

PatvAc

PSE-380000-2008-3

Patrimonio Accesible: I+D+i para una cultura sin barreras

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural. Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural.



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



C 2030
Construcción
I+D+i

Índice

Introducción

1. Técnicas Tradicionales en la Rehabilitación de Edificios Históricos

1.1 Rejuntado

1.2 Inyección

1.3 Refuerzo Externo

1.4 Anclajes y Tirantes

1.5 Refuerzo interno

1.6 Post-tensionar

2. Técnicas actuales de Rehabilitación / Refuerzo para Edificios Históricos

2.1 Técnicas de colocación (SM)

2.2 Técnicas de colocación cerca de la superficie (NSM)

3. Proceso de Evaluación sísmica

4. Rehabilitación / Procedimiento de Refuerzo

5. Organización de la Obra de Refuerzo

6. Supervisión e Inspección de la Rehabilitación

7. Mantenimiento

7.1 Necesidad de una Inspección Post construcción regular

7.2 Mantenimiento preventivo y Reparaciones menores

7.3 Limpieza de la mampostería

Bibliografía

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

ANTECEDENTES

Este entregable se enmarca dentro de la **T 2.2. Desarrollo de nuevos productos o sistemas para el acceso físico monumentos**, que se resume en la siguiente tabla:

Descripción breve	ST2.3.2 Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural
Líder	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.
Participa	ACCIONA

Introducción

Desde los primeros días de nuestra civilización se han construido estructuras de mampostería. Estas estructuras representan un significativo porcentaje de los edificios actuales. La vulnerabilidad de los viejos edificios históricos de mampostería, debido al daño desproporcionado fuera del plano de carga (causado por el viento, explosiones, inundaciones o sismos) es uno de los graves problemas que enfrentan hoy en día los ingenieros estructurales. Según la Sociedad de la Mampostería (Matthys y Noland (Ed.), 1989) aproximadamente el 70% de todos los inventarios existentes de estructuras en los Estados Unidos son de mampostería no reforzada. Este informe muestra que el porcentaje es aún mayor fuera de los Estados Unidos. La mayoría de estas estructuras se han diseñado y construido utilizando muros de mampostería no reforzada (URM) antes del desarrollo de la Ingeniería de la Mampostería. Muchos de estos edificios tienen una gran importancia histórica. La restauración y el refuerzo de las estructuras históricas, para la conservación de patrimonio arquitectónico, es cada vez más importante. Algunos requisitos importantes para la restauración de estructuras de los edificios de carácter históricos son que la restauración no debe afectar negativamente a la naturaleza singular del monumento, que debe ser reversible, y que debe ser inconfundible de la composición arquitectónica original y proteger las características originales (The Venice Charter, 1964 y Triantafyllou y Fardis, 1995). La intervención en los edificios históricos debe cumplir con una serie de requisitos adicionales, además de garantizar su seguridad. Tiene que ser compatible, duradera, implicar el mínimo de intervenciones y respetar el concepto estructural y de fábrica originales (Lourenco y Martins, 2001).

En la actualidad se han desarrollado diversas técnicas innovadoras de rehabilitación de edificios históricos. La eficacia de muchas de ellas ha sido probada tanto en laboratorios o bajo condiciones de carga real, tales como sismos. La calidad y tipo de los materiales de mampostería y el diseño estructural son criterios fundamentales en la elección del método de refuerzo. En las secciones siguientes se presentan las técnicas más utilizadas en la rehabilitación tradicional y las técnicas modernas e innovadoras de rehabilitación utilizando composites avanzados (FRP).

1. Técnicas Tradicionales en la Rehabilitación de Edificios Históricos

1.1 Rejuntado

El rejuntado (Figura 1) es una de las técnicas más antiguas utilizadas en la rehabilitación de mampostería. El rejuntado consiste en eliminar el mortero deteriorado entre las juntas de un muro de mampostería y reemplazarlo con nuevo mortero.

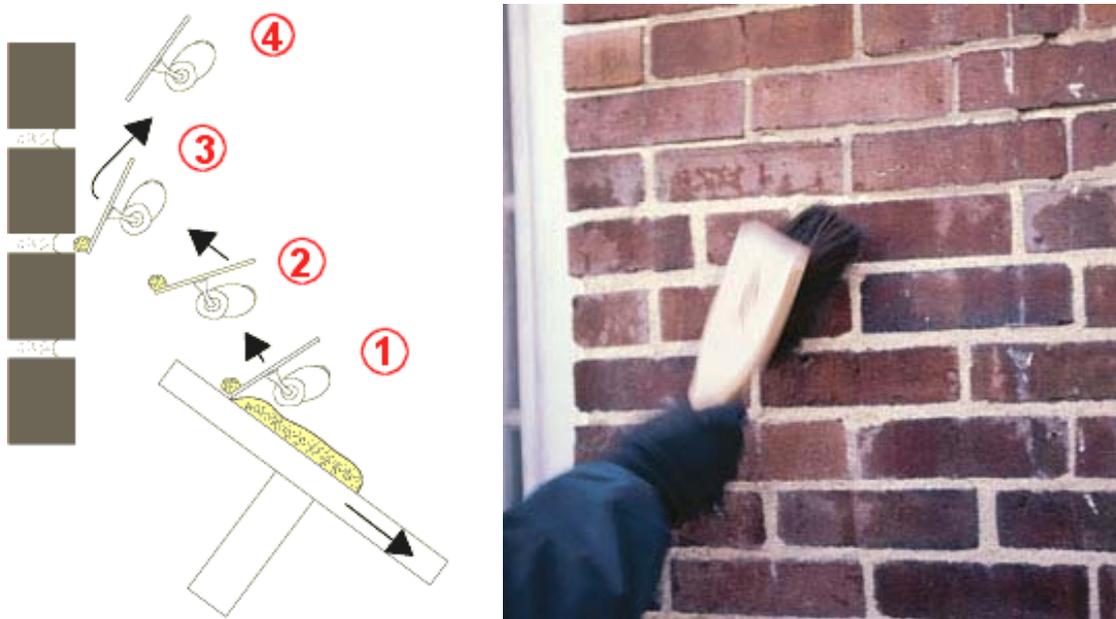


Figure 1: Técnica típica de rejuntado

Drysdale et al. (1999) recomendó rastrillar las juntas a una profundidad de dos veces su altura y con un mínimo de 13 mm. desde la superficie del mortero. El mortero fresco se coloca en capas y rastrillar cuando al presionar con el pulgar está duro y debe coincidir, a la mayor exactitud posible, con el mortero existente en color, textura y propiedades físicas. Cuando se hace correctamente, el rejuntado restaura la integridad visual y física de la mampostería. Realizado incorrectamente, rejuntar no sólo atenta contra el aspecto de la mampostería, sino que de hecho, puede causar daños físicos a los módulos de mampostería. Para que un muro de mampostería acomode los inevitables y leves movimientos, incluyendo variaciones de temperatura, asentamientos diferenciales y

vibraciones, el mortero de las juntas debe ser algo más débil que las piezas de mampostería. En caso contrario, las piezas de mampostería llegarán a ser la parte más débil del muro, y cualquier ligero movimiento haría que el ladrillo o la piedra se fracturen o descascaren. Si el mortero rejuntado es demasiado fuerte, se crean líneas de carga a lo largo del nuevo mortero, en la interfase. Un mortero fuerte también tienden a ser más impermeable a la humedad que las piezas de mampostería y, por tanto, previene el secado entre juntas; la humedad y el daño se concentra en las piezas (Londres, 1988).

1.2 Inyección

1.2.1 Inyección simple

La inyección (Figura 2) se utiliza para reforzar y endurecer los muros de mampostería rellenando sólidamente las unidades huecas o cavidades abiertas entre juntas o hileras de muro. Esta técnica ha funcionado bien en estructuras históricas de mampostería y puede ser más eficaz si la mampostería es prehumedecida (Drysdale et al., 1999). Es importante el completo llenado y evitar la posterior contracción, ya que la lechada absorbe el agua, usando una lechada que no encoge, inyección de epóxicos o una lechada polimérica modificada. Hamid et al. (1994) descubrió que la inyección de epóxicos de baja viscosidad es eficaz en la reparación de grietas tan pequeñas como 0.13 mm. Para grietas más profundas de 6,4 mm. se han investigado diferentes mezclas económicas de lechadas, utilizando epóxy o poliéster como aglomerante y diversos rellenos como arena o cemento. La resistencia a cortante de las muestras inyectadas de poliéster-arena resultó ser la misma que la de las muestras con epóxy-arena. La inyección de epóxy tiene la desventaja de una inadecuada penetración, dificultad para conseguir el curado y sensibilidad a la temperatura.

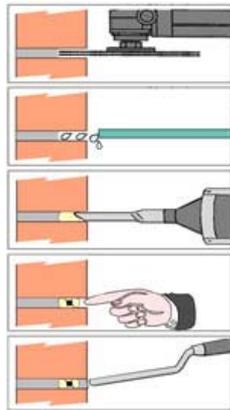


Figura 2: Inyección típica en grieta

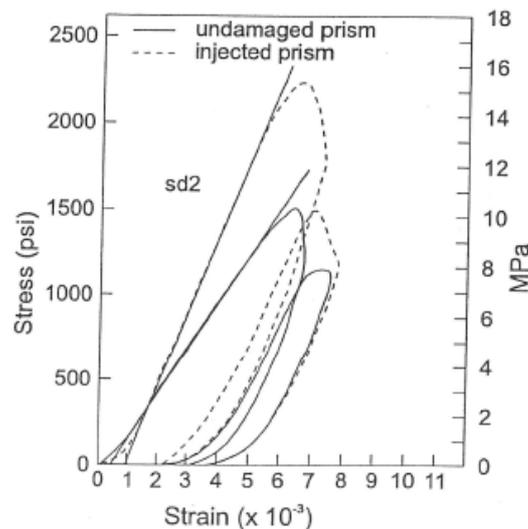
Algunos muros viejos en mampostería se construyeron con dos capas exteriores de aparejo irregular de solo piedra o piedras mezcladas con ladrillos y escombros rellenos al interior de pequeños trozos de piedras que solían dejar muchos huecos. Tomazevic y Anicic (1989) mostró que la inyección de lechadas cementicias es un método eficaz para el refuerzo de los muros mediante la vinculación de las partes desconectadas haciendo una estructura sólida. La lechada se inyecta a través de tubos en los agujeros perforados entre las piedras a una profundidad de por lo menos la mitad del espesor del muro, a intervalos de 0,5 a 1,0 m. El mortero se utiliza para fijar los tubos a la pared y sellar las grietas superficiales entre las piedras antes de la inyección. A menudo se recomienda antes de la inyección finalizar limpiando el muro con agua para desprender la arena y el polvo.

La eficacia de la técnica de inyección depende de la compatibilidad de las características físicas, químicas, y propiedades mecánicas de la mampostería original y el material inyectado. Kingsley (1995) ha demostrado que un diseño de lechadas cementicias bien preparadas se puede inyectar dentro de muros URM para llenar grietas que van desde un espesor tan pequeño como 0,08, vacíos de 12 mm. y mayores. Utilizado en combinación con los modernos anclajes, la inyección puede garantizar una acción compuesta de los muros URM, y restaurar la integridad de muros previamente dañados. Las lechadas de cemento pueden diseñarse y personalizarse para cada aplicación, la continuidad y compatibilidad de la lechada con el material existente puede optimizarse. El diseño de la inyección de lechadas debe tener en cuenta el incremento en la masa del

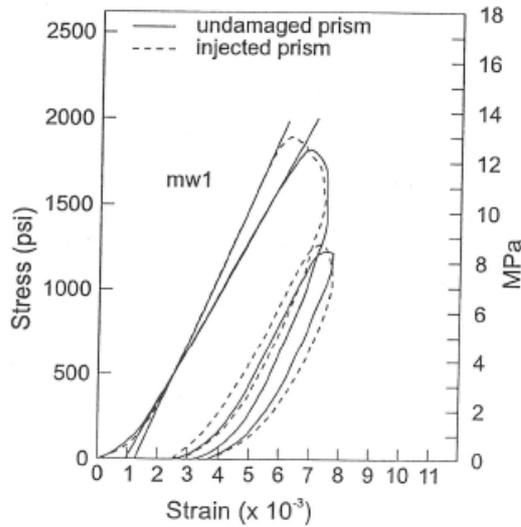
E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

muro, así como las consecuencias no estructurales del proceso de aplicar la lechada, tales como la interacción química con los materiales y con las partes alteradas por la migración de la humedad en el muro.

La inyección de lechadas de resina epóxy se ha utilizado con éxito para restablecer la resistencia a compresión en ladrillos prismáticos de mampostería previamente agrietados. Como puede verse en la fig. 3, la inyección de lechada en prismas secos produjo mayor resistencia que la inyección en prismas humedecidos. La conclusión fue que los problemas que afectan la resistencia de adherencia y la durabilidad bajo ciclos térmicos son más proclives a presentarse cuando se inyecta mampostería húmeda.



a) Curvas esfuerzo-deformación de prismas secos



b) Curvas esfuerzo-deformación de prismas húmedos

Figure 3: Reparación de prismas de mampostería con inyección de resina epóxica

Durante ensayos de carga lateral sobre muros de cortante no reforzados, en varias hileras y de ladrillos sólidos, las paredes dañadas son reforzadas por lechada inyectada y, a continuación, ensayadas de nuevo. La figura 4 muestra los resultados carga-deflexión para los muros originales, dañados y reparados, demuestran claramente la eficacia de esta técnica para restablecer la resistencia y rigidez del muro.

