

6

Comportamiento estructural de muros de carga de obra de fábrica reforzados con *TRM*

Ernest Bernat-Maso

Resumen La obra de fábrica es uno de los materiales más antiguos que existen. No obstante, su uso actual a nivel estructural se limita prácticamente a los muros de carga debido a sus limitaciones asociadas a la falta de resistencia a tracción. La introducción de los materiales compuestos en la obra civil y edificación, y en particular del *Textile Reinforced Mortar* o *TRM*, hacen plantearse su uso como refuerzo de la obra de fábrica. Una descripción del *TRM*, seguida de una contextualización de su aplicación en la obra de fábrica, llevan de forma natural a la detección de la necesidad de experimentar su uso en muros solicitados con una carga axial excéntrica. Este tema se analiza mediante la descripción detallada de la campaña experimental llevada a cabo en el CER-LITEM BarcelonaTECH y sus resultados. El trabajo presentado indica que el uso del *TRM* en la obra de fábrica es altamente efectivo llegándose a duplicar la capacidad de carga de muros solicitados verticalmente con una compresión excéntrica donde los efectos de flexión de segundo orden son importantes. Así mismo, las dificultades detectadas en el uso del *TRM* en la obra de fábrica conducen a poder plantear de forma clara las líneas de desarrollo futuras.

6.1. Introducción

La reciente introducción práctica de los materiales compuestos en la edificación e ingeniería civil se ha focalizado, en gran medida, en la ejecución de refuerzos estructurales. Debido a la gran cantidad de estructuras de obra de fábrica y sobretodo muros de carga en edifica-

Ernest Bernat-Maso

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria

Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, Colón 11, TR45, Terrassa, 08222 Barcelona, España

e-mail: ernest.bernat@upc.edu

DOI: [10.3926/oms.204](https://doi.org/10.3926/oms.204) • Omnia Publisher, 2014

ción, resulta necesario el presentar la técnica que a fecha de hoy muestra mayor proyección de futuro para el refuerzo de la mampostería en general y la obra de fábrica en particular, el *TRM*.

Así pues, en el presente capítulo se profundiza en el refuerzo de muros de carga de obra de fábrica con mallas tejidas de fibra embebidas en una matriz inorgánica, técnica conocida como *Textile Reinforced Mortar* o *TRM*. El principal objetivo de la comunicación es caracterizar el refuerzo, presentar cómo debe realizarse su aplicación en la obra de fábrica y qué mejoras aporta. En particular, se centrará la atención en el refuerzo de muros sometidos a carga axial excéntrica que se deforman fuera del plano por efectos de segundo orden. No obstante, se presentan otros casos a partir de las evidencias científicas obtenidas los últimos años. Además, todo este repaso y estudio del caso será contextualizado en la evolución histórica de la obra de fábrica y se comparará brevemente el *TRM* con las alternativas de refuerzo de uso común actualmente, para acabar planteando posibles mejoras futuras del sistema.

El capítulo se divide en tres grandes bloques. Para empezar se describe el *TRM* situándolo en el contexto técnico e histórico y se plantean las principales variables de estudio de su aplicación, sintetizando el *Estado de la técnica*. En el segundo apartado, *Aplicaciones del TRM en muros de carga de obra de fábrica*, se presentan diversos ejemplos bibliográficos y experimentales de aplicación del *TRM* en muros de obra de fábrica de entre los cuáles se analizará en mayor profundidad la aplicación de *TRM* como refuerzo frente a la flexión de segundo orden originada por sistemas de cargas de compresión excéntricas. Finalmente, y antes de proporcionar fuentes de información relevantes sobre la temática, se presentaran líneas de investigación futuras que presumiblemente pueden ser o serán desarrolladas a corto o medio plazo, en el apartado *Línea futuras de desarrollo*.

En el presente trabajo no se cubre el tema de refuerzo de estructuras esqueléticas de obra de fábrica (arcos, bóvedas y cúpulas) con *TRM* puesto que aportar resistencia a tracción a dichas estructuras puede entrar en conflicto con la conservación de la herencia cultural asociada a la tipología estructural y se optaría por desaconsejar este tipo de actuaciones en general.

6.2. Estado de la técnica

La obra de fábrica o mampostería ha sido uno de los materiales de construcción más utilizados en el ámbito de la ingeniería civil y la edificación a lo largo de la historia. De hecho, su uso puede remontarse aproximadamente 15000 años [4], aunque las primeras ciudades conocidas fechan del 4000 a.C. aproximadamente y se sitúan en Anatolia. En ese instante inicial se puede hallar un tipo de construcción adintelada que suponía un aprovechamiento muy limitado de las características resistentes de la mampostería (gran resistencia a compresión y escasa o nula resistencia a tracción). El muro era el elemento fundamental en esta fase inicial de desarrollo. No obstante, esta situación fue evolucionando y con el progreso técnico se racionalizó el uso de la mampostería adaptando la geometría de las construcciones a la realidad del material y favoreciendo que la obra de fábrica trabajara comprimida bajo las cargas habituales. Así surgieron, poco a poco, los arcos, las bóvedas, las cúpulas y, en consecuencia, las imponentes catedrales góticas. Para estos elementos constructivos y edificios, el refuer-

zo estructural no debería estar orientado a dotar de resistencia a tracción a la mampostería, puesto que contradice la esencia de la propia estructura. Por este motivo, la aplicación de la técnica presentada en este capítulo debería realizarse únicamente en casos muy particulares y justificando siempre de forma adecuada su uso en edificios históricos o de alto valor cultural que trabajen por forma.

No obstante, con el paso del tiempo y la introducción del acero y del hormigón armado (concreto reforzado) -que permitían una construcción más rápida, con menos mano de obra y por lo tanto más económica- el uso de la obra de fábrica ha ido quedando relegado a un segundo plano y los elementos estructurales se han simplificado de nuevo, en lo que podría considerarse una involución técnica asociada al uso de este material, que ha desembocado en la situación actual en que únicamente se utiliza el muro de carga dentro de sistemas estructurales generalmente porticados (pilares y vigas). Este uso estructural de la obra de fábrica que se podría calificar de "poco natural", favorece la aparición de tracciones en el material en ciertas situaciones de carga o combinaciones de acciones: viento, sismo, transmisión de momentos de los forjados o cubiertas a los muros, etc. Y es precisamente en estos casos en los que la aplicación de un sistema de refuerzo que dote a la mampostería de resistencia a tracción resulta necesario.

Además, el cambio de uso de muchos edificios e infraestructuras en servicio requiere de un aumento de la capacidad portante de las estructuras de obra fábrica ya construidas. En general, esta mejora de prestaciones pasa por dotar al material de resistencia a tracción.

Por lo tanto, hay dos grandes casuísticas para las cuales dotar a la obra de fábrica de resistencia a tracción resulta una alternativa atractiva para la mejora de las prestaciones estructurales: permitir un aumento de la carga de uso respecto de una situación inicialmente estable, y evitar fallos asociados a sistemas de carga que generen tracciones en el material. Con este fin, son varias las técnicas de refuerzo que han sido utilizadas a lo largo de la historia, y que se especifican a continuación. Entre todas ellas, cabe destacar el refuerzo con mallas tejidas de fibras embebidas en una matriz inorgánica (lo que se conoce como *Textile Reinforced Mortar* o *TRM*) por su reciente y prometedor desarrollo.

El refuerzo de la mampostería con fibras se puede observar ya desde el origen del material. Los primeros muros de adobe contenían fibras vegetales que aportaban una pequeña resistencia a tracción suficiente para la ejecución de la estructura y el uso común. Con la evolución de la construcción la tendencia derivó hacia el uso de mampostería de bloques de piedra con o sin juntas y la obra de fábrica de ladrillos. Así mismo, el uso de las fibras desapareció por no tener cabida en este tipo de mampostería más evolucionada y discontinua, y la geometría de las estructuras se fue adaptando a la imposibilidad de resistir tracciones. En este contexto se observan los primeros refuerzos con cadenas y pletinas de hierro las cuales se sujetaban mecánicamente a la obra de fábrica o mampostería. Este tipo de refuerzo pasivo presentaba diversos inconvenientes de entre los que cabe destacar la poca durabilidad del sistema por la corrosión del hierro y la incompatibilidad de deformaciones térmicas entre la piedra y el hierro. Este modo de refuerzo pasivo también evolucionó llegándose a incluir barras de hierro, que posteriormente serían de acero, en las juntas de la obra de fábrica con la que quedaba conectada directamente por fricción. No obstante, los inconvenientes anteriormente citados se mantenían o incluso agravaban con esta técnica, ya que la inclusión de hierro o acero dentro

de la obra de fábrica sin la adecuada protección podía suponer la destrucción del material por la expansividad del óxido de hierro, perdiéndose no solo el refuerzo sino también dañándose la estructura que se pretendía reforzar.

Con la industrialización de los procesos constructivos y la aparición de las acerías modernas, los refuerzos internos con acero también evolucionaron llegando a estandarizar a base de un mayor control de calidad y conservación. En el pasado siglo se expandió el uso de la obra de fábrica de bloques o ladrillos reforzada internamente con barras de acero corrugado. Varias normativas recogen ampliamente el uso y diseño de este tipo de refuerzo [7, 12] que hoy en día es común en zonas sísmicas. Cabe destacar que este es un refuerzo aplicado desde origen, durante la construcción de la estructura, y no una técnica que permita aumentar la capacidad portante de estructuras ya existentes.

La evolución de los criterios de conservación, juntamente con la evolución técnica de las últimas décadas en relación al uso de materiales compuestos para el refuerzo de estructuras civiles y de edificación, ha dado lugar a dos grandes tendencias que buscan como objetivo el aumento de la capacidad portante de las estructuras de obra de fábrica. La primera se basa en el cambio de la geometría o las cargas de la estructura, y se traduce en aumentos de sección (recrecido con o sin reforzar), cambio de pesos aplicados o utilización de sistemas de postesado que contribuyan al equilibrio estructural. Esta primera tendencia resulta indicada para la conservación de estructuras esqueléticas de mampostería con valor histórico. La segunda gran línea se asocia al aumento de la resistencia a tracción mediante la conexión con materiales de altas prestaciones y es la que se abordará con más detalle. En este conjunto se encontrarían el uso de *FRP* (*Fibre Reinforced Polymer*) adherido a la superficie de la mampostería, dispuesto en las juntas (*Near-surface mounted* o *NSM*) o cosiendo grietas existentes mediante inyección de resina. En todos estos casos el *FRP* se adhiere mediante el uso de resinas epoxi de base orgánica. También en este segundo grupo se considerarían el uso de proyecciones de microhormigón con fibras (gunitado) o el ferrocemento que consiste en embeber una malla de acero en una capa de mortero de altas prestaciones. De hecho el ferrocemento puede considerarse el precursor del *TRM*, que también se incluiría en este grupo.

