



Educación
Secretaría de Educación Pública



Volumen 8. Rehabilitación.

Tomo 5. Encamisado de Elementos Estructurales.

Elaboración: Diciembre de 2025



Índice

1 Encamisados de vigas, columnas o nudos con concreto reforzado	5
2 Descripción de la técnica	5
2.1 Encamisado de vigas	6
2.2 Encamisado de columnas	8
2.3 Encamisado de nudos	10
3 Consideraciones de Análisis	12
4 Requisitos de Diseño	12
4.1 Materiales	12
4.1.1 Requisitos Geométricos	12
4.1.2 Refuerzo longitudinal	13
4.1.3 Refuerzo transversal para confinamiento	14
4.1.4 Refuerzo transversal para cortante	14
4.1.5 Fuerza de cortante de rasante	15
4.1.6 Soldadura entre aceros de refuerzo	15
4.1.7 Columnas	15
4.1.7.1 Requisitos geométricos	15
4.1.7.2 Refuerzo longitudinal	16
4.1.7.3 Refuerzo transversal para confinamiento	16
4.1.7.4 Refuerzo transversal para cortante	18
4.1.7.5 Fuerza cortante rasante	18
4.1.7.6 Soldadura entre aceros de refuerzo	19
4.2 Nudos	19
4.2.1 Se deberán encamisar los nudos, si se cumple cualquiera de los puntos a o b: ..	19
4.2.2 Cumplimiento de sección 9.7 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o equivalente con las excepciones siguientes:	19
4.2.3 Soldadura entre aceros de refuerzo	20
4.3 Requisitos de Construcción	20
5 Encamisados de vigas, columnas o nudos con acero	22
5.1 Deficiencia por corregir	22
5.2 Descripción de la técnica	23
5.2.1 Encamisado de vigas	24
5.2.2 Encamisado de columnas	24
5.2.3 Encamisado de Nudos	28
5.3 Requisito de Análisis	29



5.4	Requisitos de diseño	30
5.4.1	Materiales	30
5.4.2	Vigas	30
5.4.2.1	Requisitos Geométricos	30
5.4.2.2	Resistencia a la Flexión	31
5.4.2.3	Resistencia a la fuerza cortante	31
5.4.2.4	Encamisado local para incrementar el confinamiento	32
5.4.2.5	Soldadura entre aceros de refuerzo.....	32
5.4.2.6	Columnas.....	33
5.4.2.6.1	Requisitos geométricos	33
5.4.2.7	Resistencia a flexocompresión.....	35
5.4.2.8	Resistencia a la fuerza cortante	35
5.4.2.9	Confinamiento	35
5.4.2.10	Encamisado local para incrementar confinamiento	36
5.4.2.11	Soldadura entre aceros de refuerzo.....	37
5.5	Requisitos de Construcción	37
5.5.1	Encamisado con placas	37
5.5.2	Ángulos y soleras	38
5.6	Requisitos de Supervisión y Aseguramiento de Calidad.....	39
6	Encamisados de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF)	40
6.1	Deficiencia por corregir	40
6.2	Descripción de la Técnica	40
6.2.1	General.....	40
6.2.2	Consideraciones para la colocación de la CPRF.....	41
6.2.2.1	Indicaciones previo a la colocación	42
6.2.2.2	Preparación de la superficie de contacto	42
6.2.2.3	Aplicación del CPRF	43
6.2.2.4	Curado de Resina	44
6.2.2.5	Protección.....	44
6.3	Requisitos de Análisis	44
6.4	Requisitos de Diseño	45
6.4.1	Requisitos Geométricos	45
6.4.2	Resistencia a Flexión en Vigas.....	46
6.4.3	Resistencia a la Flexocompresión en Columna.....	46



6.4.4	Refuerzo Transversal para Confinamiento.....	46
6.4.5	Requisitos para fuerza cortante.....	49
6.4.5.1	Límite del refuerzo cortante.....	50
6.5	Conectores de CPRF.....	51
6.5.1	Metodología de diseño de conectores de CPRF.....	53
6.5.1.1	Proceso de Colocación.....	56
6.6	Requisitos de Construcción.....	56
6.7	Requisitos de Supervisión y Aseguramiento de la Calidad.....	57
7	Encamisado de Muros de Mampostería.....	58
7.1	Deficiencia por Corregir.....	58
7.2	Descripción de la Técnica.....	59
7.3	Requisitos de Análisis.....	59
7.3.1	Materiales.....	62
7.3.2	Requisitos Geométricos.....	63
7.3.3	Resistencia al cortante de encamisados de malla de alambre recubierta con mortero	63
7.3.3.1	Tipo de Refuerzo y Cuantías de Acero.....	63
7.3.3.2	Diseño de la malla de alambre soldado.....	64
7.3.4	Resistencia al cortante de encamisados de concreto con barras corrugadas de acero	64
7.3.4.1	Tipo de refuerzo y cuantías de acero.....	64
7.3.4.2	Diseño del acero de refuerzo corrugado del encamisado.....	65
7.4	Requisitos de Construcción.....	65
7.4.1	Preparación el muro y reparación de grietas.....	65
7.4.2	Colocación de refuerzo del encamisado.....	68
7.4.3	Colocación de mortero o concreto.....	73
7.5	Requisitos de supervisión y aseguramiento de la calidad.....	75
7.6	Rehabilitación de edificios de adobe.....	75
7.7	Uso en la infraestructura escolar.....	77



1 ENCAMISADOS DE VIGAS, COLUMNAS O NUDOS CON CONCRETO REFORZADO

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

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

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

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

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

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

2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

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



2.1 ENCAMISADO DE VIGAS

Encamisado de vigas para incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante. El refuerzo longitudinal no debe ser continuo a través de los nudos. El encamisado estará separado del nudo por una junta con un espesor mínimo de 30 mm. El refuerzo transversal adicional está compuesto por estribos hechos de dos piezas. En la Ilustración 1 se muestra el armado de una viga encamisada cuyo acero termina en la columna. Nótese que el doblez del lecho inferior se ha orientado hacia abajo, de manera errónea.



*Ilustración 1. Viga encamisada con refuerzo longitudinal no continuo a través del nudo con la columna.
Fuente: coreandcut.com/*

Encamisado de vigas para incrementar la resistencia a flexión, cortante y la capacidad de deformación inelástica. El refuerzo longitudinal de las vigas encamisadas debe ser continuo a través de los nudos y debe anclarse en las columnas exteriores (de fachada), hasta la cara posterior de la columna (cara más alejada de la zona crítica para calcular la longitud de desarrollo o de anclaje) (Ilustración 2). El refuerzo longitudinal de la viga se podrá doblar en un plano horizontal para rodear la columna y anclar el refuerzo; en este caso, se deberá diseñar refuerzo transversal en la viga encamisada que resista la componente de la fuerza generada por las barras dobladas considerando $1.25 f_y$, que corresponde al valor esperado del esfuerzo de fluencia.



Ilustración 2. Viga encamisada con refuerzo longitudinal continuo a través del nudo con la columna. Fuente: Bournas, 2019

En la Ilustración 3 se presentan, de manera conceptual, posibles configuraciones de encamisado en vigas de concreto. La configuración a es poco empleada, ya que obliga a incrementar el espesor de la losa, o bien, a incluir un piso falso para ajustar el aumento de peralte de la viga sobre la losa. La opción b es la más usual; requiere ranurar la losa para colocar los estribos y el concreto. En la configuración c, también poco usada, se requiere perforar la viga transversalmente para colocar la grapa del estribo. La colocación del concreto se hace igualmente a través de ranuras que se practican en la losa.

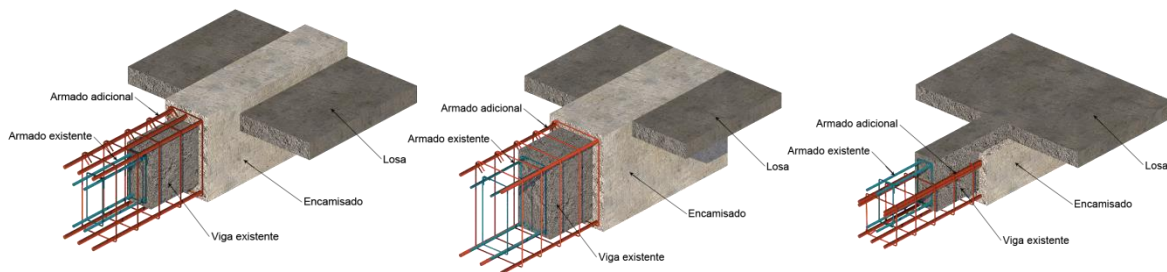


Ilustración 3. Posibles configuraciones de encamisado de vigas con concreto: a) encamisado sobre nivel superior de losa; b) encamisado al nivel del piso; c) encamisado por debajo de la losa.



2.2 ENCAMISADO DE COLUMNAS

Encamisado de columnas para incrementar la capacidad de deformación y la resistencia a fuerza cortante. El refuerzo longitudinal no debe ser continuo en la altura del edificio (Ilustración 4). El encamisado deberá estar separado del piso y del techo de cada entrepiso por medio de una junta con espesor mínimo de 30 milímetros.



Ilustración 4. Columna encamisada con refuerzo longitudinal discontinuo en la altura del edificio. Nótese que la cuantía de estribos no es muy alta. Fuente: <https://esemag.com/>

Encamisado de columnas para incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica. El refuerzo longitudinal de las columnas encamisadas debe ser continuo, desde la cimentación hasta el piso que requiera la rehabilitación (usualmente, todo el edificio) como se muestra en la Ilustración 5.



Ilustración 5. Columna encamisada con concreto de forma continua a través de las losas: Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019



Si un muro está en contacto con la columna existente, se deberá demoler parcialmente el muro para permitir el encamisado de la columna

En la Ilustración 6 se presentan posibles configuraciones de encamisado en columnas de concreto. Como se aprecia en el dibujo, los estribos del encamisado están hechos a base de varias piezas, reconociendo que no pueden construirse de una sola (como ocurre en estructuras nuevas). Así, por ejemplo, el estribo octagonal de la Ilustración 6a comprende dos piezas cuyos dobleces terminales, a 135 grados, se traslapan alrededor de barras longitudinales de la columna en lados opuestos de ella. En la Ilustración 6b, los estribos están hechos a base de estribos sobrepuestos. En la Figura 7 se muestran las perspectivas de los arreglos del refuerzo transversal de la Ilustración 6.

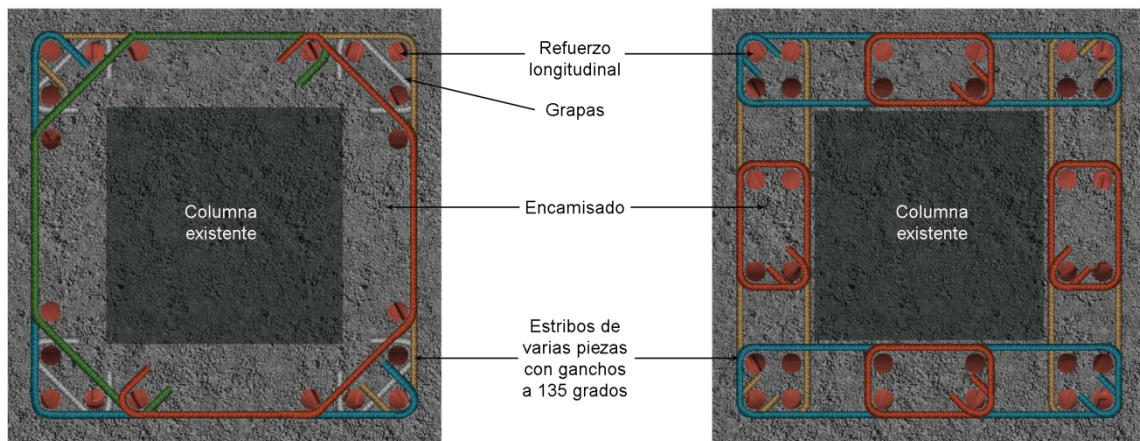


Ilustración 6. Posibles configuraciones de acero transversal en columnas encamisadas: a) estribos de varias piezas; b) estribos sobrepuestos

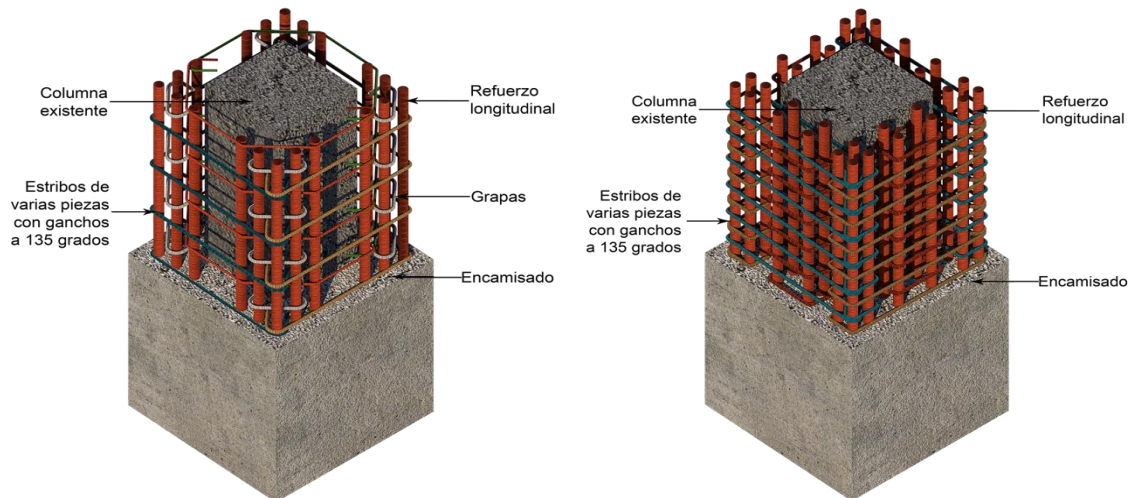


Ilustración 7. Perspectiva de columnas encamisadas según las configuraciones



En la Ilustración 8, se muestra un ejemplo del uso de estribos cuadrados hechos de dos piezas, cada una en forma de letra L, cuyos dobleces se traslapan alrededor de barras longitudinales. En la figura se aprecia el acomodo de los estribos antes de colocar el refuerzo longitudinal, así como la columna armada una vez que se suben los juegos de medios estribos y se amarran con alambre.



Ilustración 8. Ejemplo del uso de estribos en forma de letra L en encamisados de columnas. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1991

2.3 ENCAMISADO DE NUDOS

En el caso de encamisar la columna para incrementar la resistencia a flexocompresión, cortante y la capacidad de deformación inelástica, la unión viga-columna deberá ser encamisada también. El concreto del nudo debe ser confinado con estribos nuevos hechos por piezas o, preferentemente, por medio de una armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas (Ilustración 9).



Ilustración 9. Armadura metálica hecha a base de ángulos verticales en las esquinas del nudo y de soleras horizontales arriba de la losa y por debajo de las vigas. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1991

En la Ilustración 10 se muestra el armado del encamisado de columnas y vigas, con la armadura de confinamiento en el nudo. Nótese que, en la zona adyacente a la columna, el refuerzo transversal de las vigas está hecho con dos piezas en forma de letra U que se traslapan en el refuerzo longitudinal del lecho superior del encamisado.

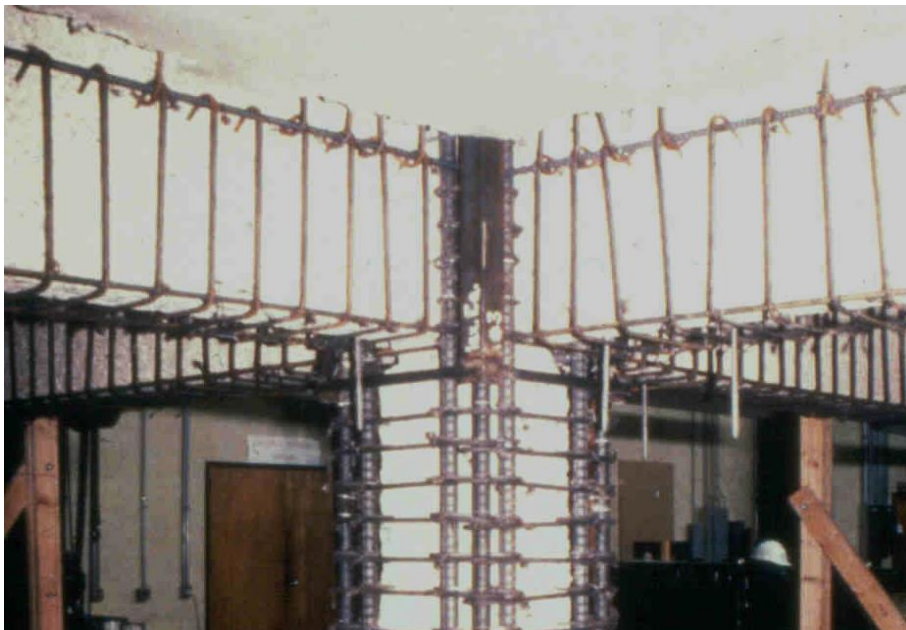


Ilustración 10. Encamisado de nudo, de columna y de viga. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1991



3 CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS

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

4 REQUISITOS DE DISEÑO

4.1 MATERIALES

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

4.1.1 Requisitos Geométricos

- a. El claro libre no debe ser menor que cuatro veces el peralte efectivo de la viga encamisada.



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

4.1.2 Refuerzo longitudinal

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

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

En el cálculo de la resistencia a flexión se aplicarán las hipótesis del Método de Análisis del Tomo previo. Para determinar la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos, se aceptará suponer, en un primer intento, que la profundidad del bloque queda dentro del espesor de la camisa. En caso de no cumplirse el equilibrio entre las fuerzas de compresión y tensión en la sección, aplicando la hipótesis de secciones planas, se variará la profundidad del bloque dentro de la sección de viga existente hasta lograr dicho equilibrio.

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



4.1.3 Refuerzo transversal para confinamiento

Se cumplirá con los incisos 8.2.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), con excepción de los incisos 8.2.3.c y 8.2.3.d. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (Ilustración 11), seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni que 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3). Dependiendo del diámetro de la(s) barra(s) en las esquinas, es posible que el doblez tenga que hacerse para alojar las barras, como se muestra en la Ilustración 1.



Ilustración 11. Estribo de dos piezas aceptable para encamisado de vigas de concreto

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

4.1.4 Refuerzo transversal para cortante

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

Se exceptúa el cumplimiento de colocar estribos de una pieza. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (Ilustración 12), seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni de 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3).

