para controlar las deformaciones y los desplazamientos del edificio.
- Rigidez, para limitar el movimiento del edificio bajo cargas de servicio (cargas de viento y sismos menores).

4.6.5 Reforzamiento de la cimentación

Cuando un sistema de rehabilitación es utilizado para mejorar el comportamiento dinámico del edificio, los elementos reforzados son diseñados para tomar las fuerzas sísmicas. Esto puede cambiar la forma en que la estructura resiste las cargas sísmicas, generando importantes concentraciones locales de carga en la cimentación. Muchas veces, se tiene que modificar la cimentación para que sea capaz de transmitir las nuevas cargas al suelo.

El diseño final de la cimentación dependerá de las características de la cimentación existente y de la magnitud de las cargas nuevas. Un incremento en zonas de contacto, la adición de pilas precoladas, y el reforzamiento de vigas y losas de cimentación son trabajos que pueden mejorar la cimentación.

4.7 Rehabilitación a nivel elemento

La rehabilitación a nivel elemento puede ser una estrategia más rentable que una a nivel estructura porque solamente se necesitan ciertos elementos para mejorar el desempeño sísmico de la estructura existente (Bai, 2003).

La rehabilitación a nivel elemento incluye:

- Encamisado de concreto
- Encamisado con elementos de acero

Una rehabilitación sin cambiar el sistema que resiste las fuerzas laterales se puede lograr con los siguientes aspectos (De la Torre, 1995):

1.- Reforzando las losas para que su efecto como diafragma horizontal sea más eficiente, especialmente si existe agrietamiento.

2.- Reforzando vigas, columnas y/o muros existentes para garantizar que su sección transversal participe con toda su área e inercia.

3.- Mejorando la unión entre los elementos estructurales existentes para garantizar un trabajo de conjunto previsto en el diseño original.

4.7.1 Encamisado de concreto

El encamisado de concreto se utiliza para incrementar la resistencia axial, flexión y cortante de elementos existentes. El encamisado se realiza agregando refuerzo longitudinal y transversal o una malla electrosoldada alrededor de la sección original y recubrirla con concreto premezclado o lanzado.

Un incremento en las dimensiones de las columnas aumenta la capacidad a cortante del elemento más que la resistencia a flexión, con lo cual puede incrementarse significativamente la ductilidad de cortante de la columna.

Características principales

El encamisado de concreto como técnica de rehabilitación a nivel elemento presenta las siguientes características (Aguilar et al., 1996):

- Cambia el mecanismo resistente de cada marco, de una falla frágil por cortante a un mecanismo de momento resistente dúctil.
- Para un mejor desempeño se recomienda un encamisado completo, es decir, en todas las caras de la columna, pero ello dependerá del acceso que se tenga a la zona dañada.
- Para incrementar la resistencia axial, a flexión y cortante, el refuerzo longitudinal debe continuar a través de la losa de entrepiso.
- El uso de concreto lanzado disminuye considerablemente el tiempo del proceso constructivo.
- El encamisado con malla electrosoldada se utiliza principalmente para incrementar la resistencia axial y a cortante en las columnas, y por lo tanto, su ductilidad.

Consideraciones constructivas

Cuando se utiliza esta técnica de rehabilitación se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos constructivos (Ohkubo, 1991):

- La resistencia a compresión del concreto del encamisado debe ser mayor que 210 kg/cm^2 y que el $f'c$ del concreto utilizado en la columna original.
- El espesor del recubrimiento de concreto para las mallas electrosoldadas o estribos debe ser mayor que 6 cm.

- La longitud de las juntas y empalmes de la malla de alambre soldado debe ser mayor que 20 cm.

4.7.2 Encamisado con elementos de acero

Una ventaja importante de utilizar sistemas de acero estructural es el menor peso, lo cual evita un aumento significativo en la masa y las fuerzas laterales resultantes, y disminuye un posible reforzamiento de la cimentación por el incremento de las cargas gravitacionales, que puede resultar muy costoso.

Si la sección de concreto no tiene daño significativo, los elementos de acero se pueden colocar directamente sin un procedimiento previo. De lo contrario, se debe de restaurar la rigidez del elemento dañado antes del encamisado (Aguilar et al., 1996).

En el capítulo 6 se discute ampliamente el tema de encamisados tanto de acero como de concreto.

4.7.3 Postensión

Se utilizan para reparar elementos con poca resistencia o que presentan grandes deflexiones o agrietamiento. Las reacciones originadas por el anclaje tienen que evaluarse cuidadosamente para evitar daños en el elemento existente (Breña, 1990). También, se hace un análisis cuidadoso de la posición del cable para controlar los efectos de postensionamiento (excentricidades y momentos secundarios).

4.8 Revisar el desempeño de la estructura rehabilitada

En muchos edificios rehabilitados, la efectividad del proyecto de rehabilitación fue verificada comparando el período fundamental de la estructura antes y después de la rehabilitación. La obtención de los periodos fundamentales se hace con métodos de vibración ambiental.

5. INYECCIÓN

Este capítulo se refiere al método de inyección de grietas como una de las técnicas de rehabilitación de estructuras de concreto más utilizadas en la actualidad. Se mencionan los métodos de inyección, los factores que influyen en el proceso y se hacen algunas recomendaciones para optimizar la técnica. También se mencionan las aplicaciones, propiedades, ventajas y limitaciones de diversos tipos de resinas, haciendo énfasis en la más utilizada en la rehabilitación: las resinas epóxicas.

5.1 Tipos de resinas

Una resina es cualquier compuesto orgánico, formado por una sustancia líquida viscosa. Se dividen en naturales y sintéticas. Las resinas naturales son producto de la secreción de las plantas formadas por sustancias orgánicas transparentes o traslúcidas. Las resinas sintéticas (también llamadas polímeros sintéticos) son sustancias artificiales que sufren un proceso de polimerización o secado dando lugar a un producto sólido con algunas de las propiedades físicas de las resinas naturales, pero con diferentes propiedades químicas.

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1) Resinas naturales | 2) Resinas sintéticas |
| - Resina verdadera | - Epóxica |
| - Gomorresinas | - Poliéster |
| - Oleorresinas | - Poliuretano |
| - Bálsamos | - Acrílicos |
| - Lactorresinas | |

Las que tienen aplicación en la construcción son las resinas sintéticas. A continuación se presentan algunas características generales de las resinas sintéticas.

5.1.1 Resinas de poliéster

1.- Aplicaciones comunes

- Anclaje
- Sellador o adhesivo
- Sellador para inyección epóxica
- Aglutinante para mortero con polímeros
- Aglutinante para fibra de vidrio
- Recubrimientos delgados
- Protección del revestimiento.

2.- Propiedades físicas

- Varían con la formulación
- Coeficiente de expansión térmico mayor que el del concreto.

3.- Ventajas

- Fácil de usar
- Buenas propiedades físicas (algunas formulaciones)
- Buena resistencia al uso
- Resistencia al impacto similar a la del concreto
- Impermeable
- Buena resistencia química.

4.- Limitaciones

- Mayor contracción y expansión que el concreto
- Hidrólisis
- Olor fuerte
- Propiedades de adherencia relativamente pobres

5.- Normas aplicables

- ASTM D 2393 "Standard test method for viscosity of epoxy resins and related components"
- ASTM D 1338-99 "Standard practice for working life of liquid or paste adhesives by consistency and bond strength"

5.1.2 Resinas de poliuretano

1.- Aplicaciones comunes

- Impermeabilizante
- Pegamento de control de agua (curado húmedo)
- Capa protectora
- Aislamiento
- Anclaje en revestimientos de pisos.

2.- Propiedades físicas

- Varían con la formulación
- Coeficiente de expansión térmico mayor que el del concreto.

3.- Ventajas

- Fácil de usar
- Buenas propiedades físicas (algunas formulaciones)
- Buena resistencia al uso
- Impermeable
- Contracción mínima
- Buena resistencia química.

4.- Limitaciones

- El curado es afectado por la humedad
- Sensibilidad a diferencias de temperatura
- Estabilidad cuestionable bajo ciertas condiciones.

5.- Normas aplicables

- ASTM D 2393 "Standard test method for viscosity of epoxy resins and related components"
- ASTM D 1338-99 "Standard practice for working life of liquid or paste adhesives by consistency and bond strength"
- ASTM D 695-91 "Standard test method for compressive properties of rigid plastics"

5.1.3 Resinas acrílicas

1.- Aplicaciones comunes

- Adherencia entre concreto fresco y viejo
- Recubrimiento y resane
- Cemento, yeso, etc.

2.- Propiedades físicas

- Varían de acuerdo con la formulación.

3.- Ventajas

- Buena adherencia
- Resistencia al agua
- Buena resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo
- Resistencia ultravioleta
- Baja permeabilidad a soluciones salinas
- Excelente resistencia a la decoloración

- Buena resistencia química con algunos materiales
- No es necesario el curado húmedo
- Mejora la resistencia a tensión, flexión, impacto y cortante.

4.- Limitaciones

- Tienen una vida de trabajo corta
- Requiere equipo especial para grandes aplicaciones
- Podría ablandarse bajo humedad continua
- Variación en la resistencia a la abrasión.

5.2 Resinas epóxicas

Las resinas epóxicas son compuestos sintéticos cuya aparición data de fines del siglo XIX; sin embargo, no fue sino hasta mediados del siglo XX que se utilizaron en la industria de la construcción, como recubrimiento para pisos y carreteras (Romero, 1995). Las resinas epóxicas fueron descubiertas en 1891 por el noruego Lindeman, pero hasta 1920 y 1930 se encontraron patentes de trabajos con estos materiales. En 1938, P. Castan, un químico suizo, produce una resina epóxica para su empleo en prótesis dental. En la Feria Industrial de Suiza en 1946 se presenta el Araldit I, un adhesivo que permite la unión de distintos materiales. Ese fue el comienzo de la explotación industrial de estos materiales que aparecieron con el nombre de Araldit. Paralelamente, en Estados Unidos, S. Greenlee trabaja con resinas epóxicas para pavimentos. Los trabajos de Greenlee pasan a la Compañía Devos y Reynolds de Estados Unidos, y Shell obtiene la licencia y empieza a producir resinas epóxicas con el nombre de resinas Epikote.

En un principio, las resinas epóxicas fueron simples auxiliares de otros materiales. Sus primeras aplicaciones fueron como adhesivos de elementos estructurales, principalmente en la industria aeronáutica y en construcción; hoy en día siguen manteniendo ese papel de auxiliar, pero lo importante es que han pasado a ocupar el puesto de materiales de construcción, con usos cada vez más frecuentes en pinturas, morteros, concretos epóxicos, etc.

Historia de las resinas epóxicas en la Industria de la construcción	
1936	Apareció la primer patente de resinas epóxicas, en Suiza
1948	Se utilizaron por primera vez los epóxicos para adherir concreto endurecido con concreto endurecido
1950s	Se utilizaron para parchar concreto (mortero con arena), reparar grietas, recubrimientos y como pegamento para anclar acero
1954	El California Department of Transportation (Caltrans) utilizó los epóxicos para pegar señales de tránsito a la superficie de rodamiento.
1959	El U.S. Army Corps of Engineers escribió las primeras especificaciones federales sobre epóxicos.
1978	Se publicó la primera especificación sobre epóxicos (ASTM C 881)

La primera aplicación importante en el campo de la construcción tiene lugar en 1954, cuando el Departamento de Carreteras del Estado de California de los Estados Unidos las emplea en carreteras para pegar señales de tránsito a la superficie de rodamiento (Trout, 2006).

5.2.1. Generalidades

Las resinas epóxicas por sí solas no tienen aplicación práctica en la construcción, salvo que vayan unidas a un “agente de curado” o “endurecedor”, con los cuales reaccionan y toman la forma que se desee al transformarse en sólidos.

Los diversos proporcionamientos entre resina y endurecedor, así como la amplia gama de estos elementos, permiten obtener una gran variedad de compuestos en los que las diferentes conexiones intermoleculares proveen al material de propiedades mecánicas específicas. Cabe mencionar que las combinaciones entre resinas y endurecedores

suelen acompañarse de los llamados “modificadores”, los que otorgan a las resinas un menor costo y/o un aumento de ciertas propiedades (Romero, 1995). Entre estos modificadores se encuentran diluyentes, flexibilizadores, cargas, materiales de refuerzo, etc.

Las resinas epóxicas comprenden una gran gama de productos que van desde líquidos de baja viscosidad, hasta sólidos. Las más utilizadas en la construcción son las líquidas. Para la preparación y el empleo de las resinas deben seguirse las instrucciones especificadas por el fabricante. Las resinas se emplean, por lo general, en la inyección de grietas en elementos de concreto, o bien como pegamento para unir elementos metálicos al concreto.

La mayor desventaja de este material es que existe mucha diferencia en sus propiedades (coeficiente de expansión térmico, resistencia a tensión y flexión) comparadas con las del concreto (tabla 5.1). Estas diferencias en propiedades producen un efecto adverso en la calidad y desempeño del material epóxico como material de reparación. En México, se han llegado a inyectar grietas de 1.0 hasta 10 mm (Ramírez, 1996).

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas comunes de las resinas epóxicas y del concreto (Ramírez, 1996)

Propiedad	Material	
	Concreto	Resina epóxica
Resistencia a compresión (kg/cm ²)	250	700
Resistencia a tensión (kg/cm ²)	21	120
Resistencia a flexión (kg/cm ²)	35	280

5.2.2 Clasificación de las resinas

Las normas ASTM C881-90 para sistemas de adherencia basados en resinas epóxicas para el concreto clasifica a los epóxicos por su uso (tipo), viscosidad (grado), y temperatura (clase).

1. Clasificación según su tipo

Se clasifican de acuerdo con sus aplicaciones y propiedades físicas (resistencia a la compresión, adherencia y módulo de elasticidad).

Tabla 5.2 Clasificación de las resinas según su uso (ASTM C881-90)

Tipo	Aplicación
I	Para unir concreto endurecido con concreto endurecido (sin soportar carga).
II	Para unir concreto fresco con concreto endurecido (sin soportar carga).
III	Para unir otros materiales con concreto endurecido y como aglutinante de morteros y concretos epóxicos.
IV	Para unir concreto endurecido con concreto endurecido y otros materiales y como aglutinante de morteros y concretos epóxicos (soportando carga).
V	Para unir concreto fresco con concreto endurecido (soportando carga).
VI	Para unir y sellar elementos prefabricados.
VII	Como sellador en elementos prefabricados.

2. Clasificación según su grado

El grado del sistema se define de acuerdo con las características de su flujo (consistencia y viscosidad).

Tabla 5.3 Clasificación de las resinas según su grado (ASTM C881-90)

Grado	Viscosidad
1	Viscosidad baja (2,000 cp); se utiliza para inyección de grietas.
2	Viscosidad media (2,000-10,000 cp); se utiliza para propósitos generales.
3	Viscosidad alta, se utiliza para trabajos especiales.

3. Clasificación según su clase

Las clases A, B, C son para los tipos I-IV, las clases D, E y F para los tipos VI y VII de acuerdo con el intervalo de temperaturas para la cual son apropiados.

Tabla 5.4 Clasificación de las resinas según su clase (ASTM C881-90)

Clase	Temperatura ambiente
A	< 4.5°C
B	entre 4.5°C y 15.5°C
C	> 15.5°C
D	entre 4.5°C y 18°C
E	entre 15.5°C y 26.5°C
F	entre 24°C y 32°C

5.2.3 Propiedades de las resinas epóxicas

Es necesario conocer las características generales de las resinas epóxicas para hacer una adecuada selección del producto. La amplia gama de posibilidades que ofrecen actualmente estas resinas obliga conocer sus propiedades físicas y químicas. Las características del producto final endurecido dependen fundamentalmente de las cantidades relativas entre los elementos de base y los modificadores incluidos.

Características físicas

Las resinas epóxicas como material de reparación presentan las siguientes propiedades físicas (Romero, 1995):

- Resistencia a tensión entre 300 y 950 kg/cm²
- Resistencia a compresión entre 1,200 y 2,100 kg/cm²
- Módulo de elasticidad entre 15,000 y 300,000 kg/cm²
- Adherencia alta en comparación con la que se puede proporcionar, por ejemplo, entre concreto y concreto, y aún entre concreto y acero
- Rapidez para alcanzar resistencia (normalmente algunas horas)
- Alta resistencia al impacto (ideal para revestimientos en superficies expuestas a condiciones de trabajo difíciles)
- Resistencia a la abrasión y al desgaste general muy superior a la que puede alcanzar un concreto de alta calidad
- Coeficiente de expansión térmico entre 1.0 y 5.8 x 10⁻⁵ cm/cm, mientras que para el concreto es de aproximadamente 1 x 10⁻⁵ cm/cm. Esta diferencia puede no ser relevante si el espesor de la resina es del orden de fracciones de milímetros; sin embargo, se debe poner atención cuando el espesor rebase los

5 mm, ya que una gran diferencia entre los coeficientes de expansión puede provocar fallas en la interfase de unión

- Poca disminución del volumen final con respecto al inicial; en general, esta contracción es bastante más pequeña que la del concreto
- Estabilidad térmica, los sistemas de resinas epóxicas presentan una fuerte disminución de sus propiedades mecánicas y un aumento considerable en su deformabilidad a temperaturas entre los 60°C y los 100°C. A los 200°C estos sistemas han reducido sustancialmente sus características, y a los 300°C empiezan a quemarse produciendo la volatilización de algunos de sus componentes.

Características químicas

Las propiedades químicas más importantes que presentan las resinas epóxicas son (Romero, 1995):

- *Termoestabilidad:* Las resinas epóxicas son sustancias plásticas termoestables cuando se han convertido en sólidos al reaccionar con el endurecedor.
- *Facilidad de reacción:* Es posible obtener mezclas que no requieran condiciones especiales para lograr la reacción deseada; sin embargo, es necesario mencionar que existen algunos componentes que requieren determinadas condiciones ambientales durante la construcción.
- *Resistencia a los agentes químicos:* Esta propiedad depende fundamentalmente de la estructura interna que se logre; conocerla permite prever, en general, su comportamiento ante las condiciones a que estará expuesta.

5.2.4 Aplicaciones de las resinas epóxicas

Las aplicaciones de las resinas epóxicas dentro de la construcción se pueden dividir en tres grupos (Romero, 1995). Estos grupos son los siguientes:

1. Adhesivo estructural

- Unión de concretos fresco y endurecido
- Unión de elementos prefabricados
- Unión de elementos estructurales
- Unión de acero, bronce, latón y otros metales entre sí, con concreto
- Inyección de grietas.