6.2.1. ¿Qué es y cómo funciona el TRM?

El *TRM* es un material compuesto formado por una malla tejida de fibra embebida en una matriz inorgánica de mortero. La malla puede ser fabricada con materiales tan diversos como la fibra de vidrio, la fibra de carbono, la fibra de basalto, fibras vegetales o alambres de acero (esta última opción se asemeja al ferrocemento). El principal requisito que debe cumplir la malla es su perfecta adherencia con el mortero de la matriz del *TRM*. Esta adherencia se consigue por compatibilidad química pero también por la geometría de dicha malla, o sea, por el anclaje mecánico derivado del mortero que pasa entre la trama y la urdimbre de la malla. Pasos de malla excesivamente pequeños evitan que el mortero penetre por completo entre las líneas de fibra reduciendo considerablemente la conexión entre mortero y malla. Es esencial entender que el *TRM* aporta resistencia a tracción gracias a las fibras de la malla, y que estas fibras soportan únicamente las cargas que el mortero es capaz de transmitir. Así pues, la transmisión de esfuerzos mortero-malla es el principal requisito a plantearse. Otro requisito es que la malla sea químicamente estable cuando está embebida en el interior de

la matriz inorgánica, asegurando su durabilidad. Se deben descartar, para las fibras, aquellos materiales reactivos químicamente con la matriz inorgánica a la que vayan a ser asociada. Por otro lado, la adaptabilidad geométrica de la malla es de gran importancia cuando se plantea el refuerzo de estructuras con geometrías singulares. Así pues, fibras como las de carbono o vidrio ofrecerán mayor flexibilidad geométrica que las mallas de alambres de acero. Para acabar con la malla se debe destacar que esta suele ser uni o bidireccional de acuerdo con las necesidades de refuerzo.

En referencia al mortero, este puede ser cualquier tipo de matriz inorgánica. Entre las matrices más comunes están los morteros de base cementítica (*Portland*), los morteros de cal o los morteros de puzzolana. Todos los morteros que se distribuyen comercialmente para su uso en *TRM* han sido específicamente diseñados para su uso con una malla de fibra específica y cuentan con múltiples aditivos químicos que mejoran su trabajabilidad y afinidad química con la correspondiente malla. Algunos, incluso están dotados de microfibras en su composición. Por este motivo se recomienda encarecidamente seguir siempre las combinaciones y especificaciones propuestas por los distribuidores de *TRM*.

Siguiendo con la matriz se podría decir que las dos principales aportaciones que realiza al material compuesto son la conexión entre el material sustrato a reforzar (obra de fábrica) y la malla, y la protección de la fibra frente a las condiciones externas (humedad, luz solar, etc.). La primera aportación es la más relevante a nivel estructural puesto que el *TRM* únicamente contribuirá a soportar las cargas que la matriz sea capaz de transferir desde la superficie de la obra de fábrica a reforzar hasta las fibras. Así pues, la adherencia de la matriz a la mampostería u obra de fábrica es el principal parámetro a tener en cuenta si se pretende sacar el máximo provecho al material de la malla (generalmente más caro).

Si la adherencia matriz-obra de fábrica no es suficiente, el fallo de la estructura reforzada suele producirse por despegado (*debonding*) del *TRM*. Por contra, si dicha adherencia es suficiente, el fallo puede ser por falta de resistencia de la obra de fábrica que no es capaz de transmitir la carga a la matriz sin colapsar localmente en superficie. En este caso se observaría un efecto de arrancada de la capa superficial de la fábrica (*peeling*). Si la interfase obra de fábrica-matriz funciona correctamente y la conexión matriz-fibra también, podría observarse un fallo por agotamiento de la resistencia a tracción de la malla (que no tiene por qué corresponderse con un agotamiento a tracción de todas las fibras traccionadas de la sección).

Dicho esto, resulta imprescindible recordar en este punto lo que podría parecer (quizás porqué lo sea) una obviedad que pasa desapercibida muy a menudo entre los aplicadores de cualquier tipo de refuerzo: no tiene ningún sentido reforzar más allá de las posibilidades del material de sustrato o la capacidad resistente de la estructura frente a otros esfuerzos no considerados por la intervención. Es decir, que se tiene que tener siempre en cuenta el eslabón más débil de todos los que participan en la cadena de la capacidad portante de una estructura. Por ejemplo, si una viga puede soportar la flexión derivada de una carga de 20 kN y el cortante asociado a una carga de 50 kN, no tiene sentido reforzar dicha viga a flexión para soportar cargas más allá de 50 kN si no se refuerza también a cortante. De lo contrario, el material de refuerzo adicional no será de utilidad y se alcanzará una solución desproporcionada, antieconómica y técnicamente insostenible. Del mismo modo, no debería reforzarse ninguna estructura sin tener en cuenta el esfuerzo rasante máximo que puede soportar el sustrato, es decir, qué carga podrá transmitir la superficie de contacto obra de fábrica-*TRM* sin fallar

localmente. Así pues, los modos de fallo asociados al colapso de la obra de fábrica o de la superficie de contacto con el TRM, deberían considerarse un error de diseño del sistema de refuerzo que no desarrolla todas sus posibilidades.

6.2.2. Comparación del TRM con otros métodos de refuerzo

Las favorables proyecciones de futuro que se otorgan al TRM están íntimamente relacionadas con sus múltiples ventajas frente a otros métodos de refuerzo aplicables en la obra de fábrica [3, 8, 15]. En particular, la comparación resulta interesante con el FRP que es el principal competidor en el mercado:

- *Buena relación resistencia/peso.* Mucho mejor que refuerzos a base de conectar viguetas o pletinas de acero o basados en gunitado (contiene mucha menos fibra que el TRM). No obstante el FRP resulta más competitivo en este aspecto.
- *Adaptabilidad a geometrías complejas.* Únicamente comparable al gunitado y el FRP aplicado en húmedo (poco común).
- *Permeabilidad al vapor de agua de la obra de fábrica.* Esta es una de las grandes ventajas frente al FRP con el que compite en el campo de los materiales compuestos aplicados en el refuerzo de estructuras. Para la durabilidad de la obra de fábrica la permeabilidad del vapor de agua resulta esencial e irrenunciable por parte de un refuerzo.
- *Compatibilidad de deformaciones.* Puesto que la matriz inorgánica puede ser prácticamente del mismo material que las juntas de la obra de fábrica, la compatibilidad física es completa, evitando que se generen esfuerzos por deformaciones relativas debidos a cambios térmicos o por tener rigideces muy distintas. Esta es una gran ventaja frente al FRP ya sea montado en superficie o junta.
- *Aplicación simple por parte de personal de albañilería.* No se requiere formación específica como para el FRP.
- *No utiliza materiales tóxicos ni peligrosos en su aplicación* a diferencia de las resinas químicas requeridas para la adhesión del FRP a la obra de fábrica.
- *Es resistente al fuego y a la acción de rayos ultravioletas.* Esta es una gran ventaja frente al FRP que pierde sus características resistentes a temperaturas relativamente bajas (200°C) y su durabilidad se ve comprometida si se expone al sol.
- *Es reversible y reciclable de forma sencilla,* puesto que se trata de un composite formado por materiales reciclables. La adherencia del TRM con la obra de fábrica es suficientemente buena para la transmisión de esfuerzos pero no tanto como para calificar el refuerzo de irreversible sin dañar la estructura original.

No obstante, el TRM también tiene limitaciones técnicas y desventajas frente a otros sistemas. Entre las más destacables están:

- *Menor rigidez que los refuerzos con FRP o con pletinas o viguetas de acero.*
- *Larga espera para que el refuerzo sea efectivo* (en general 28 días de curado).

- *Falta de experiencia y normativa en relación al TRM.*
- *Falta de distribuidores del material de refuerzo.*
- *Falta de empresas aplicadoras del TRM.*

Así pues, las principales ventajas y desventajas técnicas están ambas relacionadas con la matriz inorgánica, que si bien es simple de aplicar y aporta una gran compatibilidad con la obra de fábrica además de resistencia frente al fuego, por contra requiere un largo período de curado. En referencia al resto de desventajas se cree que pueden ser transitorias y que podrían desaparecer de producirse la implantación definitiva de este método de refuerzo.

6.2.3. Aplicación del TRM en la obra de fábrica, consideraciones y variables de diseño

La aplicación del TRM en la obra de fábrica puede resultar simple para un trabajador de albañilería aunque hay ciertas consideraciones determinantes que deberían tenerse en cuenta antes de emprender su instalación. A continuación se detallan los diferentes pasos de aplicación haciendo hincapié en los condicionantes de la mampostería que alteran en cierta forma el proceso de instalación estándar descrito por los distribuidores de este material de refuerzo.

(a) Preparación de la superficie

Para poder aplicar cualquier mortero de reparación o refuerzo en mampostería, la preparación de la superficie es similar. En esencia se trata de conseguir una superficie rugosa, regular y sobretodo limpia de polvo y grasa.

Para la aplicación del TRM en obra de fábrica se aconseja, en primer lugar, retirar todas las irregularidades que sobresalgan de la obra de fábrica, en especial juntas de mortero excedente y que presenten ángulos agudos que podrían llegar a cortar la malla. Cabe destacar que no se trata de conseguir una superficie plana o lisa (como algunos distribuidores de TRM aconsejan erróneamente) sino que esté exenta de protuberancias que dificulten la aplicación o puedan dañar la malla. Si quedan huecos, estos serán rellenados con el mortero de refuerzo cuando se aplique el TRM.

Una vez regularizada la superficie se procederá a limpiarla. El objetivo de este proceso es eliminar el polvo y posibles grasas. El uso de desengrasantes tipo alcohol está aconsejado para este segundo fin y para retirar el polvo se ha comprobado la efectividad del uso de aire comprimido (en ambiente ventilado) como alternativa al uso de arena proyectada o agua a alta presión, que son los métodos más contrastados y los aconsejados por los fabricantes del sistema de refuerzo. Cabe destacar que la función de proyectar arena es doble ya que limpia la superficie y simultáneamente aporta rugosidad a la obra de fábrica. Para la mayor parte de aplicaciones, esta rugosidad adicional no es necesaria y por lo tanto se considera el método desproporcionado para pequeñas intervenciones si bien se puede considerar para obras de gran extensión.

Para acabar la preparación de la superficie y justo antes de aplicar el refuerzo, la obra de fábrica se debe humedecer hasta la saturación pero la superficie debe estar completamente

seca. Esta humectación resulta esencial para conseguir una buena adherencia del *TRM* con la obra de fábrica.