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

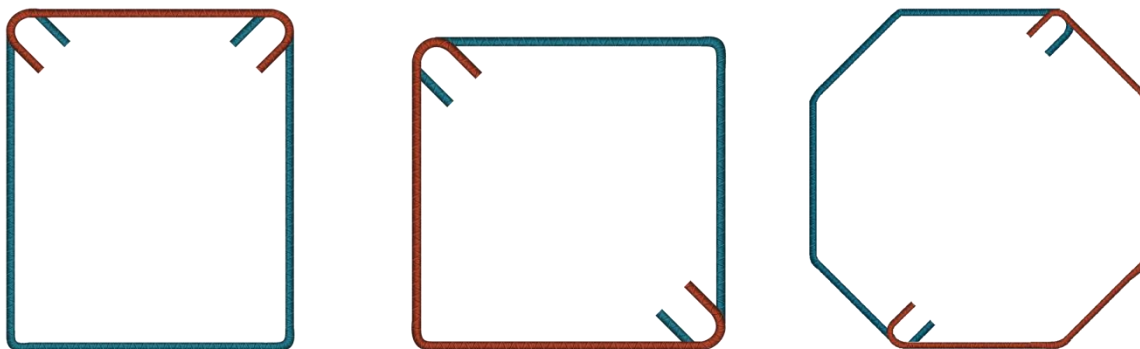


Ilustración 12. Estribos de dos piezas aceptables para encamisado de concreto

4.1.5 Fuerza de cortante de rasante

En caso de encamisados parciales, se revisará la necesidad de colocar conectores o anclas para resistir la fuerza cortante rasante.

4.1.6 Soldadura entre aceros de refuerzo

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

4.1.7 Columnas

4.1.7.1 Requisitos geométricos

- a. La relación de aspecto de la sección transversal no exceda de 3.
- b. El espesor mínimo de la capa de concreto de la camisa será de 100 milímetros.
- c. El recubrimiento mínimo será de 15 mm, según la sección 4.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
- d. Se revisará que la distancia libre entre barras longitudinales y la superficie de concreto existente no sea menor que una vez el diámetro nominal de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo de agregado, ni que 25 milímetros.



- e. Se procurará que la distancia libre entre barras longitudinales no sea menor que 1.5 veces el diámetro nominal de la barra, 1.5 veces el tamaño máximo de agregado, ni que 40 mm.
- f. Se aceptará el uso de paquetes formados por tres barras como máximo en la camisa de columnas.
- g. Se deberán cumplir los requisitos del inciso 9.3.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

4.1.7.2 Refuerzo longitudinal

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

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

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

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

4.1.7.3 Refuerzo transversal para confinamiento

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

- a. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas que estén rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (Ilustración 13), seguidos de un tramo



recto no menor que seis diámetros de largo ni de 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3).

- b. Colocar estribos de cuatro ramas (inciso 8.2.3.d de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).



Ilustración 13. Práctica incorrecta: estribos con dobleces a 90 grados. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019

En la Ilustración 13 se presenta un ejemplo de estribos con dobleces a 90 grados. Ésta es una práctica incorrecta y no permitida en este Volumen. Durante las demandas sísmicas, el agrietamiento y la expansión del concreto muy probablemente harán que los estribos se abran, pudiéndose reducir significativamente su contribución a resistir fuerzas cortantes y a la capacidad de deformación inelástica del elemento. En contraste, en la Ilustración 14 se muestran estribos con dobleces a 135 grados. Nótese, además, el adecuado anclaje del refuerzo longitudinal de la columna.



Ilustración 14. Encamisado de columna con estribos con dobleces a 135 grados y con refuerzo longitudinal anclado a la cimentación. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019.



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

4.1.7.4 Refuerzo transversal para cortante

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

Se exceptúa el cumplimiento de colocar estribos de una pieza. Se aceptará que los estribos estén hechos por dos piezas que estén rematadas en sus extremos con dobleces de, al menos, 135 grados (Ilustración 13), seguidos de un tramo recto no menor que seis diámetros de largo ni de 80 mm. El diámetro mínimo del estribo será de 9.5 mm (número 3).

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

4.1.7.5 Fuerza cortante rasante

En caso de encamisados parciales, se revisará la necesidad de colocar conectores o anclas para resistir la fuerza cortante rasante (Ilustración 15).



Ilustración 15. Columna con agujeros para instalar anclas ahogadas en resina epóxica. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1991.



4.1.7.6 Soldadura entre aceros de refuerzo

No se permitirá soldar el refuerzo transversal o longitudinal existente al nuevo refuerzo (Ilustración 16).



Ilustración 16. Práctica no permitida: soldadura entre aceros de refuerzo. Fuente: Vandoros y Dritsos, 2006.

4.2 NUDOS

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

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

4.2.2 Cumplimiento de sección 9.7 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México o equivalente con las excepciones siguientes:

El refuerzo transversal horizontal se podrá colocar mediante:

- a. Estribos hechos por dos piezas y que estén rematados con dobleces de, al menos, 135 grados, si se demuele la zona próxima de las vigas que llegan al nudo. En este caso, se deberán tomar las medidas apropiadas de apuntalamiento y/o arriostamiento.



- b. Ángulos y soleras que confinen el nudo formando una armadura de acero (véase Ilustración 9).

Para revisar la resistencia a cortante del nudo, se usará la ecuación 1 para calcular una resistencia a compresión de concreto equivalente:

Ecuación 1

$$f'_{c eq} = \frac{f'_c A_{col\ existente} + f'_c A_{encamisado}}{A_{col.\ existente} + A_{encamisado}}$$

En donde:

- $f'_{c eq}$ resistencia a compresión del concreto equivalente para revisión de la resistencia a fuerza cortante de un nudo encamisado, MPa (kg/cm²).
- $A_{col,\ existente}$ área de la sección transversal de la columna existente, mm² (cm²).
- $A_{encamisado}$ área de la sección transversal del concreto nuevo, mm² (cm²).

La ecuación 1 será aplicable cuando el concreto existente en la unión viga-columna exhiba daño nulo, ligero o moderado.

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

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

4.2.3 Soldadura entre aceros de refuerzo

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

4.3 REQUISITOS DE CONSTRUCCIÓN

- a. Se preparará toda la superficie de concreto del elemento por encamisar hasta obtener una rugosidad de al menos 6 mm (1/4 pulgadas) entre valle y cresta. La cara escarificada deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del concreto nuevo (Ilustración 17).



Ilustración 17. Ejemplo de preparación de la superficie de una columna existente. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019.

- b. Dos horas antes del colado, se deberá saturar la superficie del concreto existente con agua limpia.
- c. No será necesario usar adhesivo entre concretos nuevo y existente ni cualquier otro aditivo para el efecto.
- d. El revenimiento y el tamaño máximo del agregado se seleccionarán de acuerdo con la separación mínima y el recubrimiento del refuerzo.
- e. Diseñar las cimbras para facilitar la salida del aire en el concreto (o mortero) del encamisado, con objeto de evitar la formación de panales o huecos en el concreto (Ilustración 18).

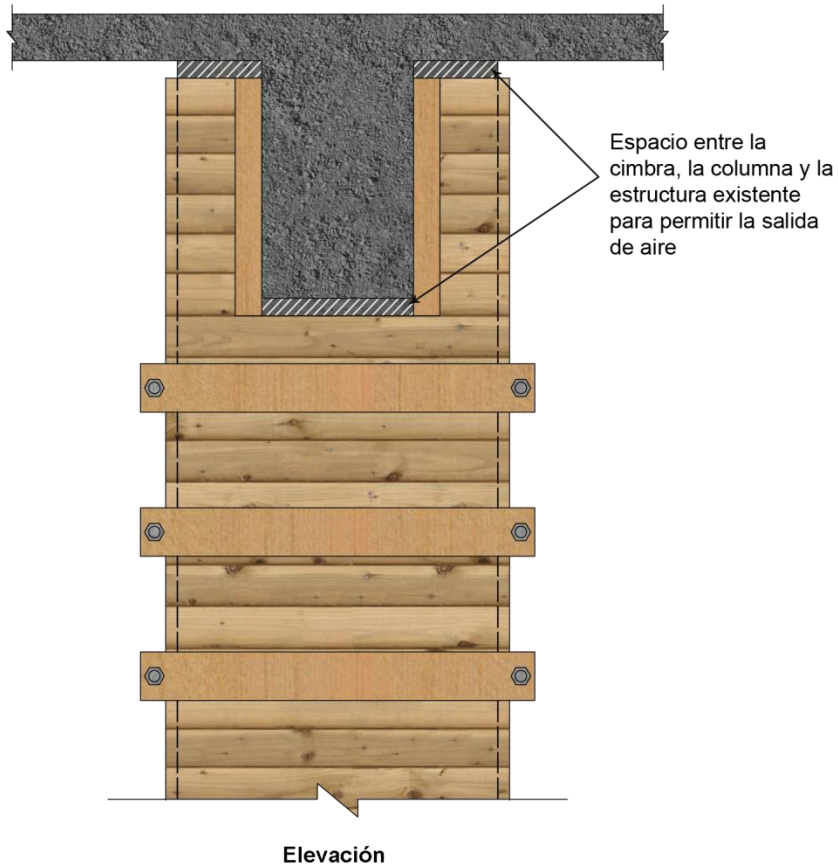


Ilustración 18. Ejemplo de cimbra de columna encamisada diseñada para facilitar la salida de aire del concreto.

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

5 ENCAMISADOS DE VIGAS, COLUMNAS O NUDOS CON ACERO

5.1 DEFICIENCIA POR CORREGIR

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

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



- a. Edificios con columnas cuyo modo de comportamiento está controlado por fuerza cortante. Tal es el caso de columnas en edificios de planta baja flexible (Figura 94).

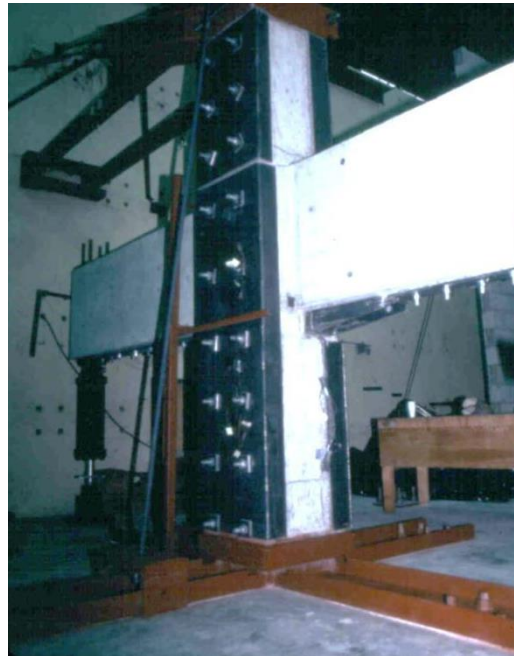


Ilustración 19. Ensayo de laboratorio de una conexión viga-columna con placas de acero en el lecho inferior de la viga conectadas con anclas adheridas. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1991.

- b. Edificios cuyas columnas tienen escasa capacidad de deformación lateral o requieren incrementar su resistencia a carga axial mediante el confinamiento de las camisas metálicas.
- c. Edificios con vigas y/o columnas cuyos traslapes del refuerzo existente son escasos.

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

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

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

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



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

5.2.1 Encamisado de vigas

Consiste en la colocación de una placa de acero que cubra el lecho inferior de la viga, en contacto con el concreto por medio de mortero y conectores (Figura 95). Los lados pueden ser encamisados también con placas o con soleras que se conectan a la losa con el uso de ángulos y conectores.



*Ilustración 20. Encamisado de vigas con ángulos y soleras. Fuente: Horse Construction Company China
www.horseen.com*

5.2.2 Encamisado de columnas

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



a. Placas que cubren todo el perímetro del elemento.

Se tienen dos casos: el más usual es el encamisado de la columna en toda su altura (o encamisado completo); el otro es el encamisado local, normalmente colocado para confinar la zona de un traslape de refuerzo con longitud insuficiente, o bien, para reforzar e incrementar el confinamiento en una zona donde se esperan deformaciones inelásticas. En el caso del encamisado completo, la técnica se aplica para incrementar la capacidad de deformación lateral, resistencia a cortante y/o carga axial. El encamisado se deberá diseñar de modo que se minimice la cantidad de soldadura en campo.

Dependiendo del tipo de comportamiento para el que fue diseñado el encamisado, será necesario asegurar contacto entre las placas y el concreto existente. Si el encamisado se diseñó para incrementar el confinamiento de la columna original, bastará con rellenar el espacio entre las placas metálicas de la camisa y la columna con mortero fluido de baja contracción. Si la camisa se diseñó para incrementar la resistencia a flexión y/o fuerza cortante, además del mortero fluido de baja contracción, se revisará la necesidad de colocar conectores entre la camisa y la columna. Los conectores se deben distribuir de forma uniforme en toda la altura de la columna en cada una de sus caras. La profundidad de empotramiento de los conectores será de al menos 1/3 de la menor dimensión transversal de la columna. En la Ilustración 21 se muestran ejemplos de columnas encamisadas sin (Ilustración 21a) y con conectores (Ilustración 21b).



a) Columna con encamisado completo sin conectores



b) Columna con encamisado completo con conectores

Ilustración 21. Encamisado completo de columna: a) sin conectores b) con conectores. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019 y archivo personal de Rubén Bautista, 2019.

En esta modalidad de encamisado, las placas deben ser soldadas entre sí. En caso de encamisados de columnas rectangulares, se recomienda soldar las placas a ángulos



metálicos que se coloquen en las esquinas de la camisa, por dentro de ella (Ilustración 22).

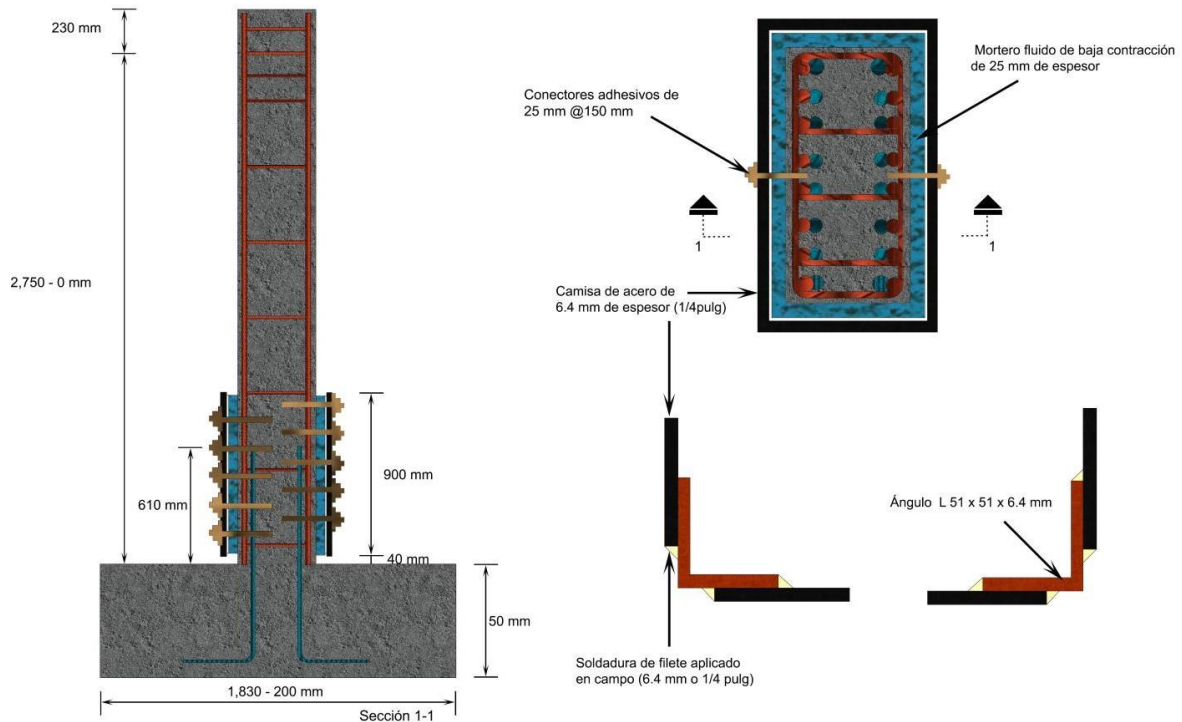


Ilustración 22. Encamisado local de una columna con longitud escasa de traslapes. Véase el detalle de soldadura de las placas del encamisado a ángulos en las esquinas. Fuente: Aboutaha, 1994.

Si el encamisado se coloca para aumentar la capacidad de deformación y/o la resistencia a cortante, se dejará una separación de 30 mm de la losa inferior y del nudo o losa superior. No será aceptable un encamisado metálico sin mortero entre la camisa y el concreto existente (Ilustración 23).



Ilustración 23. Práctica no permitida: encamisado metálico sin mortero entre los elementos de acero y el miembro de concreto. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019.



Ilustración 24. Encamisado local, sujetado con conectores y mortero fluido entre el concreto y el acero. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019.

En el caso de encamisados locales, se conectará la camisa a la columna por medio de conectores en las caras sujetas a flexión (Ilustración 22 y Ilustración 24). Adicionalmente, se colocará mortero fluido sin contracción.

b. Armadura de ángulos y soleras.

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

En el primer caso, sólo es necesario rellenar el espacio entre los ángulos, soleras y el concreto existente, con mortero fluido sin contracción. En el segundo, además de colocar el mortero fluido sin contracción, se debe revisar la necesidad de conectar la camisa al concreto mediante conectores (Ilustración 25).

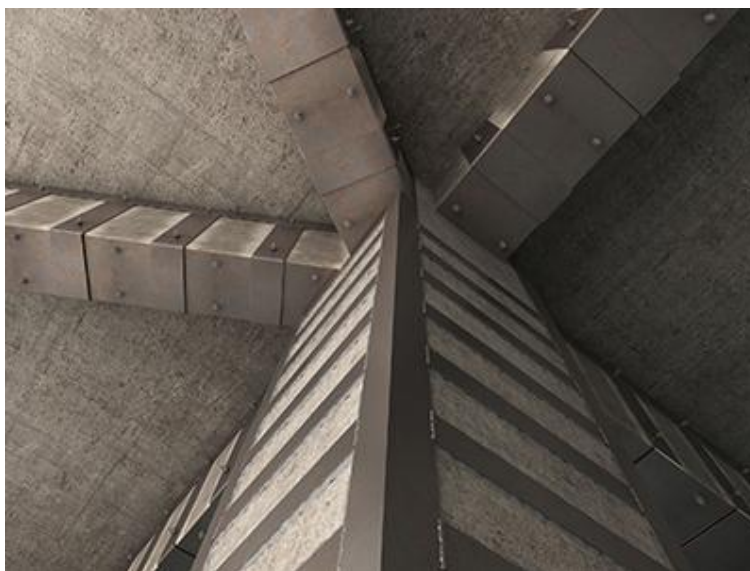


Ilustración 25. Ejemplo de encamisado con armadura de ángulos y soleras, con y sin conectores. Fuente: Horse Construction Company China www.horseen.com



En los extremos de la columna, se recomienda colocar placas de acero para conectar la camisa a la columna y, también, a la losa y viga. Estas placas son fijadas por medio de conectores (Ilustración 26).