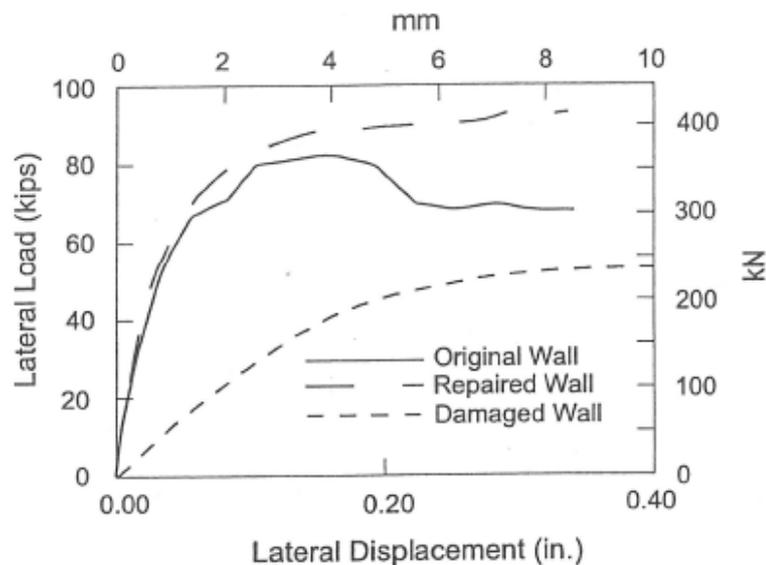
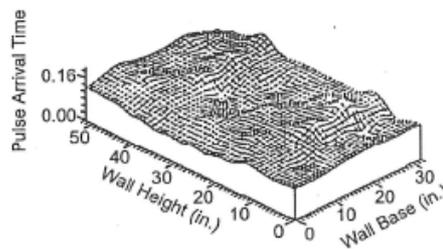


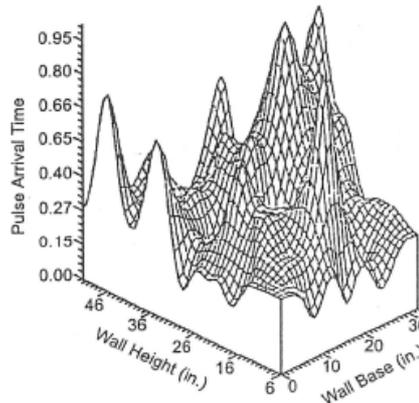
Figure 4: Eficacia de la inyección de lechada en el restablecimiento de la resistencia a la carga lateral

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

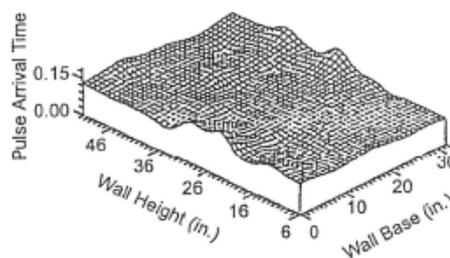
Se han utilizado mediciones ultrasónicas (UPV) para controlar la penetración de la lechada en los muros de mampostería dañados. La figura 5 muestra el tiempo de llegada en los muros originales sin daños, dañados y posteriormente reparados con inyección de lechada. Los resultados demuestran la eficacia de la técnica de inyección de lechada en la reparación de grietas y huecos y, en la restauración de la mampostería a su condición original. Este estudio también confirma la idoneidad de este método no destructivo para asegurar la calidad en similares situaciones de reparación.



a) UPV para la condición original



b) UPV para la condición dañada



c) UPV para la condición reparada

Figure 5: Evaluación de la eficacia de la inyección de lechadas utilizando pruebas no destructivas tipo UPV

1.2.2 Inyección de Refuerzo

Un breve estudio de los aspectos relevantes de la experiencia italiana, durante y después de los eventos sísmicos ocurridos en la región Friul-Campania y Basilicata, en cuanto a reparación y mejora de los edificios URM, fue presentado en Módena (1989 y 1994). Se discutieron tres técnicas para mejorar las propiedades de la mampostería. La primera técnica fue la sustitución de la mampostería dañada. La segunda técnica, la inyección de lechada en el muro a través de agujeros taladrados a las dos terceras partes del espesor del muro, después de sellar las grietas. La inyección a baja presión se utilizó empezando por la parte inferior del muro. La tercera técnica descrita fue la Inyección de Refuerzo que modifica las condiciones de mampostería donde las barras de acero se insertan en cada agujero a inyectar. Como se muestra en la Figura 6, esta técnica creó a nivel local, mallas densas que aseguraban las conexiones entre los muros intersectados y, a nivel global, aumentaban la resistencia del muro.

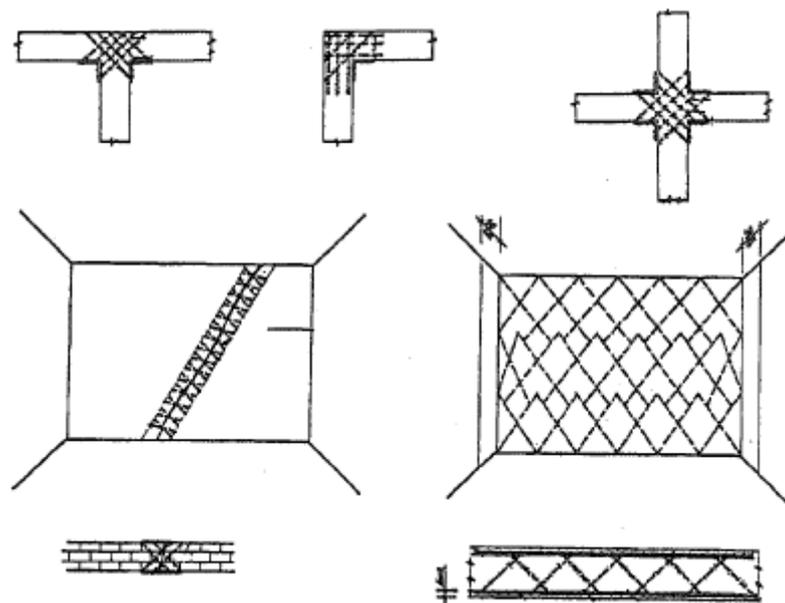


Figure 6: Inyección de refuerzo en un muro dañado URM (Módena, 1994)

Manzouri et al. (1996) realizó un estudio para evaluar la efectividad de las diferentes técnicas de reparación y refuerzo del URM. Los objetivos de este estudio fueron

identificar materiales de lechada adecuados y los procedimientos para el refuerzo de las estructuras URM, cuantificar la eficacia de estas técnicas, y desarrollar herramientas analíticas para evaluar el comportamiento de las estructuras de mampostería antes y después de su rehabilitación. La primera fase del estudio se centró en la evaluación de las propiedades de los materiales de lechada. La segunda fase del estudio cuantificó los efectos de la reparación por inyección de lechada en muelles de mampostería. Se realizaron once pruebas en cuatro muros de cortante, en su estado original, después de que fueran dañados y reparados con diferentes métodos. Tres de estos muros eran muros sólidos de idéntica geometría y una relación altura-longitud de 0,6 mientras que el cuarto ejemplar tenía una abertura central representando un muro de fachada en edificios de mampostería. Las técnicas estudiadas de rehabilitación incluyeron la inyección de lechada y la introducción de refuerzos horizontales y verticales de acero dentro de muros de cortante.

Los resultados de las pruebas mostraron que la inyección de lechada cementicia acompañada de la reparación y sustitución de las áreas dañadas con materiales similares, puede restablecer la original resistencia y rigidez de los muros URM. Los resultados también mostraron que el introducir un refuerzo horizontal en un muro de mampostería en las juntas, incrementa la resistencia y ductilidad del muro (Manzouri et al., 1996). La introducción de un refuerzo horizontal en los muelles de mampostería ha demostrado ser muy eficaz en la prevención de la falla a cortante de estos muelles. El refuerzo vertical en los muelles aumentó la resistencia a la flexión lateral y la ductilidad del muro cuando la falla a cortante fue prevenida por el acero horizontal. Cabe señalar que la lechada de inyección sólo es eficaz en fachadas (doble hoja) y muros de dos hileras de mampostería con un espacio entre ellos. En ausencia de grandes huecos o grietas, la lechada de inyección por sí misma no es muy útil en la mejora de la resistencia de una estructura URM (unreinforced masonry)

1.3 Refuerzo externo

Otro grupo de técnicas analizadas por Módena (1994) aborda el aumento de la resistencia sísmica de muros de mampostería mediante el uso de refuerzo externo. Este

grupo incluye: encamisados, hormigón armado y pórticos de acero, hormigón armado y vigas y tirantes de acero. El encamisado es la aplicación de yeso reforzado a ambas superficies del muro cubriéndolo en su totalidad o solo las partes necesitadas de intervención. El espesor del yeso era del orden de 30-50 mm. La malla de acero se hizo con varas de 3-4 mm. de diámetro. Las dos finas láminas estaban conectadas con amarres a través de la pared. El hormigón armado y los marcos de acero se utilizaron para contrarrestar la debilidad producida por una abertura del muro. El uso de hormigón armado y vigas y tirantes de acero hace actuar la mampostería existente como mampostería confinada, en el sentido que, los elementos unidimensionales para la resistencia a la tensión se introducen tanto horizontalmente como vertical y horizontalmente lo cual permitía al muro, o parte de él, actuar como elementos tipo cercha.

En el estudio de Módena se analizan dos técnicas para aumentar la rigidez de piso y fortalecer las conexiones con el fin de mejorar el comportamiento sísmico de la estructura completa. La técnica más simple y eficaz para conectar muros de intersección es colocar barras de acero en cada nivel de piso y mecánicamente anclarlas a placas u otros dispositivos de acero. Este método es el preferido en casos en que las superficies del muro deben ser preservadas, como viene siendo común en la restauración de monumentos y edificios históricos. Otra técnica para mejorar la resistencia sísmica es conectar los muros a pisos rigidizados. Esto puede hacerse, ya sea con tirantes de acero clavados directamente a vigas o losas rigidizadas y anclándolos a la fachada externa del muro con sujeciones de acero, o creando una sección compuesta del techo existente y nuevamente vaciando una losa de hormigón armado. Todas las técnicas de refuerzo exterior son visualmente intrusivas y / o aumentan drásticamente la masa y la rigidez de la mampostería. Medidas como encamisados y pórticos, obviamente no se ajustan a la restauración de la mampostería histórica. La técnica típica del refuerzo externo se muestra en la Figura 7.

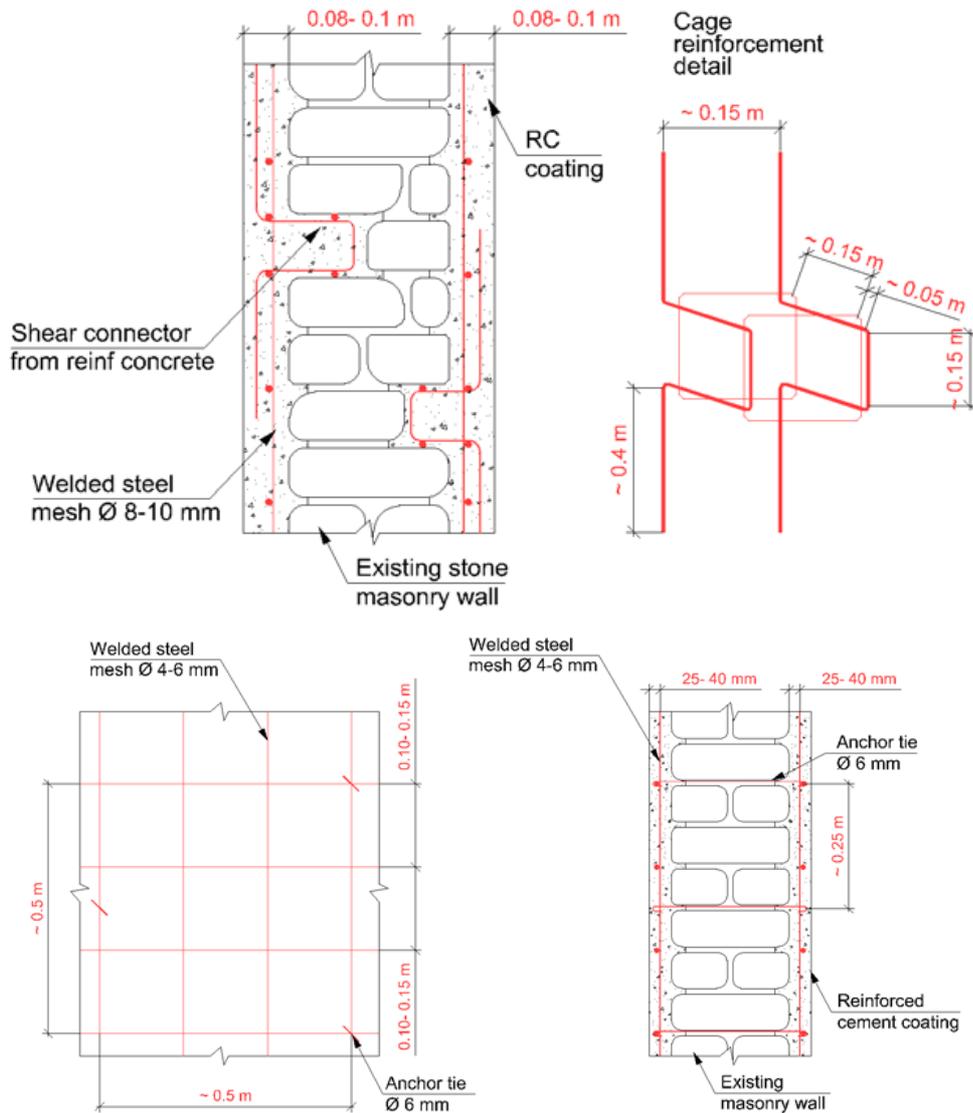


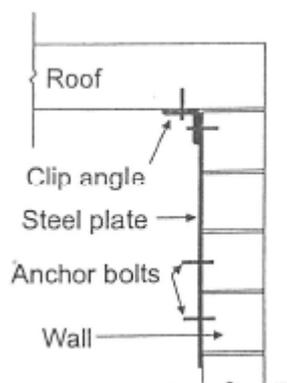
Figura 7: Típico refuerzo externo

Tomazevic y Anicic (1989) en sus investigaciones llevadas a cabo en Yugoslavia durante la década de 1980, describió cómo mejorar la resistencia sísmica de estructuras utilizando amarres URM. Los modelos fueron construidos y testados en una mesa de sacudidas, posteriormente reparados con diferentes técnicas y vueltos a probar. Una de las técnicas fue unir los muros a través de barras de amarre de acero, colocadas a ambos lados de los muros a nivel del piso y ancladas en los extremos con placas de acero. Si bien, esta técnica no evitaba la aparición de grietas verticales en las juntas entre los muros, si impidió la separación y derrumbe de los muros transversales, incluso

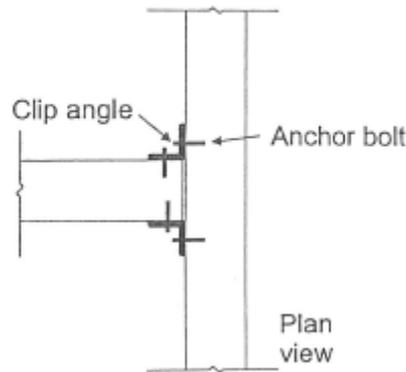
E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

cuando el muro longitudinal comenzase a derrumbarse.