(b) Preparación del mortero

En primer lugar, se remarca que la elección del mortero debe realizarse de acuerdo con la elección de la malla para asegurar la compatibilidad química y la adherencia entre ambos materiales. No deberían aplicarse combinaciones no estudiadas previamente en laboratorio.

Para la preparación del mortero se aconseja seguir estrictamente las instrucciones del proveedor de mortero ya que, en general, se trata de morteros tecnológicos, con una gran cantidad de componentes químicos o aportación de microfibras. En particular es esencial respetar el tiempo y velocidad de amasado así como la proporción fase polvo/fase líquida. En todos los casos la mezcla deberá realizarse mecánicamente, nunca a mano, para asegurar la homogeneidad del producto final. El uso de las herramientas adecuadas (por ejemplo, se suele aconsejar un mezclador de hélice de sección plana asociado a un taladro) es muy importante para asegurar una buena mezcla.

Sin entrar en el detalle de productos comerciales concretos se debe señalar que en general se procede a mezclar el mortero añadiendo la fase polvo sobre la líquida mientras se agita el conjunto con el mezclador aconsejado. La fase líquida puede ser agua corriente o algún preparado con aditivos químicos que se distribuya conjuntamente con la fase polvo.

Dependiendo del mortero utilizado se dispondrá de más o menos tiempo de trabajabilidad. Aun así, se ha observado que prácticamente todos los morteros comerciales presentan características tixotrópicas, es decir, que el producto recupera en buena medida su trabajabilidad cuando se remueve de nuevo.

(c) Preparación de la malla

La elección de la malla debe realizarse de acuerdo con la elección del mortero tal y como se ha descrito anteriormente. Cabe destacar que el tipo de malla determinará en gran medida el comportamiento estructural del *TRM* así que los criterios de rigidez y resistencia deseadas son básicos para la elección.

En la guías de aplicación no se habla de la preparación previa de la malla. No obstante, para agilizar el proceso de aplicación es conveniente que la malla esté limpia y cortada a las medidas necesarias. Cortar la malla una vez aplicada es una mala praxis relativamente común en las primeras aplicaciones. Para grandes superficies en que deban superponerse varias mallas se suele aconsejar un solape de unos 30 cm. No obstante, este parámetro que debería ser aportado por el distribuidor de la malla en general no está disponible en los catálogos que acompañan el producto y debe ser solicitado.

El corte de la malla debe realizarse con las herramientas adecuadas (tijeras, cizalla, etc.) y siempre intentando no interrumpir las líneas continuas de fibra. Además, la posición de la malla debe ser elegida cuidadosamente de acuerdo con la orientación deseada para las fibras.

(d) Aplicación del *TRM*

El procedimiento de aplicación aconsejado por los fabricantes de *TRM* es prácticamente el mismo en todos los casos. Consiste en aplicar una primera capa de mortero el grosor de la

cual dependerá del tipo de producto utilizado (varía de 3 a 6 mm en general). Nótese que el consumo del producto de esta primera capa solo puede calcularse a partir de la experiencia en el refuerzo de obra de fábrica similar a la que se está interviniendo puesto que la cantidad de huecos, juntas medio llenas, etc. que deberán rellenarse con el mortero varía de caso a caso.

El siguiente paso consiste en situar correctamente la malla sobre la capa de mortero. Debe realizarse con precisión y asegurando la alineación de las líneas de fibra. Así mismo, se desaconseja que la malla exceda las dimensiones de la estructura a reforzar, es decir, que debe ser ligeramente menor que la superficie a reforzar (dejando por ejemplo 1 cm de margen por cada lado).

Con la malla situada en posición, se procede a embeberla en la capa previamente dispuesta de mortero mediante una suave presión con una llana. La dirección de avance del paso de la llana debe ser siempre la misma para evitar que se arrugue la malla. Es muy importante asegurar que la dirección de las fibras no se ve alterada durante el proceso de inserción de la malla en el mortero. Este paso del procedimiento asegura que el mortero penetra por completo en los orificios de la malla asegurando la conexión mecánica entre ambos componentes. El resultado final debe ser que la malla quede parcialmente oculta por el mortero pero que todavía se pueda distinguir su presencia.

A continuación se procede a disponer una segunda capa de mortero, que puede ser la de acabado (de 4 a 5 mm de grosor en general) si solo se desea incorporar una malla o una capa intermedia (de unos 2 a 4 mm de grosor en general) antes de repetir el procedimiento de posicionar una nueva malla y embeberla en esta segunda capa. En general, los proveedores de material para *TRM* no aportan información sobre el número máximo de capas que se pueden aplicar. No obstante, según la experiencia práctica se observa que disponer más de 3 ó 4 capas en una sola aplicación (antes de dejar curar el mortero) resulta complicado de ejecutar. Entre capa y capa de malla siempre se aconseja disponer una capa de mortero. Aún así, se ha probado con éxito la instalación de dos mallas superpuestas al tresbolillo sin mortero intermedio cuando el paso de malla es considerablemente grande (20 mm) y reducirlo a la mitad no impide el paso correcto del mortero a través de las mallas. Este procedimiento no estandarizado puede tenerse en cuenta si se dispone de información experimental que avale su uso.

(e) Acabado final y curado

La capa de acabado de mortero debe ser plana, dejando un grosor constante de *TRM* en toda el área reforzada. El criterio generalmente aceptado para asegurar un recubrimiento adecuado de la malla es que esta no se pueda distinguir a través de la última capa de mortero. Un acabado liso mejora la durabilidad del refuerzo. Por ello se aconseja el uso de llanas de grandes dimensiones que uniformizan la superficie fácilmente.

Respecto al curado, se aconseja seguir en la medida de lo posible las directrices de los distribuidores del material de refuerzo. No obstante, se debe recordar que en general se trata de una matriz inorgánica comparable a un mortero de albañilería, así que su curado seguiría la misma praxis: evitar un secado rápido de la superficie mediante humectación durante el curado o bien cubriendo la zona reforzada si está expuesta al sol a un viento considerable. Las primeras horas de curado son críticas para evitar fisuras de retracción que comprometerían la durabilidad del refuerzo.

(f) Uso de conectores

Los conectores son elementos cuya función es mejorar el anclaje del *TRM* a la obra de fábrica mediante el paso de un elemento resistente desde la cara reforzada hasta el trasdós de la estructura donde se adhiere. La sujeción transmite los esfuerzos que tenderían a desprender el refuerzo de *TRM* al trasdós mejorando así la capacidad de carga del refuerzo.

El uso de conectores no está previsto por todos los sistemas comerciales de *TRM* así que debe considerarse una técnica cuya aplicación es opcional en la mayoría de los casos. De hecho, en la bibliografía, el uso de conectores queda restringido prácticamente a estructuras esqueléticas bi o tridimensionales, es decir, estructuras tipo arco, bóveda o cúpula (por ejemplo [6]). En general se pueden distinguir dos tipos de conectores: las barras de *FRP* con fibras libres en los extremos y los realizados manualmente a partir de la malla de refuerzo. El uso de los primeros está más estudiado que el de los segundos y su producción está industrializada. No obstante, por el hecho de tratarse de *FRP*, su conexión con la obra de fábrica requiere de resinas epoxi en el agujero de paso con los inconvenientes asociados citados anteriormente. En la zona de las fibras libres la conexión puede realizarse con el propio mortero del *TRM* al que se asocia el conector. Por contra, el segundo tipo de conectores es de producción manual puesto que son tramos de la misma malla usada en la capa de *TRM*, que se cortan a la medida necesaria y se enrollan para pasar a través del agujero entre las dos caras de la estructura. La adhesión de estos conectores con la obra de fábrica es en toda su superficie mediante mortero.

A partir de la propia experiencia se considera oportuno indicar que el uso de conectores cada vez tiene menos sentido dadas las excelentes propiedades de los morteros de refuerzo usados en el *TRM* que mejoran día a día su adherencia haciendo estos elementos innecesarios en gran parte de la casuística. Así pues, el uso de conectores quedaría limitado prácticamente a geometrías curvas para las cuales el desprender del *TRM* pueda suponer un modo de fallo viable.

Dicho esto, cabe destacar también los problemas de instalación observados en el caso de utilizar conectores fabricados a partir de la propia malla de refuerzo. Se ha notado que en la zona donde el conector sobresale del plano del muro y se abre, el grosor del *TRM* aumenta considerablemente por el propio radio de giro de la malla. Además, en este punto el mortero tiene muy complicado el penetrar en la malla, por lo que el *TRM* queda parcialmente desprender de la obra de fábrica. Y para acabar, se ha observado que la presencia de puntos de paso de conectores muy juntos puede comprometer seriamente la resistencia de la estructura, generándose planos de fallo.

A pesar de las consideraciones anteriores se recomienda, en todo caso, leer y seguir las instrucciones de los desarrolladores del producto y si cabe la posibilidad, observar como personal experimentado lo aplica para detectar detalles que no se pueden recoger por completo en las guías.

Para terminar este apartado se procederá a analizar cuáles son las variables de diseño del refuerzo que deben considerarse:

- En relación a la malla, se debe tener en cuenta su material componente ya que determinará en gran medida su comportamiento estructural así como su afinidad química con la matriz inorgánica. Además, resulta esencial conocer el paso de malla, es decir, la

distancia entre líneas de trama y de urdimbre. Pasos de malla pequeños indican mayor cantidad de fibra pero menor posibilidad de que el mortero penetre en la malla asegurando su conexión mecánica con la obra de fábrica. Debe tenerse en cuenta en todo momento que la resistencia a tracción y deformación última de la fibra no tiene por qué coincidir con la de la malla ya que esta segunda presenta el material en un tejido muy deformable.

- La resistencia a tracción del mortero de refuerzo, ya que la malla de fibra no trabajará plenamente hasta que se fisure la matriz en la que está embebida por el hecho de tratarse de un refuerzo pasivo. En general, el TRM requiere de grandes deformaciones de la estructura para entrar en carga.
- Posición de la malla o canto útil. Se requiere conocer donde está situada la malla de refuerzo en relación a la estructura de obra de fábrica para conocer el brazo mecánico de la resultante de las cargas de tracción.
- Ancho de la malla aplicada o número de líneas de fibras embebidas en el refuerzo.