Ilustración 26. Ejemplos de la colocación de placas de acero en los extremos de la columna para conectar el encamisado a la columna, y también a la losa.

5.2.3 Encamisado de Nudos

El encamisado de nudos se hará para incrementar su confinamiento y, consecuentemente, su resistencia a corte y capacidad de deformación. El encamisado de los nudos sólo será continuo con la columna inferior; es decir, no se deberá perforar la losa. El encamisado de los nudos se puede fabricar mediante placas de acero soldadas que cubren las distintas caras de la intersección entre la columna y la viga o losa. En la Ilustración 27 se muestra esquemáticamente la colocación de placas de longitud parcial para encamisar el nudo. El caso ilustrado no refiere la existencia de una losa de piso.

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

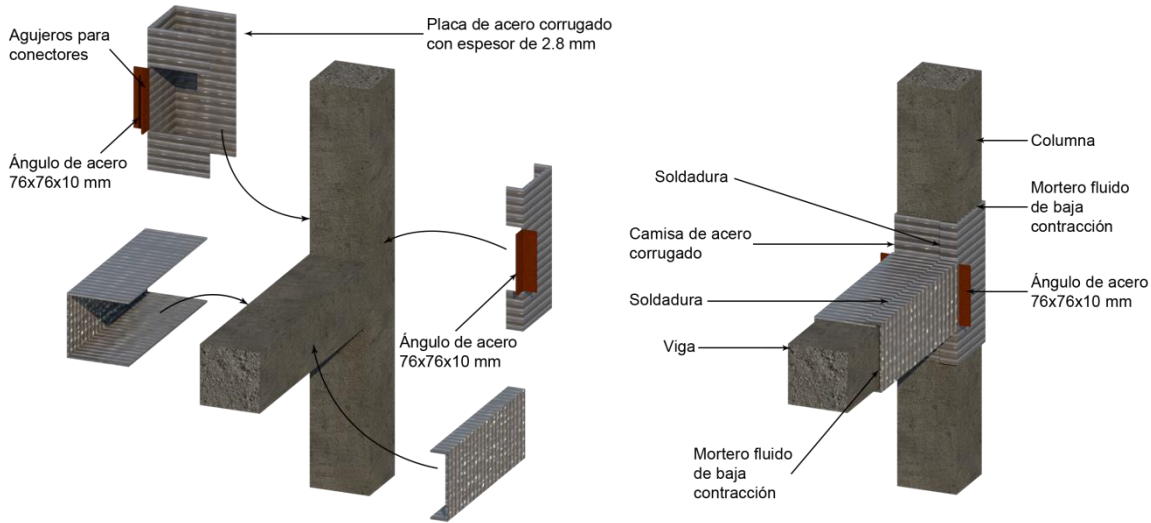


Ilustración 27. Ensamblado esquemático de placas para un encamisado de nudo. Fuente: Elaboración propia, con base en Ghobarah et al., 1996.

5.3 REQUISITO DE ANÁLISIS

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



5.4 REQUISITOS DE DISEÑO

5.4.1 Materiales

- a. Para asegurar el contacto de los encamisados metálicos, ya sea en forma de placas (sección rectangular o circular) o con ángulos y soleras, se usará mortero fluido sin contracción que tenga una resistencia a compresión mínima de 30 MPa (300 kg/cm²) o igual a la del concreto original, la que sea mayor.
- b. Los espesores mínimos y máximos de las placas de acero serán de 6.4 y 12.7 mm (1/4 y 1/2 pulg), respectivamente.
- c. Los espesores mínimo y máximo de los ángulos de acero serán de 6.4 y 19.1 mm (1/4 y 3/4 pulg), respectivamente.
- d. Si es necesario usar conectores, se deberá cumplir con los requisitos de este Volumen.

5.4.2 Vigas

5.4.2.1 Requisitos Geométricos

- a. El área de la sección transversal de acero del encamisado (placas o ángulos) se calculará según el inciso 5.1.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), y no debe ser menor que 0.01 del área de la sección de concreto.
- b. Si se usan encamisados a base de armaduras de ángulos y soleras:
 - I. Las dimensiones de las alas de los ángulos deberán estar en un intervalo entre 1/5 y 1/4 parte de la dimensión transversal de la viga (b, h) y con un espesor *t* máximo de 19 mm (3/4 pulgadas) (Ilustración 28).
 - II. Las soleras sólo se colocarán en forma paralela al eje transversal de la sección en la dirección de análisis. Es decir, para vigas, se colocarán en las caras laterales.
 - III. Las soleras tendrán un peralte, *h_{sol}*, tal que las relaciones *h_{sol}/h_a* y *h_{sol}/b_a* se encuentren entre 3/4 y 1, donde *h_a* y *b_a* son el peralte y el ancho de la sección transversal del ángulo, respectivamente (Ilustración 28).
 - IV. La separación centro a centro entre soleras, *s*, se definirá en función del peralte de la solera, tal que la relación *h_{sol}/s* se encuentre entre 1/5 y 1/3. Además, *s*, no deberá ser mayor que 0.5 veces el peralte efectivo de la viga (*s* ≤ *d*/2) Ilustración 28).
 - V. El espesor, *t_s*, máximo de las soleras será de 12.7 mm (1/2 pulgadas). El espesor de la solera será 3.18 mm (1/8 pulgadas) menor que el espesor del ángulo *t_a*.



- VI. La longitud l_s de la solera será igual al espacio libre entre los ángulos más la longitud del ala del ángulo. Por tanto, el cordón de soldadura en los extremos será igual al peralte de la solera más la longitud del ala (Ilustración 29).

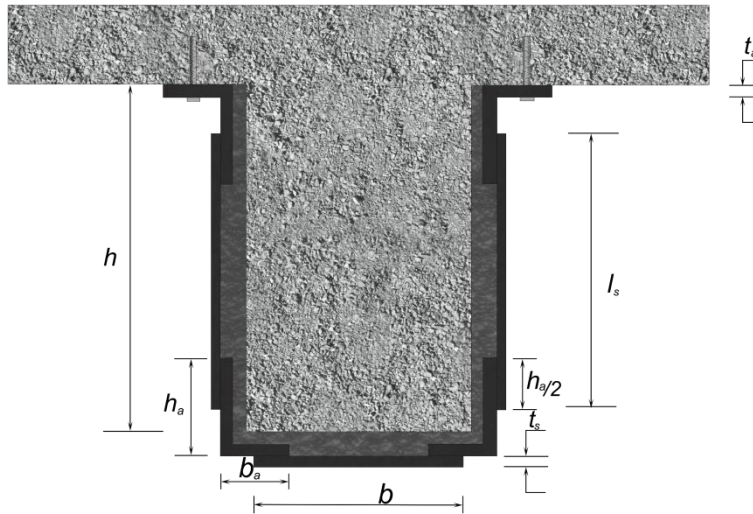


Ilustración 28. Sección transversal de viga encamisada con ángulos y solera.

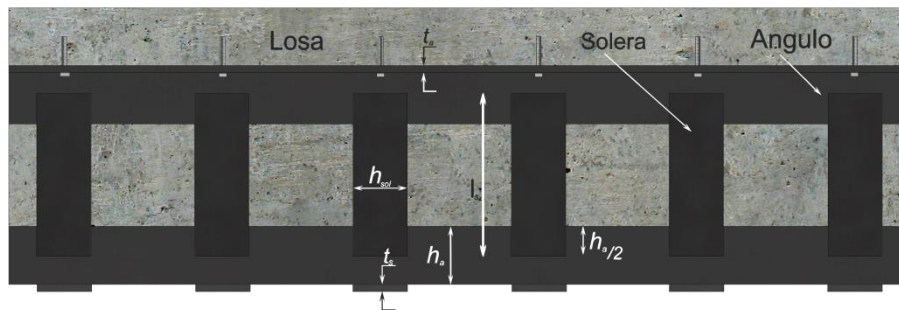


Ilustración 29. Sección longitudinal de viga encamisada con ángulos y soleras.

5.4.2.2 Resistencia a la Flexión

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

5.4.2.3 Resistencia a la fuerza cortante

- a. La resistencia a fuerza cortante de la viga encamisada será igual a la suma de las contribuciones a fuerza cortante del elemento existente y la del encamisado metálico. La contribución de la viga existente será nula si el daño es moderado o severo, según las N-Rehabilitación. Si el elemento fue inyectado con resina epóxica de acuerdo con la sección 6.3.



- b. Se empleará la sección 5.3 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela) para calcular la resistencia a la fuerza cortante.
- c. La separación centro a centro entre soleras no deberá exceder $0.5 d$, donde d es el peralte efectivo de la viga por encamisar.

5.4.2.4 Encamisado local para incrementar el confinamiento

- a. Si se coloca un encamisado local para incrementar el confinamiento en una zona con traslape de refuerzo escaso y/o donde se esperan deformaciones inelásticas, el encamisado se fabricará con placas de acero (Figura 99).
- b. Si la camisa de acero se coloca para mejorar la resistencia de un traslape de barras con longitud insuficiente para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia de las barras traslapadas multiplicado por 1.25 (i. e., valor esperado del esfuerzo de fluencia), se podrá considerar que el traslape tiene una resistencia equivalente a la de un traslape con longitud calculada con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), siempre que se cumplan los puntos i a iii:
 - i. La camisa rodee a la viga en sus tres lados (suponiendo una losa monolítica).
 - ii. La camisa se extienda más allá de la zona del traslape, al menos, una distancia igual a la máxima dimensión transversal de la viga.
 - iii. La camisa esté sujeta al concreto existente con conectores. Al menos se colocarán dos hileras verticales de dos conectores por lado. Los conectores se diseñarán para resistir una cortante rasante igual a la fuerza a tensión que debe resistir el traslape.
- c. Si la camisa se coloca para incrementar la capacidad de deformación inelástica de una zona, las placas de acero cubrirán $0.25l_v$, donde l_v es el claro de cortante e igual a la distancia entre la sección de momento máximo y el punto de inflexión en el diagrama de momentos.
- d. Se deberá revisar la resistencia de la columna existente que quede fuera del encamisado, suponiendo valores de límite inferior de las resistencias de los materiales.

5.4.2.5 Soldadura entre aceros de refuerzo

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



5.4.2.6 Columnas

5.4.2.6.1 Requisitos geométricos

- a. La relación de aspecto de la sección transversal no exceda de 3.
- b. El área de la sección transversal del acero del encamisado (placas o armaduras de ángulos y soleras) se calculará de acuerdo con el inciso 5.1.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). El área transversal del encamisado no debe ser menor que 0.01 del área de la sección de concreto.
- c. Si se usan encamisados a base de armaduras de ángulos y soleras:
 - i. Se colocarán ángulos con dimensiones de sus alas en un intervalo entre $1/5$ y $1/4$ de la dimensión transversal y con un espesor, t_a , máximo de 19.1 mm (3/4 pulgadas) (Ilustración 30).
 - ii. Las soleras sólo se colocarán en forma paralela al eje transversal de la sección en la dirección de análisis.
 - iii. Las soleras tendrán un peralte, h_{sol} , tal que las relaciones h_{sol}/h_a y h_{sol}/b_a se encuentren entre $3/4$ y 1, donde h_a y b_a son el peralte y el ancho de la sección transversal del ángulo, respectivamente (Figura 105).

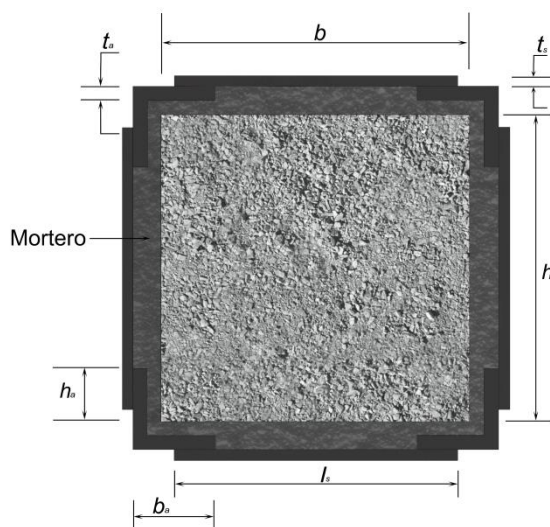


Ilustración 30. Sección transversal de columna encamisada con ángulos y soleras.

- iv. La separación entre soleras, s , se definirá en función del peralte de la solera, tal que la relación h_{sol}/s se encuentre entre $1/5$ y $1/3$. Además, s no deberá ser mayor que 0.5 veces la dimensión transversal h de la columna, en la dirección paralela a la dirección de análisis ($s \leq h/2$) (Figura 106).
- v. El espesor, t_s , máximo de las soleras será de 12.7 mm (1/2 pulgadas). El espesor de la solera será 3.18 mm (1/8 pulgadas) menor que el espesor del ángulo t_a .



- vi. La longitud, l_s , de la solera será igual al espacio libre entre los ángulos más la longitud del ala del ángulo. Por tanto, el cordón de soldadura en los extremos será igual al peralte de la solera más la longitud del ala (Ilustración 31).

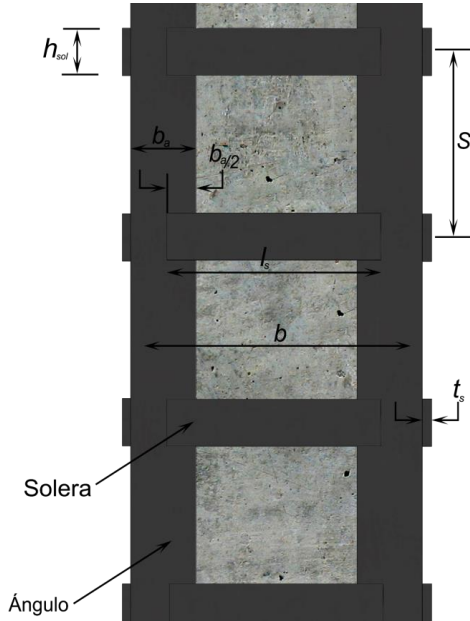


Ilustración 31. Elevación de una columna encamisada con ángulos y solera.

- d. En los extremos superior e inferior de la columna, las placas tendrán un peralte de entre 200 y 300 mm. Estas placas se anclarán al concreto por medio de dos conectores de al menos 15.9 mm (5/8 pulgadas) de diámetro (Figura 107). Estos conectores se anclarán dentro del núcleo de la columna, dentro del tercio medio de cada lado de la columna.



Ilustración 32. Encamisado de columna con placa con conectores en el extremo.



5.4.2.7 Resistencia a flexocompresión

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

5.4.2.8 Resistencia a la fuerza cortante

- a. Se aceptará que la resistencia a fuerza cortante de un encamisado de acero sea igual a la suma de las contribuciones del elemento original más la del encamisado de acero. Se despreciará la contribución de la columna existente cuando se cumpla cualquiera de las siguientes características:
 - i. Tenga daño moderado o severo, según las N-Rehabilitación.
 - ii. Si la estructura fue diseñada con un reglamento anterior a la versión de 1987.
- b. Se revisará que no se exceda el límite de fuerza cortante que pueda resistir el elemento de concreto existente.
- c. La separación centro a centro entre soleras no deberá exceder $0.5h$, donde h es la dimensión transversal de la columna en la dirección de análisis.

5.4.2.9 Confinamiento

Si se encamisado la columna por medio de placas continuas para incrementar su confinamiento y, con ello, su capacidad de deformación lateral y de carga axial, se usarán las ecuaciones 2 y 3 para calcular la cuantía de refuerzo por confinamiento:



En caso de encamisado con placas continuas:

$$p_c = \frac{2t_p}{b_2}$$

Ecuación 2

En caso de encamisado con ángulos y soleras:

$$p_c = \frac{2th_{sol}}{b_2s}$$

Ecuación 3

En donde:

- p_c cuantía de refuerzo de confinamiento considerada equivalente a los estribos; su límite superior es de 0.012.
- t_p espesor de la placa del encamisado de acero, mm.
- b_2 dimensión transversal de la sección de la columna perpendicular a la dirección de análisis, mm.
- h_{sol} peralte (altura) de la solera, mm.
- s separación de soleras, mm.

5.4.2.10 Encamisado local para incrementar confinamiento

- a. Si se coloca un encamisado local para incrementar el confinamiento en una zona con traslape de refuerzo escaso y/o donde se esperan deformaciones inelásticas, el encamisado se fabricará con placas de acero (véase Figura 99).
- b. Si la camisa de acero se coloca para mejorar la resistencia de un traslape de barras con longitud insuficiente para desarrollar el esfuerzo especificado de fluencia de las barras traslapadas multiplicado por 1.25 (i. e., valor esperado del esfuerzo de fluencia), se podrá considerar que el traslape tiene una resistencia equivalente a la de un traslape con longitud calculada con la sección 6.6 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela), siempre que se cumpla i a iii:
 - i. La camisa rodee a la columna en todo su perímetro.
 - ii. La camisa se extienda más allá de la zona del traslape, al menos, una distancia igual a la máxima dimensión transversal de la columna.
 - iii. La camisa esté sujeta al concreto existente con conectores. Al menos se colocarán dos hileras verticales de dos conectores por lado. Los conectores se diseñarán para resistir una cortante rasante igual a la fuerza a tensión que debe resistir el traslape.



- c. Si la camisa se coloca para incrementar la capacidad de deformación inelástica de una zona, las placas de acero cubrirán:
- $0.25 l_v$, para incrementar la capacidad de deformación inelástica de la zona encamisada y si la carga axial en la columna es menor o igual a $0.3 f'_c A_g$
 - $0.375 l_v$, para incrementar la capacidad de deformación inelástica de la zona encamisada y si la carga axial en la columna es mayor que $0.3 f'_c A_g$

En donde:

l_v es el claro de cortante e igual a la distancia entre la sección de momento máximo y el punto de inflexión en el diagrama de momentos.