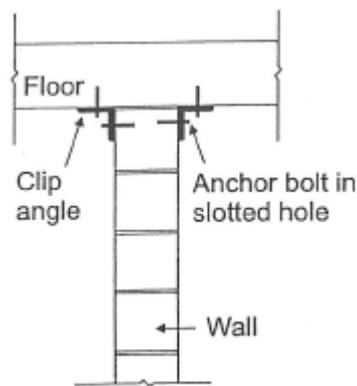
La falta de anclar apropiadamente las paredes a los límites de pisos y techos en virtud de la estabilidad lateral fuera del plano de carga y limita la capacidad del sistema del piso o techo lateral para transmitir las cargas en el plano de la pared a la consolidación de la estabilidad en general. Drysdale y otros (1999) señalaron que el derrumbe de los muros URM indebidamente anclados era bastante común en edificios de mampostería dañados por terremotos. Constatan que, excepto cuando se utiliza la lechada de anclajes para simular la construcción original es posible que los tornillos perforados, anclas de expansión, o anclas epoxy sean utilizadas como conexión mecánica. Ángulos de acero u otros elementos de unión normalmente son necesarios para transferir eficazmente la fuerza desde un componente estructural a otro, como se muestra en la Figura 8. El anclaje de muro es relativamente caro, sin embargo, proporciona valor en cuanto a disminución de riesgos que muchas otras técnicas de rehabilitación tienen. Drysdale et al. (1999) informó que la resistencia cortante y resistencia a la tensión son los principales requisitos para muros sólidos en hileras o de composite. Sugirieron que los pernos de anclaje o similares pueden servir a bajo costo. Otras alternativas son los anclajes internos con tuerca y arandela en los extremos. La lechada puede hacerse con material de cemento Portland o cualquier material disponible en el comercio con lechada que no encoge. El problema de la aplicación de estas técnicas en la rehabilitación de edificios históricos es la perturbación visual y la corrosión del acero.



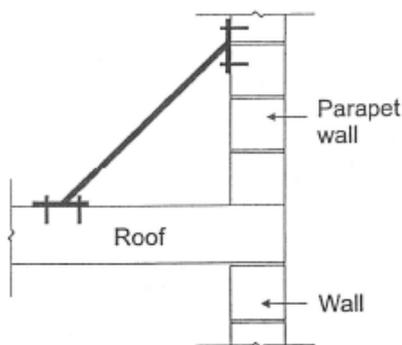
a) Sujeción de techos



b) Intersección de muros



c) Piso al muro



d) Parapeto apuntalado

Figure 5: Anclajes y Tirantes en los Muros de Mampostería (Drysdale et al., 1999)

1.5 Refuerzo interno

El Refuerzo interno (figura 9) es otra técnica utilizada en la rehabilitación de muros URM.

Comúnmente, las barras de refuerzo de acero y, en algunos casos, los tendones pretensados de acero se insertan en huecos de hasta 60 mm de diámetro y 50 m de largo, perforados en el grosor del muro en paralelo a su plano. Después de que el refuerzo ha sido colocado, los agujeros se rellenan generalmente con mortero de cemento. Plencik et al. (1984 y 1986) investigó la eficacia de esta técnica para aumentar la resistencia sísmica del muro. Para la investigación, se perforaron pozos verticales de 50 mm a 130 mm de diámetro en la parte superior del muro. Se colocaron barras de refuerzo en el centro de los agujeros y se vertió material de relleno en su interior. Como material de relleno se utilizaron varios tipos de epóxy-arena, poliéster-arena y lechada cementicia. Los muros de las construcciones actuales, de alrededor de 80 años de edad, han sido reforzados con esta técnica. Para testarlos, se extrajeron paneles y prismas. Los paneles se utilizaron para probar la resistencia en plano a cortante. Los prismas se utilizan para determinar la resistencia a compresión de la mampostería.

Los resultados de las pruebas mostraron que los refuerzos interiores aumentaron el plano de corte en un 56% a 111% (0,52 a 1,03 MPa). Los pozos de gran diámetro produjeron mayor dilatación del material de relleno en las juntas de aro, un adecuado mecanismo de transferencia de cortante para conseguir capacidad y una mayor área efectiva de resistencia a cortante. Debido a sus propiedades de resistencia y dilatación, la epoxy-arena resultó ser superior a la lechada como material de relleno. La mezcla de poliéster-arena es una alternativa posible a la mezcla epoxíco-arena, debido a su bajo costo y a su resistencia. Las muestras reforzadas con lechada cementicia fueron en general un 30% más débil que las muestras reforzadas con lechada de poliéster-arena o epoxy-arena.

Medina et al. (1995) describió el trabajo de restauración realizado en la Iglesia de San Isidoro de Sevilla, Italia, para asegurar la estabilidad sísmica, una estructura de mampostería construida durante el siglo XIV. Las columnas fueron ancladas con fundación de esteras. Estas esteras estaban unidas entre sí y con los muros exteriores mediante las vigas rígidas. La cimentación de los muros exteriores se reforzó introduciendo micro-pilotes perforados en la grava que existía bajo la capa superior del suelo. Una vez que la cimentación fue firme, los muros URM y columnas fueron

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

reparados y reforzados. Se introdujo un esqueleto de hormigón armado en el interior de los muros por agujeros perforados, se colocaron barras de acero y se inyecta lechada cementicia en los agujeros. Además de reforzar las columnas y los arcos, se introdujo una viga perimetral en la parte superior de cada muro para confinar la construcción. A pesar de su éxito técnico, esta técnica ha sido objeto de críticas cuando se aplica a la mampostería histórica porque no es reversible (Croci, 1998). El Refuerzo interior también requiere ser sustituido debido a la corrosión.



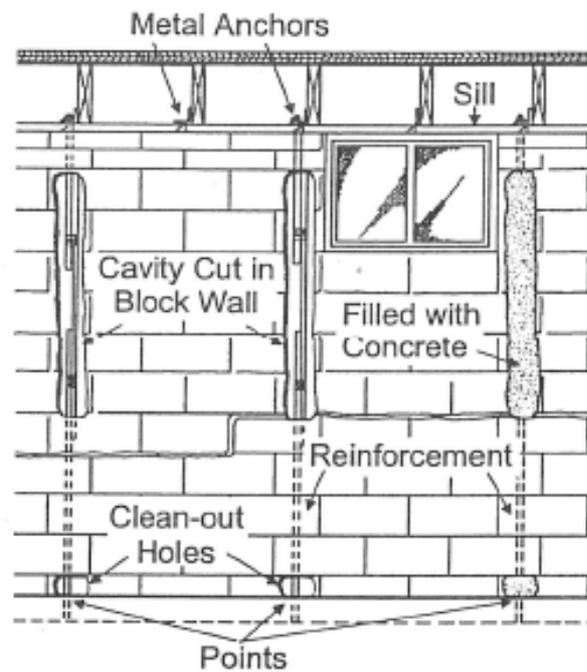
i) Pozos perforados



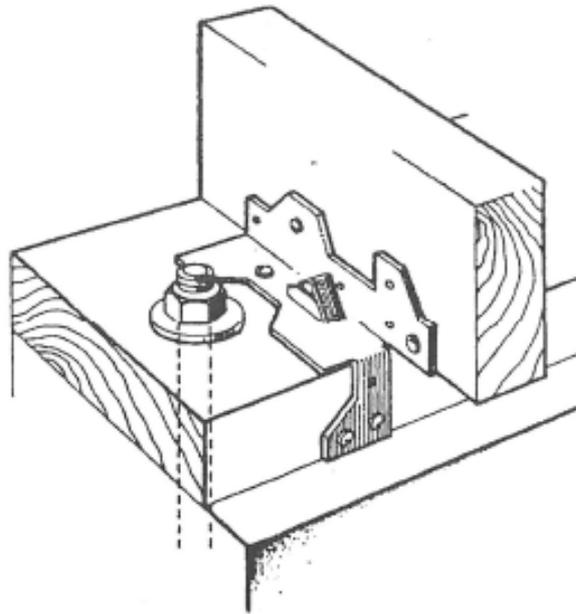
ii) Lechada



iii) Técnica de rehabilitación con pozos
a) Pruebas experimentales en laboratorio



i) Instalando refuerzo en el muro



ii) Vigueta de suelo y placa de apoyo

b) Aplicación Práctica

Figure 9: Técnica típica de refuerzo interior

Post-tensionamiento

Los muros URM que desarrollan tensión debido, ya sea a fuera del plano de flexión pueden reforzarse usando acero pretensado para producir compresión axial en el muro y aumentar así la flexión necesaria para producir tensión. La post-tensionamiento se ha utilizado con éxito (Hamid et al., 1994) para aumentar la resistencia y ductilidad de las estructuras URM. A menos que el espacio de la cavidad sea lo suficientemente amplio para permitir el emplazamiento de las barras pretensadas, se requieren aperturas en los muros para instalar los anclajes y placas, la lechada adherida en la base del muro se utiliza como anclaje. Post-tensionamiento aumenta la capacidad de flexión lateral de los muros y también mejora la resistencia a las grietas.

Aunque la post-tensión en los muros de mampostería ha demostrado ser una técnica eficaz en el fortalecimiento de las estructuras de URM, la post-tensión en los muros de mampostería utilizando FRP composites en ambientes fríos no es recomendable debido a la disminución de fuerza de pretensado, resultado del bajo coeficiente de expansión

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

térmica. Lissel et al. (1998) investigaron el efecto de las bajas temperaturas en la pérdida de pretensado a partir de cuatro tendones CFRP pretensados y utilizados con una post-tensión de 3,0 m de la altura del diafragma del muro. Teóricamente, el frío del invierno causa en los tendones CFRP una gran reducción de la resistencia del pretensado en comparación con los tendones de acero. Esto se ha verificado monitorizando la disminución de resistencia de los tendones CFRP en tiempos. Debido al bajo coeficiente de expansión térmica de los CFRP comparado con los de mampostería, las alteraciones en sus niveles de pretensado son opuestas a los que experimentan los muros pretensados con tendones de acero. Las bajas temperaturas reducen la disminución de la fuerza de pretensado de los tendones de acero.

A pesar de que la post-tensionamiento es una técnica atractiva en la rehabilitación de edificios históricos, los últimos resultados de la investigación (Binda et al., 2001) acerca de la fluencia de la mampostería bajo resistencia de compresión moderada (no más del 50% de la resistencia de compresión) sugieren que esta técnica no debe aplicarse a la mampostería histórica.

La figura 10 ilustra un ejemplo de la utilización de post-tensionamiento horizontal para mejorar la integridad estructural y resistencia a cargas laterales de los muros en un edificio de mampostería mediante muros pretensados insertados entre sí y al piso. El análisis de los efectos del pretensado en los muros construidos sigue la misma metodología que para nueva construcción.

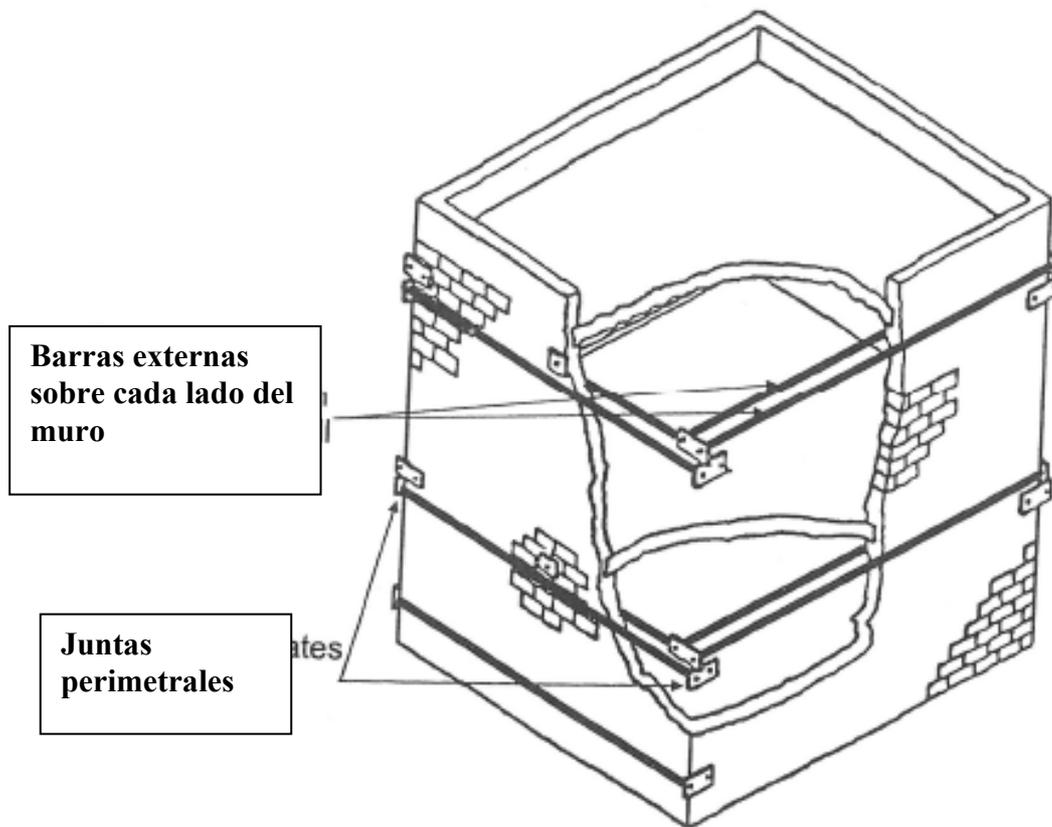


Figura 10: Típica Técnica de Post-tensionamiento

2. Técnicas actuales de Rehabilitación / Refuerzo para Edificios Históricos

Los materiales compuestos FRPs están hechos de fibra de carbono, vidrio o aramida adheridos a una matriz polimérica: epoxy, poliéster o vini-lester. Las fibras son los elementos primarios de soporte de carga y proporcionan a los materiales compuestos sus únicas propiedades estructurales. La resina funciona como agente de adherencia para proteger las fibras y distribuir la carga entre ellas. Dependiendo del tipo de aplicación, las fibras pueden orientarse para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos en la dirección deseada. Las fibras con diámetros en un rango de $5-25 \cdot 10^{-12}m$ pueden colocarse en una cierta posición, volumen y dirección en una matriz vinculante para lograr un rendimiento máximo. Se produce un material unidireccional con una resistencia y rigidez cercana a la de esas fibras y con la resistencia química de la matriz cuando las fibras son continuas, paralelas y en fracciones de volumen de más del 50%. Estos materiales ofrecen una destacada combinación de propiedades que incluyen