6.3. Aplicaciones del TRM en muros de carga de obra de fábrica

6.3.1. Estudio bibliográfico

El TRM se ha desarrollado de forma activa a partir de finales de los años 1990 cuando su aplicación se realizaba con el objetivo de reforzar estructuras de hormigón [10, 13, 17]. Los buenos resultados obtenidos en el hormigón junto con las propiedades de afinidad físico-químicas con la obra de fábrica plantearon rápidamente la utilización del TRM para el refuerzo de la obra de fábrica. Los primeros años del siglo XXI están caracterizados por el estudio experimental y el desarrollo específico del sistema de refuerzo TRM para su aplicación en estructuras de mampostería. Varios artículos científicos tratan el tema y obviamente comparan el TRM con otros sistemas de refuerzo basado en materiales compuestos como el uso de láminas de plástico [16], o una capa de microhormigón reforzado con fibras [3, 11]. No obstante, el principal competidor hoy en día es el FRP. En varios artículos se compara el TRM con el FRP [3, 8].

Analizando la bibliografía existente se puede notar que el caso más estudiado del refuerzo de obra de fábrica con TRM es el de cortante, ya sea estático o dinámico. Este hecho no es casual puesto que el TRM se ha utilizado mayormente para reforzar estructuras dañadas por sismo. Por ejemplo, en [2] se presenta un estudio experimental sobre la influencia del TRM en la respuesta estructural de paredes de carga de obra de fábrica previamente dañadas cuando se someten acciones dinámicas de cortante. En [14] se analiza la efectividad del TRM en el refuerzo de muros de obra de fábrica sometidos a acciones dinámicas en el plano (axial y cortante) y fuera del plano. Todos los estudios remarcan que el TRM es especialmente efectivo al disipar energía en situaciones dinámicas de cortante por lo que su uso en refuerzos sísmicos está justificado.

También existen estudios del refuerzo de muros con *TRM* frente a acciones fuera del plano, sobretodo simulando casos de viento o sismo. Así, tenemos el caso de [9] que se centra en la evaluación de la efectividad del *TRM* aplicado en muros de obra de fábrica sometidos a acciones cíclicas fuera del plano. De esta investigación resulta que las cargas cíclicas no reducen significativamente la rigidez ni la resistencia de la obra de fábrica reforzada frente a esfuerzos de flexión fuera del plano. Además, se remarca la gran capacidad de absorción de energía que tiene este sistema de refuerzo.

En cambio, no existían muchas investigaciones anteriores a la presentada a continuación sobre el caso de refuerzo de muros de obra de fábrica sometidos a flexión fuera del plano por efectos de segundo orden con *TRM*. Quizás una de las investigaciones previas más completas en esta rama concreta de estudio es el trabajo que se pueden encontrar en [5] donde se analiza la influencia del *TRM* y el uso de conectores en la capacidad de carga de muros de varias hojas. En esta investigación se detecta el predominio de los conectores como sistema de refuerzo y la influencia del *TRM* queda en un segundo plano.

6.3.2. Estudio de muros reforzados con *TRM* en el CER-LITEM

A partir del estudio bibliográfico, en el grupo de investigación LITEM (BarcelonaTECH) se detectó la necesidad de completar el campo de conocimiento tratando el tema del refuerzo de muros de carga sometidos a cargas axiales excéntricas con *TRM*. En este caso de sollicitación los muros sin refuerzo presentan desplazamientos fuera del plano debido a efectos de segundo orden (excentricidad) que en general llevan al colapso por formación de un mecanismo. El principal objetivo del estudio era valorar cómo cambiaba el comportamiento estructural de los muros al aplicar el refuerzo con *TRM* y, en particular, detectar posibles mejoras en la capacidad de carga de las paredes.

La investigación se centró en el estudio, tanto experimental como numérico, de una serie de 9 muros a escala real reforzados con varios tipos de *TRM*. A partir de los resultados experimentales se ajustó un modelo numérico usado posteriormente para hacer prospecciones de estudio de diversos patrones de refuerzo posibles usando el *TRM*. Los pasos seguidos en la investigación más allá de la búsqueda bibliográfica fueron:

(a) Construcción de los muros

Los materiales usados para la construcción de los muros de obra de fábrica a estudiar fueron ladrillos sólidos cerámicos y mortero común de albañilería M7,5. La ejecución de los muros fue realizada por una empresa constructora experimentada. Las dimensiones teóricas de los muros eran de 165 cm de altura, 90 cm de ancho y 13 cm (un solo ladrillo) de grosor. En total se construyeron once paredes, dos de las cuales fueron ensayadas sin refuerzo como base de comparación.

(b) Refuerzo de las paredes

Las nueve paredes restantes se reforzaron con los siguientes materiales:

- Mortero bicomponente de base cemento *Portland*, con aditivos químicos, fibras de vidrio y que se mezclaba con látex e indicado para el refuerzo de obra de fábrica actual. Este mortero fue desarrollado para el uso conjunto con mallas de fibra de vidrio.

- Mortero bicomponente de base cal, con aditivos químicos, fibras de vidrio y que se mezclaba con látex. Este estaba especialmente diseñado para el refuerzo de estructuras históricas con las juntas de cal. Como el anterior, este mortero fue desarrollado para el uso conjunto con mallas de fibra de vidrio.
- Mortero monocomponente de base puzzolánica con aditivos para favorecer sus propiedades tixotrópicas desarrollado específicamente para el refuerzo de estructuras de mampostería usando mallas de fibra de carbono. Este se mezclaba con agua corriente.
- Malla bidireccional de fibra de vidrio recubierta, dotada de un gran paso entre líneas de fibra (25 mm).
- Malla bidireccional de fibra de carbono con un paso entre líneas de fibra de 10 mm.

Que se combinaron de la siguiente forma:

- 2 muros reforzados con una malla de fibra de vidrio embebida en una capa de mortero bicomponente de base *Portland*. No se usaron conectores en este caso.
- 2 muros reforzados con una malla de fibra de vidrio embebida en una capa de mortero bicomponente de base cal. Sin conectores.
- 1 muro reforzado con dos mallas de fibra de vidrio al tresbolillo embebidas conjuntamente en una capa de mortero bicomponente de base *Portland* y sin conectores.
- 1 muro reforzado con dos mallas de fibra de vidrio al tresbolillo embebidas conjuntamente en una capa de mortero bicomponente de base cal y sin conectores.
- 1 muro reforzado con una malla de fibra de carbono embebida en una capa de mortero de base puzzolánica y ningún conector.
- 1 muro reforzado con una malla de fibra de carbono embebida en una capa de mortero de base puzzolánica y 6 conectores.
- 1 muro reforzado con una malla de fibra de carbono embebida en una capa de mortero de base puzzolánica y 9 conectores.

La aplicación del refuerzo siguió el procedimiento anteriormente presentado. Se debe destacar que todas las combinaciones de mortero y malla estaban aconsejadas por los distribuidores del material por lo que se trata de soluciones de *TRM* comerciales.

(c) Prueba de carga

La prueba de carga fue diseñada de tal modo que permitiera obtener el máximo de información útil para la validación de un modelo numérico simplificado. Así pues, la eliminación de las indeterminaciones correspondientes a las condiciones de contorno fue una prioridad. Con este fin, todos los muros fueron ensayados en una configuración estructural en la cual los muros estaban articulados en los dos extremos, superior e inferior, mediante rótulas durante la prueba de carga (véase Figura 6.1). Todos los muros se ensayaron con la misma excentricidad en la parte inferior y superior del muro: 30 mm. Por lo tanto, las variables de estudio fueron el número de mallas embebidas en una capa de mortero, el tipo de mortero, el uso de conectores y la comparación entre tres sistemas comerciales de *TRM*.

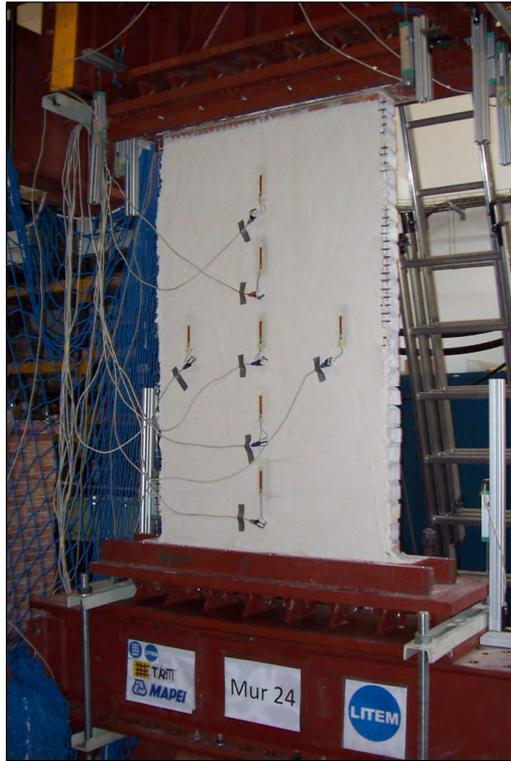


Figura 6.1: Montaje e instrumentación para el ensayo de los muros reforzados con *TRM*.

Ocho sensores potenciométricos se usaron para medir el descenso y giro de la rótula superior y el giro de la rótula inferior. Cuatro sensores de desplazamiento láser se usaron para la medida de los movimientos del muro y la rótula superior fuera del plano. En teoría la rótula superior tenía este movimiento impedido. Así pues, una de las mediciones era para cerciorarse del correcto funcionamiento del sistema de ensayo. Un sensor de presión permitió conocer, de manera indirecta, la fuerza aplicada sobre el muro en todo instante. Galgas extensométricas de hormigón se adhirieron a la superficie del *TRM* de algunos muros para medir las deformaciones en la cara exterior de la capa de refuerzo. Una videocámara de alta velocidad se instaló en el lateral del sistema de ensayo para capturar el modo de rotura.

(d) **Resultados de la prueba de carga**

Una vez finalizados los ensayos y postprocesados los datos correspondientes se realizó un análisis crítico de los resultados experimentales obtenidos.

En primer lugar, desde el punto de vista cualitativo debe remarcarse que se observaron dos modos de fallo. Los dos muros no reforzados y dos de los reforzados con una sola malla de fibra de vidrio (uno con mortero de base *Portland* y el otro con mortero de base cal) fallaron al formarse un mecanismo (véase Figura 6.2). A las dos rótulas del sistema de ensayo se añadió una más desarrollada al abrirse una junta horizontal de la obra de fábrica (caso de los muros sin reforzar) o romperse a tracción el *TRM* (caso de los dos reforzados). En cambio, los siete

muros reforzados restantes presentaron un modo de fallo caracterizado por el agotamiento de la obra de fábrica cerca de uno de los extremos debido a la concentración de los esfuerzos derivados de la compresión y el cortante fuera del plano. Para todos los casos de muros reforzados ensayados el TRM fisuró mostrándose grietas horizontales cada 20 cm aproximadamente antes de alcanzar cualquier de los dos modos de colapso descritos. Así mismo, no se observó en ningún caso que fallara la adherencia entre la obra de fábrica y el TRM por lo que ninguna diferencia aparente se detectó con el uso de conectores. No obstante, analizando los restos de los muros colapsados sí que se observó que el plano de rotura de la obra de fábrica incluía los agujeros por donde pasaban los conectores en los dos muros donde estos fueron utilizados.