- d. Se deberá revisar la resistencia de la columna existente que quede fuera del encamisado, suponiendo valores de límite inferior de las resistencias de los materiales.

5.4.2.11 Soldadura entre aceros de refuerzo

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

5.5 REQUISITOS DE CONSTRUCCIÓN

5.5.1 Encamisado con placas

- Se preparará la superficie de concreto del elemento por encamisar hasta obtener una rugosidad de al menos 6 mm (1/4 pulgadas) entre valle y cresta. La cara escarificada deberá estar libre de cualquier sustancia que impida el correcto funcionamiento de la sustancia adhesiva.
- Si se usan conectores adhesivos con resina epóxica en vigas y columnas, su profundidad será la que se calcule con la información de este Volumen. La profundidad mínima será la mayor de 100 mm o un tercio de la menor dimensión transversal del elemento. En losas, la profundidad será de medio peralte.
- Si se usan conectores, su distribución será al tresbolillo con una separación máxima de 200 mm en forma paralela al eje longitudinal y se localizarán dentro del tercio medio de la dimensión transversal (b o h) del elemento (Ilustración 33).
- En todo encamisado, el espacio entre el concreto y la placa será de al menos 25 mm (1/pulgadas) y deberá ser rellenado con mortero fluido sin contracción con resistencia a compresión al menos igual a la del elemento por encamisar o de 30 MPa (300 kg/cm²), la que resulte mayor.



Ilustración 33. Distribución adecuada de conectores en encamisado de placas de acero. Fuente: Archivo personal de Rubén Bautista, 2019.

5.5.2 Ángulos y soleras

- a. Se preparará la superficie de concreto del elemento por encamisar correspondiente con el área de contacto de los ángulos y soleras hasta obtener una rugosidad de al menos 6 mm (1/4 pulgadas) entre valle y cresta. La cara escarificada deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la correcta adhesión del mortero al concreto original.
- b. Durante la colocación de los ángulos, se utilizará un anillo de acero o su equivalente, con objeto de mantener en posición a los ángulos durante el soldado de las soleras. Los ángulos deberán estar separados, al menos, 12.7 mm (1/2 pulgadas) del concreto.
- c. El espacio entre el concreto, los ángulos y la solera deberá rellenarse con mortero fluido sin contracción con una resistencia a compresión mínima de 30 MPa (300 kg/cm²) (Ilustración 34).



Ilustración 34. Mortero fluido sin contracción colocado entre las soleras y el concreto. Fuente: Archivo personal de Víctor Cruz, 2019.

- d. En ningún caso se aceptará un encamisado metálico que no esté en contacto con el elemento de concreto mediante mortero (véase Ilustración 23).

5.6 REQUISITOS DE SUPERVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

- a. Se debe revisar que toda la superficie de concreto se escarifique hasta alcanzar una rugosidad como la especificada en los planos de construcción.
- b. El diámetro y la profundidad del agujero para alojar anclas o conectores sean las especificadas en el proyecto ejecutivo, con las tolerancias establecidas por los fabricantes.
- c. Se limpie el agujero de polvo y residuos de la perforación para la correcta adhesión de la resina con el concreto existente.
- d. Cuando corresponda, rellenar el espacio anular entre el agujero de las placas y el conector con resina epóxica.
- e. Se cumpla con lo establecido en el capítulo 13 de las NTC-Acero de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). En particular, se debe garantizar que las soldaduras de penetración completa cumplan con los espesores y longitud de cordón requeridos.
- f. En caso de colocar concreto o mortero fluido sin contracción, debe verificarse que la cimbra permita la salida de aire y facilite la colocación del material.



6 ENCAMISADOS DE VIGAS, COLUMNAS, NUDOS Y MUROS CON COMPUESTOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (CPRF)

6.1 DEFICIENCIA POR CORREGIR

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

El encamisado de vigas, columnas, nudos y muros con compuestos de polímeros reforzados con fibras (CPRF) se emplea para:

- a. Restaurar la capacidad original de un elemento estructural deteriorado.
- b. Incrementar la capacidad de carga de elementos.
- c. Incrementar la ductilidad y la capacidad a flexión (no muy usual) y fuerza cortante de columnas y muros.
- d. Incrementar la ductilidad y la capacidad a flexión y fuerza cortante de vigas.

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

6.2.1 General

Este tipo de encamisado consiste en el recubrimiento del elemento estructural con capas de fibras que se adhieren por medio de resina epóxica. Dichas fibras trabajan de forma unidireccional, razón por la cual su orientación depende de la característica estructural (resistencia, confinamiento) que se busca mejorar. Así, si se desea incrementar la resistencia a la flexión de una viga, por ejemplo, las fibras deberán ser colocadas colinealmente al eje del elemento; si se quiere mejorar la resistencia a fuerza cortante, las fibras serán transversales al eje de la viga.

El encamisado del elemento estructural puede ser total, si se cubren todas las caras del elemento, o parcial, si se cubren dos o tres caras del elemento estructural. Su uso depende de la característica estructural que se quiera mejorar y el área en donde lo requiere. Es común encontrar encamisados de CPRF cubriendo de forma total a las columnas. En el caso de vigas, es usual que sólo se encamise el alma y/o el lecho inferior.

Su aplicación es sencilla y se lleva a cabo rápidamente. Debido a la ligereza del material y al bajo volumen empleado, los encamisados no cambian significativamente el peso de la estructura ni reducen la superficie útil de la planta.



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

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

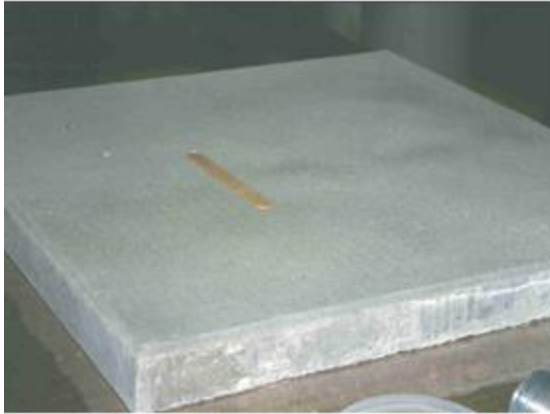
Las fibras pueden ser precuradas (o preimpregnadas) o no. Antes de colocar las fibras, es usual que el concreto del sustrato se repare localmente para lograr una superficie tersa y uniforme para promover una adecuada adhesión con la resina empleada para pegar las fibras.

6.2.2 Consideraciones para la colocación de la CPRF

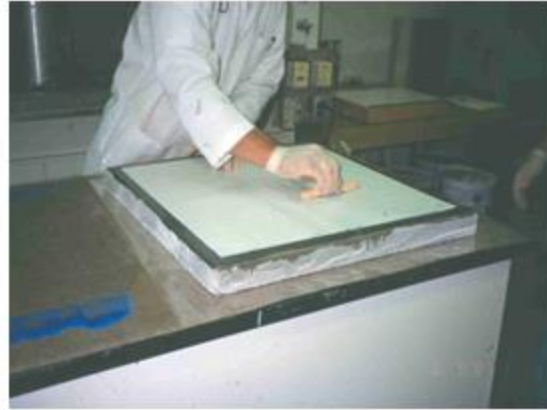
Los procedimientos de instalación de polímeros reforzados con fibras pueden variar entre fabricantes. Las diferencias dependen del tipo de sistema y del estado de la estructura a rehabilitar. En los siguientes incisos se describen las principales consideraciones para la instalación de CPRF. En la Ilustración 35 se ilustran gráficamente los pasos a seguir para colocar los CPRF. Una demostración de la colocación de CPRF en especímenes de laboratorio se puede observar en la Ilustración 36.



Ilustración 35. Guía ilustrada del proceso de colocación de CPRF.



a) Superficie limpia, ya preparada y con resina saturante



b) Colocación de hojas de fibra

Ilustración 36. Fotos de una demostración de colocación de hojas de fibra de carbono en laboratorio. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1994.

6.2.2.1 Indicaciones previo a la colocación

- a. Los imprimadores, resinas y adhesivos no se deben aplicar sobre superficies frías o congeladas a menos de que el fabricante lo permita.
- b. Se puede utilizar una fuente de calor auxiliar para elevar la temperatura ambiente y la superficie durante la instalación y mantener temperaturas adecuadas durante el curado.
- c. Las resinas y adhesivos no se deben aplicar en superficies húmedas o mojadas a menos de que el fabricante así lo permita.
- d. Los sistemas no deben aplicarse a superficies de concreto que estén sujetas a transmisión de vapor de humedad.
- e. Todo equipamiento debe estar limpio y en buenas condiciones de funcionamiento y el personal debe tener la capacitación de operación del equipamiento.
- f. El personal debe contar con el equipo de seguridad necesario, como guantes, máscaras, protectores oculares y overoles.

6.2.2.2 Preparación de la superficie de contacto

Los recubrimientos existentes, polvos, suciedad, aceites, obstrucciones y objetos incrustados en la superficie deben retirarse del concreto (Ilustración 36 a). Las grietas de más de 0.3 mm de grosor deben ser inyectadas a presión con resina epóxica antes de la instalación del CPRF, la inyección se deberá llevar a cabo según se indica en este Volumen. Las grietas más pequeñas



pueden requerir inyección de resina o sellado para evitar la corrosión del acero de refuerzo existente. En ningún caso se podrá aplicar el CPRF si el elemento muestra signos de corrosión.

Las variaciones fuera del plano de la superficie de contacto no deben exceder 1 mm. Estas variaciones se pueden eliminar mediante rectificado o chorro de agua, o se pueden alisar mediante una masilla a base de resina. Los agujeros o huecos deben rellenarse con masilla a base de resina.

Toda la superficie deberá estar seca, como lo indica el fabricante del sistema. Las superficies por encamisar deberán ser, como mínimo, planas o convexas. Los huecos grandes en la superficie deben ser reparados con un material de reparación compatible con el concreto existente.

6.2.2.3 Aplicación del CPRF

La imprimación debe ser colocada de manera uniforme sobre toda la superficie del concreto donde se colocarán las fibras. Se puede aplicar mediante el uso de un rodillo liso, y si fuera el caso, la masilla se puede aplicar con ayuda de una espátula. La imprimación aplicada debe protegerse de polvo, humedad u otros contaminantes antes de aplicar el CPRF. Antes de colocar la resina saturante, se debe dejar que el imprimador o masilla curen de acuerdo con lo especificado por el fabricante.

Una vez curada la imprimación, se aplica la resina saturante de forma uniforme en todas las superficies preparadas donde se colocará el sistema (Ilustración 36 b). Las fibras se pueden impregnar por separado antes de colocarlas en la superficie de concreto usando una máquina de impregnación de resina.

Al colocar las fibras en la superficie, se deben presionar suave y uniformemente (Ilustración 37 c). Es necesario eliminar el aire atrapado entre las capas de resina antes de que ésta endurezca. Se tiene que aplicar suficiente resina saturante para lograr cubrir totalmente las fibras (Ilustración 37 d) Si se coloca una nueva capa de fibras, se debe instalar antes de que la capa de resina anterior se cure y se dificulte la adecuada unión entre las diversas capas de resina y fibras.



c) Colocación de resina saturante sobre las fibras



d) Resultado final, ante de capa de protección

Ilustración 37. Colocación de hojas de fibra de carbono en laboratorio. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1994.

6.2.2.4 Curado de Resina

Todas las resinas deben curarse de acuerdo con las indicaciones del fabricante. La instalación de capas sucesivas debe detenerse si existe alguna anomalía en el curado de las resinas de las capas anteriores.

6.2.2.5 Protección

Durante el periodo del curado de la resina, se deberá tener cuidado con temperaturas adversas, el contacto con agua, polvo o suciedad, la luz solar excesiva y la alta humedad. Como protección temporal se recomienda utilizar algún elemento, como plástico o carpas que ayuden a proteger el elemento reforzado. Si se requiere apuntalamiento temporal, el CPRF debe estar completamente curado antes de quitar el apuntalamiento.

6.3 REQUISITOS DE ANÁLISIS

- a. Cumplimiento al factor de comportamiento sísmico.
- b. Comportamiento monolítico. Para fines de análisis, se deberá suponer un comportamiento de sección compuesta de la estructura existente con el encamisado de CPRF. Ello implica que haya un contacto completo entre el CPRF y el concreto existente.
- c. Momento de inercia. El incremento de rigidez del CPRF es bajo. Por ello, para el análisis, sólo se considerará el momento de inercia del elemento de concreto existente.

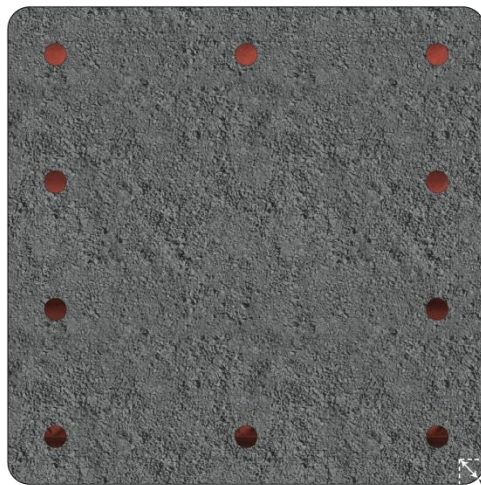


- d. Carga axial. Se supondrá que la carga axial en columnas es resistida solamente por el elemento original, ya que el CPRF no trabaja a compresión. Se podrá incrementar la capacidad axial de los elementos existentes si se diseña el encamisado de CPRF para aumentar su confinamiento.
- e. Factor de rigidez efectiva para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para la sección encamisada según el inciso 3.2.1 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). Se debe ignorar la aportación de la rigidez del encamisado de CPRF.

6.4 REQUISITOS DE DISEÑO

6.4.1 Requisitos Geométricos

- a. En el caso de elementos con sección transversal rectangular, se redondearán las esquinas con un radio al menos igual a 12.7 mm (1/2 pulgadas), pero no menor que el valor recomendado por el fabricante de las fibras (Ilustración 38).



$r \geq 12.7 \text{ mm (1/2 pulg)}$

Ilustración 38. Esquinas redondeadas en elementos de concreto.

- b. Si se requiere incrementar el confinamiento en elementos con sección transversal rectangular por medio de CPRF, la relación lado largo a lado corto de la sección transversal deberá ser menor o igual que 1.5, y ninguna de las dimensiones de la sección transversal deberá ser mayor que 900 mm. Si alguna de las dimensiones es mayor que 900 mm, se deberá convertir la sección rectangular en una sección circular mediante la adición de alguna camisa de concreto.



En la Ilustración 39 se muestran dos columnas encamisadas con fibras de carbono, con y sin conectores. En ambos casos, las esquinas de las columnas existentes fueron redondeadas para evitar la fractura de las fibras.



Ilustración 39. Aplicación de un encamisado completo en columnas, con y sin conectores. Fuente: Cortesía de Oscar López, 1995.

6.4.2 Resistencia a Flexión en Vigas

El diseño a flexión en vigas deberá satisfacer los requisitos de ACI 440.2R-17.

6.4.3 Resistencia a la Flexocompresión en Columna

El diseño a flexocompresión de una columna deberá cumplir con ACI 440.2R-17.

6.4.4 Refuerzo Transversal para Confinamiento

La cuantía de fibras para proveer confinamiento se calculará de conformidad con el capítulo 13 de ACI 440.2R-17.

Para calcular el espesor del encamisado, se usarán las 4 y 5 (correspondientes a las ecuaciones 13.3.3a de ACI 440.2R):

$$nt_f = 1000 \frac{D}{E_f}$$

Sección circular

ECUACIÓN 4



$$nt_f = 1500 \frac{D}{E_f}$$

Sección rectangular

ECUACIÓN 5

En donde:

- D diámetro de la sección o la dimensión mayor, mm.
- E_f módulo de elasticidad del CPRF, MPa.
- N número de capas de CPRF.
- t_f espesor de la capa de CPRF, mm.

Para secciones circulares, la cuantía de CPRF se calculará con la ecuación 6 (a partir de las ecuaciones 13.3.4a, b y c de ACI 440.2R):

$$p_f = \frac{4nt_f w_f}{D s_f}$$

Ecuación 6

Para secciones rectangulares

$$p_f = 2nt_f \left(\frac{b+h}{bh} \right) \frac{w_f}{s_f}$$

ECUACIÓN 7

En donde:

- D diámetro de la sección circular o la diagonal de la sección rectangular, mm.
- b y h dimensiones de la sección rectangular, mm.
- w_f ancho de la banda de CPRF, mm.
- s_f separación entre los ejes de las bandas de CPRF, mm

En cualquier caso, se debe cumplir que:

$$p_f \geq \frac{0.0052p_i D}{d_{bl}} \frac{f_y}{f_{fe}}$$

Ecuación 8

En donde:

- D diámetro o diagonal de la sección, mm.
- p_i cuantía de acero de refuerzo longitudinal
- d_{bl} diámetro del acero de refuerzo longitudinal, mm.
- f_y esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, MPa.
- f_{fe} tensión efectiva del CPRF, MPa.

$$f_{fe} = \epsilon_f E_f$$



Ecuación 9

En donde:

E_f módulo de elasticidad del CPRF, MPa.

ϵ_{fe} deformación unitaria efectiva.

$$f_{fe} = 0.004 \leq k_{\epsilon} \epsilon_{fu}$$

En donde:

k_{ϵ} 0.58

ϵ_{fu} deformación unitaria última del CPRF.