2. Protección y revestimientos de superficies

- Revestimientos de depósitos que contienen productos agresivos para el concreto o acero
- Membranas epóxicas impermeabilizantes
- Preparación de suelos industriales resistentes al desgaste, deslizamiento y agentes agresivos
- Pinturas anticorrosivas
- Pinturas para marcar señales de tránsito, etc.

3. Refuerzos y reparaciones

- Morteros para reparaciones y bacheos
- Juntas
- Reparaciones en obras hidráulicas.

5.2.5 Selección de la resina epóxica

Trout (2006) describe las propiedades más importantes que se deben considerar para hacer una adecuada selección de la resina epóxica:

1.- *Resistencia a compresión:* Para reparación de grietas estructurales (tipo IV), la norma ASTM C881 requiere que la resina epóxica tenga una resistencia a compresión mínima de 10,000 psi (700 kg/cm²), y para la inyección de grietas no estructurales (tipo I) de 8,000 psi (560 kg/cm²).

2.- *Resistencia a la adherencia:* En general, se requiere una resistencia a la adherencia de 1,500 psi (105 kg/cm²).

3.- *Resistencia a tensión:* La resistencia a tensión de las resinas epóxicas para inyección siempre debe ser mayor que la resistencia a tensión del concreto, que generalmente es menor que 500 psi (35 kg/cm²). La resistencia a tensión es del orden de 5,000 a 7,000 psi (350 kg/cm² a 490 kg/cm²).

4.- *Módulo de elasticidad:* Para el proceso de inyección se prefieren materiales con módulos de elasticidad altos, de 150,000 a 200,000 psi (10,500 a 14,000 kg/cm²). Se debe tener cuidado ya que un módulo de elasticidad alto puede ocasionar que la resina se fragmente o agriete fácilmente.

5.- *Resistencia química:* En general, las resinas epóxicas tienen una excelente resistencia química, aunque algunos ácidos y solventes muy fuertes pueden degradarlas, y para esos casos se requiere protección especial.

6.- *Tiempo de vida útil de la mezcla (Pot life):* Es el tiempo que lleva a la resina gelificarse después de que se ha mezclado. Se pueden agregar aceleradores o retardantes a la formulación para controlar el tiempo de la mezcla y que siga siendo trabajable.

7.- *Tiempo de curado:* Que el epóxico haya endurecido no significa que haya curado lo suficiente. Por esta razón, el tiempo de curado se debe distinguir de su tiempo de vida útil. El tiempo de curado representa el tiempo que le toma a la resina epóxica alcanzar sus propiedades últimas. Para propósitos prácticos, es 3 días después del curado, cuando se alcanzan resistencias de 80 a 90%. El curado completo se alcanza generalmente a los 28 días, igual que el concreto.

8.- *Viscosidad:* Es la resistencia para fluir del líquido. Materiales con baja viscosidad, como pastas y geles, son muy densos y se resisten a fluir. La viscosidad se mide en poise (1 gramo/cm.s) o comúnmente, en centipoise (0.01 poise).

9.- *Coefficiente de expansión térmico:* Generalmente, la inyección epóxica se expande y contrae de 5 a 10 veces más que el concreto. Por esta razón, los epóxicos no son efectivos cuando se utilizan para reparar grandes masas de concreto.

5.2.6 Componentes de una formulación epóxica

Se denomina "formulación epóxica" al conjunto de por lo menos, una resina y un endurecedor. En una formulación epóxica, en general, lo más importante es, no la resina en sí, sino la formulación que se haya hecho con ella, es decir, determinar la proporción óptima entre la resina y el endurecedor, lo cual es la esencia de la calidad de la mezcla, puesto que cualquier exceso o deficiencia en ésta debilitará el producto final.

1.- Endurecedores o agentes de curado

La elección del agente de curado que se utilizará con la resina está determinada por:

- Las características requeridas para la aplicación que se vaya a realizar, tales como: tiempo de vida útil de la mezcla, viscosidad, exotermicidad, toxicidad, etc.

- Las propiedades buscadas en el sistema de curado (mecánicas, eléctricas, químicas, etc.)
- El costo del agente de curado.

Relación resina/endurecedor

Las cantidades de resina y endurecedor que se requieren para lograr una reacción completa y un buen curado, dependerá de la formulación. La mayoría de las resinas tienen una relación volumétrica 1:1 ó 2:1. Es conveniente revisar que la relación dada por el fabricante sea volumétrica.

La adición de cargas o itálicas hace más fácil producir materiales con relación 1:1. Las resinas con viscosidades menores que 500 cp generalmente no contienen cargas. Por lo tanto, es muy común una relación 2:1 en la inyección de estas resinas. La mayoría de las inyecciones con resinas tiene una tolerancia de error de por lo menos 2% en su relación, sin sufrir una pérdida significativa en sus propiedades (Trout, 2006).

2.- Cargas

Las cargas o itálicas se emplean en las formulaciones epóxicas para disminuir su costo y/o mejorar algunas propiedades. Las cargas pueden ser de sílice, cuarzo, caliza, amianto, grafito, metales, etc. El uso de una u otra dependerá de la propiedad sobre la que se desea influir. En la tabla 5.5 se presentan algunas propiedades que se desean mejorar en la formulación epóxica y el tipo de carga que se puede utilizar para lograrlo.

Ventajas

Algunas características de las cargas que la hacen útil en la formulación epóxica son:

- Reducen considerablemente el costo
- Reducen la retracción del curado
- Disminuyen la temperatura de curado
- Aumentan la conductividad térmica
- Disminuyen el coeficiente de expansión térmico
- Reducen la absorción de agua
- Aumentan la dureza superficial
- Aumentan la resistencia a compresión
- Aumentan la resistencia eléctrica.

Tabla 5.5 Características de los tipos de carga (Romero, 1995)

Propiedad que se desea mejorar	Tipo de carga que se puede utilizar
Costo	Sílice, carbonato cálcico
Densidad	Microbalones de vidrio
Resistencia al impacto	Fibra de vidrio, nylon
Resistencia a la tracción	Fibra de vidrio, nylon
Resistencia a flexión	Fibra de vidrio, nylon
Trabajabilidad	Polvo de aluminio, carbonato cálcico
Resistencia al calor	Carbón, amianto
Estabilidad dimensional	Sílice, polvos metálicos
Conductividad térmica	Sílice, polvos metálicos
Coeficiente de dilatación	Silicato de aluminio, litio
Retardadores de fuego	Materiales inorgánicos
Resistencia química	Amianto, polvo de carbón
Resistencia a la humedad	Carbón en polvo, mica, sílice
Aislamiento eléctrico	Amianto, mica, sílice
Conductividad eléctrica	Polvo de aluminio, carbón, grafito

Limitaciones

El uso de cargas en la formulación epóxica presenta las siguientes limitaciones:

- Aumentan el peso
- Dan lugar a pérdida de transparencia
- Disminuyen la resistencia al impacto y tracción
- Aumentan la constante dieléctrica.

5.3 Inyección de grietas

La reparación de grietas depende sobre todo de conocer las causas y seleccionar el procedimiento de reparación que tome en consideración dichas causas; de lo contrario, la reparación podría ser temporal. Un procedimiento de reparación exitoso debe atacar y eliminar las causas del agrietamiento (ACI 224.1 R93).

Para seleccionar la técnica de reparación de grietas más exitosa se deben considerar los siguientes aspectos (Newman, 2001):

- La causa del agrietamiento
- Si la grieta es activa o inactiva
- Las necesidades de reparación

El comité ACI 224 señala que las grietas que se deben reparar son aquéllas que reducen significativamente la capacidad estructural del elemento (resistencia, rigidez o durabilidad), pero lo primero es identificar la causa y naturaleza de la grieta. Las grietas transversales en vigas y columnas reducen su rigidez y durabilidad. La rigidez de un elemento de concreto reforzado no sólo depende de la aparición de grietas, sino de la extensión de las mismas.

5.3.1 Generalidades

En estructuras de concreto, la técnica de reparación de grietas más utilizada es la inyección epóxica, pero hay que tener en cuenta que no todas las grietas conviene inyectarlas. La inyección de epóxicos se utiliza comúnmente para grietas inactivas que reducen significativamente la resistencia o rigidez del elemento y para reparar grietas causadas por sismos (Newman, 2001). La inyección epóxica se ha utilizado con éxito en la reparación de grietas en edificios, puentes, presas, y otros tipos de estructuras de concreto. Los materiales epóxicos utilizados en reparaciones estructurales deben cumplir con la norma ASTM C 881 (tipo IV).

Las grietas y fisuras que aparecen en elementos estructurales pueden ser originadas por causas de tipo geológico, térmico o mecánico. En cualquier caso, las grietas pueden dar lugar a (Romero, 1995):

- Pérdida de resistencia, debido a que el concreto resulta incapaz de transmitir las cargas para las que fue diseñado
- Fuertes desperfectos en el concreto, sobre todo en climas en los que el agua y los ciclos de hielo y deshielo se combinan, poniendo en peligro la integridad del mismo
- Infiltraciones de agua u otros fluidos empleados en procesos industriales que pasan a través de las grietas y pueden ser motivo de contaminación y peligro para aquellos objetos o materiales que trata de proteger la estructura
- Un aspecto antiestético en el elemento estructural.

Debido a su habilidad para fluir en grietas finas, las resinas de baja viscosidad son normalmente utilizadas para inyección. Estas resinas fluyen en las grietas rápidamente pero también se absorben en el concreto más fácilmente; por lo tanto, requieren que la inyección continúe después de que la grieta técnicamente se ha llenado. Como una alternativa, cuando no se requiera un sellado completo, se puede colocar un gel

epóxico, aunque no podrá penetrar tan profundamente como un epóxico líquido (Newman, 2001).

Las resinas de baja viscosidad generalmente se aplican a una presión de 200 a 300 psi (14 a 21 kg/cm²), aunque se pueden requerir presiones de 300 a 500 psi (21 a 35 kg/cm²) para llenar grietas finas (Trout, 2005).

5.3.2 Clasificación de las grietas

Las grietas en el concreto tienen muchas causas. Las grietas menores de flexión son parte del comportamiento normal del concreto. Las grietas grandes ocurren cuando las barras fueron mal colocadas o porque el elemento ha sufrido daño por una demanda mayor que la de diseño. Pueden ser solamente de aspecto, o indicar daño estructural. Su significado depende del tipo de estructura. Por ejemplo, el agrietamiento puede ser aceptable en edificios pero no en estructuras que almacenan agua.

Las sobrecargas mecánicas, estáticas o dinámicas pueden dar lugar a grietas en el concreto. Estas sobrecargas pueden ser pasajeras, como por ejemplo, las producidas por el paso de un camión pesado sobre un puente proyectado para tráfico ligero, o permanentes, o como las debidas a un exceso de carga en una zona dedicada a almacenamiento. En ambos casos, si eliminamos las causas y tomamos las precauciones necesarias para prevenir futuras sobrecargas, las reparaciones con inyección epóxica pueden ser la solución (Romero, 1995).

Otra causa de agrietamiento puede ser provocada por asentamientos diferenciales de la cimentación. Estos asentamientos pueden interrumpirse de forma natural o artificial por procedimientos de consolidación o estabilización; en ambos casos, una vez logrado el cese del movimiento las grietas pueden inyectarse.

Existen varias formas de clasificar las grietas, Newman (2001) las divide en activas e inactivas y el comité ACI 224 las clasifica dependiendo donde ocurren, en concreto plástico o en concreto endurecido.

Grietas activas: Es una grieta que se mueve (abre o cierra) periódicamente debido a las cargas. Las grietas activas cambian de tamaño y longitud bajo las cargas. Se forman como respuesta a movimientos continuos o a sobrecargas, se abren y cierran como resultado de fuerzas externas. Su reparación es muy difícil. Las grietas activas se abren y cierran durante cambios de temperatura, por el contenido de humedad y/o por la respuesta ante las cargas aplicadas.

Grietas inactivas: Es una grieta que no se mueve (no se abre o cierra), porque no está expuesta a cargas o temperatura que inducen el movimiento. No aumentan de tamaño y longitud. Generalmente son el resultado de contracción, movimientos iniciales en los apoyos, o sobrecarga estructural previa. Su reparación dependerá del tamaño y ubicación.

El ACI ha establecido límites de anchura de grietas para diversas condiciones de exposición, como se muestra en la tabla 5.6. A continuación se presenta la clasificación de grietas de acuerdo con el comité ACI 224:

1. Agrietamiento del concreto plástico

Agrietamiento por contracción plástica: El agrietamiento por contracción plástica en el concreto generalmente ocurre en superficies muy grandes como pisos y losas, ya que están sujetos a pérdidas rápidas de humedad causadas por viento, y/o temperaturas altas. Los factores que agravan la contracción del concreto es el diseño de la mezcla y

el curado. Si el concreto no es curado adecuadamente o contiene demasiada agua con certeza se agrietará.

Estas grietas generalmente son paralelas unas a otras, y usualmente aparecen entre los 30 minutos y 6 horas después de haberse colado el concreto. Por su tamaño son importantes estructuralmente.

Agrietamiento por asentamientos: Después del vibrado del concreto, éste tiene la tendencia de continuar consolidándose. Durante este período, el concreto plástico puede ser restringido con acero de refuerzo dando lugar a vacíos y/o a grietas adyacente al elemento restringido. Cuando está asociado a acero de refuerzo, el agrietamiento por asentamiento aumenta cuando se incrementa el tamaño de la barra y cuando disminuye el recubrimiento. El agrietamiento por asentamientos puede aumentar cuando se hace un vibrado deficiente del concreto.

2. Agrietamiento del concreto endurecido

Los tipos de agrietamiento que se pueden presentar en el concreto endurecido son por:

- Esfuerzos térmicos
- Contracción por secado
- Reacciones químicas
- Intemperismo
- Corrosión del acero de refuerzo
- Prácticas constructivas deficientes
- Sobrecargas de construcción
- Errores en el diseño y detallado, y debido a cargas externas

Tabla 5.6 Anchuras tolerables de grietas en elementos de concreto reforzado (ACI 224)

Condiciones de exposición	Anchura tolerable (mm)
Aire seco con membrana protectora	0.40
Humedad- aire seco- suelo (tierra)	0.30
Productos químicos para deshielo	0.20
Agua marina-brisa marina- humedad- sequía	0.15
Estructuras de almacenamiento de agua	0.10

5.3.3 Evaluación de las grietas

Antes de proceder a la reparación, se debe hacer una evaluación para determinar la localización y extensión de las grietas, las causas del agrietamiento y lo que se necesita para repararlas. Las grietas necesitan ser reparadas si reducen la resistencia, rigidez, o la durabilidad de la estructura a un nivel inaceptable.

5.3.3.1 Determinar la localización y extensión del agrietamiento

De acuerdo con el ACI 224, la localización y extensión del agrietamiento se puede determinar con los siguientes procedimientos:

- Inspección visual
- Pruebas no destructivas
- Pruebas a núcleos de concreto
- Revisión de planos y datos constructivos

5.3.3.2 Selección del procedimiento de reparación

Después de que se conozcan las causas del agrietamiento, se debe elegir un procedimiento de reparación, de tal forma que se puedan cumplir alguno de los siguientes objetivos:

- Mejorar el desempeño funcional
- Proporcionar impermeabilidad
- Mejorar la apariencia y la durabilidad de la superficie de concreto
- Prevenir el desarrollo de ambientes corrosivos en el acero.

Dependiendo de la naturaleza del daño, se pueden seleccionar uno o más métodos de reparación. Por ejemplo, la resistencia a tensión se puede restaurar con inyección epóxica. Sin embargo, puede ser necesario proporcionar resistencia adicional agregando refuerzo.

5.3.4 Programa de reparación de grietas

Un programa de reparación de grietas exitoso debe incluir los siguientes cinco aspectos (Kline, 1991):

1. Condiciones generales del elemento

Se deben determinar las siguientes condiciones y propiedades de los elementos de concreto afectados:

- Resistencia a la compresión
- Propiedades físicas
- Propiedades químicas
- Actividad de corrosión
- Pruebas de ultrasonido
- Monitoreo del movimiento de las grietas
- Pruebas de emisión acústica
- Extensión y/o profundidad de la grieta.

Identificar el tipo de grieta (activa o inactiva)

- Estructural
- No estructural

2. Formular un programa de reparación

Se hace una evaluación de la reparación considerando los siguientes aspectos:

- Compatibilidad del sustrato con el material utilizado
- Historia del material en el mercado e instalaciones exitosas
- Nivel de experiencia del trabajador

3. Preparación del proyecto de reparación

La experiencia del contratista es esencial para una reparación exitosa pero además se deben considerar los siguientes aspectos:

- Condiciones del equipo de reparación
- Condiciones de trabajo

4. Programa de reparación /Control de calidad

Se debe preparar la superficie agrietada cumpliendo con los siguientes puntos:

- Se realiza una limpieza con cepillo de alambre, chorro de agua, y tratamiento químico
- La interfase de la grieta se limpia con un chorro de agua para retirar la lechada o los contaminantes de la superficie.

Colocación del material y del equipo

- Perfilado y sellado
- Sellado de la superficie (penetración por gravedad)
- Se realiza la inyección a baja presión (mecánicamente), a alta presión (con bombas neumáticas e hidráulicas), o al vacío.

Monitoreo de la instalación

- Muestreo del material de reparación y pruebas
- Monitoreo de la operación del equipo, la presión y el material utilizado
- Monitoreo de las condiciones del sitio (temperatura, precipitaciones, etc).

5. Evaluación de la reparación después de la instalación

- Verificar la reparación con la perforación de núcleos de concreto
- Prueba de tensión indirecta de cilindros en las grietas consolidadas
- Pruebas de permeabilidad del sellador
- Instalación del monitor de grietas
- Monitoreo visual de los cambios de las grietas en la zona reparada.

5.3.5 Técnicas de reparación de grietas

Una vez identificadas y eliminadas las causas del agrietamiento, se procede a la reparación de las grietas. Los criterios de selección de la técnica de reparación están basados en el resultado deseado.