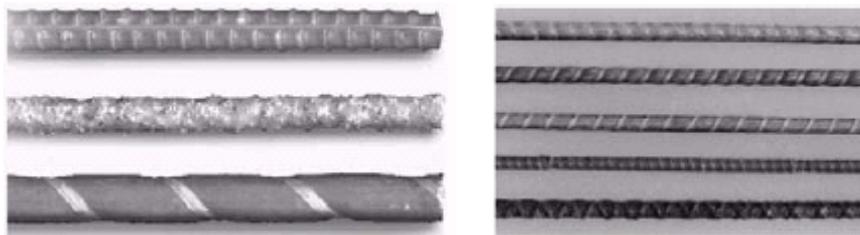
alta resistencia y rigidez en la dirección de las fibras, inmunidad frente a la corrosión, ligereza y disponibilidad en la forma de laminados, tejidos y tendones en longitudes mayores que cualquier requerimiento práctico. Como cualquier otro material de construcción, los FRPs a menudo se ven sometidos a efectos medioambientales tales como el ataque de elementos químicos, la humedad, las fluctuaciones de temperatura, y la irradiación con luz ultra violeta, lo que puede conducir al deterioro y rotura prematura. En general, los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) son altamente resistentes a estos efectos; los polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) son sensibles y los polímeros reforzados con fibra de aramida (AFRP) muestran un comportamiento intermedio.

El uso de los FRPs en una gran variedad de aplicaciones industriales ha tenido un gran incremento en los últimos años. Las principales razones para utilizar materiales compuestos son su superior relación de resistencia-rigidez, rigidez-peso y su durabilidad en ambientes corrosivos frente a los materiales convencionales. El uso de estos materiales para aplicaciones especiales en construcción es muy atractivo y económico debido a su durabilidad mejorada, a los reducidos costes de mantenimiento durante su ciclo de vida y al ahorro que supone su fácil transporte y su mejorada productividad in situ. Debido a sus ventajas sobre los materiales convencionales, los FRPs se han abierto camino en numerosas aplicaciones en la construcción tales como el desarrollo de tendones de pretensado y el aumento de la resistencia del hormigón, la madera y las estructuras de mampostería. Las desventajas de las técnicas tradicionales de refuerzo han llevado recientemente a los investigadores hacia la idea de estructuras de mampostería reforzadas con refuerzos de FRPs. Los FRPs proporcionan soluciones viables para el reforzamiento de muros URM (Mampostería sin refuerzo) sujetos a grandes tensiones en diferentes planos causadas por cargas de viento, explosiones, inundaciones o terremotos. Los FRPs se ajustan a los principios de restauración de los edificios históricos. Se adaptan tanto a superficies curvas como rugosas, implican adiciones limitadas de material y no alteran la respuesta dinámica de la estructura. Las propiedades dinámicas de la estructura permanecen inalterables debido a que no se añade peso ni rigidez. Su utilización ofrece importantes ventajas además de sus características mecánicas. La facilidad de aplicación y su ligereza reducen

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

significativamente el tiempo de restauración y como resultado una menor obstrucción en la ocupación de los edificios.

La aplicación de FRPs en mampostería se ha incrementado rápidamente en los últimos años. Los FRPs se han usado con éxito para reforzar nuevas construcciones de mampostería y, lo que es más significativo, para reforzar y rehabilitar la ya existente. La bibliografía al respecto muestra que el aumento de la actividad sísmica es una de las principales razones para la reciente expansión de la aplicación de laminados de FRPs en muros URM. En todo el mundo se han reforzado o modernizado muchas estructuras históricas de mampostería utilizando FRPs. La Figura 10 muestra los diferentes materiales de refuerzo de FRPs, las características de deformación de las fibras y el proceso de rehabilitación.



a) Diferentes barras de FRP

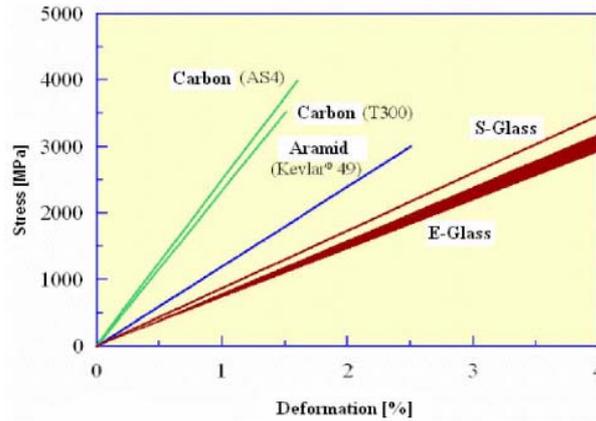


b) Cables de fibra de vidrio y de carbono

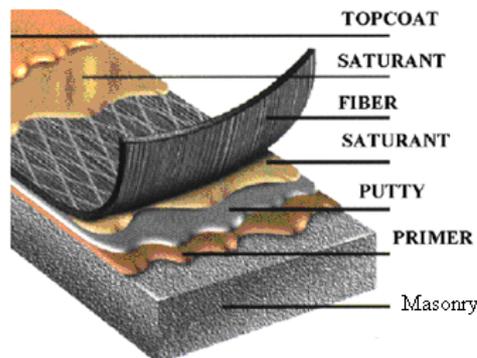
E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural



c) Fibras CFRP y CFRP impregnadas con resina epoxy



d) Características de deformación de diferentes FRPs



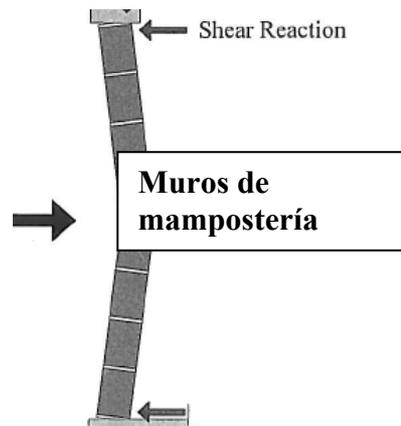
e) Procedimiento para reforzar con FRPs

Figura 10: Materiales de Refuerzo y Procedimiento de Rehabilitación

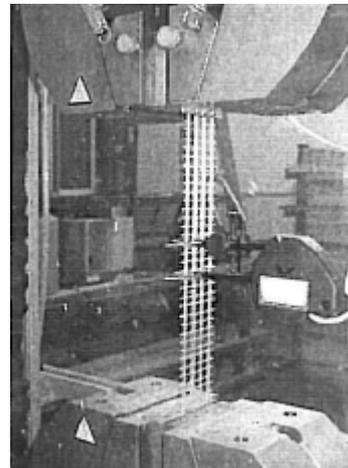
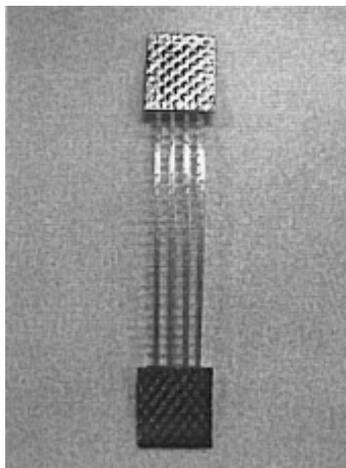
2.1 Técnicas de colocación (SM)

La Figura 11 muestra técnicas y procesos típicos de refuerzo y rehabilitación SM-FRPs para estructuras de mampostería.

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural



a) Problema estructural



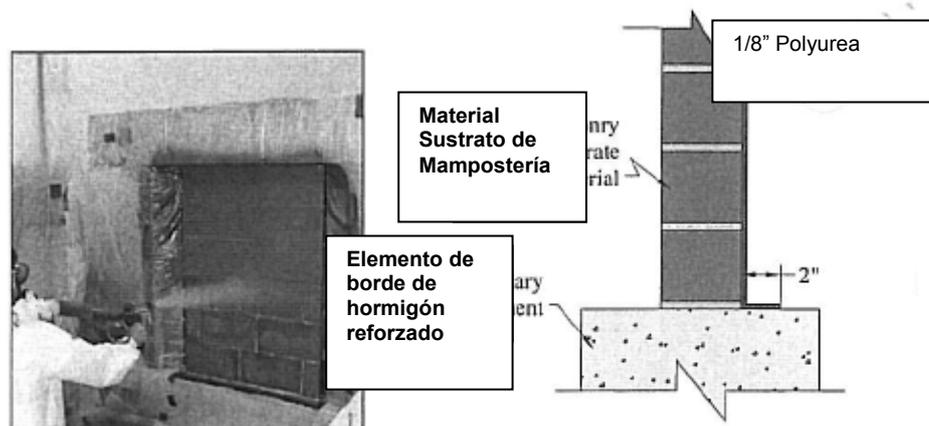
b) Ensayo en mallas de fibra plana antes de su aplicación



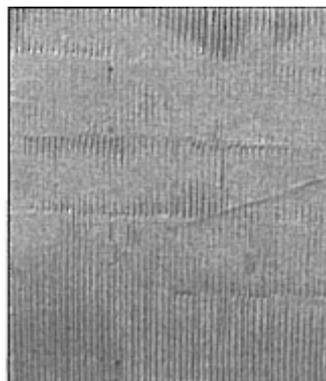
c) Ensayo de fibra impregnada con resina antes de su aplicación



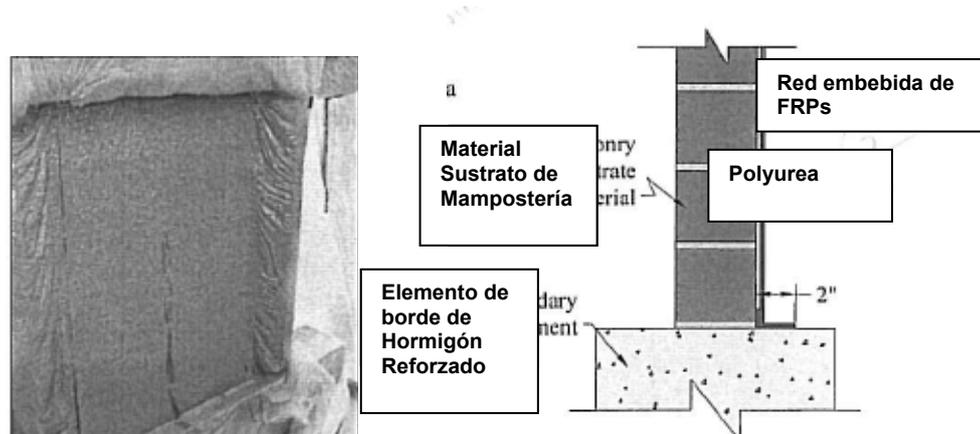
i) Muro de mampostería imprimado



ii) Aplicación de Polyurea



iii) Tejido de FRP embebido



iv) Refuerzo de tejido-polyurea con FRP

d) Procedimiento de refuerzo SM

Figura 11: Técnicas y procesos de refuerzo SM-FRP para mampostería.

Ehsani y otros (1993) y Ehsani y Saadatmanesh (1996) presentaron un nuevo procedimiento para el refuerzo de estructuras de mampostería no reforzadas (URM). Ellos muestran ensayos a flexión en seis vigas de mampostería. Las vigas tenían las siguientes dimensiones: 215 mm de ancho, 100 mm de alto y 1448 mm de largo. Las vigas de mampostería fueron reforzadas adhiriendo laminados en materiales compuestos a su cara tensionada y ensayándolas bajo un estado de carga a cuatro puntos. Las variables estudiadas incluían el tipo epoxy, tejido, mortero, ladrillo y la superficie terminada del muro. Se utilizaron tres tipos de tejidos, fibra de vidrio con un acabado de polivinilo acrílico y dos tipos diferentes de fibra de vidrio-E unidireccional con matrices epóxicas.

Los resultados de los ensayos indicaron que el refuerzo de estructuras URM con tejidos de FRP constituye una técnica muy eficaz para incrementar la resistencia a la flexión y la ductilidad. Cuando se utilizaron tejidos ligeros, la carga máxima fue la que produjo la rotura de tensión del tejido. Al utilizar otros más pesados, los tejidos mantuvieron la integridad de la probeta hasta que se alcanzó la resistencia a compresión última en la mampostería en la pequeña zona comprimida. A partir de ensayos en prismas de mampostería, se averiguó que la rotura se iniciaba por el fallo a compresión de la arcilla del ladrillo y no por el mortero. La resistencia del mortero no cambió ni el modo de rotura ni la capacidad máxima de carga soportada. El examen de las probetas durante y

después de los ensayos mostró que en ninguna de las mismas se apreciaba ningún signo visible de deslizamiento o falla por adherencia en la interfaz de tejido-epóxico.