En los casos donde el encamisado no es continuo, la separación libre entre las bandas de CPRF no deberá ser mayor que 150 mm ni que la calculada con la ecuación 10 (Ilustración 40):

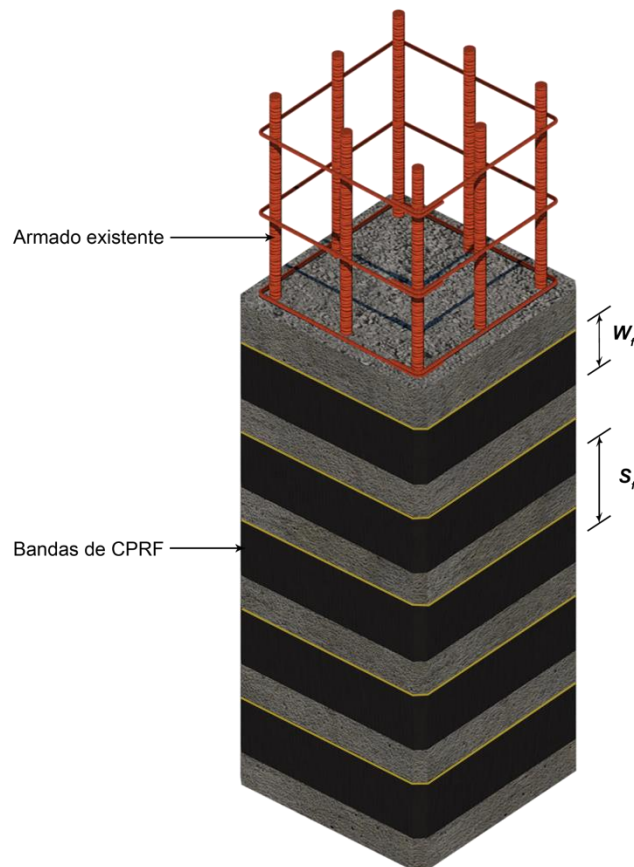


Ilustración 40. Notación para el encamisado de elementos con bandas de CPRF. Fuente: Elaboración propia, con base en ACI 440-2R, 2017.



$$s_f \leq \left[3 - 6 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \right] d_{bt} \leq 6d_{bt}$$

ECUACIÓN 10

En donde:

f_u esfuerzo último del acero de refuerzo longitudinal, MPa.

6.4.5 Requisitos para fuerza cortante

El diseño del encamisado para resistir la fuerza cortante se hará de acuerdo con el capítulo 11 de ACI 440.2R-17.

La resistencia a fuerza cortante de un elemento encamisado con CPRF será igual a la suma de las contribuciones del concreto y del refuerzo transversal del elemento existente, más la contribución de la camisa de CPRF. Si la estructura fue diseñada con un reglamento anterior a la versión de 1987, se despreciará la contribución del elemento existente a la resistencia a la fuerza cortante.

La contribución del CPRF será igual a $\Psi_f V_f$. El factor Ψ_f se considerará igual a 0.95 en el caso de un encamisado completo; en el caso de encamisados parciales (en los cuales se cubren tres o dos caras —opuestas— del elemento), el factor Ψ_f se considerará igual a 0.85 (Ilustración 41).

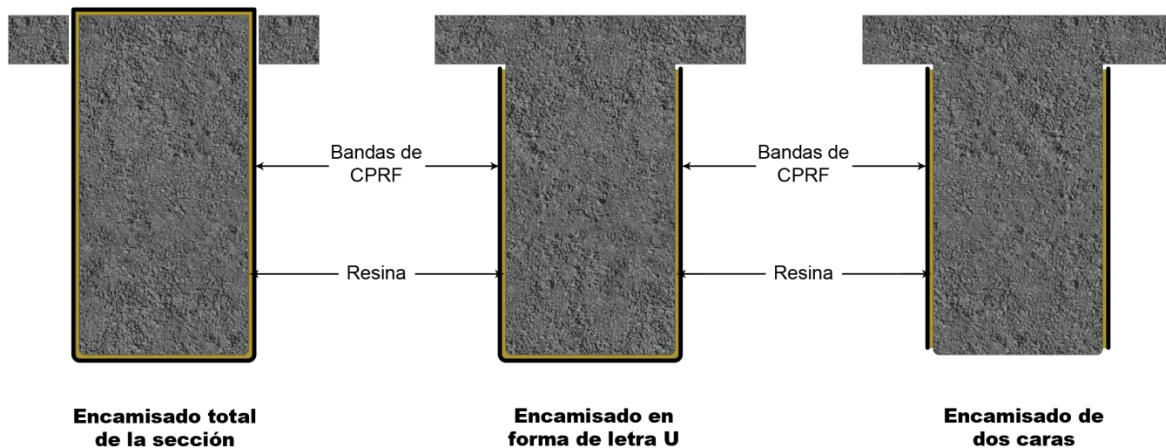


Ilustración 41. Encamisados completo y parcial de vigas

La contribución a la resistencia a fuerza cortante del CPRF se calcula a partir de la ecuación 11

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f}$$

ECUACIÓN 11

Para secciones rectangulares, A_{fv} se calcula como:



$$A_{FV} = 2nt_f w_f$$

ECUACIÓN 12

Para secciones circulares, se calcula de la siguiente forma:

$$A_{fv} = \frac{\pi}{2} nt_f w_f$$

Las dimensiones mencionadas en las expresiones anteriores se definen en la Ilustración 42.

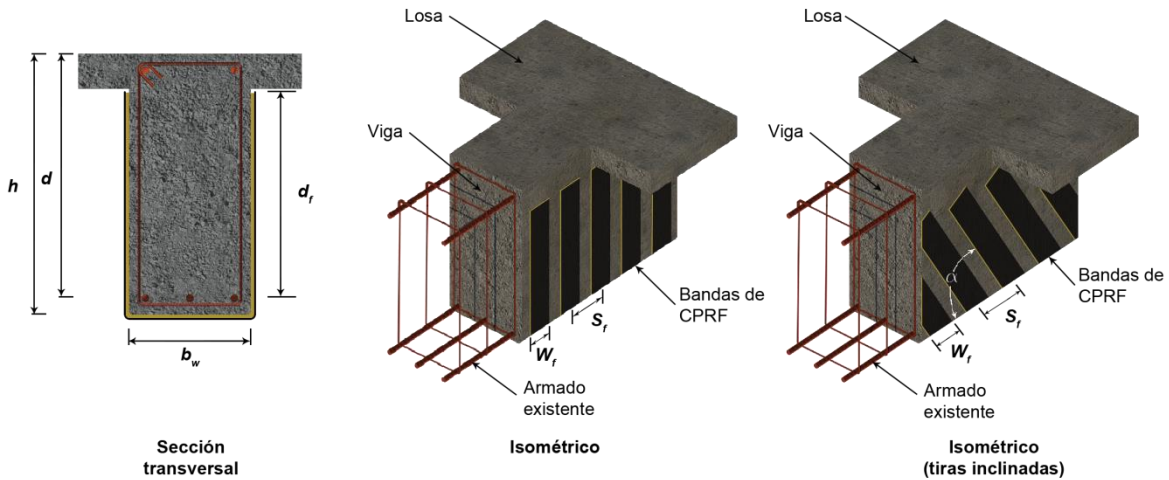


Ilustración 42. Notación de encamisados de vigas con bandas de CPRF.

6.4.5.1 Límite del refuerzo cortante

El límite de la suma de las contribuciones a la resistencia a fuerza cortante aportada por el acero de refuerzo existente y el CPRF es el especificado en las ecuaciones 13 y 14 para elementos con sección rectangular o circular, respectivamente. La primera ecuación corresponde al sistema internacional de unidades y medidas; en paréntesis se presentan las expresiones equivalentes en el sistema gravitacional usual (kilogramo fuerza y centímetro).

Sección regular

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} bh$$

$$(V_s + V_f \leq 2.20 \sqrt{f'_c} bh)$$

ECUACIÓN 13



Sección circular

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} 0.8D^2$$

$$(V_s + V_f \leq 2.20 \sqrt{f'_c} 0.8D^2)$$

ECUACIÓN 14

En donde

V_s Resistencia a fuerza cortante del acero de refuerzo, N (kg).

6.5 CONECTORES DE CPRF

Se aceptará el uso de conectores hechos de CPRF. Los conectores o anclas de CPRF son un método viable de conexión, entre otros, para retrasar o evitar el desprendimiento del CPRF del concreto.

Para formar los conectores, la tela u hoja de fibras de carbono o de otro material se corta de forma perpendicular a la dirección de las fibras. Posteriormente, se enrolla en forma de un cilindro con diámetro igual al del anclaje calculado. El cilindro formado se amarra en un extremo; este extremo es el que se insertará en el agujero. El otro extremo del cilindro se corta longitudinalmente (i. e., en la dirección de las fibras) en varias tiras, haciéndolo parecer a una escobeta. El conector se ahoga en la perforación con una resina polimérica. Las dimensiones del conector y del agujero en el concreto serán determinadas siguiendo el método de diseño, y sobre los pasos para la colocación de anclas de CPRF. En Ilustración 43 se muestra un conector hecho con CPRF (Del Rey et al., 2017).

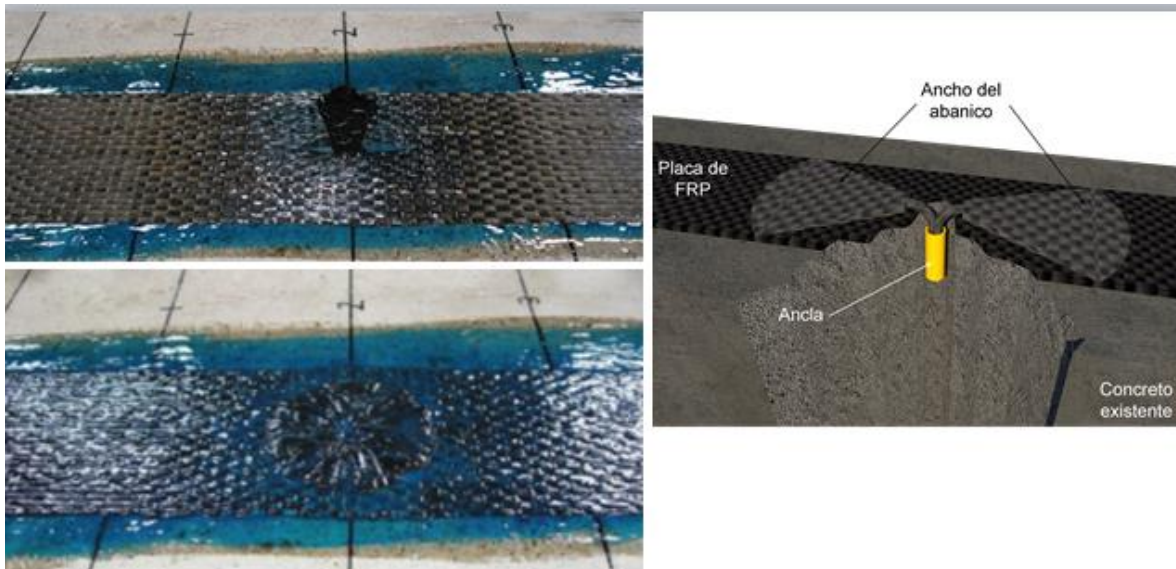


Ilustración 43. Conector del CPRF.



Se distinguen tres tipos de conectores de CPRF (Ilustración 44):

- Conector recto, en el cual el plano del abanico es colineal al eje del ancla;
- Conector a 90 grados, cuando el plano del abanico forma 90 grados con respecto al eje del ancla;
- Conector a β grados, cuando el ángulo entre el plano del abanico y el eje del ancla es de β grados. Es claro que el conector a 90 grados es un caso particular del conector a β grados.

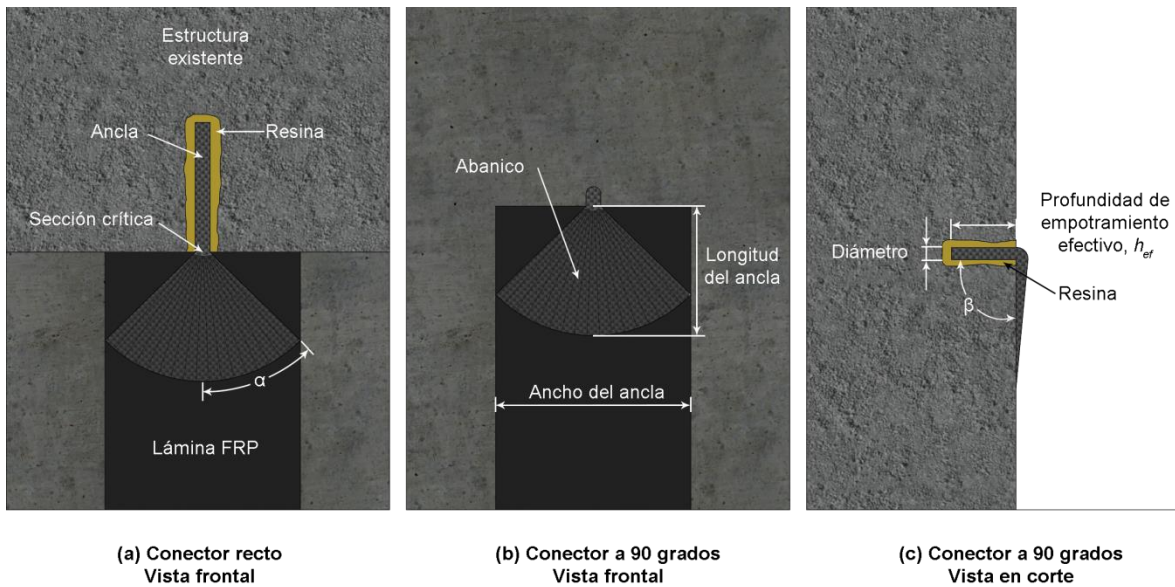


Ilustración 44. Tipos de conectores de CPRF.

Los tres modos de falla de un conector se pueden observar en la Ilustración 45 (Del Rey et al., 2017). Los modos son:

- Falla del concreto mediante la formación de un cono.
- Falla mixta del concreto con formación de un cono y de adherencia.
- Falla por extracción del ancla.
- Desprendimiento del abanico de la hoja de fibra.
- Rotura de la fibra.

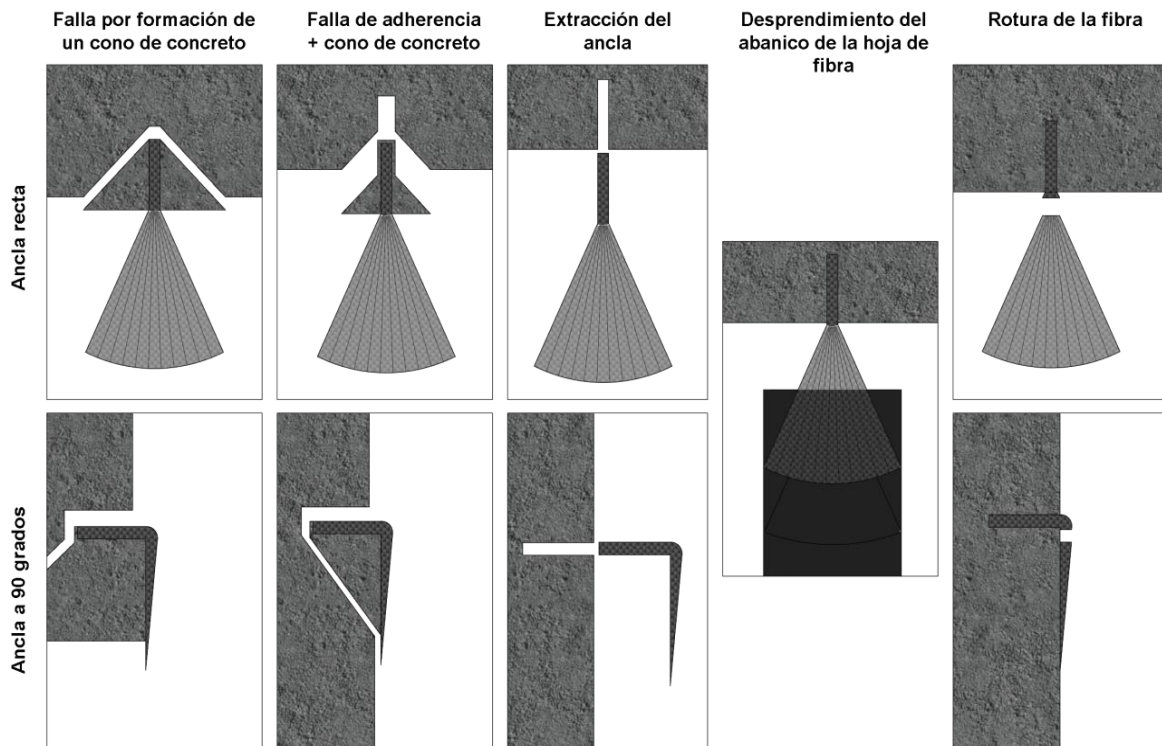


Ilustración 45. Modos de falla de conectores de CPRF.

6.5.1 Metodología de diseño de conectores de CPRF

Para el diseño de conectores de CPRF se deberán seguir los pasos siguientes (Del Rey et al., 2017):

- Determinar si se requieren instalar conectores de CPRF para fijar el encamisado. Para ello, se requiere calcular la resistencia del elemento rehabilitado con CPRF usando los requisitos de. Si la resistencia requerida no se puede alcanzar con capas adicionales de CPRF o si el diseño no es eficiente, se deberá considerar el uso de conectores de CPRF.
- Deformación unitaria efectiva del encamisado fijado con conectores. Determinar la magnitud de la deformación unitaria efectiva de diseño en el CPRF requerida para satisfacer la demanda de diseño suponiendo un anclaje perfecto.
- Fuerza de tensión total del CPRF fijado con conectores. Determinar la fuerza de tensión resultante en las capas de CPRF utilizando la deformación unitaria efectiva y el módulo de elasticidad del CPRF. Esta fuerza se transmitirá a través de las anclas al sustrato. Los conectores permitirán el desarrollo de la deformación unitaria efectiva supuesta en las hojas de fibra.
- Número de conectores necesarios. Determinar el número de conectores que se instalarán, teniendo en cuenta que éstos deben estar distribuidos en todo el ancho de la fibra. Posteriormente, se debe calcular la fuerza de tensión por ancla.



- e. Área transversal del conector de CPRF. Calcular el diámetro del ancla del CPRF como:
- i. Suponiendo que N_{fr} es la fuerza de tensión en el conector, calcular el área transversal mínima del ancla de CFRP usando la ecuación 15 para conectores rectos, la ecuación 16 para conectores a 90 grados, o la ecuación 17 para conectores a β grados (véase Ilustración 46).