Existen tres métodos básicos para reparar grietas (Newman, 2001):

- **Pegar** la parte agrietada del concreto con inyección epóxica o lechadas; es apropiado para reparar grietas inactivas que reducen significativamente la resistencia o rigidez del elemento.
- **Remachar** el concreto agrietado con dovelas; sirve para disminuir el crecimiento de la grieta y para reforzar al elemento a cortante.
- **Agrandar la grieta y calafatear** con un sellador flexible o semirígido; es una opción que se puede utilizar en grietas activas para prevenir que se introduzca agua y reducir una posible corrosión. En este método la grieta se debe agrandar a una abertura de por lo menos 0.64 cm (1/4") hacia adentro trazando, ranurando, o cinceland; limpiando con un chorro de agua, arena o aire comprimido, y aplicando un sellador.

El comité ACI 224 señala los siguientes métodos que se utilizan para reparación de grietas:

- Inyección epóxica
- Trazado y sellado
- Puntadas y costuras
- Refuerzo adicional
- Perforado y tapado
- Sellador flexible
- Lechadas

En este trabajo nos enfocaremos solamente a la técnica de inyección epóxica para la reparación de grietas.

5.3.6 Inyección epóxica

La inyección epóxica es un procedimiento adecuado para la restauración de elementos de concreto o mampostería con daños no muy severos. Se usa cuando todavía es posible restablecer la resistencia a flexión y cortante del elemento.

Las grietas se inyectan para restablecer la resistencia original y restaurar, hasta cierto grado, la rigidez del elemento, aunque es difícil alcanzar los niveles que se tenían antes del daño. Con este procedimiento se puede llegar a recuperar la resistencia original, pero solamente el 70-80% de la rigidez inicial, debido a la imposibilidad de inyectar la totalidad de las grietas (Aguilar et al., 1996).

En muros de mampostería dañados con grietas de 0.5 a 3 mm de anchura se puede utilizar la inyección epóxica, pero es mejor utilizar un mortero cemento-arena, al cual se le agrega un aditivo expansivo para incrementar la adherencia (Breña, 1990).

Con la excepción de los epóxicos especializados, esta técnica no es aplicable si las grietas se están filtrando. Las grietas húmedas se pueden inyectar, pero los contaminantes (incluyendo agua) reducirán la efectividad del epóxico como reparación estructural de la grieta. Esta técnica se utiliza para anchuras de grietas desde 0.05 mm (ACI 224).

La inyección epóxica requiere de un alto grado de habilidad para lograr una ejecución satisfactoria, y la aplicación de la técnica puede limitarse por la temperatura ambiente. Los pasos básicos recomendados para la inyección de resinas son: limpieza, mezclado cuidadoso y seleccionar materiales epóxicos de calidad.

Características generales

La técnica de inyección de grietas con resinas presenta las siguientes características (León, 1991):

- En elementos de concreto, con grietas de 0.1 a 0.5 mm se deberán utilizar resinas puras y para lograr una buena penetración, es necesario tener una viscosidad baja (500 cp)
- Si las grietas son de 0.5 a 1.0 mm será necesario agregar un aditivo a la resina para reducir los efectos de flujo plástico, temperatura y las contracciones del concreto
- Para grietas de 1.0 a 1.5 mm es posible añadir a la resina, polvo de vidrio o cuarzo y para grietas de 1.5 a 5.0 mm se puede utilizar arena fina
- Una viscosidad baja, en un intervalo de 100 a 1000 cp y un tiempo de vida útil de la mezcla mayor que 4 h, es común en una penetración alta
- Cuando se presente desconchamiento del recubrimiento del concreto se puede emplear mortero epóxico
- Se ha cuestionado el empleo de resinas epóxicas cuando están expuestas a altas temperaturas, ya que pueden derretirse y perder sus propiedades
- Para que la penetración de la resina en las grietas sea adecuada, se debe controlar la viscosidad de la misma durante la inyección, de acuerdo con el espesor y profundidad de la grieta
- La inyección de resinas epóxicas no puede producir esfuerzos adicionales al elemento estructural, porque durante el proceso de inyección siempre existirán puntos de alivio de presión y eliminación de aire, que disiparán la presión, la cual es de aproximadamente 7 kg/cm². Este fenómeno se controla inyectando la resina desde la parte más baja hacia arriba, y permitiendo la liberación de energía por la perforación inmediata superior.

En la siguiente tabla se mencionan los niveles de recuperación que alcanzaron algunos elementos agrietados inyectados con resina, mortero epóxico o de cemento.

Tabla 5.7 Anchuras de grietas para la inyección de epóxicos (Ramírez, 1996)

Material	Anchura de grieta (mm)	Niveles de recuperación			Características
		Resistencia (%)	Rigidez (%)	Ductilidad (%)	
Resina epóxica	0.05-0.30	70-90	30-80	75-90	Sensibilidad a altas temperaturas. Difícil de utilizar con material poroso.
Mortero epóxico	0.30-0.50	70-90	30-80	75-90	Sensible a altas temperaturas
Mortero de cemento	> 0.50	80-120	50-100	80-90	Para elementos con pocas grietas grandes.

5.3.7 Métodos de inyección

La inyección de epóxicos se puede realizar con alguno de los siguientes métodos (French et al., 1990):

- ü Método a presión
- ü Método de impregnación al vacío.

1. Método a presión

Este método consiste en sellar la superficie de las grietas excepto los puertos que se hacen a lo largo de la grieta para que el epóxico sea inyectado bajo presión y que el aire salga por los vacíos. French et al., (1990) lo recomienda para grietas menores que ¼ pulg (6.4 mm).

Se ha observado en diversas investigaciones (French et al., 1990) que el comportamiento del espécimen reparado es satisfactorio excepto cuando se pretende restaurar la adherencia entre concreto y acero. La inyección a presión es un método efectivo para reparar daños sísmicos moderados.

Plecnik et al., (1986) señala que la temperatura, viscosidad y el tiempo de vida útil de la mezcla son factores más significativos en la penetración del epóxico que la presión de inyección.

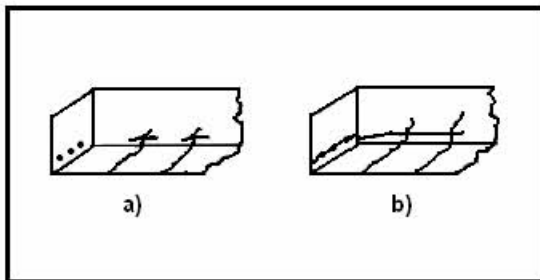


Fig. 5.1 Formación de grietas nuevas debido a presiones de inyección altas (Plecnik et al., 1986)

Estudios realizados (Plecnik et al., 1986) demostraron que las grietas transversales cerca del refuerzo longitudinal (fig 5.1), usualmente se pueden inyectar a presiones altas sin causar un nuevo daño al concreto, si el acero longitudinal puede resistir la fuerza de tensión adicional producida por la presión del epóxico.

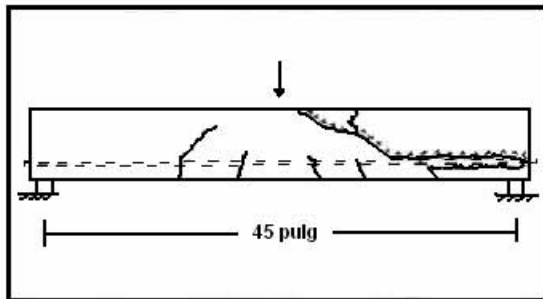


Fig. 5.2 Formación de grietas por cortante en una viga de concreto (Plechnik et al., 1986)

Y para grietas por cortante, como las mostradas en la fig. 5.2, las grietas más grandes (usualmente mayores que 0.13 cm) permitieron al epóxico penetrar fácilmente en las barras de refuerzo logrando una total adherencia en el refuerzo del concreto.

2. Método de impregnación al vacío

Inicialmente fue descubierto para reparar pilas de puentes con deterioro severo, en cuyo caso la inyección a presión tendía a volarse en las secciones de la pila. Con el proceso de impregnación al vacío, los pedazos de material son integrados a las regiones reparadas. La zona reparada se somete a un vacío parcial; el epóxico es vaciado a través del sistema hasta que esté completamente sumergido y, justo antes de que el epóxico seque, se realiza el vacío. La diferencia de presión entre el vacío y el sistema de evacuación empuja al epóxico a las grietas restantes y a los espacios vacíos (French et al., 1990).

Este método depende de la aplicación del vacío más que de la presión. Esta técnica tiene la ventaja de que no encierra aire como la inyección a presión. Pero esto no es un problema en la inyección a presión excepto cuando el concreto está saturado, cuando se tiene un material no poroso como el metal, o con fisuras en elementos de madera. Aun así, esta ventaja no es muy grande, especialmente si se considera que el aire atrapado puede orientarse a cualquier punto donde se genere vacío (Trout, 2006).

Este procedimiento no es muy utilizado, sin embargo, se ha aplicado con éxito en elementos con grietas finas muy numerosas, inyectándose individualmente cada una de ellas (Trout, 2006). Esta técnica se recomienda para reparar grandes zonas de daños, cuando el acceso a la zona de daño sea difícil (ya que es una técnica más fácil de modificar) y cuando se desee restaurar la adherencia entre acero y concreto (French et al., 1990).

5.3.8 Factores que influyen en la penetración de la resina epóxica

Estudios realizados (Plechnik et al., 1986) demuestran los factores que intervienen cuando se desea garantizar una buena penetración de la resina epóxica. Dichos factores son:

- ü Presión de inyección
- ü Temperatura del epóxico y del concreto
- ü Viscosidad del epóxico
- ü Tiempo de vida útil de la mezcla
- ü Propiedades de permeabilidad y capilaridad del epóxico
- ü Tamaño de la grieta.

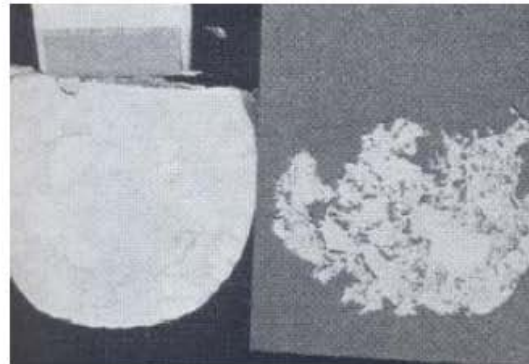
5.3.9 Procedimiento general de inyección

A continuación se presenta el procedimiento general de inyección epóxica recomendado por el comité ACI 224 y por Trout (2006).

1. Limpieza de las grietas: El primer paso a seguir en la reparación de grietas es limpiar las que estén contaminadas ya que obstruyen la penetración del epóxico y la adherencia. Según el comité ACI 224, el procedimiento más recomendable es limpiar la grieta con un chorro de agua u otro solvente efectivo (para retirar aceite o grasa) y esperar a que seque completamente.

Pero Trout (2006) difiere de esto, señalando que, aunque siempre se ha procurado la limpieza de las grietas utilizando solventes, detergentes, ácido o aire comprimido, esto raramente ha sido provechoso y en ocasiones generan más problemas de los que se tenían originalmente. Menciona que no se debe utilizar agua o ácido muriático como agentes de limpieza a chorro. El ácido muriático no retira suciedad, aceite u otro material detritus. Solamente retira la pasta de cemento. El rociado con agua o ácido, hace que las grietas se saturen y requieran días para secar. Si la superficie dentro de la grieta se satura al momento de la inyección, la resina inyectada se diluirá y se hará una película suave que no permitirá inyectar la grieta nuevamente (fig. 5.3).

Trout (2006) señala que los vacíos llenos de suciedad, arcilla, arena, y otras partículas se pueden inyectar a menudo con éxito porque la resina satura y encapsula el detritus actuando como un tapaporos (Fig. 5.4). Es por ello que Trout (2006) señala que quizás la mejor técnica de limpieza es rociar las grietas con resina durante el proceso de inyección.



5.3 Resina epóxica diluida con agua, formándose una película jabonosa sin ninguna propiedad (Trout, 2006)



5.4 La resina saturada con detritus dentro de las grietas inyectadas, con frecuencia alcanza las mismas resistencias que el concreto (Trout, 2006)

Se debe permitir que la resina fluya libremente a las boquillas alejadas hasta que esté libre de contaminantes, y después avance a la conexión para purgar la contaminación. Más allá de los resultados disponibles de este simple procedimiento, hay poco éxito documentado en la limpieza de grietas.

2. Sellado de la superficie: Una vez que se ha seleccionado el tipo de boquilla, la superficie de la grieta tiene que sellarse para permitir que el material de inyección penetre y evitar que el epóxico se escape antes de que haya gelificado.

El tipo de sellador (cinta, mortero, epóxico) dependerá de la presión que se utilice. El epóxico se recomienda para presiones altas. Antes de proceder a la inyección es preciso esperar hasta que la capa de sellado haya endurecido; en general, 24 horas es suficiente.

El ACI 224 señala que cuando se utilice una presión alta, la grieta se debe cortar a una profundidad de ½ pulg (13 mm) y un ancho de ¾ pulg (19 mm) en forma de V.

Técnicas de sellado

Generalmente se utilizan tres técnicas diferentes para el sellado de una grieta (Trout, 2006):

a) Relleno de la grieta (Fig. 5.5 a 5.7).- Esta técnica se puede utilizar cuando la grieta está limpia, libre de escombros, y con un ancho de al menos 1/16 pulg (1.6 mm). Si se cumplen dichas condiciones, éste es el mejor método, ya que no requiere ninguna preparación de la superficie, solamente el retiro de materiales contaminantes. Tampoco se requiere retirar el sello excedente después de la inyección, ni ninguna colocación tediosa para satisfacer un perfil mínimo, y no existe desperdicio de material.

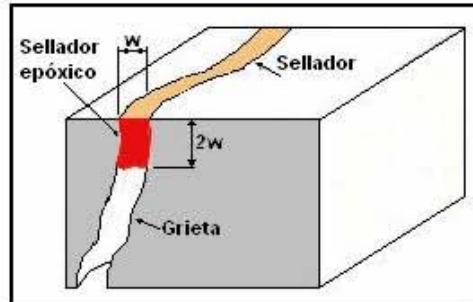


Fig. 5.5 Se debe considerar una profundidad de sellado de 2 veces el ancho de la grieta (Trout, 2005)



Fig. 5.6 La limpieza y anchura de esta grieta (> 2.2 mm) la hacen idónea para relleno (Trout, 2005)



Fig. 5.7 El relleno epóxico se coloca con una espátula de metal flexible (Trout, 2005)

El concreto debe estar completamente seco antes de colocar el sellador. El sellador debe colocarse a una profundidad mínima de dos veces el ancho de la grieta. Utilice una espátula para colocarlo y repita en ambas direcciones.

b) Perfilado de la grieta (Fig. 5.8 a 5.13).- Si la grieta es demasiado angosta o está contaminada para sellarla, se debe considerar el perfilado. Esta técnica es muy popular debido al llamado “fileteo de la grieta”, con discos de diamante que siguen la grieta, dejando un surco o ranura. Esta técnica es más eficiente si el agregado es relativamente ligero y las grietas no están dentadas.

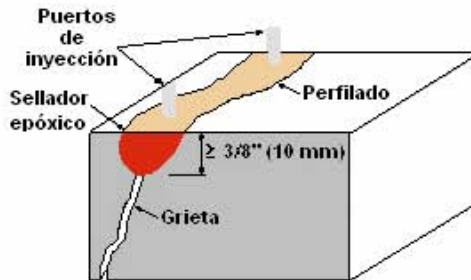


Fig. 5.8 Diagrama de un perfilado de grieta con el sellador y los puertos de inyección instalados (Trout, 2005)



Fig. 5.9 No es recomendable rellenar grietas muy angostas (Trout, 2005)



Fig. 5.10 Perfilado de una grieta con disco de diamante de 4 pulg (Trout, 2005)



Fig. 5.11 El perfilado evita la necesidad de retirar la pintura (Trout, 2005)



Fig. 5.12 Los puertos se colocan antes de aplicar el sellador (Trout, 2005)



Fig. 5.13 Se observa que no existe desperdicio en el sellado (Trout, 2005)

El perfilado es la preparación ideal para la inyección de grietas en superficies que están contaminadas y pintadas porque el proceso de perfilado expone superficie nueva, y limpia. Con esta técnica no hay necesidad de retirar protuberancias del sellador, es por ello que, si la apariencia es una prioridad, el perfilado es una buena opción.

El perfilado de la grieta se hace con un disco de diamante de 4 pulg, dejando una ranura de 3/8 pulg (10 mm) de profundidad mínima para exponer 1/2 pulg (12.7 mm) de la superficie para que el sellador se adhiera a cada lado de la grieta. La velocidad del aparato y la cantidad de presión utilizada dependerán de la profundidad de la grieta.

Se perfora y se colocan los adaptadores del puerto. Se aplica el adhesivo en la ranura con una espátula ancha y flexible y se termina al mismo nivel de la superficie. Generalmente requiere menos trabajo y más material. No existe desperdicio de material; solamente se utiliza lo necesario para sellar.

c) Sellar la grieta (Fig. 5.14 a 5.18).- Esta técnica se puede utilizar para la mayoría de las aplicaciones de inyección. Requiere de más material y trabajo que los otros métodos y con frecuencia es necesario retirar protuberancias (fig. 5.14). Una instalación adecuada permitirá presiones de inyección arriba de 800 psi (56 kg/cm²).

El espesor de la capa es muy importante para distribuir los esfuerzos en toda el área adherida. Si la capa es demasiado delgada, se romperá o pelará por la presión de inyección.

El concreto debe estar limpio, y seco. Generalmente un cepillado manual es suficiente para preparar la superficie (fig. 5.15). En otros casos se puede utilizar un chorro de arena u otros métodos.



Fig. 5.14 Se retira el exceso de protuberancias (Trout, 2006)

Existen muchas razones por las que el sellado falla (fig. 5.16), entre las que se encuentran las siguientes (Trout, 2006):

- Preparación inadecuada de la superficie
- Humedad o hielo en la superficie
- Inadecuada selección de los materiales
- Mal proporcionamiento de los componentes del sellador
- Mezcla inadecuada de los componentes del sellador
- Tiempo de curado insuficiente
- Sellador demasiado rígido para adherir
- Una cubierta o capa pobre.