Schwegler (1995) investigó el desarrollo de nuevos métodos para reforzar muros de mampostería a cortante. El objetivo de este estudio era aumentar la ductilidad del sistema y generar una distribución uniforme de fisuras sobre la superficie del muro. Se investigaron dos métodos de refuerzo mediante ensayos a gran escala en los laboratorios EMPA de Suiza. En el primero, laminados en polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) fueron adheridos diagonalmente a los muros resistentes a cortante y anclados a los forjados de techo y suelo. En el segundo método, los muros a cortante fueron reforzados con tejido de poliéster. Este tejido se aplicó a toda la superficie pero no se ancló a forjados de hormigón contiguos. Los muros a cortante reforzados se sometieron a carga cíclica en su plano. Los resultados de los ensayos revelaron que la resistencia de los muros reforzados depende en gran medida de la configuración y del tipo de material de refuerzo. Se descubrió que la excentricidad producida por reforzar sólo una cara del muro tenía un efecto insignificante en la carga resistente del muro. La resistencia a cortante se incrementaba en un factor de 4.3 cuando se utilizaban láminas CFRP y en un factor de 1.4 cuando se usaba tejido de poliéster. Los ensayos mostraron que los muros URM de mampostería resistente a cortante podían ser reforzados eficazmente con materiales compuestos FRP.

Albert y otros (1998) llevaron a cabo un programa de investigación para examinar la resistencia a la flexión fuera de plano de los muros URM reforzados con FRPs aplicados externamente. Doce muros de mampostería en hormigón fueron ensayados como vigas verticales apoyadas en uno de sus extremos y sujetos a dos líneas de carga fuera del plano. Se utilizaron varios tipos de fibras de refuerzo: láminas de GFRP, bandas CFRP y láminas CFRP. Las probetas se dividieron en dos series: Serie I, donde se compararon los diferentes tipos de refuerzo y Serie II, donde se investigaron diferentes configuraciones de laminado. Los cinco parámetros investigados fueron: tipo, cantidad, y configuración del refuerzo con FRPs, efectos de carga axial y los efectos de carga cíclica. Los resultados mostraron que los datos de carga versus deflexión en la mitad del vano para todas las probetas se caracterizaba por dos tipos diferentes de respuesta: la primera

respuesta no lineal representaba la contribución a la rigidez de mampostería y la posterior respuesta lineal representaba la contribución de rigidez del refuerzo con FRPs. El tipo de fibra de refuerzo y su cantidad afectaba a la rigidez global de la probeta. La configuración del refuerzo de fibra tenía un impacto más directo en el comportamiento local por deformación de la junta que en el comportamiento global. La introducción de carga axial incrementaba el efecto de rigidización de la mampostería y reducía el efecto de rigidez del refuerzo de fibra. Aunque la rigidez de la mampostería se reducía debido a la carga cíclica, la forma original de la envolvente carga-deformación se mantenía. La resistencia y ductilidad fuera del plano de los muros de mampostería se incrementaba significativamente cuando se reforzaban con FRPs.

Triantafillou (1998) presentó un análisis para la resistencia de muros URM reforzados con laminados de CFRP adheridos externamente bajo flexión monotónica fuera del plano, en el plano de flexión y en el plano a cortante, todo combinado con carga axial. El objetivo era estudiar el comportamiento mecánico utilizando un modelo simple consecuente con los enfoques de los códigos de diseño modernos para estructuras de mampostería. Esto se logró mediante derivaciones analíticas de capacidades de momento, carga axial y capacidad a cortante y sus interacciones, así como con ensayos experimentales en probetas de muro bajo diferentes condiciones de carga. Resultó que para niveles de carga axial bajos a moderados, la capacidad de flexión fuera de plano se incrementaba con el área de refuerzo de FRPs. Para niveles altos de carga axial, la capacidad de flexión fuera del plano disminuía aumentando el refuerzo de FRPs. La capacidad a flexión en el plano se incrementaba casi linealmente con el área de refuerzo. Para la misma área, independientemente del nivel de carga axial, la efectividad del refuerzo con FRP aumentaba al disminuir el número de laminados. El uso de dos laminados separados tanto como fuera posible daba como resultado el mayor incremento de la capacidad en plano. Se demostró que el incremento en la capacidad a cortante debido al refuerzo externo depende del nivel de carga axial. Se encontró que la capacidad a cortante en el plano de los muros reforzados con FRP era bastante alta, especialmente en el caso valores bajos de carga axial. La consecución de la resistencia total a flexión en el plano depende de un anclaje adecuado. Longitudes de desarrollo cortas y/o la ausencia de fijación pueden dar como resultado roturas prematuras por desprendimiento de los laminados de FRP.

Kuzik y otros (1999) investigaron el comportamiento cíclico fuera de plano de los muros de mampostería reforzados en acero con refuerzo externo con envoltura de GFRP. En la Universidad de Alberta se llevó a cabo un programa de ensayo a escala real sobre ocho probetas de muro de 1.2 m de ancho, 0.2 m de espesor y 4.0 m de largo. Los muros fueron ensayados en posición vertical bajo carga axial de compresión constante y carga cíclica reversible aplicada fuera de plano. Se investigaron tres anchos diferentes de envolturas de GFRP: 250 mm, 130 mm y 65 mm. Se estudiaron los efectos del nivel de carga axial, la cantidad de acero de refuerzo y la cantidad de refuerzo adherido externamente. Los datos de deformación de ambos refuerzos (acero y GFRP) se utilizaron extensivamente en la evaluación del comportamiento. Se propuso un modelo analítico para predecir el momento de flexión frente a la deflexión de la línea central. El modelado de la resistencia se desarrolló basándose en las fuerzas internas mecánicas del área transversal efectiva. Se desarrolló un enfoque basado en la deformación máxima de GFRP para predecir la deflexión última. La rigidez efectiva fue modelada incorporando un modelo de degradación de la rigidez.

El comportamiento global a flexión de los muros de mampostería reforzados externamente con GFRP fue excelente. Salvo por fisuras visibles, los muros mantuvieron su integridad estructural durante la carga cíclica como se observó de sus respuestas histeréticas carga-deflexión. Todas las ramas de descarga pasaban cerca del origen resultando un efecto de estrangulamiento. Esto se debe al comportamiento elástico del refuerzo de FRPs y a la ausencia de deformaciones plásticas. Aumentando la cantidad de refuerzo de GFRP, se incrementaban la rigidez y resistencia última. Se descubrió que variando la cantidad de refuerzo de GFRP, el comportamiento de los muros se veía afectado de forma significativa.

Ehsani y otros (1999) investigaron el comportamiento de muros de URM reforzados con tejido de FRPs sometidos a cargas sísmicas simuladas. Tres muros de ladrillo URM a media escala y reforzados en ambos lados con bandas verticales de GFRPs fueron sometidos a carga cíclica fuera del plano. Cada muro fue sometido a una carga e historia de desplazamientos predefinida fuera del plano. La secuencia de carga constaba de un gran número de desplazamientos cíclicos. Los cuatro primeros ciclos fueron aplicados en

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

modo de carga controlado, dos antes del agrietamiento y dos para la carga de agrietamiento. Los ciclos restantes se aplicaron en modo de desplazamiento controlado. El comportamiento observado mostraba que el modo de falla por tracción controlaba cuando se empleaban materiales compuestos de densidad amplia y ligera y por delaminación, cuando se usaban materiales compuestos más resistentes. La pobre capacidad de transferencia a cortante de la mampostería controlaba el modo de rotura de los muros reforzados con este tejido unidireccional. La resistencia a última flexión se incrementaba de forma significativa debido al reforzamiento de las bandas de FRPs.

Se observaron deflexiones de un 2.5 % de la altura del muro. Aunque tanto los muros URM como las bandas de FRPs se comportaron de forma frágil, la combinación dio como resultado un sistema capaz de disipar algo de energía. Velázquez-Dimas y otros (2000) investigaron un innovador sistema de refuerzo para edificios URM utilizando laminados de GFRP. Cuatro muros de ladrillo URM a media escala, reparados con bandas verticales de GFRP adheridos con resina epoxy, fueron probados bajo flexión cíclica fuera de plano. La presión lateral fue aplicada mediante un sistema de airbag que se movió de una a otra cara del muro. Los parámetros investigados incluían el número de hileras de muros, siendo uno o dos, y la relación de refuerzo que variaba desde 0.5 hasta 3 veces la de la condición balanceada.

Se detectaron cuatro modos de rotura en muros de una sola hilera: tensión en el tejido de materiales compuestos, compresión en el ladrillo, excesiva delaminación del tejido y falla por cortante horizontal de la mampostería. Dos probetas fallaron por delaminación extensa en la falla. La falla por tensión se produjo en la probeta reforzada con valores medio y completo de la cuantía balanceada. La otra probeta falló debido a los altos esfuerzos cortantes en el plano. Se observaron dos modos de rotura para el muro con doble hilera: delaminación excesiva de todas las bandas de materiales compuestos y fallo por cortante en la interfaz del muro. Las probetas con cuantías de refuerzo más bajas mostraron un comportamiento más dúctil. Por lo tanto, se recomendó que la cuantía de refuerzo fuera limitada a dos veces la cuantía balanceada. La resistencia y capacidad de deformación de los muros reforzados mejoró significativamente. Se concluyó que la deflexión máxima medida no dependía directamente de la cantidad de

refuerzo. Sin embargo, la resistencia a carga lateral era linealmente dependiente de la cantidad de refuerzo. Se detectaron fisuras verticales donde se alcanzaba la capacidad a flexión paralela a las juntas. Se recomendó aplicar refuerzo en la dirección horizontal para limitar su formación.

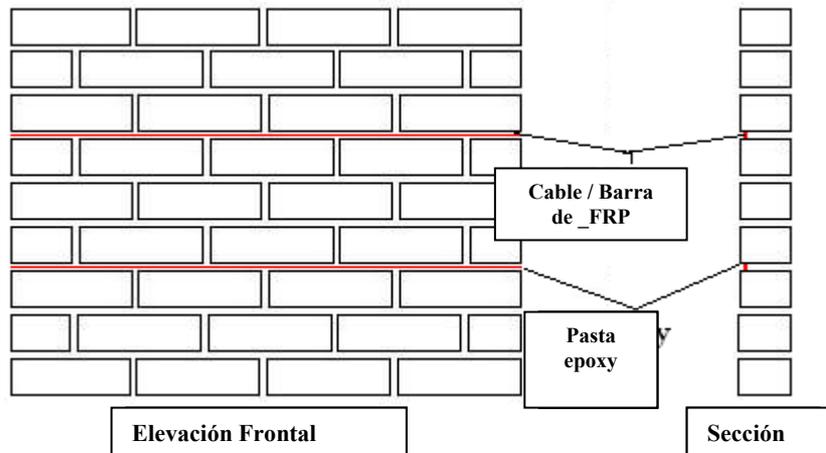
Hamoush y otros (2001) investigaron la efectividad de utilizar laminados en materiales compuestos de FRPs para reforzar muros URM existentes bajo cargas fuera de plano. Se ensayaron un total de 15 muretes de mampostería de hormigón de 1200x1800x200 mm. El laminado en FRPs se componía de un tejido ortogonal de vidrio y aramida en la dirección lateral. Los revestimientos de FRPs fueron adheridos a la cara a tensión de los doce muretes. Se evaluaron dos configuraciones. La primera constaba de dos capas de laminado bidireccional de FRP y la segunda de bandas horizontales y verticales de FRP unidireccional. También se evaluaron dos métodos de preparación de la superficie: chorro de arena y cepillado. Se aplicó una presión uniforme a los muretes utilizando bolsas de vacío. Se registraron cargas de rotura, tensiones en los FRPs, deformaciones fuera de plano y modos de falla.

Se descubrió que la resistencia a cortante del muro de mampostería tenía mayor influencia sobre la carga de falla del sistema. La mayoría de los muretes ensayados fallaron prematuramente por delaminación en la conexión final entre el laminado de FRPs y la mampostería. Otra fuente de delaminación prematura fue el aire atrapado y el tejido defectuoso que crearon concentraciones de tensión. No se observó mucha diferencia en la ganancia de resistencia entre el refuerzo mediante un laminado continuo en el toda el área del murete y el refuerzo mediante bandas unidireccionales aplicadas de forma ortogonal. Esto sugiere que cubrir toda el área de superficie no necesariamente produce mayor resistencia. Tanto el chorro de arena como el cepillado producen suficiente adherencia en la interfaz entre el revestimiento de FRPs y la mampostería.

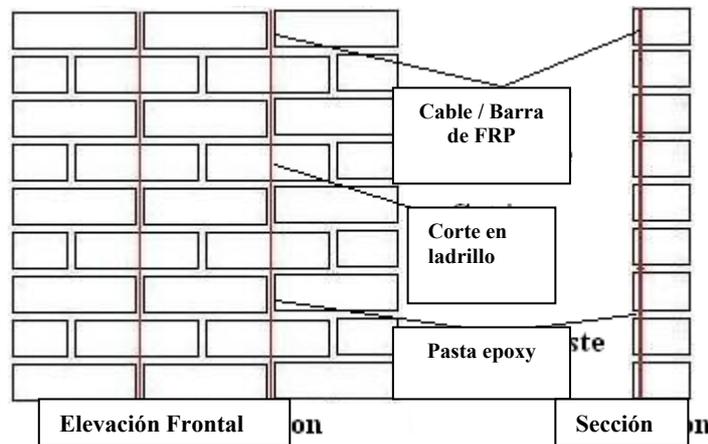
2.2 Técnicas de colocación cerca de la superficie (NSM)

La siguiente figura 12 muestra las técnicas típicas de refuerzo/rehabilitación NSM-FRPs y el procedimiento para estructuras de mampostería.