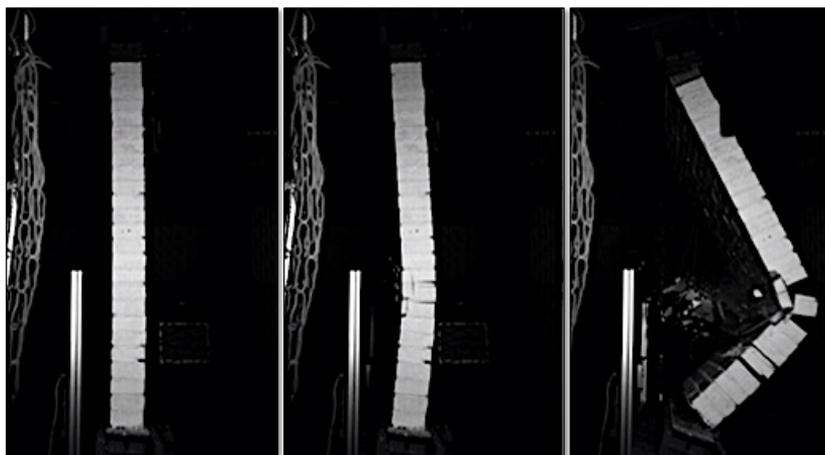


Figura 6.2: Modo de fallo por flexocompresión de la obra de fábrica simultáneo a la apertura de las juntas de mortero a media altura por flexotración.

Para comparar los datos obtenidos se definieron tres variables adimensionales: la capacidad portante del muro ϕ , definida como la carga aplicada durante el ensayo N dividida entre la resistencia a compresión de la obra de fábrica en el caso de distribución uniforme de tensiones $N_u = b \cdot bt \cdot f_c$; el desplazamiento lateral (fuera del plano) del muro a media altura h dividido por el grosor del muro t ; y el desplazamiento vertical de la rótula superior v dividido entre la altura efectiva del muro H_{eff} , que se define como la distancia entre los ejes de la rótulas. Además, con fines de comparación, se tuvieron en cuenta la excentricidad real a media altura del muro ya que las imperfecciones en la construcción de los especímenes hacen que los muros no sean nunca perfectamente verticales y que por lo tanto la excentricidad varíe a lo largo de la altura del muro aunque la excentricidad en los extremos de los muros sea siempre la misma (30 mm).

La capacidad portante de los muros reforzados con TRM se comparó con el promedio de la capacidad portante de los dos muros sin reforzar para evaluar el incremento de resistencia aportado, resultando un aumento promedio superior al 100%. Es decir, que en general, al aplicar TRM los muros doblaron su capacidad de carga. Antes de analizar los gráficos presentados se debe aclarar que los puntos posteriores a haber alcanzado la carga máxima forman

6 | Comportamiento estructural de muros de obra de fábrica reforzados con TRM

parte del proceso de colapso, que, por lo tanto, deben interpretarse con prudencia puesto que son datos obtenidos en un transitorio con sensores no destinados a ello. Además, la dispersión en las propiedades de los materiales y las irregularidades geométricas aconsejan un trato prudencial de los datos presentados a continuación.

Comparando los gráficos (véanse Figuras 6.3, 6.4 y 6.5) se puede observar que la influencia de la excentricidad sobre la capacidad de carga es mucho mayor en los muros sin reforzar que en los muros reforzados con TRM. Los pocos casos observables en que se alcanzan mayores resistencias con excentricidades ligeramente mayores que otros muros comparables con el mismo refuerzo, se pueden atribuir a la dispersión en las propiedades de la obra de fábrica y/o las irregulares geométricas.

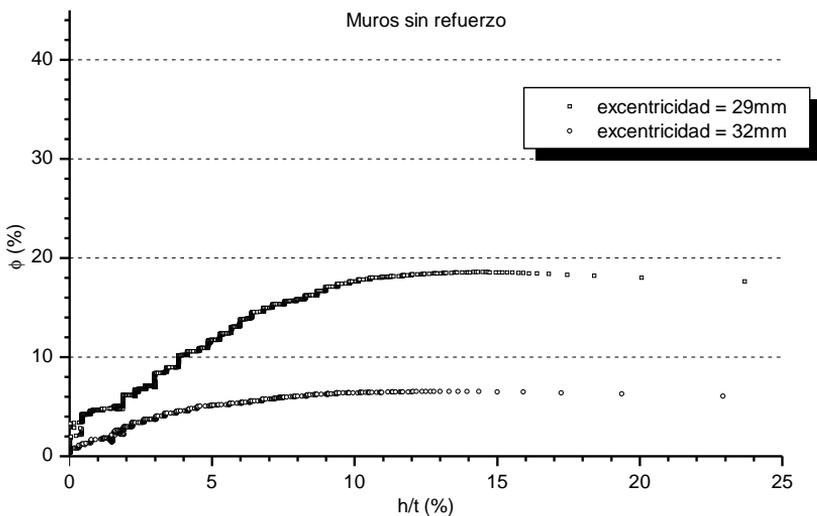


Figura 6.3: Carga ϕ vs. desplazamiento lateral a media altura (h/t) de los dos muros no reforzados.

En las Figuras 6.4 y 6.5 se puede observar que el hecho de disponer dos mallas de fibra de vidrio en comparación con el uso de una sola malla, supone un claro aumento de la capacidad portante del muro reforzado. Así mismo, el uso de dos mallas se traduce en un aumento de la rigidez lateral del muro. Este aumento de rigidez es más evidente para desplazamientos laterales a media altura mayores (fuera del plano) y para los casos reforzados con mortero de base cal (el más flexible), que para los casos reforzados con el mortero de base *Portland*. Observando las Figuras 6.6 y 6.7 se puede ver que el hecho de disponer dos mallas de fibra de vidrio rigidiza también la respuesta de desplazamiento vertical si se aplica con mortero de base cal pero no hay cambio si se hace con mortero de base *Portland* que es considerablemente más rígido. Ninguna de estas comparaciones se realizó para el tercer tipo de mortero en estudio.

Observando la Figura 6.8 se puede ver como el hecho de disponer conectores supone un claro aumento de la rigidez lateral. Igualmente se puede ver en la Figura 6.9 que los conectores aumentan la rigidez vertical aunque en este caso no hay cambio entre el uso de 6

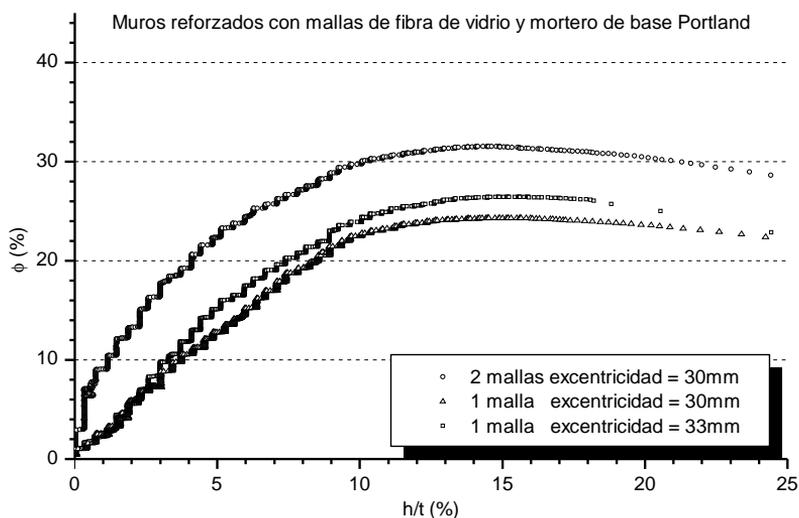


Figura 6.4: Carga ϕ vs. desplazamiento lateral a media altura (h/t) de los tres muros reforzados con malla de fibra de vidrio y mortero de base Portland. Tres muros, dos con una malla (1-grid) y uno con dos mallas (2-grids).

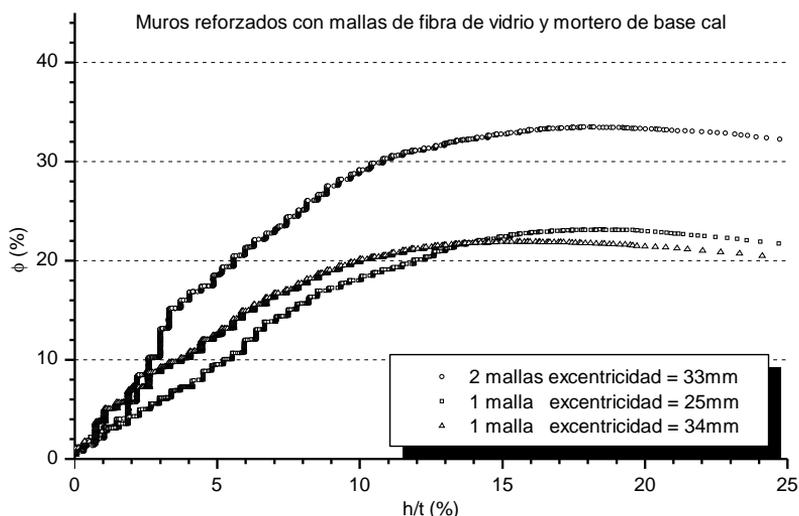


Figura 6.5: Carga ϕ vs. desplazamiento lateral a media altura (h/t) de los tres muros reforzados con malla de fibra de vidrio y mortero de base cal. Tres muros, dos con una malla (1-grid) y uno con dos mallas (2-grids).

o 9 conectores. Esto podría ser debido al uso de grosores mayores de mortero estrictamente necesarios para realizar la conexión más que al trabajo de los propios conectores. También resulta interesante remarcar que la capacidad de carga no se vio afectada de forma clara por el uso de conectores. Esto es consistente con el hecho de que ningún modo de fallo observado involucrara un despegue del TRM. Así pues, la adherencia del TRM con la obra de fábrica es suficiente en todos los casos y el uso de conectores no parece ser necesario.