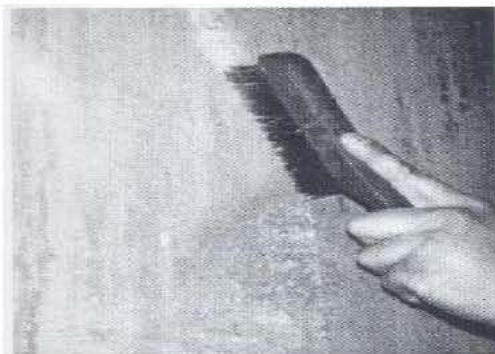


Fig. 5.15 Preparación de la superficie con un cepillado manual para posteriormente colocar la capa de sellado (Trout, 2006)

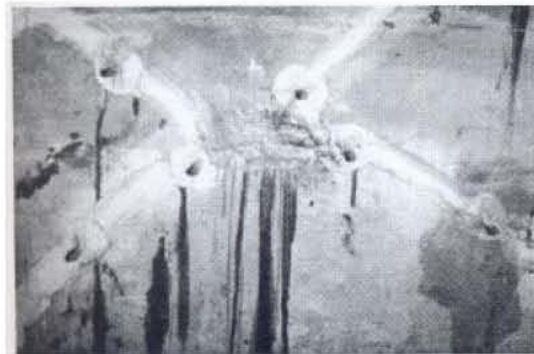


Fig. 5.16 Fugas del sellado como resultado de un trabajo descuidado ó por ignorancia del proceso (Trout, 2006)



Fig. 5.17 Se utiliza una brocha para aplicar la capa de sellado (Trout, 2005)



Fig. 5.18 Aplicación del sellador siguiendo puertos (Trout, 2005)

3. Instalación de los puertos de entrada (Fig. 5.19 y 5.20): Los puertos o boquillas sirven como entrada para aplicar la inyección epóxica. Se colocan a la vez que se hace el sellado, pues han de quedar unidos a la grieta por medio del sellador. Tienen que estar espaciados a lo largo de la grieta para proporcionar acceso al área por inyectar y para asegurar una penetración completa en la grieta antes de que el material fluya hacia fuera por el puerto adyacente.

Si una grieta es menor que 1/8 pulg (3 mm) de ancho, se recomienda sólo insertar un segmento del tubo (7.5 cm es suficiente) en la grieta. Los tubos y los accesorios que se conectan del equipo de inyección a la tubería están disponibles en diámetros de 1/8, 5/32 y 1/4 pulg (3, 4, y 6 mm).



Fig. 5.19 Las grietas mayores que 3 mm de ancho son candidatas para colocarles puertos de inserción (Trout, 2005)



Fig. 5.20 El puerto de inserción se fija con el material de sellado (Trout, 2005)

Localización de los puertos o boquillas

La separación de las boquillas dependerá del ancho y profundidad de la grieta, la viscosidad de la resina y la presión de inyección. Trout (2006) menciona que las boquillas deben estar separadas al menos 8 pulg (20 cm), (fig. 5.21). Esta separación permite que la resina penetre 4 pulg (10 cm) en cada dirección del puerto. Y el ACI 224 menciona que las distancias típicas entre boquillas es de 1 a 1.2 veces la profundidad del elemento.

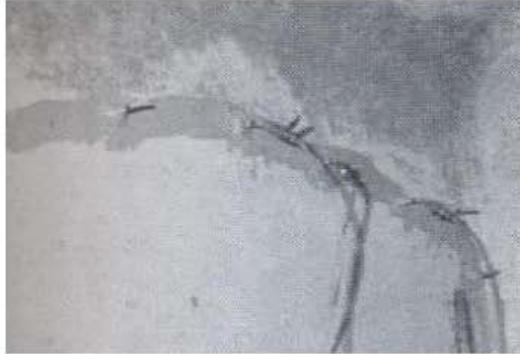


Fig. 5.21 La separación entre boquillas no necesita ser menor que 20 cm (Trout, 2006)

Otra opción es colocar las boquillas tan lejos como sea posible, disminuyendo el número de adaptadores de puertos, y por lo tanto, el costo, y el trabajo de colocación. En algunos casos, es necesario colocar boquillas en ambos lados del elemento, como en el caso de muros.

Se pueden utilizar muchos tipos de puertos de entrada (de plástico o metal). Cuando la grieta tiene bifurcaciones, es conveniente colocar una boquilla en cada punto de separación de las grietas (Romero, 1995).

Métodos para colocar puertos o boquillas

Trout (2006) señala cinco métodos para establecer puertos o boquillas:

- Choque
- Inserción
- Superficie
- Socket
- Puertos maestros

Choque.- Este método no requiere adaptadores. Se coloca una boquilla de ¼ pulg a la izquierda del sello y listo. Antes de que el sellador endurezca, se quita la cinta sobre la grieta para exponer la boquilla al puerto (fig. 5.22).



Fig. 5.23 Puerto tipo inserción (Trout, 2006)

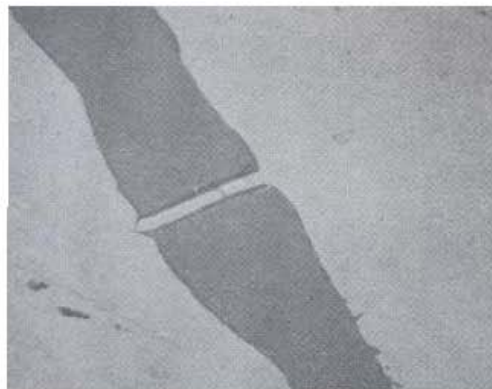


Fig. 5.22 Puerto tipo choque (Trout, 2006)

Inserción.- Es uno de los métodos más simples y estudiados. Consiste en insertar un tubo de nylon en la grieta (fig. 5.23). Tiene la desventaja que la grieta debe ser lo suficientemente ancha para poder introducir el segmento de tubo. Generalmente el tubo tiene un diámetro de 1/8 pulg y se coloca antes del sellado, asegurándose con el mismo. Ningún otro método es tan simple, seguro y económico.

Superficie.- Es el método más costoso y tedioso para establecer puertos, requiere de un trabajo intenso. Los adaptadores de superficie usualmente se aseguran al concreto, con el mismo sellador (fig. 5.24).

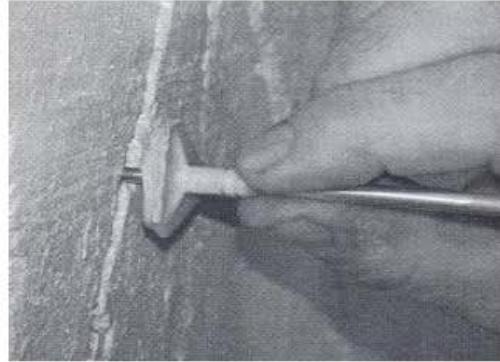


Fig. 5.24 Puerto tipo superficie (Trout, 2006)

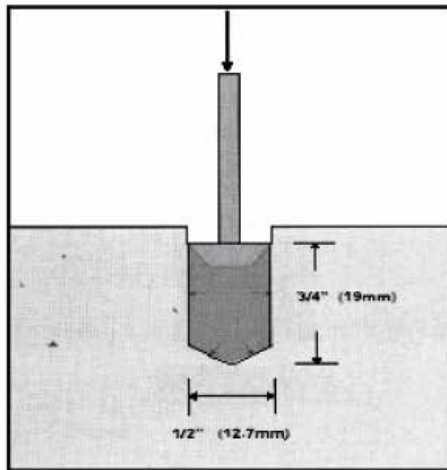


Fig. 5.25 Adaptador tipo socket (Trout, 2005)

Socket.- Son la única opción de establecer puertos si la grieta ha sido perfilada y no tiene el ancho suficiente para introducir un segmento de tubo. Los puertos tipo socket ofrecen una ventaja sobre los puertos tipo superficie ya que proporcionan un orificio más grande para un llenado más rápido (fig 5.25).



Fig. 5.26 Puerto maestro (Trout, 2006)

Puertos maestros.- Este método se utiliza cuando es necesario inyectar rápidamente grandes volúmenes de resina por orificios muy pequeños. Los puertos maestros son un socket de 2 pulg de diámetro y 6 pulg de profundidad (Fig. 5.26). Un segmento del tubo de nylon de 4 pulg se inserta en la parte inferior del socket, seguido de 3 ó 4 pulg de agregado, generalmente se usa grava. Es difícil hacer una recomendación de la separación de los puertos maestros ya que sus aplicaciones son muchas y muy variadas.

La instalación de un sistema de puertos maestros (fig. 5.27 a 5.29), separado de 0.6 a 1.5 m proporciona un aumento en la abertura de la grieta. La separación mínima se debe utilizar hasta que se adquiera experiencia con este método.

El procedimiento consiste en preparar la superficie, tal que sea rugosa y se aplica una resina epóxica de baja viscosidad. Después se inserta un segmento del tubo, saliendo algunos centímetros por encima de la superficie.

Cuando el sellador haya curado, se inyecta el primer puerto. La presión de inyección se aumenta gradualmente de 600 a 700 psi (42 a 49 kg/cm²), y se continúa por 5 minutos más hasta que se estabilice, entonces se pasa al siguiente puerto. Para mejores resultados, seleccione una resina con una viscosidad muy baja, no mayor que 125 cp.



Fig. 5.27 Los núcleos de 50 mm de diámetro son útiles para los puertos maestros (Trout, 2005)



Fig. 5.28 Se coloca el tubo de inyección, la grava y se tapa el puerto con mortero epóxico (Trout, 2005)



Fig. 5.29 Como preparación para sellar la grieta se aplica una capa de sellador entre puertos (Trout, 2005)

4. Mezclado del epóxico: Los componentes son premezclados según las instrucciones del fabricante, generalmente con el uso de un agitador mecánico, como una paleta con la que se mezcla la pintura. Para materiales con poco tiempo de vida útil se debe mezclar la cantidad exacta de material que se utilizará. Cuando el material comienza a gelificarse, sus características comienzan a cambiar, y la presión de inyección es más difícil. En el sistema de mezclado continuo, los dos adhesivos líquidos son medidos, llegan a las bombas y se mezclan automáticamente.

5. Inyección del epóxico: El equipo de inyección puede ser tan simple como una pistola de calafateo, o tan complejo como un sistema que efectúe la dosificación y la mezcla de los componentes de la resina en forma automática al momento de la inyección.

La presión utilizada dependerá de la anchura de la grieta y de la viscosidad del producto. Para grietas mayores que 0.5 mm de anchura se puede utilizar la inyección por gravedad. El incremento de presión con frecuencia acelera un poco el nivel de la inyección. De hecho, el uso de presión excesiva puede propagar las grietas existentes, causando un daño adicional.

Existen varios puntos importantes que se presentan durante el proceso de inyección que son convenientes tratar:

a) Donde comenzar la inyección: El comité ACI 224 señala que si la grieta es vertical o inclinada, el proceso de inyección debe comenzar bombeando el epóxico en el puerto de entrada inferior hasta que el nivel del epóxico alcance el puerto de entrada superior. El puerto de inyección inferior se cierra, y se repite el proceso hasta que la grieta este totalmente llena y se hayan cerrado todos los puertos.

Para las grietas horizontales, la inyección debe proceder a partir de un extremo a otro de la grieta de manera semejante. La grieta es llenada si puede mantenerse la presión. Si no puede mantenerse la presión, el epóxico todavía está fluyendo o se está escapando fuera de la grieta.

La inyección se hará siempre de abajo hacia arriba para expulsar el aire que pudiera estar atrapado. Cuando empieza a emanar el producto inyectado en la siguiente perforación, se suspende la inyección, se cierra la primera perforación, se continúa en el siguiente orificio de la misma forma, y así sucesivamente, hasta terminar en la última perforación. Este es un ejemplo general pero no todas las grietas en el concreto son tan comunes.

Trout (2006) señala que, en la práctica, la inyección raramente comienza en un extremo de la grieta, debido a que pocas grietas tienen un ancho uniforme, y los mejores y más rápidos resultados se obtienen inyectando primeramente el segmento más ancho de la grieta, donde sea que ocurra.

Cuando no se vea emanar la resina en el siguiente orificio, se puede barrenar en un punto intermedio para tener la seguridad de que se está inyectando toda la grieta. Siempre se debe proteger la resina en caso de incendio y evitar que el fuego llegue directamente a ella, ya que si esto ocurriera se produciría un debilitamiento en la zona inyectada.

b) Presión de inyección: En la inyección con presiones bajas los sistemas inyectan de 1 a 15 lb/pulg² (0.07-1.0 kg/cm²) para alcanzar resultados que con frecuencia son equivalentes a los obtenidos en sistemas con presiones altas.

A diferencia de los sistemas de presión alta, los de baja presión no incluyen un dispositivo proporcionador de la mezcla; ésta se hace de forma manual (proporcionamiento y mezclado). La selección de la resina es muy importante para estos dispositivos.

Cuando se deseen penetraciones con presiones muy bajas, la resina debe ser de ultra-baja viscosidad (menores que 100 cp).

Es común utilizar dos sistemas de presión baja. El primero comprende un pedestal como puerto y una cápsula como depósito. El otro sistema utiliza pedestales similares pero difiere del primero por tener un solo depósito que provee a los puertos a través de tubos de plástico que están conectados a una serie de puertos, como las luces de un árbol de navidad (fig. 5.30).

La facilidad y su bajo costo inicial son algunas de las ventajas de estos sistemas, ya que no requieren ningún surtidor sofisticado y poco entrenamiento técnico (Trout, 2006).

Trout señala que se debe inyectar a una presión tan alta como la resistencia del sellador, los adaptadores de puerto y el surtidor lo permitan. Existen dos razones para ello. La primera, es que las presiones altas hacen que la resina fluya más rápidamente en los vacíos. Y la segunda, cuanto más alta sea la presión, se obtiene una mejor adherencia ya que la resina impregnará más profundamente al concreto.

Las presiones utilizadas para aplicaciones comunes son de 400 a 500 psi (28 a 35 kg/cm²). Siendo el intervalo más común de 100 a 300 psi (7 a 21 kg/cm²). Las presiones altas (300 a 500 psi) son menos riesgosas cuando se inyectan grietas finas,

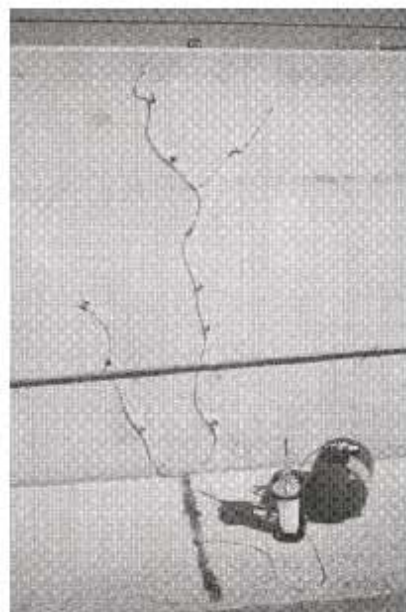


Fig. 5.30 Sistema de presión baja para inyectar varios puertos al mismo tiempo con un depósito (Trout, 2006)

ya que la fuerza ejercida contra el sellado es mínima debido a lo angosto de la grieta (Trout, 2006).

Aunque el sellado e instalación de los adaptadores de puertos pueden soportar presiones de inyección mayores que 900 psi (63 kg/cm²), raramente se utilizan para inyección de resinas con baja viscosidad ya que existen pocos surtidores capaces de proporcionar presiones tan altas y también porque el sellado nunca es perfecto.

Aunque generalmente la presión que se utiliza en la inyección de resinas es de 350 psi (25 kg/cm²), también puede llegar a ser de 50 psi (3.5 kg/cm²), pero las presiones altas llenan los vacíos mucho más rápido. Por ejemplo, a 350 psi (25 kg/cm²), la grieta se llenará mucho más rápido que a 50 ó 100 psi (3.5 a 7 kg/cm²).

Aunque utilizar presiones altas produce un trabajo más breve y rentable, los contratistas en general inyectan a presiones menores que 300 psi (21 kg/cm²), ya que no pueden lograr la instalación de puertos y un sellado sin fugas. Por lo tanto, la mayoría de los trabajos de inyección se llevan a cabo a presiones de 100 psi (7 kg/cm²), o menores.

c) Duración de la inyección: Antes de llegar al punto de rechazo (es el punto en el cual no se acepta más resina en el puerto), la inyección debe continuar aunque la resina aparezca en un puerto o puertos adyacentes (fig. 5.31).

Una vez que se llegue al punto de rechazo, la inyección debe continuar otro minuto más para asegurar que penetre en las micro grietas (Trout, 2006).

Trout no recomienda la estrategia de puerto a puerto cuando las grietas inyectadas son ocasionadas por contracción por secado (el tipo más común) o por esfuerzos térmicos. Estas grietas casi siempre son más anchas en la superficie que hacia adentro debido a la rápida pérdida de humedad en la superficie durante el curado (fig. 5.32).



Fig. 5.31 El punto de rechazo ó cese del fluido en el puerto, se indica cuando la presión en la línea del surtidor se estabiliza (Trout. 2006)

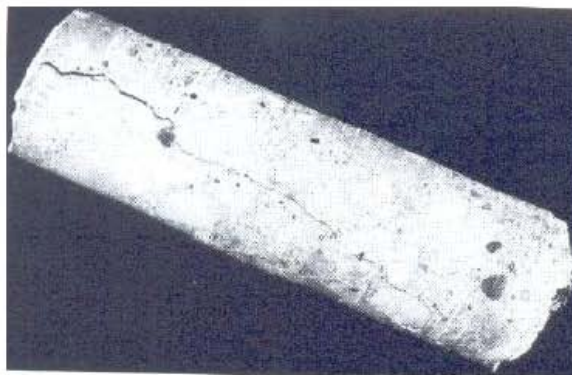


Fig. 5.32 Las grietas de contracción por secado usualmente son más anchas en la superficie que hacia adentro (Trout, 2006)

d) ¿Cuándo se debe parar la inyección?: Una regla común es considerar que la grieta entre dos puertos adyacentes está llena cuando el epóxico sale por el otro puerto. Trout, sin embargo, está en desacuerdo. Explica que el criterio de puerto a puerto no aplica para la inyección de grietas por contracción. La regla de puerto a puerto trabaja bastante bien con la inyección de gel, pero para reparaciones comunes se utilizan resinas de baja viscosidad.