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

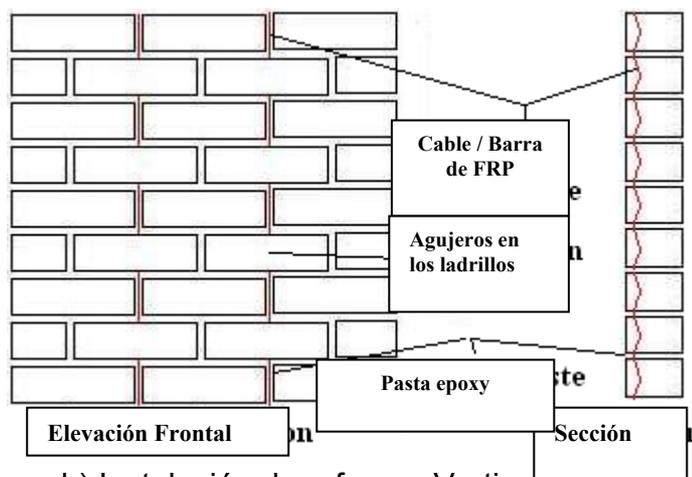


i) Instalación de Refuerzo Horizontal con Juntas de lecho para resistir carga de cortante

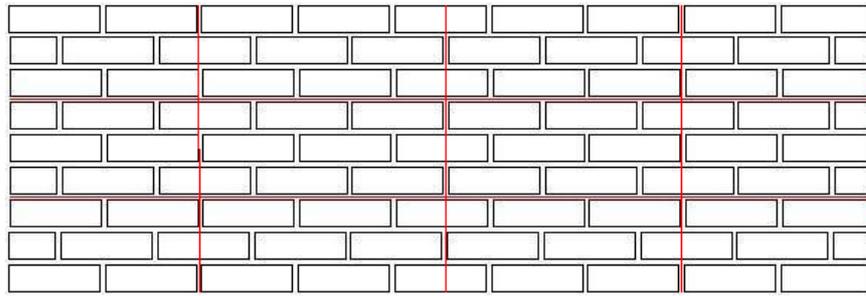


ii) Instalación de Refuerzo Vertical de FRPs para resistir la carga por flexión

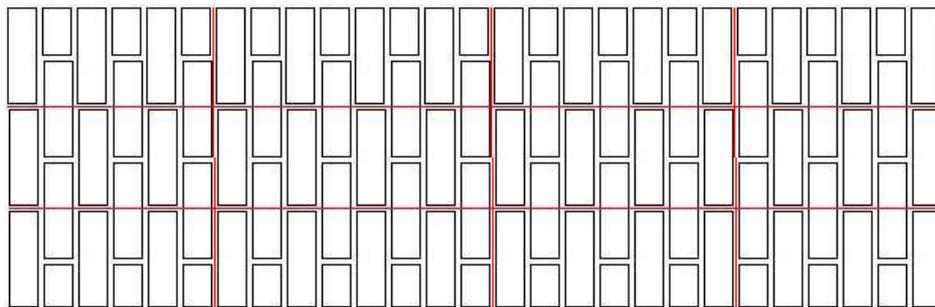
a) Instalación de Refuerzo Horizontal y Vertical



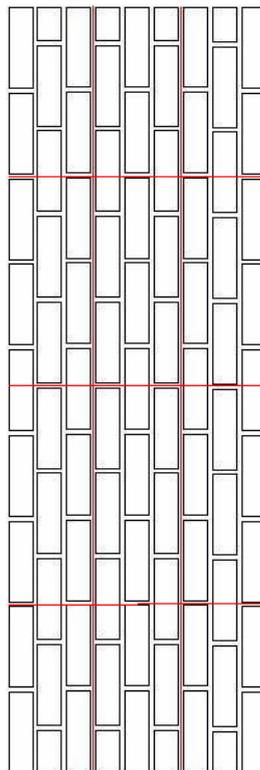
b) Instalación de refuerzo Vertical (cable)



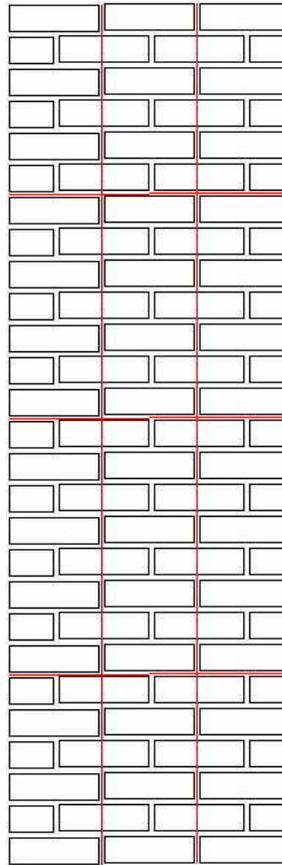
c) Refuerzo bidireccional de muros cortos (para cortante y flexión)



d) Refuerzo bidireccional de muros largos (para cortante y flexión)



e) Refuerzo bidireccional de muros altos (para cortante y flexión)



f) Refuerzo bidireccional de muros altos (para cortante y flexión)

Figura 12: Típica técnica de refuerzo NSM para estructuras de mampostería

De Lorenzis y otros (2000a y 2000b) evaluaron la efectividad de las barras de GFRP y CFRP cerca de la superficie como refuerzo de los elementos de mampostería sujetos a cargas fuera del plano. Las primeras series de ensayos se centraron en el comportamiento por adherencia de las barras de NSM embebidas en bloques de hormigón. En las segundas series, se realizaron ensayos de flexión a 4 puntos en tres muros de mampostería de hormigón de 600x1200x190mm. Las probetas para ensayos de adherencia consistían en dos bloques. Se aplicó una barra de FRPs a cada cara del bloque en dirección longitudinal, conectando los bloques juntos. En un bloque, la longitud de adherencia limitada y fue desligada de la parte restante. La barra se adhirió completamente en el otro bloque. El diámetro de la barra era de 10 mm y el tamaño de la ranura 3/4 pulgadas (19 mm). Las probetas se ensayaron con longitudes de adherencia de 6, 12 y 18 veces el diámetro nominal de la barra. La carga se aplicó mediante un gato hidráulico situado entre los dos bloques.

Se observaron dos modos diferentes de rotura: extracción en probetas con barras texturizadas con chorro de arena NSM y desprendimiento del recubrimiento epóxico combinado con agrietamiento del hormigón para probetas con barras NSM deformadas. Las barras deformadas mostraron una resistencia a la adherencia más alta que las barras rugosas. Se descubrió que aunque la carga final aumenta incrementando la longitud de adherencia, la resistencia media de adherencia se reduce. Esto se atribuyó a una distribución desigual de esfuerzos de adherencia. La falla a flexión de probetas se produjo por desprendimiento de la pasta epóxica en la que las barras estaban embebidas. Los resultados de los ensayos a flexión mostraron que se podía lograr mayor incremento en la capacidad a flexión mediante el refuerzo de FRPs NSM. Los muros reforzados fallaron para cargas de 7 y 15.7 veces la carga de rotura del muro de control, para las probetas reforzadas con una y dos barras respectivamente.

Tinazzi y otros (2000a, 2000b y 2000c) estudiaron el comportamiento en el plano interior y exterior de paneles de mampostería reforzados con esquemas diferentes utilizando una técnica que ellos denominaron rejuntado estructural. La técnica implica barras de FRPs embebidas en las juntas de muros previamente ranurados utilizando mortero epóxico. Se utilizó una amoladora para cortar las ranuras y el mortero epóxico se aplicó con una pistola. El programa de ensayo constaba de 14 muretes de mampostería de arcilla sencillos y dobles con dimensiones de 600x600x190 o 90 mm, cuatro vigas de mampostería de hormigón de 900x125x90 mm y tres muros de bloques de hormigón de 600x1200x190 mm. Los muretes de mampostería de arcilla se reforzaron con diferentes configuraciones de laminados y barras de GFRP y se ensayaron a compresión diagonal. Las vigas de mampostería se reforzaron con barras de GFRP de 6 mm y los muros de bloques de hormigón con barras de GFRP de 10 mm perpendiculares a las juntas. Los muros de bloques de cemento y las vigas de mampostería se sometieron al típico ensayo a flexión de carga a cuatro puntos.

De los envolventes de deflexión-carga, se hicieron evidentes incrementos dramáticos en la capacidad a flexión y deformación última. Cargas cíclicas revelaron un comportamiento elástico hasta que se produce el deslizamiento del refuerzo. Más allá de este punto, se desarrolló disipación de energía por fricción y se incrementaron las deformaciones a

flexión. La aplicación de barras de FRPs sólo a un lado del muro, bien horizontalmente, bien verticalmente, aumenta la capacidad a cortante en un 45%. Cuando las barras se aplicaron en ambos lados, se logró un incremento de más del 120%. Cuando la carga se aplicó a la segunda diagonal, tras la falla a cortante a lo largo de la primera, la capacidad residual a cortante resultó un 60% mayor que la del muro sin refuerzo. Los ensayos de adherencia muestran que la falla debida al deslizamiento del mortero epóxico dentro de la ranura es más común que la extracción del refuerzo o la ruptura del mortero epóxico. Por este motivo, la adherencia entre la pasta epóxica y el material base es la clave en comportamiento.

Tumialan y otros (2001-a) investigaron el comportamiento a cortante de muros de bloques de hormigón simple reforzándolos mediante la técnica de rejuntado estructural con FRPs. Barras de GFRP de 6 mm de diámetro se colocaron en las juntas de mortero en diferentes configuraciones: en cada junta horizontal sobre un lado, en cada junta horizontal y vertical sobre un lado y en cada junta horizontal sobre un lado además de en cada junta vertical sobre el otro lado. Se ensayaron cuatro probetas de 1.6x1.6 m construidas con bloques de hormigón de 20 cm bajo carga diagonal en ciclos de carga y descarga. Los resultados revelaron que el refuerzo con FRPs incrementaba la resistencia a cortante de los muros URM en un 100%. Los muros reforzados con la misma cantidad de refuerzo, independientemente de ser aplicados sobre una o las dos caras del muro, mostraban comportamientos similares. A diferencia de los muros URM, los muros reforzados eran estables después de la falla. Esta mejora en la integridad estructural puede reducir substancialmente los heridos y/o la pérdida de vidas humanas por derrumbamiento.

Tumialan y otros (2001-b) presentaron una visión general de los sistemas de FRPs propuestos para reforzar muros URM. Se describen muchas aplicaciones implementadas y potenciales de los materiales compuestos de FRPs en estructuras URM. También se presentan algunas aplicaciones en campo incluyendo la rehabilitación por seísmos, por fuertes presiones de vientos y resistencia ante explosiones. Ellos ilustraron su potencial aplicación para reforzar estructuras históricas. Asimismo, se identificaron las necesidades de la investigación en el área del refuerzo de estructuras de mampostería

con materiales compuestos de FRPs. Una de las áreas señaladas para llevar a cabo investigaciones futuras fue la mejora del sistema de anclaje para evitar la separación mediante la falla controlada. Las investigaciones acerca del comportamiento fuera de plano de los muros URM reforzados con laminados de FRPs han demostrado que la capacidad de flexión de los muros reforzados se puede aumentar significativamente. En los muros de URM sujetos a cargas en el plano, la capacidad a cortante mejoró notablemente cuando fueron reforzados con laminados de FRPs. Los muros reforzados mostraban un comportamiento más dúctil. Tumialan sugirió que el uso de barras de FRPs NSM es más atractivo que los laminados ya que se preserva la apariencia estética y la preparación de la superficie que se requiere para la instalación de laminados se reduce enormemente.

3. Proceso de Evaluación sísmica

La evaluación de la resistencia a la carga sísmica requiere una consideración especial en lo que se refiere al diseño de carga, riesgo aceptable, factores que afectan a la distribución de la masa y rigidez, humedad, requerimientos de ductilidad así como a la respuesta cíclica no lineal. Para poder explicar, de forma racional, las respuestas tan complejas ligadas a la mampostería, como la influencia de las grietas la cual, depende de las propiedades de los materiales constituyentes, de la geometría del muro (y la relación entre las dimensiones), así como la tensión biaxial (o incluso triaxial) se requieren competencias especializadas.

En cuanto a la mampostería no reforzada, existen guías disponibles para ayudar a mitigar el riesgo sísmico de los edificios existentes.

El libro *“Handbook for Seismic Evaluation of Existing building”* expone un proceso de tres fases para la evaluación sísmica. Proporciona un procedimiento formalizado para completar u omitir alguna de las fases de la investigación de la siguiente manera:

Fase 1 (*Fase de investigación de antecedentes*): completa para poder identificar, de forma rápida, las deficiencias potenciales en todos los edificios. Las listas de comprobación de los que cumplen/no cumplen los criterios de evaluación se usan para determinar si la Fase 2 es necesaria o si el edificio cumple todos los requisitos. Estas

listas de comprobación no se usan para edificios con mampostería de carga no reforzada con diagramas flexibles, dichos diagramas se evalúan en la fase 2.

Fase 2 (*Fase de Evaluación*) implica un análisis lineal (ya sea estático o dinámico) o un procedimiento espacial (como el uso de un análisis de respuesta específica en lugares con alta intensidad de movimiento de tierras). Si se confirman las deficiencias o si se identifican futuras deficiencias, se tomaría la decisión de determinar si el edificio no cumple los requisitos o de proceder a la Fase 3.

Fase 3 (*Fase de Evaluación Detallada*) implica un análisis no lineal exhaustivo.

4. Rehabilitación / Procedimientos de refuerzo

Si la demanda sísmica (carga) en un elemento de un muro excede la oferta (resistencia), es necesario un refuerzo para mejorar el rendimiento sísmico. Se recomiendan los siguientes enfoques para edificios de mampostería no reforzada:

- a. Corregir las deficiencias en el concepto global de la estructura mediante:
 - Refuerzo de la transferencia a cortante entre los muros a cortante y el suelo/techo.
 - Reducir el efecto de torsión reduciendo la excentricidad entre el centro de la masa y el centro de rigidez del muro añadiendo o quitando muros.
 - Asegurar la redundancia y la continuidad vertical de los muros.

- b. Corregir las deficiencias en la capacidad de resistencia y deformación de los muros de flexión y los muros a cortante de la siguiente manera:
 - Aumentar la resistencia a cortante mediante el refuerzo o reducción de la carga a cortante para disminuir la rigidez de la pared cortando un muro más bajo en diferentes piezas con una relación de dimensiones más elevada.
 - Mejorar la estabilidad en plano si se pretende que el muro resista una carga lateral mediante acción de trasvase (por ejemplo, sujetando muros cruzados o añadiendo miembros).
 - Prevenir el derrumbamiento fuera de plano, bien atando el muro a los

diafragmas suelo/tejado o proporcionando restricciones en los bordes para permitir que se desarrolle el arco.