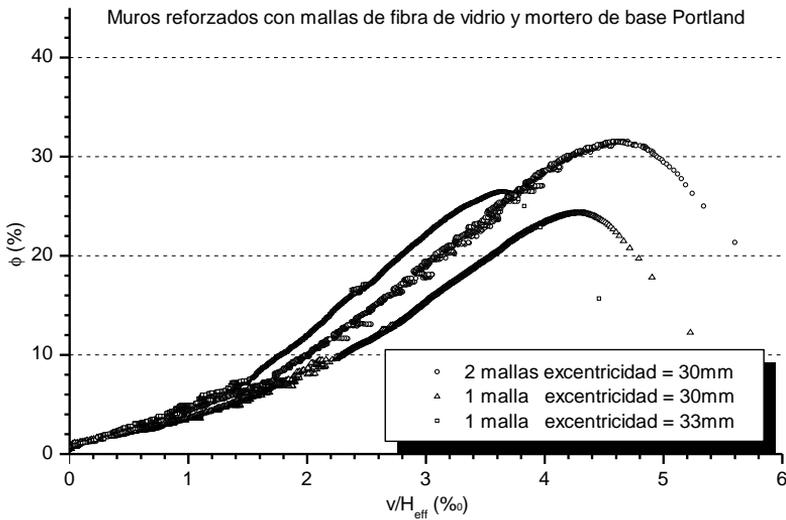


Figura 6.6: Carga ϕ vs. desplazamiento vertical (v/H_{eff}) de los tres muros reforzados con malla de fibra de vidrio y mortero de base Portland. Tres muros, dos con una malla (1-grid) y uno con dos mallas (2-grids).

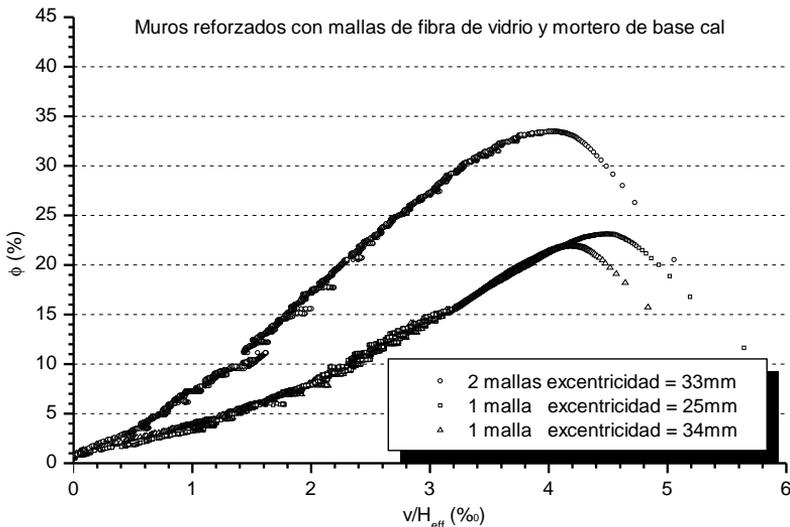


Figura 6.7: Carga ϕ vs. desplazamiento vertical (v/H_{eff}) de los tres muros reforzados con malla de fibra de vidrio y mortero de base cal. Tres muros, dos con una malla (1-grid) y uno con dos mallas (2-grids).

Para acabar con el análisis de los resultados experimentales se puede destacar que el uso de galgas extensométricas instaladas en la superficie del TRM permitió detectar que las deformaciones de los muros cerca del colapso, dependen en gran medida del sistema de refuerzo utilizado (tipo de mortero y malla). Además, se identificó una dependencia entre las deformaciones medidas para cargas pequeñas (alrededor de $\phi=15\%$) y el modo de fallo observado. Así, los muros que mostraron deformaciones menores en el punto central del TRM acaba-

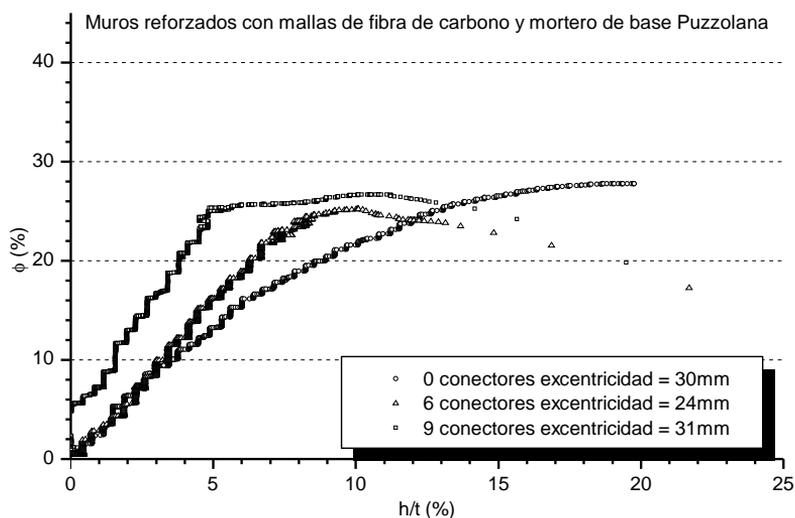


Figura 6.8: Carga ϕ vs. desplazamiento lateral a media altura (h/t) de los tres muros reforzados con malla de fibra de carbono y mortero de base puzzolana. Tres muros, uno sin conectores, otro con 6 conectores y uno con 9 conectores.

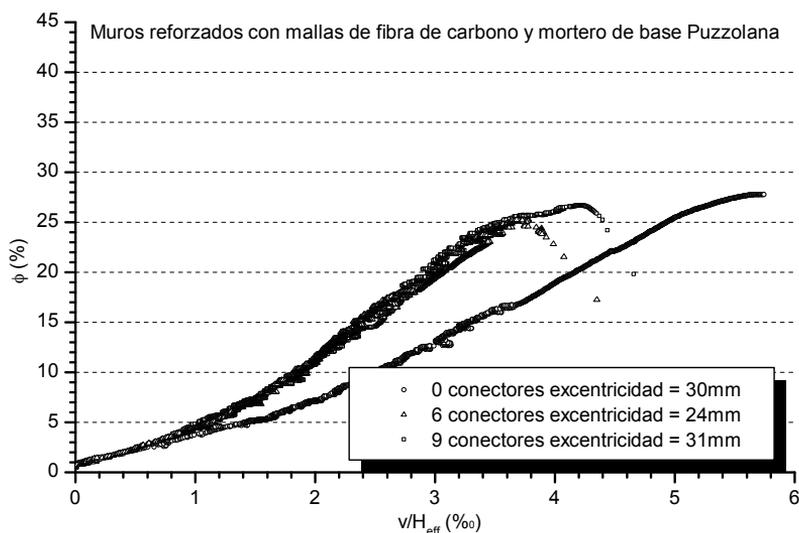


Figura 6.9: Carga ϕ vs. desplazamiento vertical (v/H_{eff}) de los tres muros reforzados con malla de fibra de carbono y mortero de base puzzolana. Tres muros, uno sin conectores, otro con 6 conectores y uno con 9 conectores.

ron fallando por compresión-cortante de la obra de fábrica cerca de los extremos del muro, mientras que los muros con deformaciones mayores acabaron fallando por tracción del TRM.

(e) Desarrollo y validación del modelo numérico

Para la modelización del caso de estudio se implementó un modelo numérico caracterizado por usar un software de simulación generalista (ANSYS® v.12.1.) no específico para la obra

de fábrica. El modelo se inscribe en el grupo de los micromodelos simplificados para la obra de fábrica y parte de la hipótesis de que los muros estudiados pueden simplificarse a un caso bidimensional de deformación plana.

Entrando en detalle en la descripción de las simulaciones de los ensayos experimentales se debe comenzar por la geometría utilizada. Al tratarse de un micromodelo simplificado, cada hilada de obra de fábrica se simula como un material homogéneo. Así pues, los muros se representan geoméricamente como una columna de "rectángulos" apilados en que cada "rectángulo" modela una hilada y tendrá las propiedades del material compuesto (ladrillo y mortero) correspondiente. La presencia de discontinuidades o juntas entre los "rectángulos" permite definir contactos entre ellos para representar el comportamiento a tracción de la obra de fábrica. Del mismo modo, el TRM se representa con un rectángulo estrecho correspondiente a cada hilada de la obra de fábrica y en contacto con ella. Esta división del TRM busca el mismo fin que el separar las hiladas del muro, es decir, facilitar unos puntos de contacto donde se definirá la posibilidad de fallo a tracción del material correspondiente. De hecho, en la observación de los ensayos experimentales se ha detectado que, de producirse, el fallo a tracción siempre se localiza en una junta real de la obra de fábrica, incluso si el refuerzo con TRM está aplicado.

Aún en referencia a la geometría cabe destacar que las rótulas se representan de forma muy simplificada ya que no forman parte del dominio de estudio y su inclusión responde únicamente a la necesidad de representar fielmente las condiciones de contorno. Por este motivo se utilizan cuerpos triangulares para una modelización eficiente de las rótulas que permita situar el centro de giro de forma precisa (vértice libre) en relación al muro (véase Figura 6.10).

Para acabar con la descripción de la geometría se debe destacar que con la finalidad de representar con la máxima fidelidad los modos de fallo observados en la experimentación física, se opta por incluir una línea inclinada en cada extremo de la obra de fábrica que divide los "rectángulos" de mampostería con el objetivo de poder definir un contacto "ficticio" de la obra de fábrica que permita el fallo por compresión localizada y cortante que se ha observado en el laboratorio.

Pasando a la descripción de los materiales, el comportamiento de la obra de fábrica y del TRM a compresión se supone elástico lineal hasta la resistencia máxima a compresión donde se impone plastificación perfecta. Así pues, el módulo elástico (E) y la resistencia a compresión (f_c) son los parámetros necesarios para la representación tanto de la obra de fábrica como del TRM a compresión. Para representar el comportamiento a tracción, las juntas entre objetos de obra de fábrica y entre objetos de TRM requieren de la resistencia a tracción (f_t) y la energía de fractura del primer modo para ser caracterizadas. El primer parámetro se determinó experimentalmente pero la energía de fractura (G_f^I) se calculó a partir de la resistencia a tracción siguiendo una relación obtenida a partir de datos bibliográficos: $(N \cdot m)G_f^I = 36.65 \cdot f_t$ (MPa). Las juntas inclinadas en la obra de fábrica cerca de los extremos del muro se caracterizaron por la resistencia a tracción y a cortante (f_s) y sus respectivas energías de fractura (G_f^I y G_f^{II} respectivamente). Para acabar, los contactos entre la obra de fábrica y el TRM se modelaron con adherencia perfecta puesto que en la experimentación no se observó ningún proceso de separación (*debonding*) ni deslizamiento.