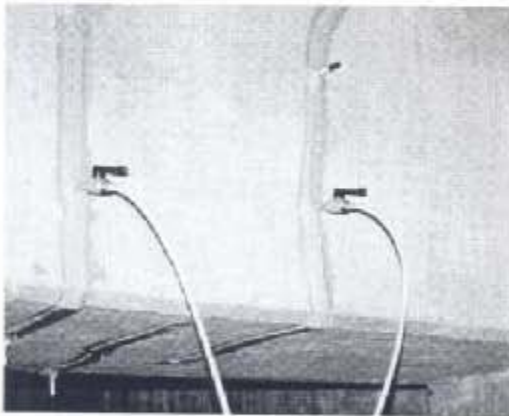
Trout recomienda que para grietas de 0.2 mm de ancho, la inyección debe continuar hasta el punto de rechazo. El hecho de que la resina fluya por los puertos adyacentes se debe tomar simplemente como evidencia de que se está procediendo correctamente.

Para grietas de anchura menor que 0.2 mm la situación es más complicada, ya que el volumen de fluido es demasiado pequeño, y el llenado de estas grietas toma mucho tiempo, y es difícil determinar el punto de rechazo. Para que el trabajo sea exitoso, se requiere personal especializado.

Si la grieta penetra completamente en el elemento, la inyección se puede detener cuando la resina aparece en el puerto opuesto. Pero si la grieta no es muy profunda, el extremo opuesto del elemento no es accesible, y por lo tanto, el operador debe estimar cual es la duración adecuada (Trout, 2006).

Si se tiene suficiente experiencia, se sabe que para llenar una grieta de 0.23 mm, en un muro de 20 cm, con una resina de viscosidad de 160 c.p. a una temperatura de 23°C, tomará aproximadamente 5 minutos.

e) Inyección en puertos múltiples (fig. 5.33 y 5.34): Los puertos múltiples no necesariamente mejoran los resultados de la inyección. Se puede conseguir la misma penetración inyectando un puerto a la vez, pero lo hace más rentable.



La aplicación más simple de los puertos múltiples son dos o tres líneas de surtidores (fig. 5.33). Las líneas largas permiten la inyección de grietas separadas o en puertos adyacentes.

El número de puertos múltiples que un operador puede manejar es directamente proporcional a la duración de la inyección. Por ejemplo, si se requieren 10 minutos, un operador es capaz de manejar hasta nueve puertos.

Fig. 5.33 Inyección en múltiples puertos con dos líneas de producción separadas (Trout, 2006)

En lugar de inyectar un puerto a la vez, se puede inyectar simultáneamente numerosos puertos. Comúnmente se inyectan nueve puertos (en ocasiones no menos de 12) al mismo tiempo (fig. 5.34).

Un contratista no puede permitirse durar en cada puerto 8 minutos, pero si los puertos múltiples son con seis líneas, ese tiempo es apropiado.

f) Fugas del sellado (Fig. 5.35): La mayoría de las fugas ocurre porque el epóxico no consigue una adherencia con el concreto. Esto se puede mejorar humedeciendo el sustrato, además tallar la superficie con un cepillo de alambre también mejora el trabajo del sellador en la grieta.

Cuando ocurre una gran fuga del sellado, inmediatamente se deben tomar medidas para minimizar la interrupción y evitar pérdidas de resina. Se debe detener la inyección para poder valorar el problema. Si la fuga es tan pequeña que la resina no fluye a menos que sea bajo presión, no afectará el resultado final.

Las fugas se deben reparar antes y no durante el proceso de inyección. Antes de la inyección, se tapan temporalmente todos los adaptadores de puerto, entonces se inyecta aire a altas presiones en cada décimo puerto.

Cualquier filtración grande permite que la resina se escape y ventile el suficiente aire para ser sentido con la mano. Corregir las fugas repararlas con un epóxico, y continuar con el proceso de inyección.



Fig. 5.34 Los puertos múltiples permiten inyectar varios puertos de la misma grieta (Trout, 2005)



Fig. 5.35 Las fugas en el sellado de la grieta se localizan rápidamente inyectando aire en la grieta (Trout, 2005)

g) Utilizar un hidratante (Fig. 5.36 a 5.38): Cuando se aplica un epóxico en gel o pasta, frecuentemente es difícil colocarlo antes que endurezca. Ya que la resistencia a la adherencia del epóxico endurecido se reduce significativamente, lo cual es un problema serio. La mayoría de las fugas ocurren por esta razón. El problema es eliminado colocando al adhesivo un hidratante.

h) Grietas del sellado: Esto es muy común que ocurra con los cambios bruscos de temperatura, por ejemplo, cuando se tienen días soleados con noches frías, la superficie de concreto se contrae, tendiendo a ensanchar las grietas.

6. Retiro del sello superficial: Después de que la inyección epóxica haya curado, se debe retirar el sello superficial.

7. Control de calidad (Fig. 5.39): El control de calidad en campo es muy importante. No existen métodos exactos para verificar que la grieta se haya llenado correctamente, con excepción de pruebas destructivas, tales como la extracción de núcleos (Trout, 2005).

El control de calidad en campo depende de los siguientes criterios:

- La experiencia del personal para aplicar la técnica adecuada
- Conocer si el material de inyección es el adecuado y está mezclado correctamente (antes de la inyección)
- Que el equipo funcione correctamente
- La temperatura debe estar dentro de las normas recomendadas para un curado apropiado
- Limpieza de las caras de las grietas.



Fig. 5.36 Una preparación manual de la resina ocasiona mayores desperdicios (Trout, 2005)

Fig. 5.38 Se puede utilizar una manguera junto con el hidratante para aplicar el epóxico directamente en la grieta (Trout, 2005)



Fig. 5.37 Un hidratante proporciona frescura, bien dosificado, y mezclado con el epóxico (Trout, 2005)



Para lograr un buen control de calidad de la inyección es necesario tomar núcleos. Sin estas muestras, no es posible saber si el trabajo realizado fue el adecuado.

La obtención de núcleos de concreto para probar la continuidad en el elemento inyectado, ha dado excelentes resultados en pruebas a compresión.

Además, se ha demostrado que dicho núcleo se rompe por todas partes, menos donde se ha hecho la unión (ya que se forma un “cordón de soldadura”).



Fig. 5.39 Núcleos de concreto tomados después de terminar la inyección (Trout, 2005)

5.4 Ficha técnica

A continuación se presenta la ficha técnica del proceso de inyección.

6. ENCAMISADO

Se utiliza cuando el elemento está muy dañado y requiere una mayor capacidad resistente, aumentando para ello su sección transversal mediante elementos que rodean al anterior. Debido al aumento en la sección de la columna, la resistencia axial, flexión y cortante, se incrementan. El encamisado no sólo permite reparar elementos, sino que logra aumentar su resistencia y rigidez originales. Es por ello, que a esta técnica también se le considera como un método de refuerzo.

El encamisado puede ser de concreto, acero, o de láminas sintéticas reforzadas con fibras (por sus siglas en inglés, FRP). Esta técnica requiere que se hagan pocas modificaciones a las cimentaciones existentes.

6.1 Generalidades

Por sismos pasados se sabe que, en general, las columnas fallan por cortante y, en consecuencia, debe mejorarse su ductilidad y resistencia. Esto se puede lograr asegurando que el elemento ceda por flexión antes de que falle por cortante. En la fig 4.4 se ilustran algunas técnicas para incrementar la capacidad a cortante de una columna vulnerable.

El encamisado se puede colocar en toda la longitud del elemento o sólo en una parte; a estos últimos se les llama collares. Los collares son camisas que cubren sólo una parte de la columna, se utilizan para proporcionar apoyo incrementando la losa o viga en la parte superior de la columna. Los collares proporcionan capiteles a las columnas existentes para que soporten la losa de entrepiso. El collar proporciona a la losa una mayor capacidad a cortante y disminuye la longitud efectiva de la columna (ACI 546-96).

Esta técnica requiere que el concreto dañado sea retirado en su totalidad, que se reparen las grietas y la superficie dañada, para que el material nuevo se adhiera a la estructura existente. En México, usualmente se utiliza concreto premezclado lo que implica el uso de cimbra. En la práctica mexicana, el concreto lanzado ha sido raramente utilizado (Terán and Ruiz, 1992). El diseño de la cimbra es muy importante para facilitar el proceso de colado y vibrado del concreto. Las cimbras utilizadas pueden ser temporales o permanentes, de madera, metal corrugado, concreto premoldeado, hule, fibra de vidrio, o de tela especial, dependiendo de lo que se desee (ACI 546-96).

6.2 Encamisado de concreto reforzado

Después del sismo de 1985, una de las técnicas utilizadas para la reparación y rehabilitación de estructuras en la ciudad de México, fue el encamisado de elementos con concreto reforzado. Esta técnica tiene como objetivo principal incrementar la capacidad sísmica de la estructura. Dependiendo del tipo de encamisado que se utilice, se puede obtener un incremento en resistencia, rigidez, ductilidad o una combinación de ellas (Terán and Ruiz, 1992).

Las principales dificultades de esta técnica es proporcionar continuidad al refuerzo longitudinal, y confinar el núcleo de concreto (Jirsa, 1987).

El encamisado de concreto es preferible colocarlo en todas las caras del elemento, pero muchas veces no se tiene acceso y por ello se aplica solamente en una, dos o tres caras (ACI 369-06).

Consideraciones constructivas

Cuando se utiliza esta técnica de rehabilitación se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos constructivos (ACI 369-06):

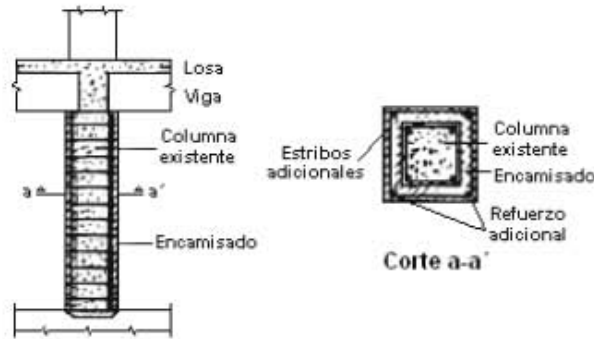
- La superficie del elemento debe estar limpia y rugosa para garantizar una buena adherencia entre el concreto nuevo y el existente, promoviendo con ello, un comportamiento monolítico.
- El revenimiento y el tamaño máximo del agregado grueso serán de acuerdo con la separación mínima del refuerzo y la distancia mínima entre la cimbra y el concreto existente.
- En columnas, el refuerzo longitudinal debe extenderse a través de la losa de entrepiso, para proporcionar continuidad e incrementar la resistencia a flexión en los extremos del elemento.
- Cuando el encamisado no sea completo, deberá verificarse la necesidad de colocar elementos de conexión que garanticen la transmisión de los esfuerzos cortantes entre el encamisado y el elemento por reforzar.
- Para garantizar un comportamiento monolítico del elemento encamisado, es necesario tener un adecuado mecanismo de transferencia de cortante en la zona de contacto entre el encamisado y el elemento existente, tal que evite el movimiento relativo entre ambos concretos.

Consideraciones de análisis y diseño del encamisado

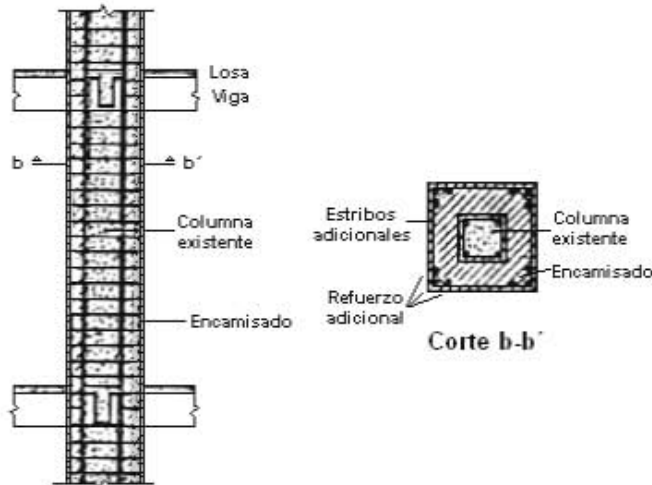
Al utilizar el encamisado de concreto como técnica de rehabilitación se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos en su análisis y diseño (ACI 369-06, Terán and Ruiz, 1992):

- Los elementos encamisados se pueden analizar como elementos compuestos suponiendo una perfecta adherencia entre el concreto nuevo y el existente, siempre que se asegure un comportamiento monolítico.
- Si sólo se encamisa la columna en el entrepiso (fig. 6.1) se obtiene un incremento en resistencia ante carga axial y fuerza cortante, y un comportamiento dúctil, pero no se altera la resistencia original a flexión.
- Para incrementar la resistencia a flexión es necesario extender el encamisado a través de la losa, prolongando el acero longitudinal y añadiendo algunos estribos que atraviesen el alma de las vigas (fig. 6.2).
- Cuando existen restricciones de espacio, es posible encamisar uno, dos o tres lados únicamente (Fig. 6.3). En tal caso se puede recurrir al uso de ganchos (fig. 6.4a), estribos soldados (fig. 6.4b) o conectores entre el refuerzo longitudinal (fig.6.4c).
- Si la columna es de sección rectangular el refuerzo se concentra cerca de las esquinas para permitir confinarlo con estribos, o bien se distribuye de manera uniforme uniendo el refuerzo nuevo al existente mediante conectores soldados.
- Para el diseño de un proyecto de encamisado se recomienda usar un factor de comportamiento sísmico de Q bajo, debido a las incertidumbres en el comportamiento sísmico de los elementos encamisados, así como la imposibilidad, en la mayoría de los casos, de proporcionar un adecuado detallado del encamisado (especialmente en uniones). En la práctica mexicana se utilizan valores de Q entre 2 y 3.
- Como en todo proyecto de reforzamiento, en el diseño del encamisado, se debe considerar una probable redistribución de las cargas en la estructura, posibles cambios en los mecanismos de falla, y un cambio en las propiedades dinámicas de la estructura.
- Si bien existe incertidumbre en la distribución de las cargas entre el elemento existente y el encamisado, un análisis suponiendo un comportamiento monolítico entre el encamisado y el elemento existente proporciona un resultado razonable para el diseño.
- Para obtener las propiedades geométricas de los elementos, se puede utilizar el método de la sección transformada equivalente. Si existe daño previo en el

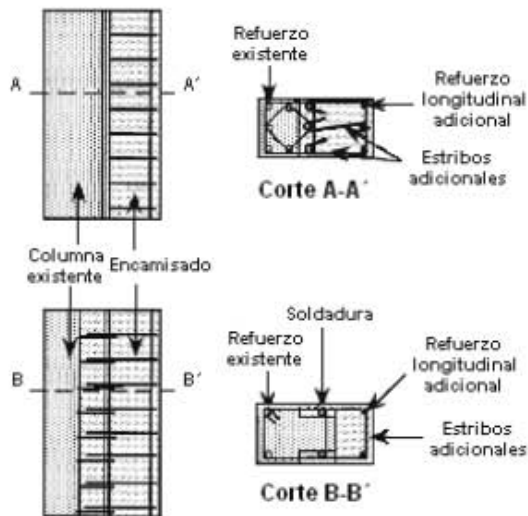
elemento existente, es recomendable ignorar la contribución de la rigidez del elemento encamisado.



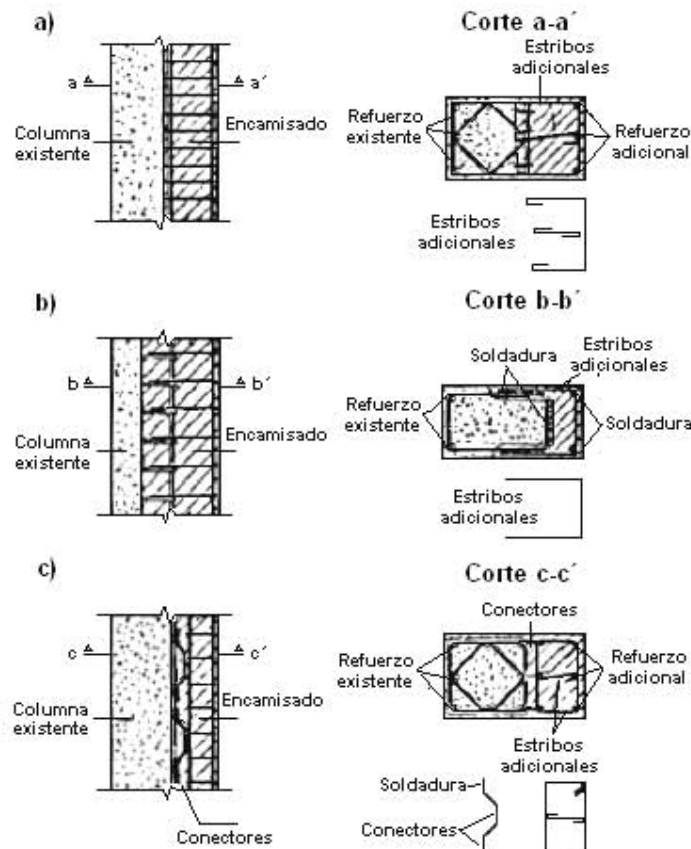
6.1 Encamisado de una columna hasta el entrepiso (UNDP/UNIDO, 1983)



6.2 Encamisado de una columna hasta la losa (UNDP/UNIDO, 1983)



6.3 Encamisado en una cara de la columna (Aguilar et al., 1996)



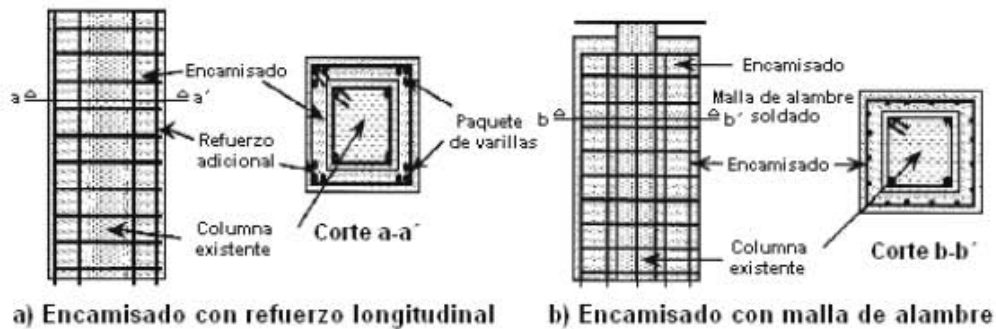
6.4 Encamisado parcial de columnas (UNDP/UNIDO, 1983)

6.2.1 Encamisado de columnas

Para prevenir un mecanismo de piso durante un sismo, las columnas nunca deben ser los elementos más débiles de un edificio. La respuesta de una columna es controlada por una combinación de carga axial, flexión, y fuerza cortante.