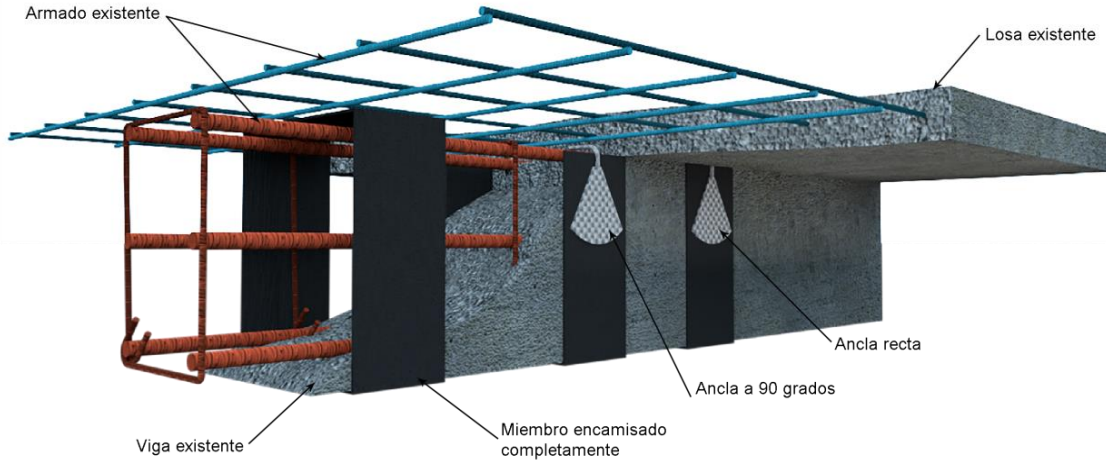


Ilustración 46. Uso de conectores de CPRF

Para anclajes rectos:

$$N_{fr} = 0.59 w_f t_f f_{fu}$$

ECUACIÓN 15

En donde:

- N_{fr} resistencia a tensión de la fibra (rotura a tensión), N.
- w_f ancho de la tira de CPRF, mm.
- t_f espesor de la capa de CPRF usada para elaborar el conector de CPRF, mm.
- f_{fu} resistencia última la tensión del CPRF, MPa.

Para conectores a 90 grados:

$$N_{fr} = 2.2 E_f \varepsilon_{fu} 10^{-3} A_{ancla}^{0.62} \left(\frac{90 - \alpha}{90} \right)$$

ECUACIÓN 16

En donde:

- E_f módulo de elasticidad del CPRF, MPa.
- ε_{fu} deformación unitaria de falla del CPRF usado en el ancla, mm/mm.
- A_{ancla} área de la sección transversal del ancla de conector de CPRF, mm².



α ángulo de abanico definido en la ilustración 46, grados

Para anclajes con ángulo de inserción diferente, se multiplica la ecuación 16 por el factor k_β de la ecuación 17:

$$k_\beta = 2.34 \left(\frac{\beta}{2\pi} \right) - 0.33$$

ECUACIÓN 17

En donde:

k_β factor de reducción para conectores a β grados
 β ángulo de inclinación del conector, rad.

- ii. Cuando se usan propiedades netas (en condiciones secas de la fibra), se debe tener en cuenta que el área de la sección transversal real del conector de CPRF es mayor que el área de las fibras, ya que éstas deben saturarse con resina epóxica. Aunque una relación de fibra a volumen total depende en gran medida del método de fabricación y la calidad de la mano de obra, se puede suponer una relación de 0.3 a 0.5 para calcular el área real del ancla una vez que las fibras están saturadas con resina y colocadas en el agujero.
- iii. Se ha recomendado que el volumen total de fibras en el ancla debe ser al menos igual al volumen de fibras en la hoja por ser anclada
- f. Dimensión del barreno en el elemento de concreto. Usando la fuerza a tensión requerida en el anclaje igual a N_{cc} y N_{cb} , en las ecuaciones 15 a 17, calcular la profundidad de empotramiento efectiva requerida, h_{ef} , y el diámetro del agujero, d_0 . Se recomienda que h_{ef} sea, al menos, mayor que la suma del recubrimiento de concreto más 25 mm para mitigar el desprendimiento del CPRF. El diámetro del orificio perforado deberá ser ligeramente mayor (entre 3 y 4 mm) que el diámetro externo del conector.
- g. Dimensión del abanico. Usando la fuerza de tensión en el conector como N_{sd} en la ecuación 19, calcular el área del abanico requerida para transmitir la fuerza de tensión desde la hoja de CPRF al conector. Para ello, se supone un ángulo para el abanico y se calcula la longitud y el ancho del abanico para lograr el área requerida.

$$N_{sd} = 0.35 V_{sb} A_{abanico}$$

ECUACIÓN 18

N_{sd} resistencia a la adherencia del abanico, N.
 V_{sd} esfuerzo resistente a la adherencia de la resina epóxica, MPa
 $A_{abanico}$ área del abanico, mm².



6.5.1.1 Proceso de Colocación

Los conectores se deberán instalar durante el proceso de rehabilitación con CPRF como se indica a continuación (Breña, 2010):

- a. Los agujeros para los conectores se deberán perforar a la profundidad requerida por el diseño con un diámetro entre 3 y 4 mm más grande que el del ancla de CPRF.
- b. La superficie de concreto deberá estar libre de recubrimientos, polvos, aceites, obstrucciones y objetos incrustados. El agujero para el conector se limpiará para retirar el polvo o material suelto siguiendo el mismo proceso de limpieza que para anclas de acero.
- c. Se deberá aplicar una imprimación de resina epóxica sobre la superficie de concreto y dentro de la perforación. Se deberá dejar que la imprimación se cure de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- d. Posteriormente, se aplica el saturante sobre la superficie de concreto y dentro de la perforación. Después se colocan las hojas de fibra sobre la superficie de concreto y se saturan con resina, según las recomendaciones del fabricante. En el proceso de colocación de las fibras, éstas deberán desplazarse cuidadosamente, sin cortarlas, alrededor de los agujeros para permitir la inserción de los conectores.
- e. Se insertan los conectores en el agujero con resina y se acomodan las tiras de fibras para formar el abanico sobre la superficie de la fibra a conectar.
- f. Se aplica una segunda capa de resina que sature a la fibra y al conector.
- g. Curar el sistema de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Durante el periodo de curado de la resina se deberá tener cuidado con temperaturas extremas, contacto con el agua, polvo o suciedad, exposición excesiva a luz solar y alta humedad.

6.6 REQUISITOS DE CONSTRUCCIÓN

- a. Se deben cumplir los requisitos establecidos en el capítulo 6 del 440.2R-17.
- b. Antes de encamisar un elemento con CPRF, si es el caso, se debe reparar localmente el elemento, especialmente si exhibe deterioro por corrosión.
- c. Se deberán usar productos certificados por un organismo nacional de certificación.
- d. Cuando la aplicación dependa de la adherencia de las fibras al concreto existente (como en el caso de encamisados para incrementar la resistencia a la flexión), se debe



preparar la superficie de concreto para garantizar la adherencia del CPRF. Se deberán seguir las instrucciones de los fabricantes de CPRF.

- e. Cuando la aplicación dependa del contacto entre las fibras y el concreto existente (como en el caso de encamisados para incrementar el confinamiento de una zona), la superficie debe estar seca y limpia, libre de cualquier sustancia o defecto que pueda afectar el contacto entre el concreto existente y el CPRF. Se debe limpiar con un cepillo con cerdas rígidas.
- f. No se aplicarán encamisados de CPRF en elementos que presenten corrosión en el acero de refuerzo, a menos de que se reparen.
- g. La colocación de las fibras y resina, así como el curado de la resina se harán siguiendo las indicaciones del fabricante.
- h. Se recomienda proteger el encamisado con cubiertas de plástico hasta que la resina termine su proceso de curado.

6.7 REQUISITOS DE SUPERVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Para llevar a cabo una correcta supervisión que garantice la calidad del proceso, se recomienda consultar el capítulo 7 de ACI 440.2R-17. Al menos, se observarán y registrarán los aspectos a los siguientes:

- a. Fecha y tiempo de instalación.
- b. Temperatura ambiente, humedad relativa y observaciones generales del estado del clima.
- c. Temperatura de la superficie del concreto.
- d. Humedad de la superficie del concreto.
- e. Método de pretratamiento de la superficie.
- f. Descripción cualitativa de la limpieza de la superficie.
- g. Tipo de fuente auxiliar de calor, en casos aplicables.
- h. Tamaño de grietas no inyectadas con epóxicos
- i. Número de fibras o número de lotes de láminas precuradas y ubicación aproximada en la estructura.



- j. Número de lotes, relaciones de mezcla, tiempo de mezclado y descripción cualitativa de la apariencia de todas las mezclas de resina, incluyendo los primarios (primera), saturantes, resinas de regulación, adhesivos y mezclas de revestimiento.
- k. Observaciones del progreso del curado de las resinas.
- l. Conformidad con los procesos de instalación.
- m. Resultado de pruebas de extracción: adherencia, modo de comportamiento y localización.
- n. Propiedades del CPRF obtenidas mediante pruebas de paneles de muestra de campo o de paneles testigos, si son requeridos.
- o. Ubicación y tamaño de cualquier delaminación y/o burbujas de aire.
- p. Progreso general del trabajo.

El supervisor debe proporcionar al constructor, al proyectista, al corresponsable y al director los resultados de las pruebas en paneles. Éstos deben ser conservados por lo menos 10 años o durante el periodo especificado por el Corresponsable Estructural. El contratista de la instalación debe conservar muestras de las mezclas de resinas y el registro de la ubicación de cada lote.

7 ENCAMISADO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA

7.1 DEFICIENCIA POR CORREGIR

El diseño de la rehabilitación dependerá del modo de comportamiento de la estructura existente, como resultado de la evaluación estructural ante sismo.

Los edificios que pueden ser rehabilitados para mejorar su desempeño sísmico mediante encamisado de muros de mampostería son:

- a. Edificios de marcos resistentes a momento, de concreto o de acero, con muros diafragma, con o sin daño, cuya falla puede afectar el desempeño sísmico de todo el edificio.
- b. Edificios a base de muros de carga de mampostería, con o sin daño.

La técnica de encamisar muros de mampostería tiene como objetivo mejorar el comportamiento de los muros ante cargas sísmicas a través de:

- a. Incrementar la resistencia a fuerza cortante.



- b. Aumentar la capacidad de deformación inelástica.
- c. Aumentar la rigidez.
- d. Incrementar la capacidad a flexocompresión del muro cuando se añaden castillos en los extremos para anclar la malla.

Esta técnica puede ser utilizada en muros con cualquier grado de daño, como reparación, o en muros sin daño previo, como reforzamiento.

7.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

Consiste en el aumento de la sección transversal de un muro estructural de mampostería mediante la colocación de mallas de alambre soldadas, capas de CPRF1 o barras corrugadas de acero cubiertas con varios centímetros de mortero de cemento o de concreto, colocados a mano o mediante lanzado. También se pueden encamisar el muro con ferrocemento o con concreto reforzado con fibras de acero. El encamisado puede ser completo, si rodea a todo el muro, o parcial, si sólo cubre una cara. Es usual que el encamisado se aplique solamente en una cara del muro, como en aquellos de colindancia en los cuales no se tenga acceso por el exterior. En la Figura 47 se pueden observar las mallas de alambre soldadas colocadas sobre la mampostería, listas para ser recubiertas con mortero.



Ilustración 47. Uso de encamisado de muros de mampostería para rehabilitar una escuela.

En caso de muros de mampostería simple o de muros mal confinados (según los requisitos de las NTC-Mampostería para mampostería confinada), se puede considerar construir nuevos castillos y dalas, en adición al encamisado de muros. La construcción de dalas es compleja y laboriosa; se recomienda aprovechar la losa como elemento de confinamiento. En tal caso, se deberá anclar el refuerzo longitudinal del castillo en la losa, ya sea mediante su paso continuo a través de ella o mediante un doblé a 90 grados.

7.3 REQUISITOS DE ANÁLISIS

- a. Factor de comportamiento sísmico. Se cumplirá con el inciso 11.3.3 de esta Guía técnica. Se analizará la estructura suponiendo un factor de comportamiento sísmico consistente con el tipo de pieza del muro, ya sea sólida o hueca, según la definición de las NTC-Mampostería. Para el primer caso, se usará $Q=2$; para el segundo, $Q=1.5$.



- b. Comportamiento monolítico. Para fines de análisis, se supondrá comportamiento monolítico entre la mampostería existente y el encamisado. Esto implica que el encamisado, y más específicamente la malla se conecte al muro de conformidad con las NTC- Mampostería de la Ciudad de México.
- c. Carga axial. Si el muro es de carga, se supondrá que el muro existente resiste la carga axial. Si se requiere, se deberá reforzar el muro por medio de inserción de castillos o adosando un muro al existente para resistir un incremento de la carga axial. Si el muro es diafragma o de relleno, se deberá considerar que no contribuye a resistir cargas verticales.
- d. Factor de rigidez efectiva para análisis lineal. Se usará un factor de rigidez efectiva para el muro encamisado igual a 0.5, el cual afectará el módulo de rigidez a cortante del muro. En el cálculo de la rigidez lateral del muro, se aceptará incluir la aportación del mortero o concreto del encamisado.
- e. Continuidad. Se debe cumplir con lo requerido en la sección 3.3 de las NTC-M de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). El encamisado de los muros de mampostería se debe extender a los muros transversales de manera continua, ya sea doblando la malla, o bien, traslapando un tramo de malla (Ilustración 48 e ilustración 49). De igual forma, el encamisado debe rodear las aberturas en el muro (Ilustración 50).

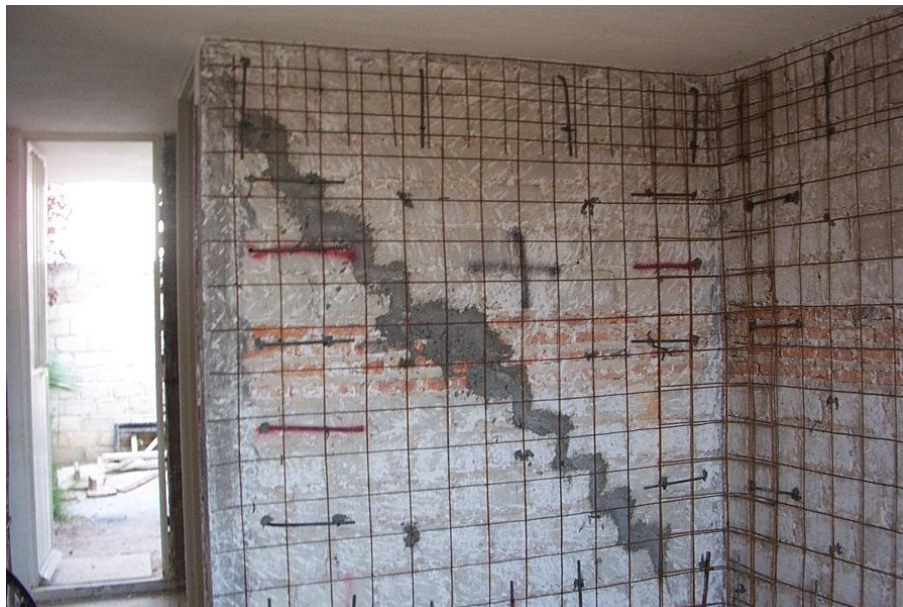


Ilustración 48. Práctica correcta: continuidad del refuerzo del encamisado en muros transversales mediante traslape de malla en forma de letra L. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 2003



Ilustración 49. Práctica no permitida: falta de continuidad del refuerzo del encamisado en muros transversales.



Ilustración 50. Práctica correcta: continuidad del refuerzo del encamisado en abertura, mediante traslape de malla en forma de letra C. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1996.



7.3.1 Materiales

- a. Si se emplean mallas de alambre soldado, éstas deberán cumplir con la NMX-B-290.
- b. Si el encamisado es a base de mortero de cemento, éste deberá ser de tipo I, con una resistencia mínima especificada a la compresión de 12.5 MPa (125 kg/cm²). Se aceptará el uso de fibras de vidrio para el repellado de mortero de acuerdo con la dosificación del fabricante.
- c. Si se emplea concreto para el encamisado, se usará concreto clase 1 con una resistencia mínima especificada a la compresión de 25 MPa (250 kg/cm²).
- d. Si se emplean clavos para conectar la malla de alambre soldado a la mampostería, éstos deberán tener una longitud mínima de 50 mm.
- e. Si se emplean conectores instalados a través de carga explosiva de potencia controlada, el tipo de carga (o de potencia) se determinará a partir de las recomendaciones del fabricante y mediante ensayos en sitio para verificar que la potencia sea la adecuada.
- f. Se acepta el uso de alcayatas o grapas de barra de refuerzo o alambroón para fijar la malla a la mampostería. Estas barras se anclarán en barrenos practicados al muro con resina o mortero epóxico.
- g. Si se emplean morteros o concretos con fibras metálicas o plásticas, se deberán dosificar las fibras de modo que su contribución a resistir fuerza cortante sea equivalente a la contribución de barras de acero de refuerzo convencional. Si se emplean fibras de acero, el contenido de fibras deberá ser de 40 kg/m³ y la relación de aspecto de la fibra (longitud/ diámetro) mayor que 50, a menos que se justifique ante el corresponsable un contenido y relaciones de aspecto distintos.



Ilustración 51. Ejemplos de conectores para usar en encamisados de muros de mampostería.

En la Ilustración 51 se ilustran ejemplos de conectores; en la Ilustración 52 se muestra un conector instalado a través de carga explosiva de potencia controlada.



Ilustración 52. Conector instalado a través de carga explosiva de potencia controlada. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1996.

7.3.2 Requisitos Geométricos

- a. El espesor mínimo del mortero del encamisado será de 15 milímetros.
- b. El espesor mínimo del concreto del encamisado será de 35 milímetros.

7.3.3 Resistencia al cortante de encamisados de malla de alambre recubierta con mortero

7.3.3.1 Tipo de Refuerzo y Cuantías de Acero

Para el diseño de la malla de alambre soldado, así como del mortero a emplear en el encamisado, se debe contemplar lo siguiente:

- a. Las mallas que se utilizarán para el encamisado deberán tener, en ambas direcciones, la misma área de refuerzo por unidad de longitud.
- b. El esfuerzo de fluencia para diseño no deberá ser mayor que 500 MPa (5 000 kg/cm²).
- c. Las mallas se anclarán y detallarán como se señala en los incisos 3.3.6.5 y 3.3.7.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población



- donde se encuentre la escuela). No se permite el uso de separadores o silletas entre la malla y el muro de mampostería.
- d. Las mallas deberán ser continuas a lo largo del muro. No se permitirá traslapar las mallas en ninguna sección vertical del muro.
 - e. Las mallas deberán ser continuas en muros transversales. Se aceptará doblar la malla; si no es posible, se podrá traslapar un tramo de malla en forma de letra L.
 - f. En caso de que se necesite traslapar los alambres verticales de la malla, el traslape entre los alambres transversales extremos no será menor que dos veces la separación entre alambres transversales más 50 mm, de acuerdo con el inciso 3.3.7.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
 - g. Las cuantías mínimas y máximas del refuerzo deberán cumplir las establecidas en el inciso 5.4.4.2 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

7.3.3.2 Diseño de la malla de alambre soldado

El diseño de la malla para resistir fuerza cortante se hará de conformidad con el inciso 5.4.4.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).