- c. Corregir las deficiencias de la respuesta en los elementos no estructurales como por ejemplo parapetos o paredes sin carga. Esto se puede conseguir mediante el anclaje adecuado, refuerzo, apoyo y, en algunos casos, asegurando las juntas de movimiento adecuadas para evitar la transferencia de carga a estos elementos.

Para edificios de mampostería reforzada, el enfoque en cuanto al refuerzo es asegurar la respuesta a la deformación dúctil y suprimir las fallas a cortante que puedan ser quebradizas. Esto se consigue mediante el confinamiento para mejorar la ductilidad y proporcionar un refuerzo adicional externo a cortante para suprimir las fallas a cortante de los muros estructurales y los muelles. Un buen ejemplo de refuerzo sísmico es el U.S.-TCCMAR, un edificio de investigación de mampostería de hormigón reforzado de cinco pisos, el cual se probó en la Universidad de California, en San Diego.

Los muros en mampostería dañados del primer y segundo piso se repararon utilizando revestimientos de un compuesto de fibra de carbono para mejorar la capacidad a cortante y el confinamiento del pie del muro. El polímero de hormigón se utilizó para reparar el pie de los muros de compresión y otras zonas dañadas.

El edificio reparado dio muy buenos resultados con un pequeño aumento de la capacidad de carga máxima, pero lo más importante es que tenía una capacidad de deformación del 2% de deriva en la dirección de empuje, dos veces la del edificio original. Se requiere un nuevo análisis del refuerzo del edificio teniendo en cuenta los cambios en las características físicas y mecánicas ya que al añadir masa al edificio o mejorar la resistencia de los elementos y la ductilidad las fuerzas sísmicas inducidas pueden alterarse. La iteración puede ser necesaria para alcanzar un refuerzo óptimo.

5. Organización de la obra de refuerzo

5.1 Preparación de los planes de refuerzo y especificación

Una vez que se decide que la rehabilitación es necesaria y hemos obtenido la información suficiente, debemos preparar los diseños y las especificaciones. En primer lugar, son necesarios los planos del edificio para mostrar de forma precisa todas las condiciones existentes.

5.1.1 Planos y diseños: el trabajo de rehabilitación, debido a su naturaleza única, normalmente requiere más detalles y explicaciones que la construcción original. Hay que preparar los siguientes diseños y cronogramas:

- Las condiciones existentes se deben mostrar en las zonas donde se va a llevar a cabo el trabajo de rehabilitación, incluyendo las tuberías y utilidades.
- Se deben saber, si es necesario, los detalles concretos de los trabajos de demolición, incluyendo lugar y secuencia.
- Todos los detalles de la obra de rehabilitación deben estar claramente detallados y especificados en los planos. Esos detalles incluyen: conexiones (conectores a cortante y las conexiones de los muros cruzados) y los detalles de las juntas de movimiento tanto verticales como horizontales así como su ubicación.
- En muchos casos, se deben exponer de forma clara los sistemas que deban cerrarse, la reubicación temporal de los inquilinos y otros factores que puedan afectar a la duración de la obra.

5.1.2 Especificaciones: consisten en planos y diseños más detallados, las especificaciones deben ser más minuciosas. Es muy importante tener en cuenta que dichas especificaciones concretas sobre el trabajo, son necesarias para que las previsiones en las especificaciones estándar que no se apliquen o que puedan contradecir los requerimientos especiales no nos lleven a confusión. Por ejemplo:

- Las especificaciones deben incluir una descripción de los procesos de demolición y de las secuencias para minimizar el trastorno de los componentes existentes que se pretenden dejar en el edificio.

- Se deberán especificar todos los materiales que se van a usar en la rehabilitación, incluyendo tipo y propiedades de los materiales. Debemos incluir también los requerimientos de manipulación y almacenaje.
- Las especificaciones deben incluir también las secciones donde se describen los métodos y las secuencias de la construcción para así minimizar el riesgo en los componentes vulnerables de la estructura y asegurar que la seguridad necesaria se conserva en todo momento.
- Las especificaciones también deben incluir las previsiones para el apuntalamiento, refuerzo y cualquier otra medida de protección que se pueda requerir para la estructura existente o durante la rehabilitación.
- Cuando la extensión y, en algunos casos, incluso la decisión final de la rehabilitación sea la demolición u otras fases del progreso de refuerzo, será necesario modificar los procedimientos operacionales y de toma de decisiones que están claramente descritos para evitar la cohesión y permitir que la obra proceda de la manera más eficaz posible.

6. Supervisión e inspección de la rehabilitación

El principal problema en mampostería es la falta de una supervisión adecuada y de inspección durante la construcción. A menudo, las responsabilidades de la supervisión de la construcción y la inspección no estaban bien definidas en el contrato original. No hay que decir que debido a la gran incertidumbre ligada a la corrección de los problemas existentes, las previsiones para mejorar la supervisión correcta y la inspección son incluso, más importantes que la obra de rehabilitación. En muchos casos, el coste de la inspección necesaria y la supervisión *in situ* constituye una parte del coste total de la obra más elevado de lo que requiere una nueva construcción. La mayoría de las veces no está relacionada con el coste de la rehabilitación. Además de asegurarnos de que la obra se lleva a cabo de manera correcta, la supervisión detallada de las reparaciones nos

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

hará disminuir los costes evitando así, el trabajo innecesario en lugares donde la construcción existente es adecuada.

La supervisión de construcción que proporciona el contratista es muy importante para conseguir un trabajo de calidad. La extensión de la supervisión y la experiencia y capacidades del supervisor de construcción deben estar estipuladas en el contrato.

A pesar de todos niveles de inspección, el contratista tiene la última responsabilidad en asegurar que la construcción se ajusta a los diseños y especificaciones y a los niveles definidos de trabajo. Una inspección por parte de una tercera persona, será efectiva para asegurar cualquier cualidad rutinaria (por ejemplo, un test de prueba de las juntas de refuerzo) o cuando se requiere un conocimiento especial (por ejemplo, medidas de ultrasonido para asegurar que se rellenan los huecos sellando las juntas).

Sin embargo, especialmente en el trabajo de rehabilitación que implica hacer juicios a medida que el trabajo avanza, el diseñador de la rehabilitación toma decisiones como qué partes se pueden dejar y la extensión de las reparaciones que se requieren en otras zonas. El diseñador probablemente tenga una mejor percepción de las variaciones y de la intención de la obra de rehabilitación. Por esta razón, a menudo, tendrá que asumir la responsabilidad de inspección, lo que se traduce en visitas periódicas al lugar así como que los diseños sean fieles a la obra.

El diseñador es el más capaz de visualizar la integración de detalles complicados y es muy probablemente es capaz de ayudar al contratista a conseguir el propósito de la obra. La rehabilitación de un edificio es, a menudo, muy compleja y se hace más complicada debido a la necesidad de trabajar con las restricciones del continuo uso del edificio. También, algunas veces tenemos la incertidumbre acerca de qué condiciones nos podemos encontrar a medida que avanza la obra.

Por esta razón, es muy importante que el diseñador y el contratista trabajen en equipo y así evitar una mala relación entre los dos. Este factor se tendrá en cuenta a la hora de elegir al diseñador de la obra de rehabilitación y al contratista.

Cuando existen condiciones peligrosas, el departamento local del edificio tendrá un gran interés por asegurar que la obra se lleva a cabo de forma correcta y dentro del tiempo estipulado.

7. Mantenimiento

7.1 Necesidad de una inspección post-construcción regular

La mampostería construida y bien diseñada ha batido el récord en lo que se refiere a durabilidad a largo plazo con un mantenimiento mínimo. No obstante, el mantenimiento preventivo y la corrección de los fallos existentes se consideran parte de las inspecciones post-construcción regulares que están planificadas.

Demasiado a menudo, las inspecciones sólo se realizan después de tener signos evidentes de peligro.

7.2 Mantenimiento preventivo y reparaciones menores

El mantenimiento preventivo, incluyendo reparaciones menores, puede incluir: pintar, cambiar el material de sellado, repuntar, cambiar las unidades dañadas, reparar las grietas, renovar el revestimiento impermeable y asegurar que los elementos que no son de mampostería (como por ejemplo, los drenajes del tejado, el alfeizar de las ventanas, etc...) funcionan correctamente y no comprometen el perfecto funcionamiento de la mampostería. Las zonas que están normalmente húmedas o que permanecen mojadas durante un largo período de tiempo se deben investigar para determinar la causa de la humedad para que esto se pueda corregir antes de que haya algún problema.

La guía BIA (Brick Industry Association, USA) [Asociación de la Industria del Ladrillo] proporciona la esperanza de vida de diversos materiales de construcción y se puede utilizar cuando se considere necesario un mantenimiento preventivo periódico:

1. Ladrillo.....100 años o más

2. Mortero.....15-50 años
3. Pintura del acero.....3-5 años
4. Material de sellado.....4-10 años
5. Juntas de coronamiento.....4-8 años

En algunos casos, se ha pintado la mampostería bien para cambiar su apariencia o bien para cubrir defectos que estaban a la vista. Mientras que pintar superficies interiores es técnicamente aceptable, por lo general, pintar el exterior debe evitarse debido a la importancia de la durabilidad y porque una vez pintado, esa superficie pasa a ser una pieza para el mantenimiento regular. Con climas cálidos, donde la durabilidad no es una preocupación, pintar se puede aceptar pero se debe escoger un tipo de pintura específico para que se adecue a la textura y a las condiciones de la superficie de la mampostería así como al clima.

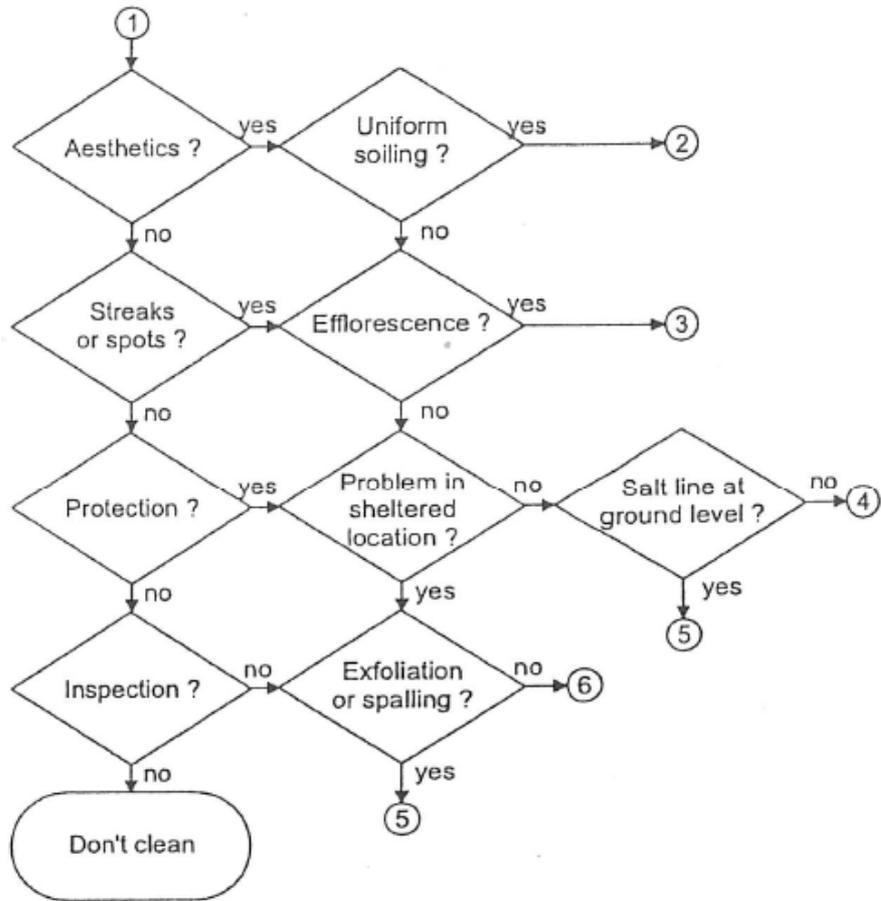
Los estucos acrílicos y otras cubiertas de superficies son alternativas donde la mampostería no proporciona la apariencia deseada. Sin embargo, es necesario evaluar las implicaciones relativas al funcionamiento global del revestimiento del edificio.