Esta técnica consiste en envolverlas con barras y estribos adicionales o con malla electrosoldada y añadir un nuevo recubrimiento de concreto lanzado o premezclado. El encamisado con malla electrosoldada es una técnica muy popular para prevenir la falla por cortante en columnas (fig. 6.5). Se utiliza para incrementar la capacidad a cortante de la columna, intentando así, lograr un mecanismo columna fuerte-viga débil. Estudios experimentales demuestran que este tipo de encamisado presenta excelentes resultados en el intervalo inelástico (Ohkubo, 1991).

En esta técnica de reforzamiento, el objetivo es prevenir la falla por cortante de la columna e incrementar la ductilidad, o incrementar la resistencia a flexión para así incrementar el desempeño sísmico del edificio (fig. 6.6).

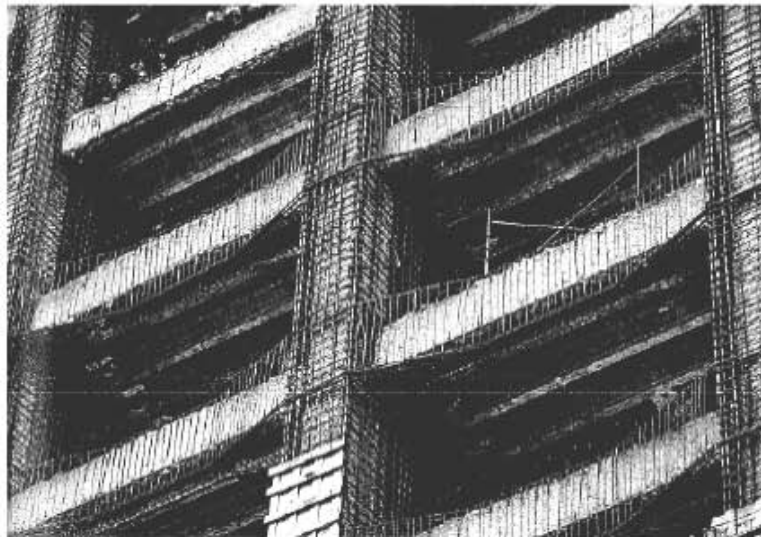


6.5 Encamisado de columnas (Aguilar et al., 1996)

Recomendaciones del UNDP/UNIDO (1983) para el encamisado de columnas con concreto reforzado

A continuación se presentan algunas recomendaciones cuando se utiliza esta técnica de rehabilitación:

- Si es posible, se deben encamisar los cuatro lados de la columna
- Para el diseño, se supone un comportamiento monolítico de las columnas compuestas
- El espesor mínimo del encamisado debe ser de 10 cm para concreto premezclado y de 4 cm para concreto lanzado
- La cuantía de refuerzo del encamisado con respecto al área encamisada debe estar limitado entre 0.015 y 0.04, y por lo menos, se deben utilizar barras del #5 en cada esquina de los cuatro lados del encamisado
- La resistencia a compresión ($f'c$) del concreto nuevo debe ser mayor que la del concreto existente por 50 kg/cm².



6.6 Encamisado de columna y viga (Aguilar et al., 1996)

6.2.2 Encamisado de vigas

Las vigas se encamisán para diversos propósitos (Terán and Ruiz, 1992): para dar continuidad al encamisado de columnas, incrementar la resistencia y rigidez de la estructura y para tratar de inducir una curvatura doble en el comportamiento de la columna (lo cual, en la mayoría de los casos, podría reducir la resistencia última de las columnas en los pisos superiores comparado con las estructuras sin vigas rígidas).

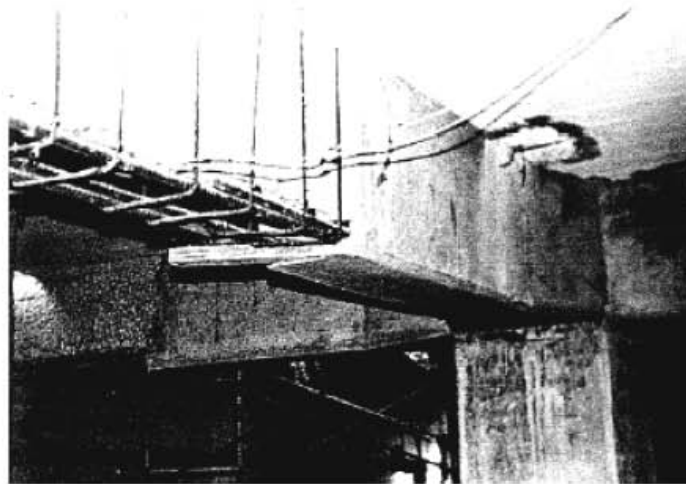
El encamisado de vigas incrementa la capacidad a flexión y cortante (fig. 6.7). Si solamente se quiere incrementar la resistencia a flexión positiva (ACI 369-06), el encamisado se coloca en la cara inferior de la viga (fig. 6.8). Si el encamisado se coloca en tres o cuatro caras de la viga, se incrementa la resistencia a momento positivo y negativo, así como la resistencia a cortante. El encamisado se debe extender sobre toda la longitud de la viga, y el refuerzo longitudinal debe ser continuo. Esto se puede lograr pasando el refuerzo adicional a través de la unión viga-columna (ACI 369-06).

En la práctica mexicana se utilizan encamisados en tres (fig. 6.9) y cuatro lados de la viga (Terán and Ruiz, 1992). En diversas ocasiones, es necesario perforar la losa para permitir el colado del concreto y el paso de los estribos.

Recomendaciones del UNDP/UNIDO (1983) para encamisado de vigas con concreto reforzado

A continuación se presentan algunas recomendaciones cuando se utiliza esta técnica de rehabilitación:

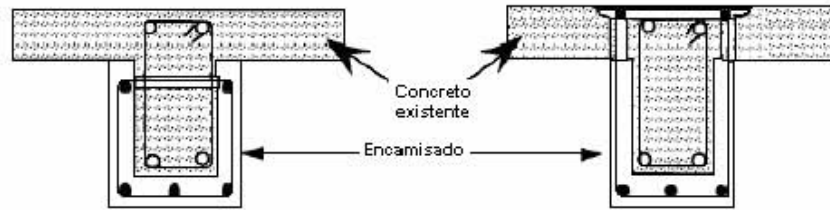
- Las vigas deben ser encamisadas a lo largo de toda su longitud
- Se debe utilizar un espesor mínimo de encamisado de 8 cm si es concreto premezclado y de 4 cm si es concreto lanzado
- Cuando la cuantía de refuerzo longitudinal del elemento existente no se conoce, la cuantía de acero del encamisado se debe limitar al 50% del área total de la sección compuesta.



6.7 Encamisado de viga (Aguilar et al., 1996)



6.8 Encamisado inferior de una viga (Aguilar et al., 1996)



**6.9 Encamisado de tres o cuatro caras de la viga
(Aguilar et al., 1996)**

6.3 Encamisado con elementos de acero

Los diferentes tipos de elementos de acero se pueden clasificar en: barras, placas, y secciones roladas (ángulos, tubos, canales, etc.). Las formas más comunes del encamisado de acero son: circular, elíptico, y rectangular (Aboutaha, 1996).

El encamisado de acero se puede efectuar mediante perfiles unidos entre sí con soleras o varillas soldadas, o bien, a base de placas. Las placas de acero se pegan a la superficie de concreto logrando una sección compuesta (León, 1991). En ambos casos se requiere especial atención en el diseño de la unión con la losa, que puede resolverse mediante un collar de acero alrededor de la columna.

El encamisado de acero presenta mayores ventajas que el de concreto, ya que su aplicación es directa y no es necesaria la colocación de cimbra. Pero la dificultad de prolongar el encamisado de acero a través de la losa limita su efectividad en cuanto a resistencia axial y cortante, así como la ductilidad de la columna, sin modificar la resistencia a flexión en los extremos.

El encamisado de acero se ha utilizado mucho para rehabilitar estructuras pero existen pocos datos disponibles sobre su eficacia, particularmente su funcionamiento en uniones (ACI 369-06).

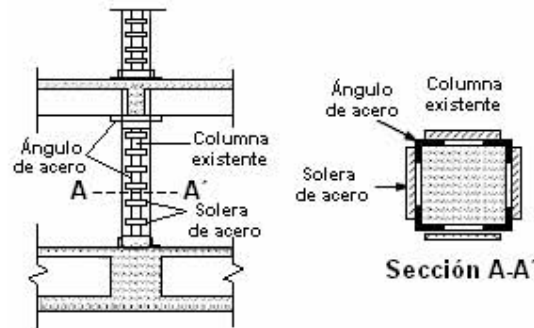
Consideraciones constructivas

Aboutaha (1996) señala algunos aspectos que se deben considerar cuando se utiliza el encamisado de acero como técnica de rehabilitación:

- El primer paso es preparar la superficie del elemento; esto implica remover el concreto dañado y limpiar la superficie expuesta de concreto y acero. El propósito de esto es que exista una adecuada adherencia entre el material nuevo y el existente.
- Después se coloca el encamisado de acero. El espacio existente entre la camisa y el elemento es llenado con material, que puede ser, concreto con cemento pórtland o modificado con polímeros, epóxicos, o látex.
- Se ha encontrado que el uso de encamisados rectangulares es menos efectivo que el circular o elíptico debido a la carencia de presión de confinamiento.

6.3.1 Encamisado de columnas

El uso de ángulos de acero en cada esquina de la columna unidos a placas soldadas o barras es un procedimiento común cuando se encamisán columnas con elementos de acero (fig. 6.10). Las placas son soldadas horizontalmente en toda la altura de la columna o diagonalmente formando una armadura vertical. Los vacíos entre el elemento de acero y la columna de concreto son sellados con morteros o lechadas para asegurar un confinamiento uniforme (Aguilar et al., 1996).

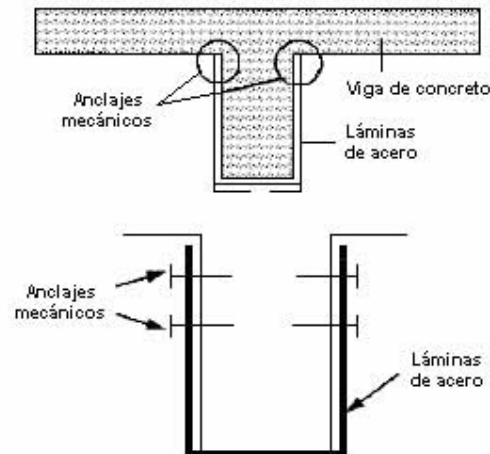


6.10 Encamisado de acero de una columna (Aguilar et al., 1996)

Los elementos de acero de la columna son conectados a la losa utilizando un collar de acero alrededor de la columna. Si la columna está a compresión, las fuerzas se transfieren directamente al collar. El collar distribuye los esfuerzos en la conexión losa-columna para evitar una falla por punzonamiento de la losa debido al cortante (Aguilar et al., 1996). Si la sección está en tensión, pueden colocarse pernos en la losa para proporcionar continuidad.

6.3.2 Encamisado de vigas y losas

Las placas de acero y soleras se utilizan para aumentar la resistencia a flexión y cortante de losas y vigas (fig 6.11). Los elementos de acero se adhieren a la superficie del concreto utilizando resinas. Si la placa se coloca en la parte inferior de la viga se incrementa la capacidad a flexión, mientras que la unión de placas o soleras en los lados mejoran la fuerza cortante (Aguilar et al., 1996).



6.11 Encamisado de acero de una viga (Aguilar et al., 1996)

6.4 Encamisado con láminas sintéticas reforzadas con fibras (FRP)

Los materiales compuestos (fiber reinforced polymers, por sus siglas en inglés FRP) son una combinación de fibras de carbono o vidrio y una matriz epóxica. Las fibras son las que aportan la capacidad de carga mientras que la matriz epóxica sirve para unir las fibras entre sí, permitiendo la transferencia de cargas entre ellas y además las protege del medio ambiente.

Estos materiales originalmente se utilizaban en la industria aeroespacial; en la actualidad se le han encontrado aplicaciones prácticas en la reparación de estructuras. En Europa y Japón se han utilizado las fibras de carbono en diversas aplicaciones de

rehabilitación y refuerzo estructural. Los sistemas compuestos más utilizados en la industria de la construcción son las fibras de vidrio o de carbono cubiertas con epóxicos o poliéster (ACI 369-06).

El encamisado con FRP se utiliza para aumentar la resistencia a cortante y para mejorar el confinamiento en la zona plástica de las columnas. Los objetivos del encamisado con FRP son: reforzamiento a cortante, reforzamiento a flexión, reforzamiento a compresión (por ductilidad), y mejorar la durabilidad.

Las características de resistencia y rigidez de estos materiales generalmente son controladas por la orientación y el tipo de fibra utilizados en la mezcla. Por lo tanto, la orientación de la fibra es un parámetro importante que se debe controlar para prevenir esfuerzos indeseables en un elemento. Los materiales compuestos tienen en dirección de la fibra una resistencia y rigidez muy alta, así como un comportamiento excepcional a la fatiga, mejor que la del acero y además su peso es muy bajo. Las fibras están colocadas en dirección longitudinal correspondiendo a la dirección de la sollicitación, de esta forma la lámina tiene una estructura unidireccional (ACI 369-06).

Ventajas

Algunas propiedades de las láminas sintéticas reforzadas con fibras que las hacen útiles en aplicaciones estructurales son (Aboutaha, 1996):

- Resistencia y rigidez alta en proporción a su peso
- Resistencia a la corrosión de ácidos y a cambios bruscos de temperatura
- Buena resistencia a la fatiga
- Características de expansión térmica controlable
- Cortos periodos de construcción
- Se requiere menos equipo y mano de obra, reduciendo así el costo de instalación
- No hay cambios en el tamaño de la sección, peso o rigidez del elemento
- Mejora la durabilidad del elemento
- Tiene una excelente resistencia a la fluencia plástica. En todos los casos las características mecánicas son determinadas por el tipo de fibra y por el contenido en volumen de fibras.

Limitaciones

Las limitantes que presenta son (Aboutaha, 1996):

- No se conocen los efectos de exposición ambiental a largo plazo y a la fatiga
- La resistencia en dirección transversal a las fibras así como la resistencia a cortante son bajas
- El reforzamiento con este método no cambia la rigidez de la estructura, lo cual es importante en el aspecto sísmico

Aplicaciones

Entre las aplicaciones estructurales de estos materiales se encuentran las siguientes (Cottier, 2000):

- Vigas de concreto
- Muros de concreto y mampostería
- Columnas y pilas
- Tubería y túneles
- Silos y tanques
- Chimeneas
- Exterior de las losas

6.4.1 Tipos de fibras

Existen diversos tipos de fibras las cuales pueden ser utilizados en FRC incluyendo; la de carbono, vidrio, boro, aramido. A continuación se describen cada una de ellas (Aboutaha, 1996):

Fibra de vidrio: Es la más utilizada por su bajo costo y su alta resistencia. Las principales desventajas que presenta es el bajo módulo de elasticidad del vidrio, tienen poca resistencia a la abrasión y poca adherencia en la mezcla especialmente cuando está expuesta a la humedad.

Fibra de carbono: Es más común utilizarla en compuestos reforzados con fibras por su alta resistencia a la tensión y su módulo de elasticidad. Las fibras de carbono tienen un contenido de carbono de 80 a 95 %. Mientras que las fibras de grafito tienen un mayor porcentaje de carbono, alrededor del 99%.

Fibra de boro: Estas fibras son producidas por la deposición de vapor químico de un substrato tal como tungsteno o hidrógeno.

Fibra de aramido: También se les conoce como fibras Kevlar, tienen mayor resistencia a la tensión que todas las demás fibras, sin embargo, presentan poca resistencia a la compresión debido a su estructura molecular anisotrópica.

En la siguiente tabla se presentan algunas características de las fibras utilizadas en FRC.

Tabla 6.1 Características de algunas fibras (Aboutaha, 1996)

Características	Láminas de fibra de		
	Vidrio-E	Carbono-HT	Aramid
Resistencia a tensión	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Resistencia a compresión	Buena	Buena	Pobre
Rigidez	Pobre	Muy buena	Buena
Fatiga estática	Pobre	Excelente	Buena
Fatiga cíclica	Regular	Excelente	Buena
Densidad	Regular	Buena	Excelente
Resistencia alcalina	Pobre	Muy buena	Buena
Revestimiento	Buena	Suficiente	Regular

Consideraciones de análisis y diseño

En el ACI 440 se tratan los sistemas de reforzamiento con materiales compuestos, las propiedades de cada uno de los materiales que los componen como son las fibras y resinas, y hace referencia a estudios e investigaciones realizadas. A continuación se presentan algunas consideraciones en el procedimiento de diseño de elementos de concreto reforzado con fibras:

- La filosofía de diseño utilizada es un diseño por resistencia. Los factores de carga que se utilizan para determinar la resistencia necesaria en los elementos de concreto reforzado con FRP son los mismos que se utilizan en el ACI 318-05.
- El diseño por flexión de estos elementos es similar al utilizado en el diseño de elementos de concreto reforzado. Como los elementos de FRP no tienen un comportamiento dúctil, se utiliza un factor de reducción conservador para proporcionar una reserva de resistencia en el elemento. Las recomendaciones japonesas para el diseño de elementos a flexión utilizando FRP sugieren un factor de reducción de resistencia igual a 0.70.

El diseño del refuerzo de estos elementos debe cumplir con las siguientes etapas: diseño a flexión, en los casos de elementos con y sin refuerzo, delaminación del concreto o cortante crítico, verificación de la longitud de anclaje de la lámina, capacidad de servicio. La experiencia ha demostrado que la delaminación del concreto o la longitud de anclaje de la lámina son las que definen el diseño de la sección (Cottier, 2000).

Las láminas sintéticas reforzadas con fibras de carbono pueden incrementar exitosamente la capacidad a flexión y cortante en las vigas de concreto. La adición de placas relativamente densas pueden reducir el agrietamiento y la deflexión, lo que se traduce en un incremento en las cargas de servicio. Las juntas del sistema de reforzamiento con fibras de carbono son críticos en el diseño (Aboutaha, 1996).