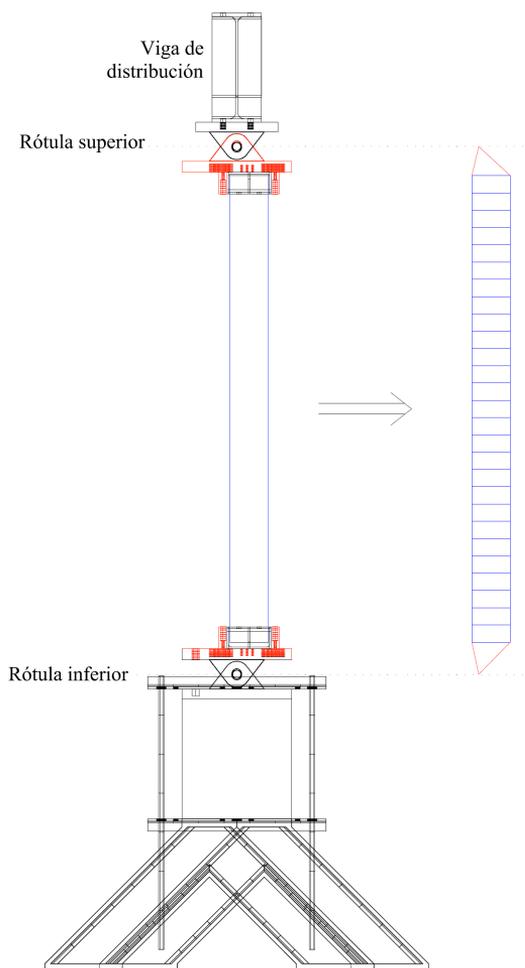


Figura 6.10: Simplificación de la geometría de ensayo para su modelización.

Todos los contactos, excepto el *TRM*-obra de fábrica, utilizan el *Cohesive Zone Model (CZM)* desarrollado por [1]. Este modelo permite a los contactos abrirse de forma elástica hasta alcanzar la resistencia a tracción. En ese momento se produce la separación entre los cuerpos y la tensión baja hasta cero siguiendo una ley lineal con la apertura del contacto (véase Figura 6.11).

La malla utilizada es homogénea y regular, formada por elementos cuadriláteros de 8 nodos y 5 mm de medida promedio en la obra de fábrica y de 3mm en el *TRM* para los objetos planos. En las juntas se usan elementos de contacto (segmentos) específicamente desarrollados para su uso con el *CZM*.

Las condiciones de contorno de la estructura son la fijación del vértice inferior del triángulo que representa la rótula inferior y el impedir el movimiento horizontal del vértice superior del triángulo que representa la rótula superior. La carga, en el modelo, se aplica de forma

6 | Comportamiento estructural de muros de obra de fábrica reforzados con TRM

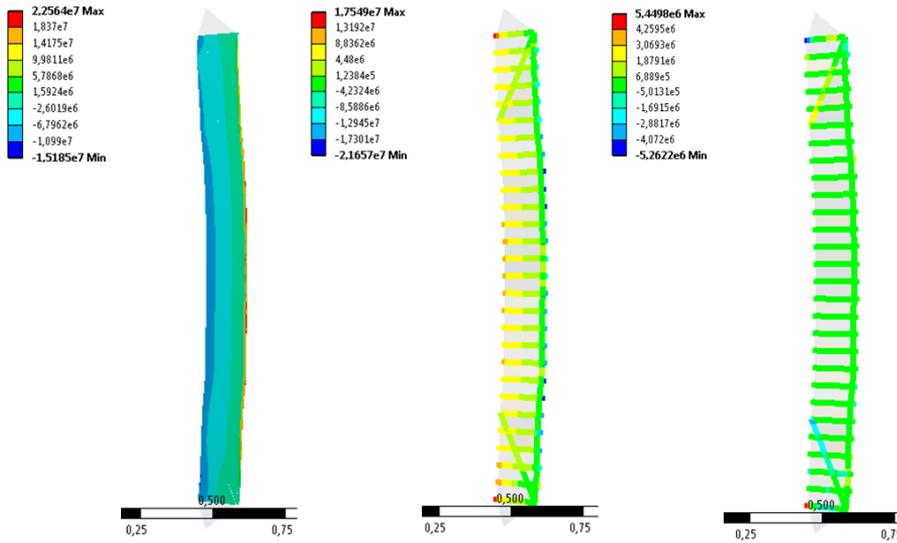


Figura 6.11: Distribución de tensiones verticales (izquierda), distribución de presión en las juntas (centro) y distribución de tensiones tangenciales en los contactos (derecha).

indirecta a través de imponer el movimiento descendiente del vértice superior. El valor de la fuerza aplicada se corresponde con la reacción en este punto. El análisis, que contempla grandes desplazamientos y la imposición del movimiento paso a paso para incluir los efectos de segundo orden, se da por completado cuando se pierde la convergencia en la solución, cosa que sucede al perderse el contacto entre dos o más objetos del medio analizado, es decir, que la estructura ha colapsado y se encuentra en proceso de caída.

La aplicación del modelo numérico descrito a los casos estudiados experimentalmente presentó los siguientes resultados:

- Se obtuvo una predicción aceptable del modo de fallo. Los resultados del modelo indicaron un fallo mixto por compresión y cortante en la obra de fábrica cercana a los extremos del muro simultáneamente a un fallo por tracción del TRM. No obstante, en la experimentación siempre uno de estos modos se impone al otro y es el dominante y, por lo tanto, el único observable. Así pues, el modelo predice correctamente los posibles modos de fallo pero para los casos analizados no es capaz de distinguir cuál sucederá primero.
- En general el modelo sobrestima la carga máxima de los muros analizados con TRM aunque la dispersión en los datos de entrada del modelo permiten un rango de soluciones (véase Figura 6.12) que queda muy cerca de la carga de colapso experimentalmente observada en todos los casos.
- El modelo únicamente subestima dos casos, ambos correspondientes al refuerzo con mallas de fibra de carbono.
- El error relativo del modelo numérico en la predicción de la capacidad de carga de los muros reforzados con TRM es del 19,5 %. Este valor está en el rango de otros estudios

experimentales e indica la buena precisión del modelo si tenemos en cuenta que la dispersión en los variables de entrada puede superar el 40 %.

- Los resultados de los muros reforzados con TRM son más homogéneos que análisis similares de muros de obra de fábrica sin refuerzo, por lo que la introducción del refuerzo en la simulación favorece una tendencia de estabilización del comportamiento de los muros. Es decir, se reduce la influencia de otras variables como la excentricidad o la esbeltez en la capacidad de carga. No obstante, se observa que la influencia de la resistencia a compresión de la obra de fábrica y su módulo de deformación elástica continua siendo muy importante (véase la amplitud del rango de soluciones posibles a partir de la variación de los datos de entrada en la Figura 6.12.).
- Se observa que el aumento del grosor de la capa de mortero de refuerzo (grosor del TRM) implica indirectamente que este material asume más carga en las simulaciones y que, por lo tanto, el fallo por tracción del TRM es más probable. Por lo tanto, de acuerdo con las simulaciones, un grosor excesivo del TRM puede estar relacionado con el fallo a tracción de este sistema de refuerzo.

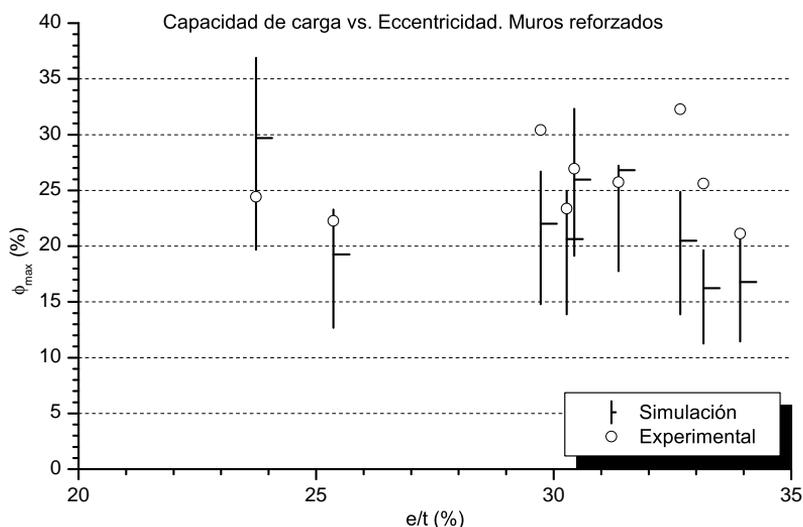


Figura 6.12: Comparación de los resultados experimentales y numéricos para los muros reforzados con TRM.

A partir de los resultados obtenidos se dio el modelo por validado aunque algunas posibles mejoras fueron detectadas. Estas se deberían centrar en la mejor modelización del comportamiento de la obra de fábrica a compresión (substituir el modelo lineal-perfectamente plástico por uno más realista de entre los muchos disponibles en la bibliografía) y el representar de forma más precisa y general la posibilidad del fallo combinado por compresión-cortante cerca de los extremos de los muros.

(f) **Aplicación del modelo numérico: extensión de la información experimental**

Aplicando el modelo previamente validado sobre un abanico de posibilidades de refuerzo se puede estudiar la influencia del TRM para diferentes esbelteces de los muros de obra de

fábrica sometidos a compresión excéntrica, la influencia de disponer dos o cuatro mallas en el refuerzo de una cara de los muros o incluso el efecto de disponer refuerzo con *TRM* en ambas caras del muro. La realización de este estudio de forma preliminar ha permitido comprender mejor las simulaciones de muros reales realizadas y extender la información experimental de que se disponía detectando particularidades en el comportamiento del refuerzo con *TRM* para el caso de carga considerado y diferentes variantes de refuerzo.

En primer lugar se estudió el efecto de considerar, o no, los contactos inclinados en los extremos de muros sin reforzar teóricos, que no deberían fallar en ningún caso en esta zona (el fallo esperado de este tipo de muros sería por formación de un mecanismo al abrirse una junta horizontal cerca de media altura). Los resultados de las simulaciones indicaron que la presencia de estos contactos no influía en el comportamiento de los muros.

A continuación se estudió la influencia de disponer 1, 2 o 4 mallas de refuerzo en la cara de tracciones de dos muros teóricos de diferente esbeltez (14 y 21). Se debe tener en cuenta que el grosor de mortero considerado para instalar una y dos mallas es el mismo dado que se ha considerado como referencia el caso de la fibra de vidrio que, por el gran espacio entre líneas de fibra, permitía el solape de dos mallas al tresbolillo como se demostró experimentalmente. El caso con 4 mallas supone el uso de un grosor de mortero doble. Los resultados se presentan en la Tabla 6.1. Se puede observar como la diferencia entre el uso de una y dos mallas es apreciable pero no muy significativo porque el grosor de mortero no cambia. Por contra la diferencia al disponer 4 mallas es evidente ya que el grosor de mortero se duplica. Este resultado apunta que la resistencia del mortero del *TRM* a tracción resulta determinante. Comparando los resultados para las dos esbelteces se concluye que el refuerzo resulta más eficiente para los muros con mayor esbeltez para los cuales el efecto de flexión de segundo orden es mayor.