Se aceptará usar el procedimiento optativo para diseñar la malla.

Se considerará que la malla se colocará en contacto directo con la mampostería.

7.3.4 Resistencia al cortante de encamisados de concreto con barras corrugadas de acero

7.3.4.1 Tipo de refuerzo y cuantías de acero

- a. Se aceptará usar una capa de refuerzo horizontal y vertical de barras corrugadas de acero.
- b. El esfuerzo de fluencia para diseño será de 420 MPa (4 200 kg/cm²).
- c. El acero de refuerzo se conectará al muro de mampostería mediante anclas hechas a base de barras lisas o corrugadas instaladas con resina o mortero epóxico. También se podrán usar conectores instalados a través de carga explosiva de potencia controlada. En el diseño de las anclas o conectores.
- d. Las cuantías mínimas y máximas del acero de refuerzo del encamisado serán las indicadas en los incisos 7.4.2.4.c y 7.4.2.4.d de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).



7.3.4.2 Diseño del acero de refuerzo corrugado del encamisado

- a. El acero de refuerzo del encamisado con concreto se diseñará según el inciso 7.4.2.4 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
- b. Puesto que la técnica de rehabilitación se usa para incrementar la resistencia a fuerza cortante y la capacidad de deformación lateral del muro, no será necesario anclar el refuerzo vertical del muro. Si se requiere aumentar la capacidad a flexocompresión del muro.

7.4 REQUISITOS DE CONSTRUCCIÓN

7.4.1 Preparación el muro y reparación de grietas

- a. Se debe tratar la superficie del muro antes de colocar el refuerzo y aplicar el mortero o el concreto para lograr un comportamiento monolítico de la mampostería con el encamisado. Se deben retirar los acabados y revestimientos del muro (yeso, morteros, azulejos, por ejemplo). Se deberá preparar la superficie de mampostería mediante un martelinado suave, con el fin de lograr una rugosidad de 3 mm (del orden de 1/8 pulgadas). Las superficies de los castillos y dalas se deberán preparar hasta una rugosidad de 6 mm (1/4 pulgadas). Previamente a la colocación del refuerzo del encamisado, la superficie de la mampostería deberá estar limpia.
- b. Si los muros presentan daños, se deberán retirar los fragmentos y piezas sueltas de la superficie de la mampostería y se limpiará el polvo y las partículas en el interior de las grietas mediante un chorro de agua limpia.
- c. Si el muro presenta agrietamiento moderado o severo, se deben reparar las grietas. Para la reparación de grietas se pueden emplear dos técnicas (véase Alcocer, 2019):
 - i. Inyección. En este caso, las grietas se rellenarán con resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento sin contracción (con consistencia de lechada). Esta técnica se aplicará para los casos de muros de piezas sólidas con bajo número de grietas, las cuales deben estar bien definidas. De acuerdo con las NTC-Mampostería de la Ciudad de México, no se permiten inyecciones por el método de vacío. Los fluidos que sean inyectados deberán fluir correctamente a través de las grietas y vacíos, pero sin aumentar la segregación, sangrado y contracción plástica. En la Ilustración 53 se muestra una grieta rellena con mortero.



Ilustración 53. Reparación de grietas mediante relleno con mortero. Fuente: Flores et al., 2004.

- ii. **Rajueleo.** Consiste en la colocación de pedazos de piezas en las grietas; se aplica cuando las grietas tienen espesores superiores a 5 mm (Ilustración 54). Las rajuelas deben acuñarse y pegarse con mortero tipo I. Es necesario limpiar y humedecer las superficies que estarán en contacto con el mortero antes de colocarlo. Se sugiere utilizar fibra de vidrio o algún aditivo estabilizador de volumen en el mortero de pega para controlar los cambios volumétricos y la contracción por secado que pueda sufrir.



Ilustración 54. Reparación de grietas por rajueleo. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1994.

- d. Si la mampostería está aplastada, será necesario sustituir las piezas por otras con características mecánicas y dimensiones similares. Análogamente, si los extremos del castillo, en el caso de mampostería confinada, están dañados por el agrietamiento inclinado del muro, se recomienda demoler y reconstruir con concreto. Este concreto deberá tener, al menos, la misma resistencia que el original. Se recomienda dejar una



separación de 10 mm entre el concreto nuevo y el existente para ser rellenada después con mortero seco con estabilizador de volumen (véase Alcocer, 2019).



Ilustración 55. Reemplazo de piezas aplastadas. Fuente: Flores et al., 2004

- e. Si la estructura es de mampostería simple, o bien, de mampostería mal confinada, y se opta por añadir nuevos castillos y/o dalas, se deberá proceder como sigue:
 - i. En nuevos castillos: se debe cumplir con lo requerido en el inciso 13.14.6, con excepción de considerar el espesor de la junta mencionado. Adicionalmente, se debe colocar el concreto del castillo por capas. Se recomienda construir el castillo por mitades para asegurar una buena compactación del concreto y, así, evitar oquedades. Si no se construye una dala, se deberá anclar el refuerzo longitudinal del castillo en la losa, ya sea atravesándola para darle continuidad en la altura, o mediante un gancho a 90 grados.
 - ii. En nuevas dalas: apuntalar el sistema de piso. Retirar el número de hiladas para lograr un peralte de la dala de 140 mm. Preparar la cara inferior de la losa que estará en contacto con el nuevo concreto de la dala. Colocar el acero de refuerzo longitudinal de la dala que se anclará en la unión con el castillo. Colocar el concreto a través de ranuras en la losa, usando una cimbra con resbaladilla.



Ilustración 56. Reconstrucción de castillos dañados. Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 1994.



7.4.2 Colocación de refuerzo del encamisado

Se debe cumplir con los incisos a al j, enunciados a continuación:

- a. Se podrá encamisar el muro por una o dos caras.
- b. Las mallas de alambre soldado o capas de barras corrugadas de acero deben ser fijadas a los castillos — extremos e intermedios — y a las dalas (en caso de que estos elementos existan o se inserten) mediante anclajes. Se podrán usar clavos, anclas, grapas, estribos abiertos o cualquier otro conector que permita fijar la malla y transmitir la fuerza cortante. Si se usan conectores expansivos o adheridos (anclas). Se acepta que las anclas tengan forma de letra L. Si se usan grapas o estribos abiertos, sus dobleces a 135 grados deberán abrazar las barras longitudinales del castillo existente. La separación máxima entre conectores, a lo largo de castillos y dalas, será de 450 mm. En la Ilustración 57 y Ilustración 58 se muestran ejemplos del uso de anclas y de estribos abiertos para conectar el refuerzo del encamisado con elementos de confinamiento, respectivamente.

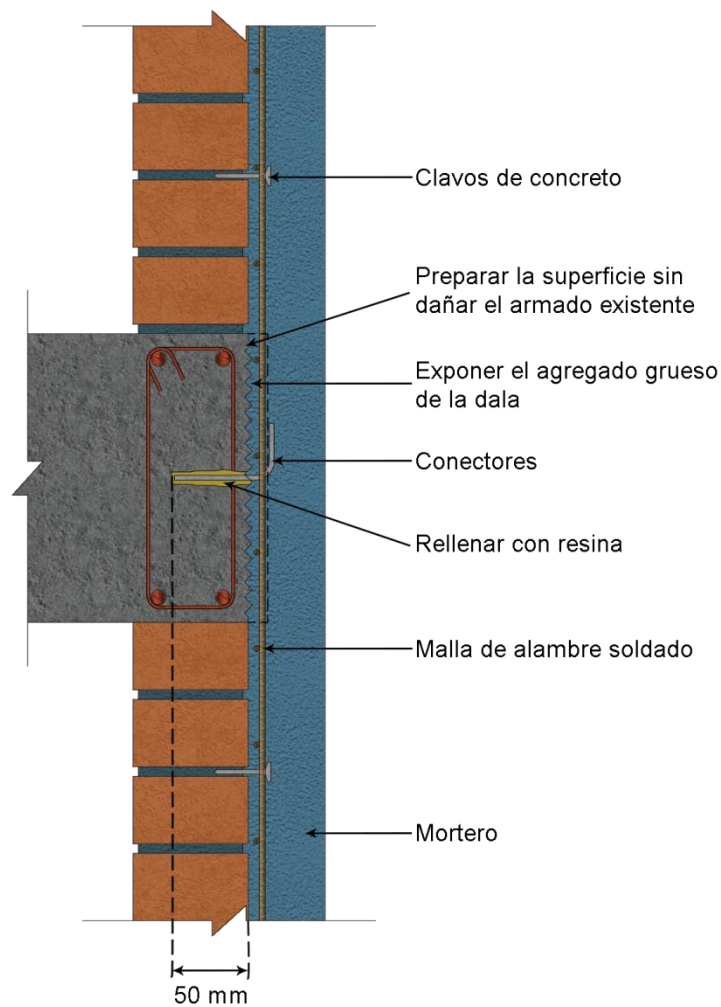


Ilustración 57. Detalle de la conexión del refuerzo del encamisado a dalas usando anclas a 90 grados.

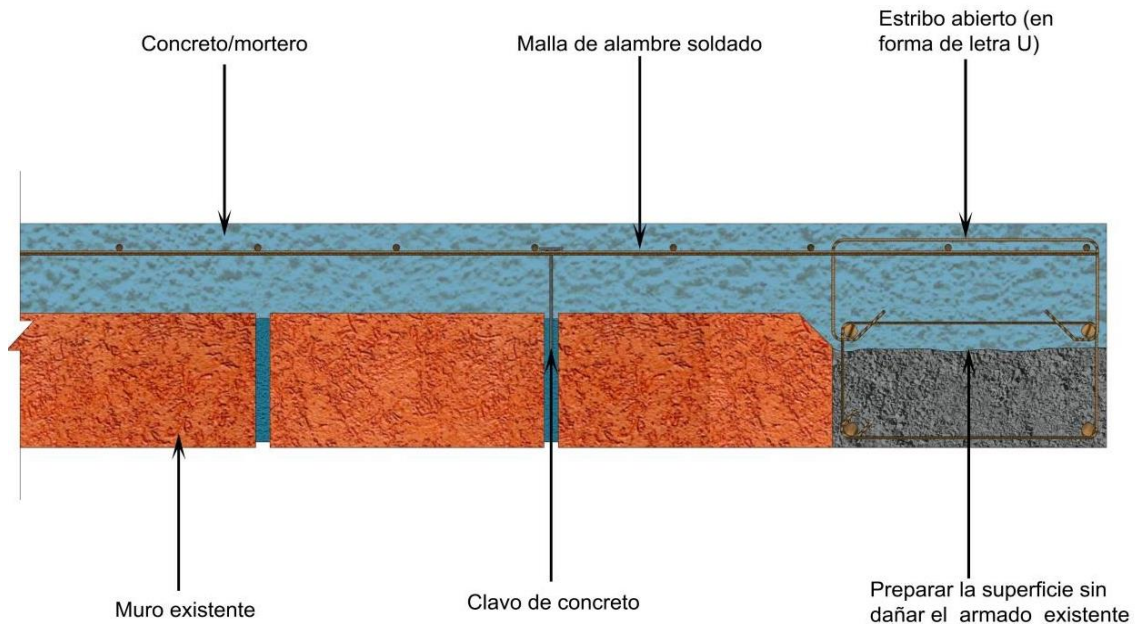


Ilustración 58. Detalle de la conexión del refuerzo del encamisado a castillos mediante estribos abiertos con dobleces a 135 grados.

- c. Con la intención de distribuir el agrietamiento en forma uniforme y obtener un comportamiento estable y con amplia disipación de energía, se usará una densidad mínima de 9 anclajes/m² en el muro de mampostería. Las mallas de calibre pequeño (8 y 10) pueden fijarse con clavos de 50 mm de longitud, colocados manualmente con martillo.
- d. La separación máxima de conectores, en sentidos horizontal y vertical, será de 450 mm. Si se considera que las piezas son de mala calidad, la separación se puede reducir hasta a 250 mm cuando se esté utilizando malla de calibre pequeño (8 o 10); cuando se utilice un calibre mayor (4 o diámetros de 6.4 mm) se recomienda utilizar clavos de 51 mm de longitud con arandela, instalados mediante cargas explosivas de potencia controlada (Ilustración 59).

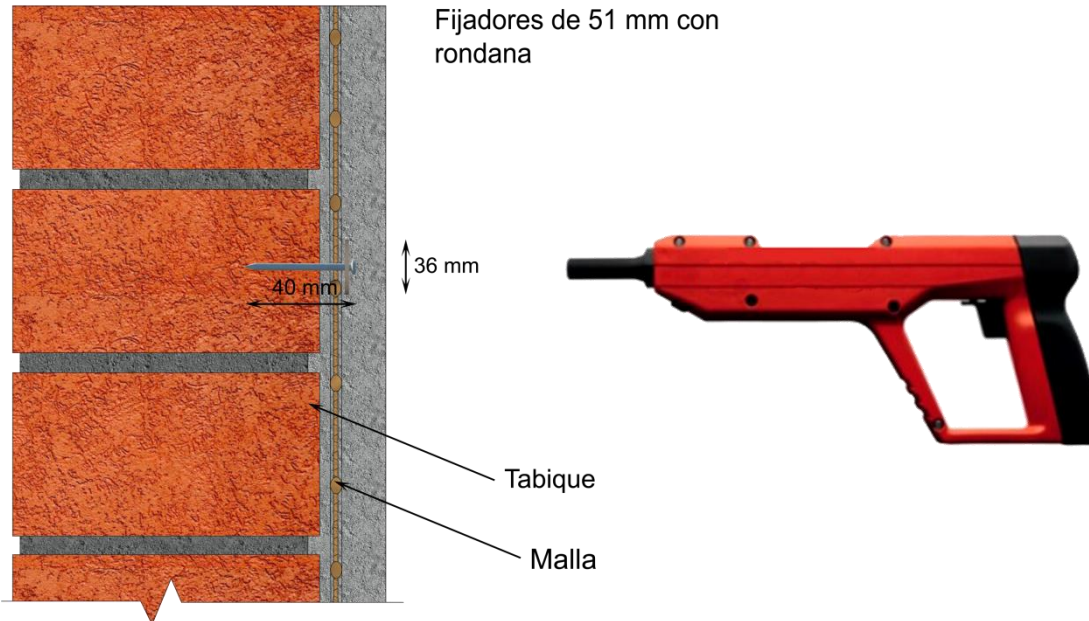


Ilustración 59. Anclaje de malla con conectores instalados mediante cargas explosivas de potencia controlada: Fuente: Alcocer, 2019.

- e. La malla debe rodear ambos bordes verticales del muro (o castillos, en caso de que estos elementos existan), así como los bordes de las ventanas o aberturas que éste tenga.
- f. Si la malla sólo se coloca en una cara del muro, deberá rodear los extremos del muro, así como extenderse al menos dos veces la separación entre alambres transversales y anclarse a la mampostería (Ilustración 60 E ilustración 61).

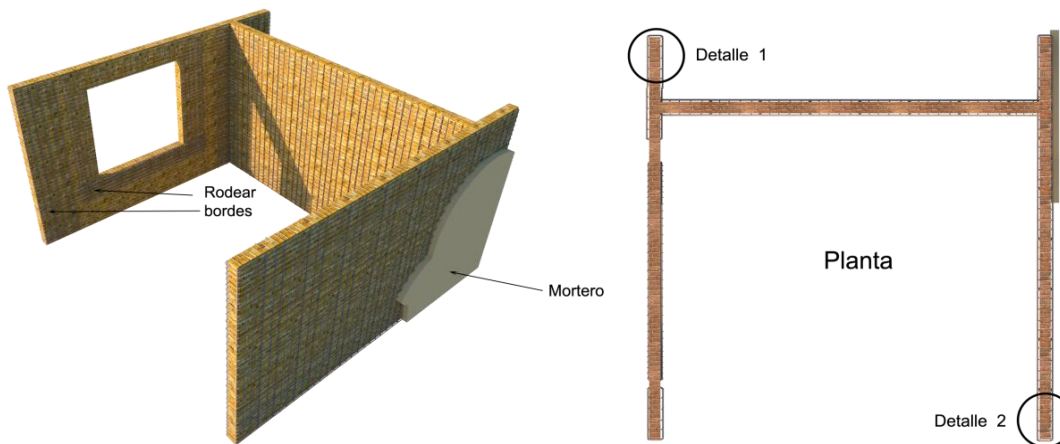


Ilustración 60. Colocación de malla de alambre soldado en la superficie de los muros de mampostería.

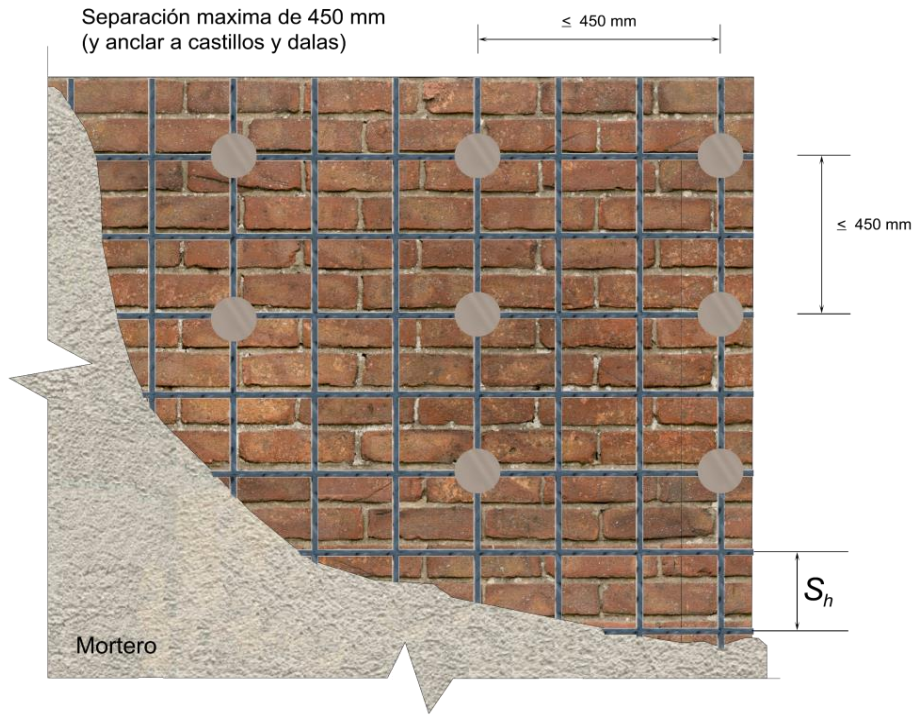


Ilustración 61. Detalles para la colocación de malla de alambre soldado sobre muros de mampostería.