La capacidad a flexión de vigas puede determinarse utilizando métodos convencionales tomando en consideración el esfuerzo en la fibra de carbono. La deflexión en las vigas de concreto reforzado es subestimada utilizando las ecuaciones convencionales del ACI. La capacidad a cortante puede determinarse utilizando las ecuaciones ya mencionadas, basados en un modelo real o en una sumatoria de las fuerzas cortantes (Aboutaha, 1996).

Características del acero contra FRP

A continuación Aboutaha (1996) presenta una comparativa de ambos materiales:

- La resistencia a tensión de las fibras de carbón es aproximadamente 10 veces mayor que la del acero.
- Existen severos problemas asociados al uso del acero como material de placas. Resultados de pruebas del EMPA de Suiza indican problemas de corrosión en las placas de acero, especialmente aquellas expuestas al medio ambiente. Después de los primeros 3 años mostraron signos de moho debido a la exposición climática. Los problemas de corrosión ocasionan pérdida de resistencia en el sistema. Otro problema asociado con las placas de acero es su alto costo de mantenimiento e instalación.
- La longitud de las placas de acero utilizadas en campo está limitada a 6-8 m debido a su peso y rigidez. Si se requieren placas con mayor longitud, es necesario utilizar múltiples placas. Las FRP pueden enrollarse, y sus longitudes pueden ser mayores que 300 m sin requerir juntas.

En la tabla 6.2 Cottier (2000) presenta algunas características de ambos materiales y en la figura 6.12 menciona algunas fallas comunes que se presentan en los sistemas de refuerzo con láminas sintéticas reforzadas con fibras.

Tabla 6.2 Características del acero contra FRP (Cottier, 2000)

Característica	Material compuesto FRP	Lámina de acero normal
Peso Propio	Muy bajo	Alto
Espesor general	Muy bajo	Bajo
Manejo	Fácil flexible	Complicado rígido
Intersecciones o cruces	Fácil	Difícil
Resistencia a la tensión	Muy alta	Alta
Resistencia a la fatiga	Excelente	Adecuado
Capacidad de carga	En dirección longitudinal	Cualquier dirección
Longitud de la placa	Cualquiera	Limitada
Corrosión	Ninguna	Si
Conocimientos técnicos	Incipientes	Completo
Resistencia a los rayos U.V.	Solo con protección	Adecuado
Resistencia al fuego	Ninguna	Limitada

6.4.2 Proceso constructivo general de las FRP

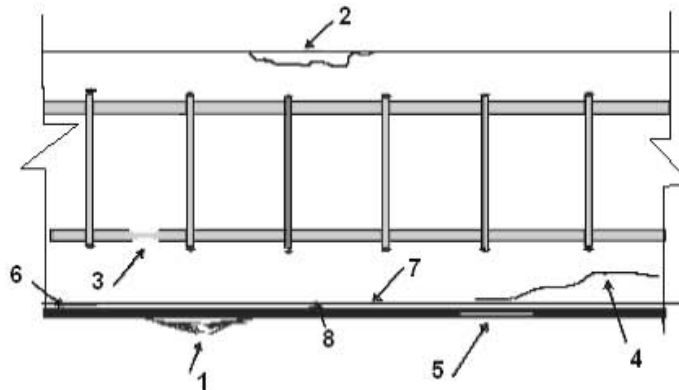
Fukuyama (1995) ha escrito sobre el proceso constructivo que se debe realizar cuando se utilizan estos materiales, el cual se presenta a continuación:

1. Retiro de las cubiertas existentes

Preparación preliminar: La superficie deteriorada del concreto sobre la que se pegarán las fibras debe estar nivelada y retirar las protuberancias, al igual que el polvo generado por la limpieza de la superficie.

2. Tratamiento de la superficie

Reparación del concreto: Los defectos en el concreto tales como: desprendimiento de material, oquedades, corrosión, etc., se deben reparar y/o retirar.



1. Falla a tensión de la lámina
2. Aplastamiento del concreto en la zona de compresión
3. Fluencia o rotura del acero
4. Desprendimiento del concreto
5. Rotura preliminar
6. Falla de cohesión en la capa del adhesivo
7. Falla de adhesión (en la superficie de la lámina)
8. Falla de adhesión (en la superficie del concreto).

6.12 Fallas comunes en los sistemas de refuerzo con materiales compuestos (Cottier, 2000)

Corrección de defectos en la superficie del concreto: Para la aplicación de las láminas de fibras de carbono, las rugosidades de la superficie del concreto, no deben exceder de 1 mm. Las irregularidades en el concreto, como pequeñas protuberancias, deben nivelarse mediante esmerilado. En caso de existir esquinas afiladas podrán ser redondeadas; el radio de redondeo no deberá ser menor que 10 mm. Resumiendo, se debe alisar la superficie irregular y redondear las esquinas del concreto.

3. Colocación de las láminas

Aplicación de la cubierta inicial (primario): El primario debe mezclarse perfectamente, hasta llegar a una consistencia uniforme. La mezcla del primario se aplicará mediante un rodillo; si existe la necesidad de aplicar una segunda capa, se debe esperar a que la primera haya penetrado en el concreto. El curado de la cubierta inicial durará un mínimo de 3 h, y se deben retirar todas las irregularidades que se presenten y rellenar las pequeñas oquedades con una masilla epóxica.

Pegado de las láminas: Las láminas se deben cortar utilizando tijeras y navajas ajustándose a las medidas especificadas. La longitud debe ser menor que 2 m de tal forma que el número de tramos cortados sea igual al número de láminas a colocar en una jornada de trabajo. La cubierta inicial (primer) en la superficie del concreto debe estar perfectamente curada. La resina se debe mezclar perfectamente, y tener los

mismos cuidados que con la cubierta inicial (primer). Utilizando un rodillo y una espátula de goma se procede a pegar la lámina a la superficie de concreto; para realizar el junteo o traslape de las láminas en dirección longitudinal, es necesario realizar un traslape de al menos 10 cm; para la dirección lateral no es necesario efectuar ningún traslape.

4. Terminación

Cubierta final: Se aplica una capa de pintura resistente al medio ambiente; en los casos en que la superficie de concreto se encuentre expuesta directamente a los rayos solares se recomienda aplicar una capa de pintura a base de uretano. La colocación de la pintura podrá hacerse después del tiempo de curado de la resina. La cubierta final deberá completarse de acuerdo con las especificaciones para cada tipo de pintura.

Control de calidad e inspección: Después de la colocación de las láminas, se procede a efectuar una inspección. Para evaluar la calidad de la aplicación se efectúan pruebas a tensión, así como una prueba de composición de la resina (pruebas de viscosidad).

En la tabla 6.3 Fukuyama (1995) presenta algunas características constructivas de los tipos de encamisados, concreto, acero y de láminas sintéticas reforzadas con fibras.

Tabla 6.3 Características constructivas de los tipos de encamisado (Fukuyama)

Características constructivas de los tipos de encamisado	
Período constructivo	FRP < Encamisado de acero < Encamisado de concreto
Costo total	≤ FRP < Encamisado de acero
Proceso constructivo	<p><u>Encamisado de concreto</u> Desconchamiento, arreglo de barras, colocación del concreto, etc.</p> <p><u>Encamisado de acero</u> Anclaje, mortero como pegamento, etc.</p> <p><u>Encamisado de FRP</u> Redondear las esquinas, terminación, etc.</p>
Tamaño y peso del elemento en reparación	<p><u>Encamisado de acero y de concreto</u></p> <p>Incremento en el peso → Incremento en las cargas de diseño sísmico de la superestructura y de la cimentación</p> <p><u>Encamisado de FRP</u></p> <p>Sin cambios en el peso → Incremento en las cargas puede ignorarse</p>
Rigidez del elemento en reparación	<p><u>Encamisado de acero y de concreto</u></p> <p>Incremento en rigidez → Incremento en las fuerzas sísmicas</p> <p><u>Encamisado de FRP</u></p> <p>Sin cambios</p>

6.5 Estudios experimentales de encamisados de concreto en columnas

A continuación se presentan algunos datos de artículos experimentales realizados por diversos autores (Ersoy et al., Rodríguez y Park, Bett et al., Gomes y Appleton, Bousias et al.) que han utilizado el encamisado de concreto en columnas como una técnica de rehabilitación.

TABLA 6.4 RESULTADOS DETALLADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A COLUMNAS

Referencia	Descripción	Especimen	Conclusiones	
Ersoy et al (1993)	9 especímenes ensayados: 4 por carga axial 5 por carga axial y flexión monotónica y cíclica reversible	Carga axial	Carga axial	
		LS= Encamisado tipo refuerzo (reforzado durante la aplicación de la carga).	Los encamisados como refuerzo fueron absolutamente efectivos. Alcanzaron un 90-95% de la capacidad del espécimen original.	
		US= Encamisado tipo refuerzo (reforzado después de la descarga).		
		LR= Encamisado tipo reparación (reparado durante la aplicación de la carga).	No tuvo un comportamiento bueno y falló cuando alcanzó un 50% de la capacidad del espécimen original.	
		UR= Encamisado tipo reparación (reparado después de la descarga).	Alcanzó un 80% de la capacidad del espécimen original.	
		Nota: Las gráficas fuerza axial-deformación, muestran que la rigidez de los especímenes reforzados (LS y US) fue casi la misma que la del espécimen original, mientras que la rigidez de los especímenes de		
		Carga axial y flexión	Carga axial y flexión	
		RBM= Especimen encamisado (reparado, sometido a flexión monotónica).	Alcanzó un 90% de la capacidad del espécimen original.	
		SBR= Especimen encamisado (reforzado, sometido a flexión cíclica reversible).	Alcanzó el 100% de la capacidad del espécimen original.	
		RBR= Especimen encamisado (reparado, sometido a flexión cíclica reversible).	Alcanzó un 90% de la capacidad del espécimen original.	
Notas: La rigidez inicial y final de los especímenes con encamisado de reparación (RBM y RBR) fueron considerablemente menores (cerca del 25%) que la del espécimen original; y las del espécimen de refuerzo La historia de carga (monotónica o cíclica reversible) no influye significativamente en la resistencia pero sí en la rigidez. La rigidez final del espécimen RBR fue 40% menor que la del espécimen RBM. La tendencia de degradación de rigidez y disipación de energía de los especímenes encamisados fueron similares al espécimen original.				
Rodríguez y Park (1994)	4 especímenes ensayados bajo carga axial y carga lateral cíclica	Carga axial y lateral cíclica	Carga axial y lateral cíclica	
		SS1 y SS4= Encamisados tipo reparación (reparados después de aplicar la carga).	Alcanzaron casi 3 veces la resistencia y rigidez de los especímenes originales. Tuvieron una buena disipación de energía. La ductilidad alcanzada tuvo un nivel satisfactorio para estructuras	
		SS2 y SS3= Encamisados tipo refuerzo (reforzado antes de aplicar la carga).		
		Notas: Las gráficas carga lateral-desplazamiento lateral de los especímenes SS1 y SS4 son similares a la de SS2 y SS3, lo cual sugiere que el daño previo en el elemento no tiene una influencia Una cantidad mayor de refuerzo transversal en los especímenes SS3 y SS4 resulta en un incremento poco significativo en su comportamiento sísmico. El encamisado con concreto reforzado incrementa significativamente la rigidez, la resistencia y la ductilidad de las columnas. La cantidad de refuerzo por confinamiento recomendado por el ACI es alto para cargas axiales relativamente bajas.		
Bett et al (1988)	3 especímenes ensayados bajo fuerza axial y carga lateral	Carga axial y lateral cíclica	Carga axial y lateral cíclica	
		1-1R= Encamisado tipo reparación (reparado con concreto lanzado después de aplicar la carga).	El espécimen reparado tiene una degradación de rigidez mayor que los especímenes reforzados. Se observó una pérdida de rigidez de 1.5%. Exhibieron patrones de grieta dominados por cortante.	
		1-2= Encamisado tipo refuerzo (reforzado con concreto lanzado antes de aplicar la carga).	Los especímenes reforzados tuvieron un comportamiento histerético estable con un desplazamiento mayor de 1.5%.	
		1-3= Encamisado tipo refuerzo (reforzado con concreto lanzado antes de aplicar la carga).	Exhibieron patrones de grieta dominados por flexión o por flexión-cortante.	

TABLA 6.4 RESULTADOS DETALLADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A COLUMNAS

Referencia	Descripción	Especimen	Conclusiones
Gomes y Appleton (1998)	2 especimenes ensayados bajo fuerza axial y carga lateral cíclica	Carga axial y lateral cíclica	Carga axial y lateral cíclica
		P2R= Encamisado tipo reparación (reparado despúes de aplicar la carga).	La energía disipada fue menor al especimen de referencia.
		P3R= Encamisado tipo reparación (reparado despúes de aplicar la carga).	Este especimen es el que tuvo mayor confinamiento y por lo tanto es el que disipa mayor energía. Presentó una ductilidad mayor
		Notas: A mayor nivel de carga axial disminuye la energía disipada.	
		A mayor nivel de confinamiento, mayor disipación de energía. La ductilidad y la energía disipada de P2R y P3R fue menor que la del modelo original. Los especimenes P2R y P3R tuvieron una disminución en la rigidez inicial (10-30%), dicha perdida es parcialmente compensada cuando se La resistencia máxima de P2R y P3R fue similar al del modelo original.	
Bousias et al (2005)	3 especimenes ensayados bajo fuerza axial y carga lateral cíclica.	Carga axial y lateral cíclica	Carga axial y lateral cíclica
		R-RCL1= Encamisado tipo reparación (reparado despúes de aplicar la carga).	Desconchamiento del concreto, y tendencia del acero longitudinal a pandearse.
		R-RCL3= Encamisado tipo reparación (reparado despúes de aplicar la carga).	Desconchamiento del concreto, tendencia del acero longitudinal a pandearse y algunas grietas
		R-RCL4= Encamisado tipo reparación (reparado despúes de aplicar la carga).	Pandeo del acero del encamisado. Se desarrollaron grietas diagonales
		Notas: Se observó un incremento en resistencia, rigidez y capacidad de deformación en las columnas encamisadas	

TABLA 6.5 DATOS DE LAS COLUMNAS ENSAYADAS

Nombre del artículo	Tipo de columna	Tipo de columna	Ancho b (cm)	Altura h (cm)	d (cm)	S (cm)	f _y (kg/cm ²)	f'c (kg/cm ²)	f _{yv} (kg/cm ²)	E (ton/cm ²)	A _g (cm ²)	A _s (cm ²)	A _v (cm ²)	ρ	ρ _v	E _{enc} (ton/cm ²)	V _{cr} (ton)	V _s (ton)	
Bousias et al (2005)																			
Carga lateral	Original	Rectangular	25	50	46.75	20	5,243	374	4,335	270.747	1,238.64	11.36	0.98	0.00909	0.00196	312.41	11.98	9.93	
	Encamisada	Rectangular	40	65	61.25	20	5,243	564	6,110	332.482	2,571.60	28.4	1.96	0.01092	0.00245				
Especímenes																			
R-0	Original																		
R-0L1, R-0L3, R-0L4	Originales																		
R-RCL1	Encamisada con concreto lanzado																		
R-RCL2	Encamisada con concreto lanzado																		
R-RCL4	Encamisada con concreto lanzado																		
Gomes et al (1998)																			
Carga axial y lateral	Original	Cuadrada	20	20	19.5		4,896		4,896		395.48	4.52	0.64	0.0113					
	Encamisada	Cuadrada	26	26	24.5		4,896		4,896		666.96	9.04	1.28	0.0117					
	Reparada	Rectangular	20	24	22.5		4,896		4,896		475.48	4.52	0.64	0.0113					
Especímenes																			
P0	Original					15		316		248.87					0.0019		3.67	4.07	
P1	Original					7.5		351		262.29					0.0038		3.87	8.15	
P2	Original					15		467		302.54					0.0019		4.47	4.07	
P3	Original					5		467		302.54					0.0057		4.47	12.22	
P4	Encamisada					7.5		467		302.54					0.004	298.994	7.30	20.47	
P0R	Reparada					5		755		384.68					0.0019		6.55	14.10	
P1R	Reparada					7.5		506		314.92					0.0057		5.36	9.40	
P2R	Encamisada					7.5		594		341.21					0.004		8.23	20.47	
P3R	Encamisada					5		506		314.92					0.0076		7.59	30.71	
Rodriguez et al (1994)																			
Carga lateral	Original	Cuadrada	35	35	29.5	26.5	3,315	200	3,570		1,202	22.72	0.64	0.01855	0.00069		7.74	2.54	
	Encamisada 1	Cuadrada	55	55	51.2	9.5	5,120		3,468		2,986	38.72	2.06	0.01280	0.00394	231.35		38.50	
	Encamisada 2	Cuadrada	55	55	50.3	7.2	5,008		3,366		2,987	38.2	2.06	0.01263	0.00520			48.44	
Especímenes																			
S1, S2, S3, S4	Original																		
SS1	Encamisada 1							336		256.62								27.36	
SS2	Encamisada 1							347		260.79								27.80	
SS3	Encamisada 2							198		197.00								20.63	
SS4	Encamisada 2							257		224.44								23.51	

TABLA 6.5 DATOS DE LAS COLUMNAS ENSAYADAS

Nombre del artículo	Tipo de columna	Tipo de columna	Ancho b (cm)	Altura h (cm)	d (cm)	S (cm)	f_y (kg/cm ²)	f'_c (kg/cm ²)	f_{yv} (kg/cm ²)	E (ton/cm ²)	A_g (cm ²)	A_s (cm ²)	A_v (cm ²)	ρ	ρ_v	Eenc (ton/cm ²)	Vcr (ton)	Vs (ton)			
Ersoy et al (1993)																					
Carga axial	Original	Cuadrada	13	13	11.5	5	2,800	280	2,800	234.26	166.16	2.84	0.251	0.01680	0.00387	219.85	1.33	1.62			
	Encamisada	Cuadrada	18	18	16.5	5	2,800	230	2,800	212.32	318.32	5.68	0.503	0.01753	0.00559		2.39	4.65			
Especímenes																					
M	Original																				
LS	Encamisada																				
US	Encamisada																				
UR	Encamisada																				
LR	Encamisada																				
Carga axial y flexión																					
Carga axial y flexión	Original	Cuadrada	16	16	15.5	10	3,060		2,650		250.84	5.16	0.251	0.02016	0.00157	248.43		1.03			
	Encamisada	Cuadrada	23	23	22.6	10	3,060		2,650		518.68	10.32	1.231	0.01951	0.00535			7.37			
Especímenes																					
MBM	Original								275	232.164							2.18				
RBM	Encamisada									312	247.289						4.87				
MBR	Original									321	250.831						2.35				
RBR	Encamisada									313	247.685						4.87				
SBR	Encamisada									337	257.006						5.06				
Bett et al (1988)																					
Carga lateral	Original	Cuadrada	30.5	30.5	28	21	4,200	280	4,200	234.26	930.25					247.61	7.57				
	Encamisada	Cuadrada	43	43	40.5	6.4	4,200	330	4,200	254.32	1,849.00						16.77				
Especímenes																					
1-1	Original											22.8	1.28	0.02451	0.002			7.17			
1-2	Encamisada con concreto lanzado											25.64	1.92	0.01387	0.00698			51.03			
1-3	Encamisada con concreto lanzado															23	37	1.92	0.02001	0.00769	56.28
1-1R	Encamisada con concreto lanzado															23	37	1.92	0.02001	0.00769	56.28
														0.71							

7. COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

Las técnicas de rehabilitación descritas en este trabajo han sido utilizadas para reparar daños sísmicos. En la mayoría de los casos, una solución integral se obtiene con una combinación de varias técnicas.