7.3 Limpieza de la mampostería

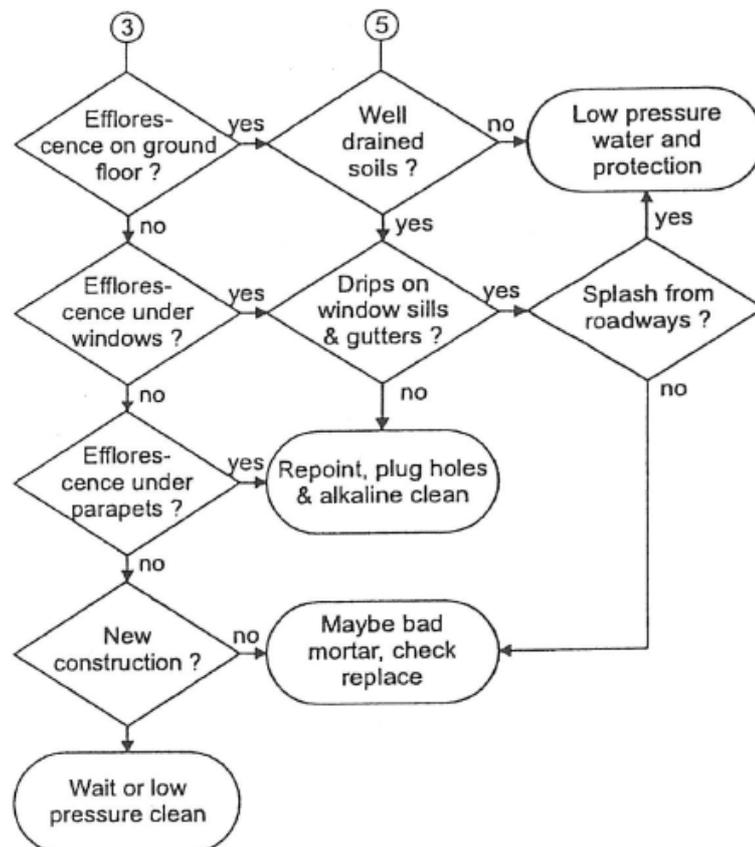
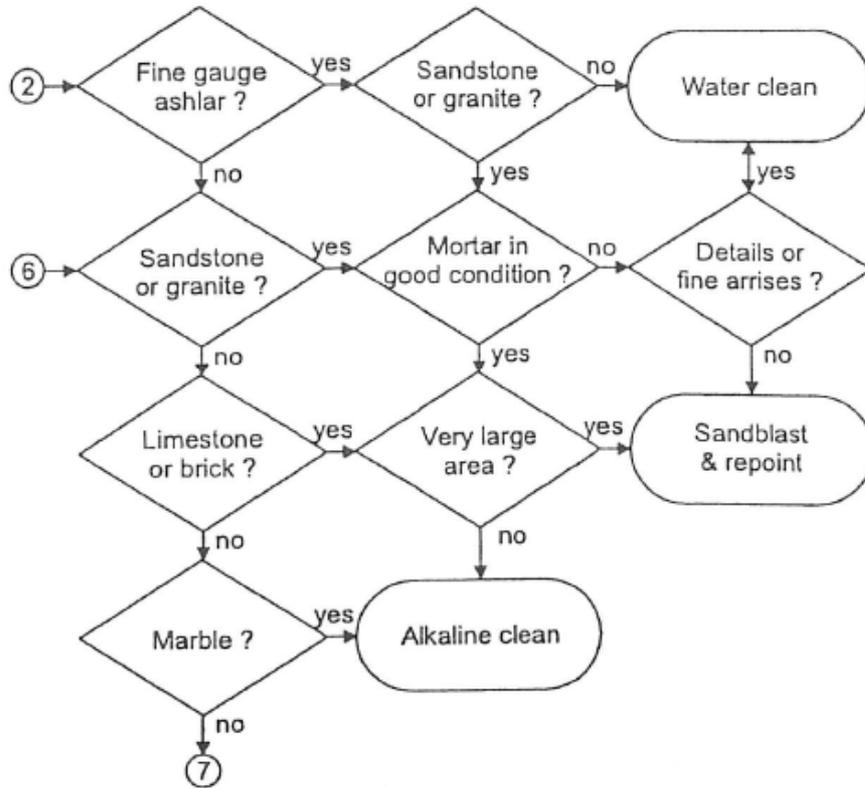
La limpieza de manchas, eflorescencias y grafitis es parte del mantenimiento rutinario, aunque se recomienda tener cuidado con la elección de los productos de limpieza y los métodos que usamos. Lógicamente, la selección se basará en la naturaleza de los sedimentos y en el tipo de mampostería de la superficie.

La mala elección de dichos productos puede dar lugar a manchas peores que las originales. El fin de la limpieza y la realidad de las obligaciones contractuales y el control de calidad, también tienen un impacto en la decisión de si hay que limpiar y el tipo de limpieza que tenemos que hacer en caso de ser necesario. El árbol de decisión de la figura 13 proporciona un formato y una guía para tener en cuenta el tipo de superficie, la naturaleza de la mampostería y, sobre todo, el motivo de la limpieza.

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural



E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural



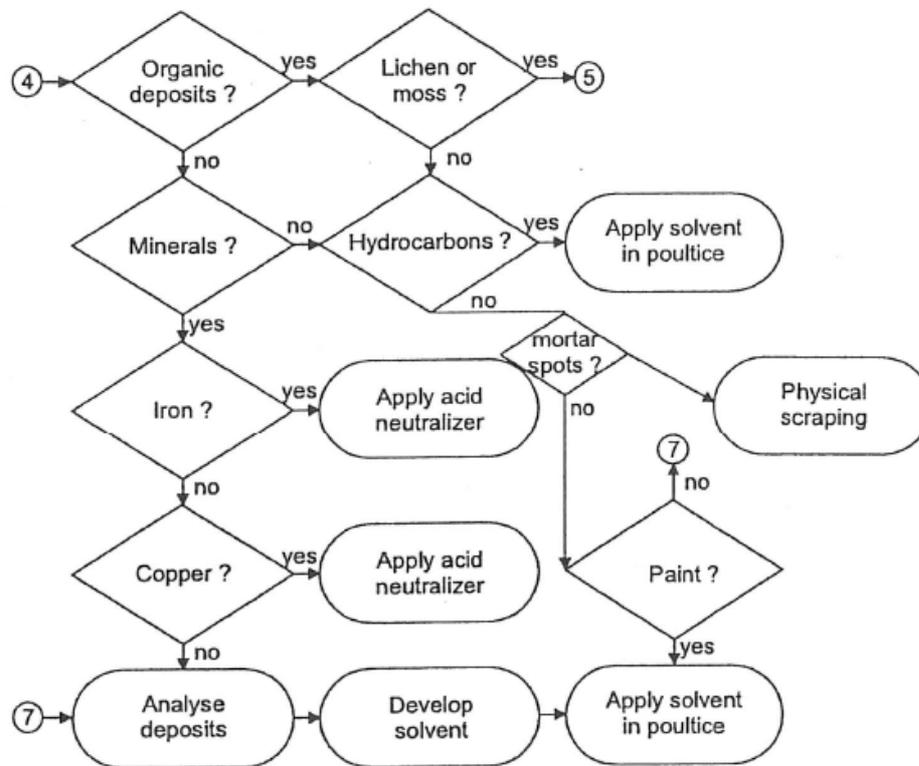


Figura 13: Árbol de decisión para la limpieza de la mampostería

La información que dan los fabricantes deberá bastar para quitar las manchas pero es conveniente probar el producto de limpieza y el método a usar en una pequeña sección de la mampostería que no llame la atención. En muchos casos, simplemente cepillar o lavar la zona con agua puede ser efectivo. A menudo, se usa el ácido muriático diluido sin considerar otras alternativas. Si comparamos las manchas, quitar la eflorescencia es relativamente fácil. Las sales eflorescentes solubles pueden desaparecer simplemente con la erosión. De lo contrario, el cepillado en seco seguido de un chorro de agua limpia normalmente es efectivo. En algunos casos, un simple chorro de arena (lo suficientemente débil para no introducir los granos en las unidades de cemento) se puede usar para quitar los sedimentos pero hay que tener cuidado ya que la apariencia de la superficie puede alterarse.

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

Los productos de limpieza comerciales pueden ser efectivos y para la limpieza de la mampostería, se puede usar el agua con jabón. Como último recurso, se puede probar con una solución de ácido muriático con un porcentaje entre el 5% y 10%, sobre todo para mampostería de ladrillo. Incluso será necesaria una solución menor (2%) para evitar los cambios en el color y la textura. Será de sabios probar el tratamiento del ácido en una zona que no llame la atención. Antes de aplicar la solución ácida, la superficie de la pared deberá estar húmeda para minimizar su absorción en el muro. Si trabajamos en áreas de menos de $0,37\text{m}^2$, los depósitos de sal se deben eliminar con un cepillo de cerdas duras después de unos 5 minutos tras aplicar la solución ácida y después se deberá limpiar rápidamente con un chorro de agua limpia para eliminar los restos de ácido. Debido a que el ácido puede cambiar la apariencia, lo normal es tratar la pared entera para no tener un efecto lleno de manchas. También se deben proteger otros componentes de los muros y de la construcción que se encuentran debajo del área de trabajo. El eflorescente de carbonato cálcico es un sedimento blanco llano que a veces forma una corteza blanca muy dura que es extremadamente difícil de quitar. La limpieza con agua a presión y, a veces, con arena fina mezclada en el agua puede tener resultados, pero cualquier método efectivo es probable que altere el color y la textura por lo que será necesario el tratamiento del muro completo.

Bibliografía

- Albert M., J. Cheng and A. Elwi (1998). Rehabilitation of Unreinforced Masonry Walls With Externally Applied Fibre Reinforced Polymers. Structural Engineering Report no. 226. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Alberta, Canada.
- Croci G. (1998). The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. Advances in Architecture Series, Computational Mechanics Publications, Southampton-UK and Boston- USA.
- De Lorenzis L., Tinazzi D., and Nanni A. (2000-a). Near-Surface Mounted FRProds for Masonry Strengthening: Bond and Flexural Testing. Proceedings of the Mechanics of Masonry Structures Strengthened with FRP-materials, modeling, testing, design, control, Venice, Italy, December, pp.7-18.
- De Lorenzis, L., A. Nanni, and A. La Tegola. (2000-b). Bond of Near Surface Mounted FRP Rods in Concrete Masonry Units. Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Composites Engineering (ICCE/7), Denver, Colorado, July 2-8.
- Drysdale R., A. Hamid and L. Baker (1999). Masonry Structures- Behavior and Design. The Masonry Society, Boulder, Colorado, USA.
- Drysdale R. and A. Essawy (1988). Out-of-Plane Bending of Concrete Block Walls. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 1, pp. 121-133.
- Ehsani M., H. Saadat esh and J. Velazquez-Dimas (1999). Behaviour of Retrofitted URM Walls Under Simulated Earthquake Loading. Journal of Composites for Construction, Vol. 3, No. 3, pp. 134-142.
- Ehsani M. and H. Saadatmanesh (1996). Seismic Retrofit of URM Walls with Fibre Composites. The Masonry Society Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 63-72.

Ehsani M., H. Saadatmanesh, I. Abdelghany, and W. Ekafrawy (1993). Flexural Behaviour of Masonry Walls Strengthened With Composite Fabrics. ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, Vancouver, Canada, pp. 497-507.

Hamid A., A. Mahtnoud and S. Abo El-Magd (1994). Strengthening and Repair of Unreinforced Masonry Structures: State-of -the- Art. The 10" International Brick and Block Masonry Conference, Calgary, Canada, pp. 485-497.

Kingsley, G . (1995). Evaluation and Retrofit of Unreinforced Masonry Buildings. Third International Concrete and Masonry Engineering Conference, San Francisco, California, USA, pp. 709-727.

Kuzik M., A. Elwi, and R. Cheng (1999). Cyclic Behavior of Masonry Walls with GFRP. Structural Engineering Report No. 228, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada, 116 pp.

Lissel S., D. Tillernan, E. Sayed-Ahmed, and N. Sherive (1998). Carbon Fibre Reinforced Plastic Prestressed Masonry. The 8" Canadian Masonry Symposium, Alberta, Canada, pp. 610- 621.

London M. (1988). Masonry: How to Care for Old and Historic Brick and Stone. The Preservation Press, Washington, D.C., USA.

Lourenço P. and P. Martins (2001). Strengthening of Architectural Heritage with Composite Materials. Composites in Construction International Conference, Porto, Portugal, pp. 571-576.

Manzouri T., M. Schuller, P. Shing and B. Arnadei (1996). Repair and Retrofit of Unreinforced Masonry Structures. Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 4, pp. 903-922.

Matthys J. and J. Noland, Ed. (1989). Evaluating, Strengthening, and Retrofitting Masonry Buildings. The Masonry Society, Boulder, Colorado, USA.

Medina F., T. Arrieta and J. Arrieta (1995). Structural Repair of S. Isidoro Church (Seville). The 4" International Conference on Structural Studies of Historical Buildings, Crete, Greece, pp. 245-256.

Modena C. (1994). Repair and Upgrading Techniques of Unreinforced Masonry Structures Utilized after the Friuli and Campania/Basilicata Earthquakes. Earthquake Spectra, Vo. 10, No. 1, pp. 171-185.

Modena C. (1989). Italian Practice in Evaluating, Strengthening, and Retrofitting Masonry

Buildings. Proceedings of an International Seminar on Evaluating, Strengthening, and Retrofitting Masonry Buildings, The Masonry Society Publications, pp. 2- 1-25.

Plecnik J., T. Cousins, and E. O'Conner (1986). Strengthening of Unreinforced Masonry Buildings. Journal of Structural Engineering, Vol. 112, No. 5, pp. 1070-1087.

Schwegler G. (1995). Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones. The 10th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, Netherlands, pp. 2299-2303.

The Venice Charter (1964). International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites. The 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, Italy.

Tinazzi D., M. Arduini, C. Modena and A. Nanni (2000). FRP-Structural Repointing of Masonry Assemblages. The 3rd Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 585-592.

Tinazzi D., C. Modena, and A. Nanni (2000). Strengthening of Masonry Assemblages with FRP Rods and Laminates. The International Meeting on Composite Materials (PLAST 2000), Advancing with Composites 2000, Milan, Italy, pp. 411-418.

Tinazzi, D. and A. Nanni (2000). Assessment of Technologies of Masonry Retrofitted with FRP. Technical Report, Centre for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri- Rolla, 143 pp.

Tomazevic M. and D. Anicic (1989). Research, Technology and Practice in Evaluating, Strengthening, and Retrofitting Masonry Buildings: Some Yugoslavian Experience. Proceedings of an International Seminar on Evaluating, Strengthening, and Retrofitting Masonry Buildings, The Masonry Society Publications, pp. 1-54.

Triantafillou T. (1998). Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. Journal of composites for construction, Vol. 2, No.2, pp. 96-104.

Triantafillou T. and M. Fardis (1995). Strengthening of Historic Masonry Structures with Fiber Reinforced Plastic Composites. The Fourth International Conference on Structural Studies of Historical Buildings, Crete, Greece, Vol. 2, pp. 129-136.

Tumialan G., P. Huang, A. Nanni and P. Silva (2001-a). Strengthening of Masonry Walls by FRP Structural Repointing. Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures (FWRCS-51, Cambridge, UK, pp. 1033-1042.

Tumialan G., F. Micelli and A. Nanni (2001-b). Strengthening of Masonry Structures with

E2.26 – Cirugía del Bien Cultural Técnicas de Rehabilitación/Refuerzos para edificios históricos del Patrimonio Cultural

FRP Composites. Structures 2001 Conference, Washington DC, USA, CD version, 8 pp
 Velazquez-Dimas I., M. Ehsani and H. Saadatmanesh (2000). Out-of-Plane Behavior of Masonry Walls Strengthened with Fiber Composites. ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 3, pp. 377-387