- g. En caso de que la malla no pueda ser doblada y anclada alrededor de los bordes laterales del muro, de las aberturas o las ventanas, se deberá colocar un refuerzo en forma de letra "U" hecho con malla de calibre no inferior a 10 (3.43 mm de diámetro) que sea traslapado con la malla principal en una zona donde los esfuerzos en los alambres de la malla sean bajos. En el diseño de los traslapes se satisfarán los requisitos del inciso 3.3.7.3 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela). En este inciso se considera que la unión de los extremos de las hojas de malla no será menor que dos veces la separación entre alambres más 50 mm (Ilustración 62).

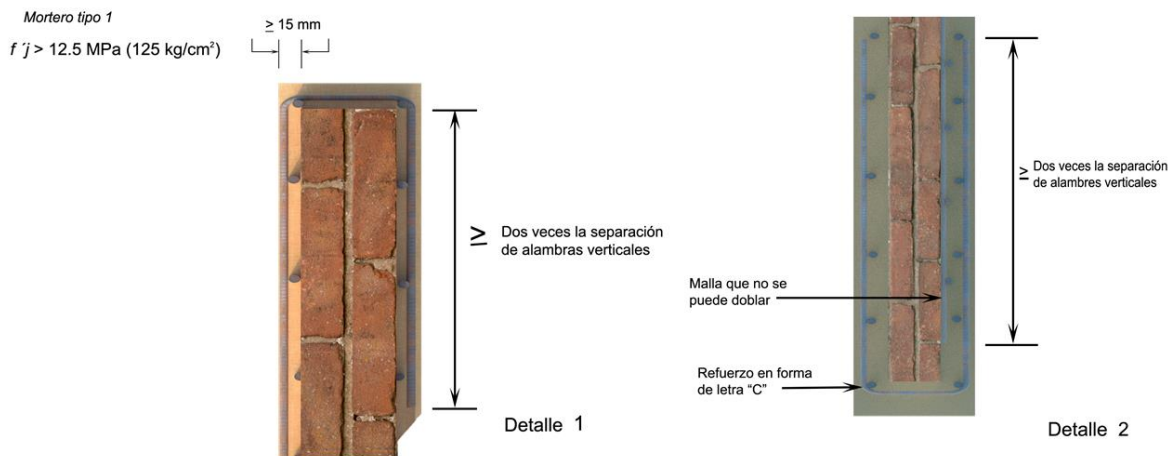
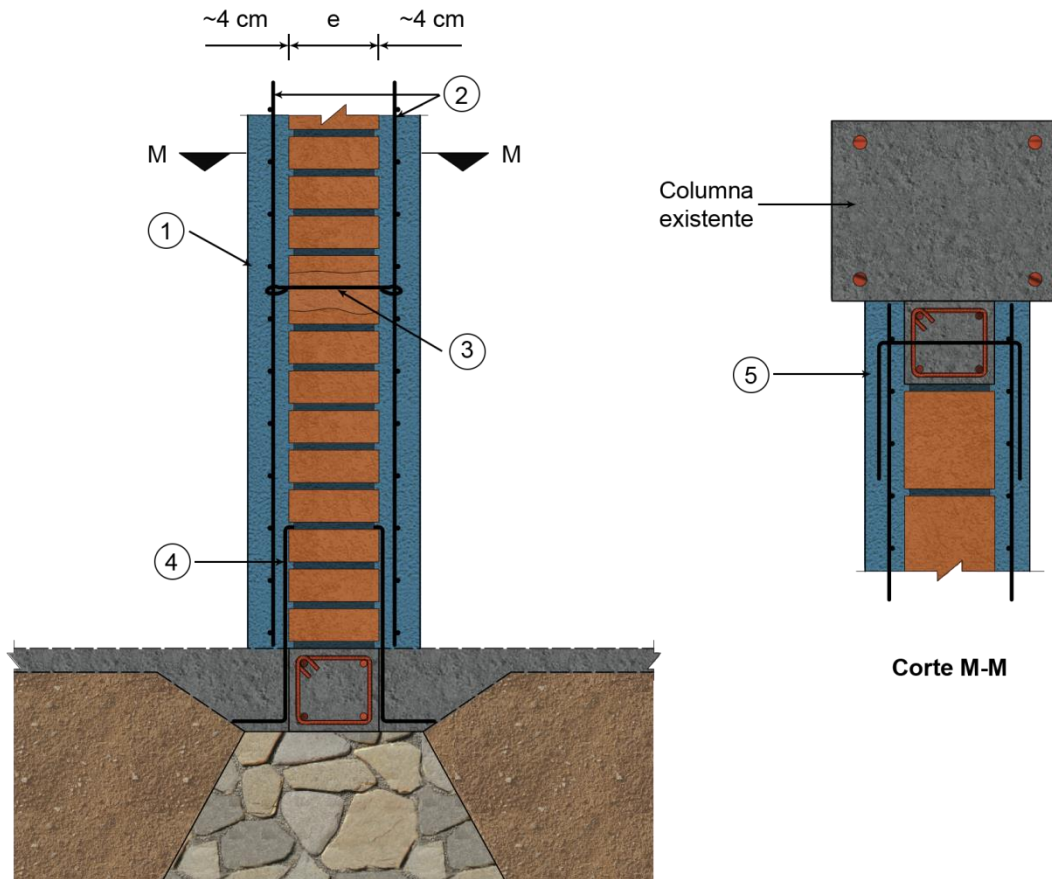


Ilustración 62. Detalles para la colocación de malla de alambre soldado sobre muros de mampostería.



- h. Si se encamisa el muro por ambas caras, se pueden fijar las mallas con clavos o alcañatas. Es aceptable usar conectores, en forma de grapas o estribos de alambroón, que atraviesen el espesor del muro para poder fijar las mallas en ambos lados. Para esto, es necesario perforar el muro, colocar el elemento de acero y rellenar el espacio libre del agujero con resina o mortero epóxico. En la Ilustración 63 e Ilustración 64 se ejemplifica un encamisado total, usando grapas para sujetar las mallas de alambre soldado o las capas de barras de acero de refuerzo.



Recubrimiento armado (encamisado) para reforzamiento de muros de mampostería

1. Capa de mortero colocada sobre el muro de mampostería.
2. Malla de alambre soldado o barras para armado de los aplanados.
3. Grapa para sujetar las dos mallas, colocadas a través de “cajas” o perforaciones hechas en el propio muro que a la vez servirán como conectores (separada @ 80 cm máx).
4. Barras ancladas al elemento estructural existente para traslaparse con la malla.
5. Dos capas de mortero, Tipo I, mínimo.

Ilustración 63. Ejemplo de fijación de mallas de alambre soldado o de capas de barras de acero de refuerzo en dos caras del muro.



Ilustración 64. Sujeción de malla de alambre soldado mediante grapas (en forma de letra C). Fuente: Archivo personal de Sergio Alcocer, 2003.

- i. El refuerzo del encamisado del muro se deberá continuar en los muros transversales (ilustración 60), al menos una distancia igual a cuatro veces la separación entre alambres verticales. Si no se puede doblar la malla, se deberá colocar un refuerzo en forma de letra L hecho con malla de calibre no inferior a 10 (3.43 mm de diámetro) que sea traslapado con la malla principal o con la capa de barras de acero de refuerzo.
- j. Cuando en el proyecto de rehabilitación se contemple la necesidad de extender el refuerzo hasta la cimentación, se deben ranurar las zapatas. Las dimensiones de las ranuras serán suficientes para poder colocar el armado del encamisado y el mortero o concreto. Las ranuras se deben limpiar de cualquier material que impida la adhesión del mortero o concreto de la camisa con el cemento. Se recomienda que la ranura tenga distintas profundidades a lo largo del muro, de modo de formar una llave de corte para incrementar la resistencia al cortante por deslizamiento. Finalmente, se debe impermeabilizar el encamisado.

7.4.3 Colocación de mortero o concreto

Se debe cumplir con los incisos siguientes:

- a. Antes de colocar el mortero sobre la malla o el concreto del encamisado, se deberá saturar la superficie del muro con agua.
- b. El mortero se podrá colocar con medios manuales (Ilustración 65) o con dispositivos neumáticos (lanzado) (Ilustración 66). En caso de utilizar la técnica de lanzado, se debe tomar en cuenta la posibilidad de formación de huecos debido al rebote de la mezcla en la superficie de la estructura.



Ilustración 65. Colocación por medios manuales del mortero sobre la malla de alambre soldado. Fuente: Flores et al., 2004.



Ilustración 66. Colocación de mortero lanzado sobre la malla de alambres soldado. Fuente: CYPE Ingenieros, 2020.

- c. El concreto se podrá colocar por gravedad, preparando la cimbra para facilitar la salida del aire atrapado en el concreto. Se acepta el uso de concreto lanzado.
- d. En la fabricación del mortero se usará arena bien graduada de conformidad con la norma NMX-C-111-ONNCCE.
- e. El mortero y concreto se curarán de acuerdo con los requisitos del inciso 15.3.9 de las NTC-Concreto de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se localice la escuela).
- f. Para evitar agrietamiento por contracción en mortero o concreto lanzado, se deberán emplear aditivos, como humo de sílice, los cuales permiten incrementar el espesor de la capa a aplicar, aumentan la densidad de la mezcla, incrementan la resistencia a los agentes químicos, a factores térmicos, a la adherencia, a flexión y compresión, y disminuyen el rebote del material lanzado. También se pueden emplear fibras de polipropileno que reducen el agrietamiento por contracción plástica. Se aceptará



colocar una capa adicional de malla de gallinero y así también poder controlar el agrietamiento prematuro.

- g. El espesor del recubrimiento de mortero debe ser al menos de 15 mm en cada lado del muro.
- h. El mortero será tipo I. Se deberán revisar las relaciones volumétricas recomendadas para morteros tipo I en la tabla 2.5.1 de las NTC-Mampostería de la Ciudad de México (o su equivalente en las NTC de la población donde se encuentre la escuela).
- i. Si el encamisado es de concreto normal, el espesor mínimo será de 35 milímetros

7.5 REQUISITOS DE SUPERVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Se revisará que se cumpla con lo siguiente:

- a. Se deberá constatar que los materiales a utilizar en el encamisado cumplan con las especificaciones establecidas en los planos de construcción y en las memorias de cálculo del proyecto ejecutivo de rehabilitación.
- b. El mortero no deberá fabricarse en contacto con el suelo.
- c. La dosificación del mortero deberá controlarse para obtener la resistencia de diseño.
- d. Se debe verificar que los conectores estén firmemente instalados en la mampostería y concreto, con la cuantía y separación especificadas en los planos.
- e. El refuerzo del encamisado se continuará en muros transversales, ya sea doblándolo, o bien, traslapando un refuerzo hecho con malla con calibre mínimo del número 10 (3.43 mm de diámetro).
- f. Saturar con agua limpia la superficie del muro y de sus elementos confinantes, si existen, antes de colocar el mortero o concreto.
- g. El mortero debe ser colocado en un tiempo menor o igual a dos horas posteriores a su fabricación, de lo contrario, éste debe ser desechado.
- h. Se recomienda curar el mortero o concreto manteniendo un ambiente húmedo durante siete días.

7.6 REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS DE ADOBE

Se aceptará rehabilitar edificios hechos a base de muros de adobes o de muros de tapia utilizando encamisados de malla y mortero. En Alcocer (2019) se pueden consultar otras técnicas.



El encamisado de muros de adobe deberá satisfacer los requisitos señalados en la Ilustración 67. Opcionalmente a las grapas de acero, se aceptará fijar la malla con alcayatas o con grapas de alambrán, si se encamisán los muros completamente (es decir, por ambas caras). Para asegurar una adecuada adherencia entre el mortero del encamisado y el adobe, así como su permanencia en el tiempo, se deberán practicar cajas en el muro de adobe para crear llaves de cortante de mortero. En elevación, las cajas tendrán las dimensiones (altura y longitud) de los adobes; su profundidad mínima será de $1/3$ del espesor del muro. Se deberán practicar, al menos, cuatro cajas en cada borde vertical de muro. En el caso de muros de tapia, las dimensiones, en elevación de las cajas, serán de 200 x 100 milímetros.

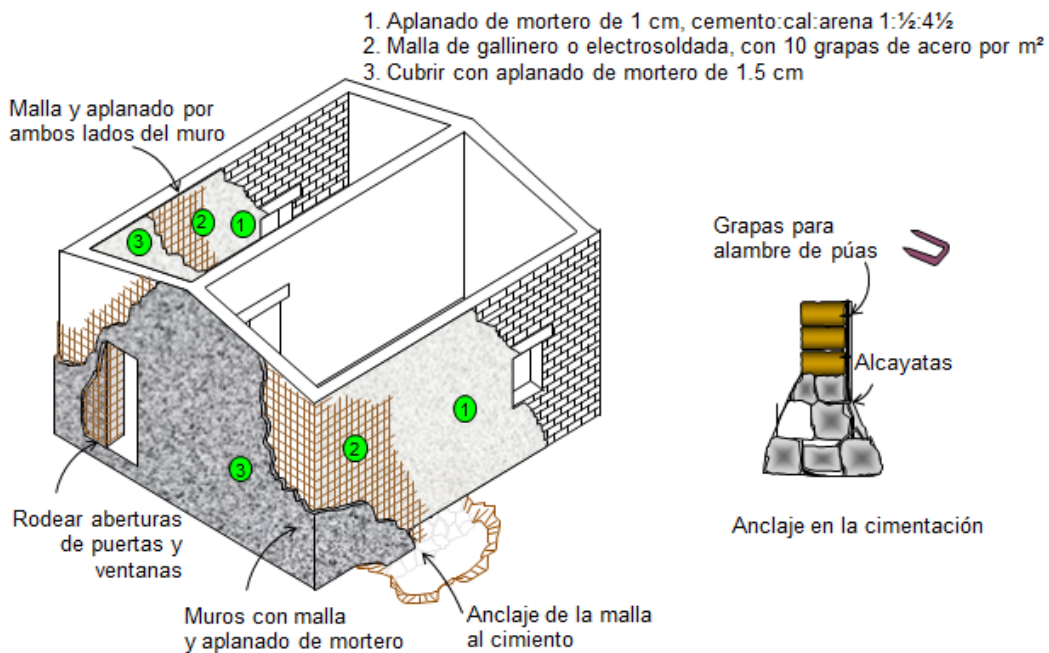


Ilustración 67. Rehabilitación de edificios de adobe con encamisado de malla y mortero. Fuente: Cortesía del CENAPRED, 1999.

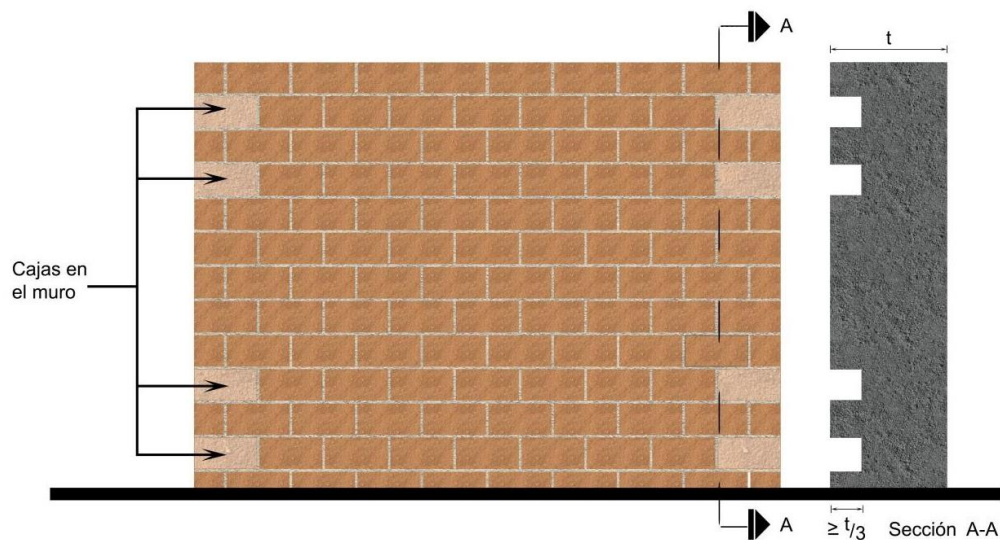
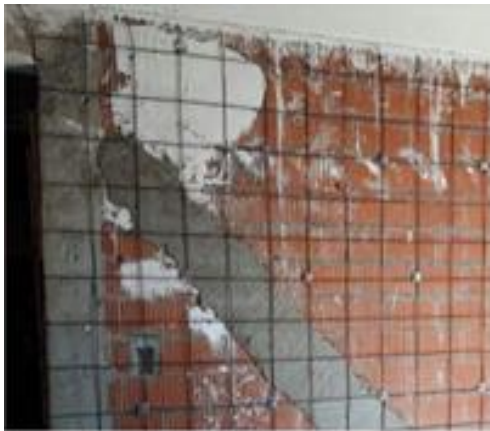


Ilustración 68. Dimensiones de cajas por practicarse en muros de adobe para formar llaves de corte de mortero.



7.7 USO EN LA INFRAESTRUCTURA ESCOLAR

El encamisado de muros de mampostería ha sido uno de los tres métodos principales de rehabilitación de estructuras que el CAPFCE/INIFED ha empleado ante daños moderados a severos en la infraestructura educativa. Este método se emplea principalmente para rehabilitar muros de carga en prototipos Regionales de varias aulas. También se ha usado para rehabilitar muros diafragma en prototipos de concreto y de estructura metálica. A raíz de los sismos de 2017 se ha empleado para encamisar los muros de tabique de barro recocido en el prototipo Regional de Concreto. En estos casos se han empleado mallas 6x6 -10/10 fijadas a los muros con conectores instalados con cargas explosivas de potencia controlada. En las fotografías de la ilustración 69 a, se ilustra: a) una adecuada colocación de la malla que rodea los bordes verticales del muro; b) malla que rodea los bordes verticales del castillo. En contraste, en la Ilustración 69 b, la malla se interrumpe sin rodear el borde y sin traslapar otra malla, en forma de letra C, para rodearlo.



a) Práctica correcta de rodear bordes de aberturas



b) Práctica incorrecta de cortar el armado del encamisado en el borde, sin darle continuidad alrededor de él

Ilustración 69. Rehabilitación de escuelas con encamisado de muros de mampostería.