En el capítulo de inyección se hacen algunas recomendaciones para optimizar la técnica, y se presenta un diagrama de flujo general de un proceso de inyección. La inyección de resinas es una de las técnicas de rehabilitación más utilizadas en la actualidad junto con el encamisado de concreto, es por ello que este trabajo se enfocó hacia ambas técnicas.

En lo referente al capítulo de encamisado se recopiló información de 21 columnas de concreto en las cuales se utilizó el encamisado de concreto como técnica de rehabilitación. En algunas se utilizó como refuerzo y en otras como reparación.

En el trabajo de Bett et al., (1988) el objetivo era conocer la efectividad de tres diferentes técnicas de reparación y/o reforzamiento para aumentar la respuesta bajo cargas laterales en columnas cortas de concreto. Se construyeron tres especímenes y se les aplicó carga axial y lateral cíclica, llegando a las siguientes conclusiones:

- El espécimen con encamisado de reparación tuvo una degradación de rigidez mayor que los especímenes reforzados. Exhibieron patrones de grieta dominados por cortante.
- Los especímenes con encamisado de refuerzo exhibieron patrones de grieta dominados por flexión o por flexión-cortante.

En el artículo de Ersoy et al (1993) se estudió el comportamiento y la resistencia de columnas de concreto reparadas y reforzadas con encamisados. Se ensayaron nueve especímenes, cuatro de ellos se sometieron a carga axial y a los cinco restantes se les aplicó carga axial combinada con flexión monotonica y cíclica reversible. Observándose lo siguiente:

- Bajo carga axial, las columnas reparadas y reforzadas con encamisados tuvieron un buen comportamiento cuando el encamisado se hizo después de la descarga. La resistencia de cada columna encamisada alcanzo de un 80 a 90% de la resistencia del espécimen de referencia. Las columnas reforzadas con el encamisado bajo carga tuvieron también un buen comportamiento.
- El encamisado de reparación hecho bajo carga no tuvo un buen comportamiento y falló cuando alcanzó un 50% de la capacidad del espécimen de referencia.
- El espécimen con el encamisado de reparación sujeto a carga axial combinada con flexión monotonica alcanzó el 90% de la capacidad del espécimen de referencia.
- El espécimen con el encamisado de refuerzo sujeto a carga axial y flexión cíclica reversible alcanzó el 100% de la capacidad del espécimen de referencia, mientras que el espécimen con encamisado de reparación alcanzó aproximadamente 90% de dicha resistencia.
- La historia de carga (monotonica o cíclica reversible) no influye significativamente en la resistencia; pero si en la rigidez del espécimen. La rigidez final de la columna reparada bajo carga cíclica reversible fue 40% menor que la del espécimen reparado ensayado bajo carga monotonica.

Rodríguez y Park, (1994) ensayó cuatro especímenes bajo carga axial y lateral cíclica, el objetivo era investigar el incremento de resistencia, rigidez y ductilidad, que se puede alcanzar encamisando con concreto a columnas dañadas o sin daño.

- Las pruebas muestran que los efectos del daño previo en las columnas, para los dos diferentes detallados de refuerzo utilizado en las columnas, no tienen una influencia significativa en todo el desempeño sísmico de las columnas encamisadas.
- Los especímenes con encamisado de reparación alcanzaron casi tres veces la resistencia y rigidez de los especímenes originales.
- Los resultados de la investigación indican que el encamisado con concreto reforzado incrementa significativamente la rigidez, la resistencia, y la ductilidad de las columnas.

El objetivo del trabajo de Gomes y Appleton (1998) fue conocer la eficiencia de las técnicas de reparación y reforzamiento en lo que concierne a ductilidad, capacidad de disipación de energía, resistencia y rigidez inicial. Se analizó también la influencia de los niveles de confinamiento y la fuerza axial. Se ensayaron dos especímenes bajo carga axial y lateral cíclica, observándose lo siguiente:

- En lo que respecta a la fuerza axial, se observa una disminución de la energía disipada y un incremento en la fuerza horizontal máxima con el aumento de los niveles de carga axial, es decir, que si aumenta la fuerza axial disminuye la energía disipada y también aumenta la fuerza horizontal máxima.
- A mayor nivel de confinamiento, mayor disipación de energía.
- Todos los especímenes reparados presentan una disminución en la rigidez inicial. La cual es parcialmente compensada cuando se hace un incremento en el confinamiento.

Bousias et al., (2005) ensayó tres especímenes bajo carga axial y lateral cíclica, llegando a las siguientes conclusiones:

- Los especímenes con encamisados de reparación presentaron desconchamiento en el concreto, y una tendencia del acero longitudinal a pandearse.
- Se observó un incremento en resistencia, rigidez y capacidad de deformación en las columnas encamisadas.

REFERENCIAS

LIBROS BÁSICOS Y DE CONSULTA:

Epoxy injection in construction. John Trout, second edition, editorial Hanley Wood, USA, 2006.

Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985. Fundación ICA, A.C., Editorial Limusa, México, D.F., 1988.

Reparación de estructuras de concreto y mampostería. Jesús Iglesias J., Francisco Robles F. V., José de la Cera A., y Oscar, M. González C, México D.F., 1985.

Structural renovation of building; methods, details, and design examples. Alexander Newman, editorial McGraw Hill, USA, 2001.

NORMAS:

ACI 224.1 R-93, "Causes, evaluation and repair of crack in concrete structures", ACI Manual of concrete practice.

ACI 364.1R, "Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation", ACI Manual of concrete practice.

ACI 369-06, "Seismic repair and rehabilitation", Documento en borrador.

ACI 503.1 "Standard specification for bonding hardened concrete, steel, wood, brick and other materials to hardened concrete with a multi-component epoxy adhesive"

ACI 503.2 "Standard specification for bonding plastic concrete to hardened concrete with a multi-component epoxy adhesive"

ACI 503.3 "Standard specification for producing a skid-resistant surface on concrete by use of a multi-component epoxy system"

ACI 503.4 "Standard specification for repairing concrete with epoxy mortars"

ACI 503 R-93 "Use of epoxy compounds with concrete"

ACI 506 R-90 "Guide for shotcrete"

ACI 546 R-96, "Concrete repair manual", ACI Manual of concrete practice.

ASCE 41 (in draft) "Seismic rehabilitation standard 1-1 public comment draft – 2/06"

ASTM C881-90 "Standard specification for epoxy resins based bonding systems for concrete".

ASTM D1763-94 "Standard specification for epoxy resins"

ATC-3-06 "Tentative provisions for the development of seismic regulations for building"

Federal Emergency Management Agency, 1997, "*NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273)*," Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 395 pp.

Federal Emergency Management Agency, 1997, "NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 274)," Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 462 pp.

ARTICULOS TECNICOS:

Aboutaha, Riyad S. (1996) "Rehabilitation of existing structures", October 7-10, a short course, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.

ACI 224.1 R-84 (1984), "Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures", ACI Journal, May-June 1984, pp. 211-230.

Aguilar, J.; Breña, S.; Del Valle, E.; Iglesias, J.; Picado, M.; Jara, M.; Jirsa, J., (1996), "Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in México City", *PMFSEL Reporte No. 96-3, Ferguson Structural Engineering Laboratory, The University of Texas at Austin*, August 1996.

Alcocer, S.M., (1995), "The Mexican experience in retrofit of building since 1985" *Proceedings of Third National Concrete and Masonry Engineering Conference*, Vol. 2, June 15-17, 1995, San Francisco, California, pp 867-879.

Anderson A.H. Jr., (1980), "Investigation, rehabilitation, and maintenance to prevent deterioration of a concrete building", *Concrete International Journal*, Vol. 2, September 1, 1980, pp. 35-43.

Bai, Jong-Wha (2003), "Seismic retrofit for reinforced concrete building structures", *Consequence-Based Engineering (CBE), Institute Final Report*, Texas A&M University.

Benuska, K.L., (1990), "Loma Prieta earthquake reconnaissance report," *Earthquake Spectra*, 6, Suppl., EERI Publication 90-01.

Bett, J.; Klingner, R.; and Jirsa, J., (1988), "Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns", *ACI Structural Journal*, vol. 85, No.5, September-October 1988, pp. 499-508.

Bousias, S., Spathis A., Fardis, M., (2005) "Concrete or FRP jacketing of columns with lap splices for seismic rehabilitation" *Structures Laboratory, Department of civil Engineering*, University of Patras, 26500 Patras, Greece.

Breña, Sergio, (1990), "An overview of rehabilitation techniques used in reinforced concrete building in México city", *Master's Thesis*, The University of Texas at Austin, December 1990.

Choudhuri, D., Mander, J., and Reinhorn, A., (1992), "Evaluation of seismic retrofit of reinforced concrete frame structures: Part I – Experimental performance of retrofitted subassemblages", *NCEER Technical Report No. 92-0030*, National center for earthquake engineering research, State University of New York at Buffalo, December 8, 1992.

Chung H.W., (1981), "Epoxy repair of bond in reinforced concrete members", *ACI Journal*, January-February 1981, pp 79-82.

Cottier C., Juan Luis (2000), "Fibras de Carbón para el Refuerzo de Estructuras de Concreto", *Memorias Técnicas del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, Guanajuato, Noviembre, 2000.

- De la Torre, Oscar, (1995), "Evaluación y reparación estructural de edificios", Curso sobre seguridad sísmica de las construcciones para directores responsables de obra", CENAPRED, Febrero 1995, pp 401-433.
- Ersoy, U., Tankut, A., Suleiman, R.E., (1993), "Behavior of jacketed columns", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 3, May-June 1993, pp. 288-293.
- French, C.; Thorp, G. A.; and Tsai W.J. (1990), "Epoxy repair techniques for moderate earthquake damage", *ACI Structural Journal*, vol. 87, No.4, July-August 1990, pp. 416-424.
- Fukuyama, H. (1995), "Seismic retrofit of existing RC building by continuous fiber sheets" *Building Research Institute*, Japan.
- Gomes, A.M. and Appleton, J., (1998), "Repair and strengthening of reinforced concrete elements under cyclic loading", *Proceedings of 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France, pp. 1-12.
- Hanson, Robert D., "Strengthening of members of concrete building", *Seminar Course Manual/SCM-14(1986)*, *Seismic Design for Existing Structures*, American Concrete Institute.
- Jain, Ashok K., (1985), "Seismic response of RC frames with steel braces", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, Num 10, October 1985, pp 2130-2148.
- Jiménez Lozano, M. A., (1986), "Procedimientos para la reparación de daños ocasionados por sismos, con productos químicos" *Revista Imcyc*, Vol. 23, No. 176, Diciembre-Enero, 1986.
- Jirsa, James O. (1986), "Repair and strengthening of reinforced concrete structures", *Seminar Course Manual/SCM-14(1986)*, *Seismic Design for Existing Structures*, American Concrete Institute.
- Jirsa, J. O. (1987), "Repair of damaged buildings in México City", *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, 5-8 August, 1987, pp. 25-34.
- Jirsa, J.O. and Kreger, M.E., (1990), "Recent research on repair and strengthening of reinforced concrete structure", 1990.
- Jordan, R.M. and Kreger, M.E., (1990), "Evaluation of strengthening schemes and effects on dynamic characteristics of reinforced concrete frames" *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, May 20-24, 1990, Palm Springs, California, pp 263-372.
- Kline, Thomas, (1991), "Crack repair an engineer's perspective", *Concrete International Journal*, Vol. 13, No. 6, June 1991, pp. 47-49.
- Kneuer, R. L.; Meyers, M., (1991), "Strengths and limitations of epoxy grouts", *Concrete International Journal*, Farmington Hills, vol. 13, March 1991, pp 54-56.
- Krause, Gary L. and Wight, James K., (1990), "Strengthening of reinforced concrete frames" *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, May 20-24, 1990, Palm Springs, California, pp 373-382.

- León, Fermín, (1991), "Reparación de elementos de concreto reforzado con alto grado de daño", Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 88.
- Loring, A. Wyllie, Jr., (1986), "Reforzamiento de edificios existentes de concreto y mampostería para resistencia sísmica" *Revista Imcyc*, Vol. 24, No. 184, Septiembre, 1986.
- Mansur M.A.; Ong K.C.G, (1985), "Epoxy repaired beams", *Concrete International Journal*, Vol. 7, No. 10, October 1985, pp 46-50.
- Meli, Roberto, (1985), "Efectos de los sismos de septiembre de 1985 en las construcciones de la ciudad de México-Aspectos estructurales. *Segundo informe del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México*, pp 48.
- Moehle, J.P. (2000), "State of research on seismic retrofit of concrete building structures in the US," *US-Japan Symposium and Workshop on Seismic Retrofit of Concrete Structures*.
- Niewiarowski, Richard W., (1995), "Development of a recommended methodology for the seismic evaluation and retrofit of existing concrete buildings" *Proceedings of Third National Concrete and Masonry Engineering Conference*, Vol. 2, June 15-17, 1995, San Francisco, California, pp 533-548.
- Ohkubo, Masamichi (1991), "Current Japanese system on seismic capacity and retrofit techniques for existing reinforced concrete building and post-earthquake damage inspection and restoration techniques", *Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, Report No. SSRP-91/02*, University of California, San Diego, May 1991.
- Ohkubo, Masamichi, (1995), "Sistema de evaluación de daños en casos de emergencia", Curso sobre seguridad sísmica de las construcciones para directores responsables de obra, CENAPRED, Febrero 1995, pp 437-463.
- Osteraas, J., Somers, P. (1996), "Northridge earthquake of January 17, 1994: reconnaissance report, Volume 2 – Reinforced concrete buildings," *Earthquake Spectra*, 11, Suppl. C, pp. 49-74, EERI Publication 95-03/2.
- Pincheira, J.A., (1993), "Design strategies for the seismic retrofit of reinforced concrete frames", *Earthquake Spectra Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 817-842.
- Plecnik, J. M.; Gaul, R.W.; Pham, M.; Cousins, T.; and Howard, Jeff, (1986), "Epoxy penetration", *Concrete International Journal*, vol. 8, No. 2, February 1986, pp 46-50.
- Ramírez, Arnulfo., (1996), "Estadísticas de edificios rehabilitados en la Ciudad de México después de los sismos de 1985", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp.
- Reaveley, L.D., Shapiro, D., Moehle, J., Atkinson, T., Rojahn, C., Holmes, W., (1995), "Seismic rehabilitation guidelines: How does your building really behave?" *Proceedings of Third National Concrete and Masonry Engineering Conference*, Vol. 2, June 15-17, 1995, San Francisco, California, pp 549-558.
- Rodriguez, M. and Park, R., (1994), "Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 2, pp. 150-159.

-
- Romero, J. E., (1995), "Las resinas epóxicas en la rehabilitación de estructuras de concreto", Tesis presentada en el Diplomado en Obras de Concreto, 1994-1995, IMCYC-Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Rosenblueth, E. and Meli, R. (1986), "The 1985 earthquake: causes and effects in México City", *Concrete International*, May 1986.
- Singh, D.P., (1992), "Repair and strengthening of reinforced concrete beams", *Proceedings of Tenth World Conference of Earthquake Engineering*, Madrid, Balkema, pp. 5217-5220.
- Sugano, S. (1981), "Guidelines for seismic retrofitting (strengthening, toughening, and/or stiffening) design of existing reinforced concrete buildings", *Proceedings of the 2nd Seminar on Repair and Retrofit of Structures*, Ann Arbor, MI, pp. 189-237.
- Sugano, S., and Endo, T., (1983), "Seismic strengthening of reinforced concrete buildings in japan", *Strengthening of Buildings Structures- Diagnosis and Theory, IABSE Symposium*, Venice, Italy, pp. 371-378.
- Tanaka, Tsuneo, (1994), "Retrofit method with carbon fiber for reinforced concrete structure", *Advanced Composite Materials-The Official Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol. 4, No. 1, pp. 73-85.
- Terán, A.; and Ruiz, J., (1992), "Reinforced concrete jacketing of existing structures", *Proceeding of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, vol. 9, pp. 5107-5113.
- Thermou, G., Elnashai, A.S. (2002), "Performance parameters and criteria for assessment and rehabilitation," Seismic performance evaluation and retrofit of structures (SPEAR), *European Earthquake Engineering Research Network Report*, Imperial College, UK.
- Tracy R. G.; Fling R.S., (1989), "Rehabilitation strategies", *Concrete International Journal*, Vol. 11, No. 9, September 1989, pp 41-45.
- Trigos Suárez José Luis, (1986), "Procedimientos para la reparación de estructuras dañadas" *Revista Imcyc*, Vol. 23, Num. 176, Diciembre-Enero 1986.
- Trikha D.N.; Jain S.C.; and Hali S.K., (1991), "Repair and strengthening of damaged concrete beams", *Concrete International Journal*, Farmington Hills, Vol. 13, No.6, June 1991, pp 53-59.
- Trout, John, (2005), "Tips for epoxy resins injection", *Concrete International Journal*, Farmington Hills, Vol. 27, No. 11, November 2005, pp. 44-48.
- UNDP/UNIDO Proyect RER/79/015, (1983), "Repair and strengthening of reinforced concrete, stone and brick masonry building", *Building construction under seismic conditions in the Balkan Regions*, Vol. 5, United National Industrial Development Programme, Austria.