Si se tiene en cuenta la posibilidad de disponer una capa de *TRM* en cada cara del muro (véase Tabla 6.1), se observa que su efectividad es mayor que el disponer las dos mallas en el mismo lado. Este resultado del modelo numérico puede explicarse en primer lugar por el aumento del canto útil al disponer dos capas de mortero y en segundo lugar por la rigidez a compresión que aporta el mortero que se supone más rígido que el mortero de albañilería dispuesto en las juntas de la obra de fábrica. Como en el caso anterior el efecto del refuerzo es más evidente. No obstante, la falta de experimentación en este caso desaconseja el uso directo de estos últimos resultados sin ser previamente contrastados en ensayos a escala real.

6.4. Conclusiones de aplicabilidad práctica

La investigación experimental y numérica realizada en el CER-LITEM sobre muros de obra de fábrica reforzados con *TRM* y solicitados excéntricamente a compresión aportó datos suficientes para concluir que este sistema de refuerzo es efectivo para aumentar la capacidad de carga de paredes de obra de fábrica solicitadas a compresión excéntrica. La efectividad del sistema de refuerzo resulta más evidente para los casos con mayor excentricidad de la carga o mayor esbeltez del muro, es decir, para aquellos casos más críticos y para los cuales el refuerzo es más necesario.

Esbeltez	TRM en la capa de tracción	TRM en la capa de compresión	Aumento de la capacidad de carga (%)
14	1 malla	No	92
	2 mallas	No	100
	4 mallas	No	130
	1 malla	1 malla	439
21	1 malla	No	133
	2 mallas	No	142
	4 mallas	No	200
	1 malla	1 malla	745

Tabla 6.1: Resultados de las simulaciones teóricas.

Los ensayos utilizando diferentes tipos de TRM han permitido observar la influencia del tipo de mortero, del número de mallas colocadas así como del uso o no de conectores. Las conclusiones prácticas para los ingenieros y arquitectos encargados del proyecto de actuaciones de refuerzo con TRM estarían orientadas a remarcar que aportan resistencia tanto el mortero como la malla que está embebida en él. Así pues, considerando únicamente la aportación resistente de la malla a tracción se está subestimando en gran medida la capacidad del sistema. Este hecho quedaría confirmado al analizar el caso teórico (no contrastado experimentalmente) de duplicar la malla manteniendo el grosor de mortero en que resultaría únicamente un aumento ligero de la capacidad de carga de acuerdo con las simulaciones llevadas a cabo.

Otro concepto a tener en cuenta en el diseño de refuerzos es que deben de optimizarse las soluciones. Así pues, se deberían plantear sistemas de refuerzo que resistieran un poco más que el material del sustrato, pero no mucho más ya que el fallo vendría dado mucho antes de lograr aprovechar el material instalado. En este sentido, los muros ensayados que estaban reforzados con una sola malla de fibra de vidrio son un buen ejemplo de un diseño próximo al óptimo ya que en dos casos comparables se presentaron dos modos de fallo diferentes, uno asociado al refuerzo y uno asociado al material original del muro.

Respecto al uso de conectores para asegurar la adhesión del TRM a la obra de fábrica, se puede concluir que su uso no ha supuesto ninguna mejora apreciable en la respuesta estructural de los muros ensayados si bien sí que ha resultado especialmente complicada su aplicación. Así pues, y teniendo en cuenta las excelentes propiedades de los morteros específicamente diseñados para ser usados como parte de un refuerzo de TRM, se estima que la adherencia del mortero es suficiente para no requerir de conectores adicionales en el caso de muros planos de obra de fábrica sometidos a cargas verticales de compresión excéntricas.

Finalmente, y en referencia a las simulaciones numéricas, se puede concluir que la implementación de un micromodelo simplificado que resulte útil para el diseño a un coste asumible, es posible utilizando paquetes de cálculo comerciales tal y como ha quedado demostrado.

Para terminar, indicar la impresión personal del equipo de trabajo de que habiendo aplicado diferentes tipos de refuerzo en obra de fábrica, el TRM es el que ha presentado un trabajo más amigable y sencillo obteniendo a su vez resultados muy competitivos.

6.5. Líneas futuras de desarrollo

Con la aplicación del *TRM* como sistema de refuerzo de la obra de fábrica se puede dotar a este histórico material de resistencia a tracción de una forma simple y eficiente. Por este motivo, no debería descartarse una expansión del uso del *TRM* para la actualización o cambio de uso de estructuras existentes. Así mismo, también se podría plantear el uso de la obra de fábrica reforzada con *TRM* como nuevo material constructivo orientado a elementos estructurales. Para alcanzar estas metas se plantean varias líneas futuras de desarrollo que se detallan a continuación.

En primer lugar, se requiere de más estudio teórico del *TRM* y una unificación de la información técnica aportada por los fabricantes. En especial, se requiere poder considerar el *TRM* como un material compuesto. Para ello es imprescindible clarificar que los datos resistentes de la fibra no se corresponden con los de la malla tejida, ni los de esta con los del *TRM* resultante. Por lo tanto, un estudio mucho más exhaustivo del material compuesto *TRM* es necesario antes de proceder con estudios más profundos sobre su aplicación.

En paralelo se requiere extender las bases de datos experimentales del uso del *TRM* en la obra de fábrica para ampliar el rango de morteros y mallas utilizables con garantías. Esto debería realizarse conjuntamente con el desarrollo de nuevos morteros o el uso de nuevas mallas que pudieran reducir el coste del sistema de refuerzo o del proceso de aplicación. Una posible tendencia en este sentido es la proyección del mortero sobre una malla previamente unida a la obra de fábrica dejando un espacio entre ella y la mampostería para que el mortero proyectado pueda penetrar. Para ello se requeriría del desarrollo de nuevos morteros.

Para la aplicación en la obra de fábrica, el uso de fibras muy rígidas como la de carbono presenta algunos problemas de compatibilidad de deformaciones y de rigidización extrema del sistema reforzado en comparación con el sistema original. Por este motivo se plantea el uso de fibras vegetales como una alternativa real. De hecho esta línea de desarrollo recuperaría el uso clásico de fibras vegetales para el refuerzo de los primeros adobes. Obviamente, el uso de nuevas fibras implicaría desarrollar morteros compatibles a la par. Tal y como se puede plantear la recuperación de las fibras vegetales de soluciones anteriores, también se puede optar por el camino complementario de desarrollar nuevos textiles que incluyan alta tecnología no estructural, capaces de la transmisión de información o energía a largo plazo, o dotados de sensores para el monitoreo estructural en tiempo real a corto-medio plazo.

En todo caso, cualquier posibilidad de desarrollo del *TRM* en obra de fábrica pasa obligatoriamente por una extensión del uso del *TRM* como sistema de refuerzo. Esto únicamente será posible con la introducción de normativas que regulen su aplicación y métodos de cálculo que sean confiables y sencillos. Con la base técnica-legal adecuada, el uso del *TRM* puede abrirse paso entre sus competidores en el proyecto de nuevas estructuras y el refuerzo de las existentes.

Finalmente y con el objetivo de desarrollar métodos de cálculo analítico ajustados, es necesaria la implementación de modelos de cálculo por elementos finitos depurados y validados con un amplio abanico de casos experimentales, pudiendo así constituir otra gran rama del desarrollo futuro de esta tecnología.

Así pues, el uso del *TRM* en la obra de fábrica presenta un gran futuro y su uso dependerá, en gran medida, de la posibilidad de llevar a cabo los proyectos de investigación necesarios para dotar de base científica un método de refuerzo que justo ahora empieza a utilizarse sobre uno de los materiales constructivos más antiguos.

Bibliografía seleccionada

La única normativa reconocida actualmente sobre el uso del *TRM* se basa en estudios realizados en Italia:

- ALVARO, V., PASCALE, G. DI TOMMASO, A. *Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali*. Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile. Indirizzo Strutture. Boloña, 2006.

A falta de más normativa para el diseño del refuerzo de la obra de fábrica con *TRM*, se estima conveniente, de momento, seguir la metodología general planteada en las normativas de refuerzo de mampostería con *FRP*. Por lo tanto las siguientes lecturas resultan de interés:

- ACI Committee 440. ACI 440.7R-10. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Systems for Strengthening Unreinforced Masonry Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2010.
- Italian National Research Council. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. CNR, 2004.

Algunas consideraciones relativas al uso del *TRM* pueden hallarse en manuales editados por los propios productores del material usado en el sistema de refuerzo. Algunos de ellos, junto con los productos disponibles para la aplicación del *TRM* pueden hallarse en las respectivas páginas web:

- www.mapei.com
- www.ruredil.it
- www.fidiaglobalservice.com

Para finalizar se recomienda la lectura de una tesis donde se trata el tema del refuerzo de arcos de obra de fábrica con *TRM*:

- GARMENDIA, L., SAN-JOSÉ, J. T., GARCÍA, D., LARRINAGA, P. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials*, 25, 12 (2011), 4374-4385. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.065

Y para profundizar en la campaña experimental del CER-LITEM descrita en el capítulo se puede consultar el artículo:

- BERNAT, E., GIL, L., ROCA, P., ESCRIG, C. Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. *Construction and Building Materials*, 44 (2013), 35-47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.006

Referencias

- [1] ALFANO, G., AND CRISFIELD, M. Finite Element Interface Models for the Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 50 (2001), 1701–1736.
- [2] AUGENTI, N., PARISI, F., PROTA, A., AND MANFREDI, G. In-Plane Lateral Response of a Full-Scale Masonry Subassemblage with and without an Inorganic Matrix-Grid Strengthening System. *Journal of Composites for Construction* 15, 4 (2011), 578–590.
- [3] BLANKSVÄRD, T., AND TÄLJSTEN, B. Strengthening of concrete structures with cement based bonded composites. *Journal of Nordic Concrete Research* 38 (2008), 133–154.
- [4] GALLEGOS, H. Y RAMÍREZ, O. *Capítulo 1: Las estructuras de mampostería. Edificaciones de mampostería para la vivienda*. Luna, F.O., Arteaga, C., Arias, A. y Flore, L. Editores. México D.F., 2003.
- [5] GARCÍA, D. *Experimental and numerical analysis of stone masonry walls strengthened with advanced composite materials*. PhD thesis, Escuela de Ingeniería de Bilbao, 2009.
- [6] GARMENDIA, L., SAN-JOSÉ, J., GARCÍA, D., AND LARRINAGA, P. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials* 25, 12 (2011), 4374–4385.
- [7] GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería*. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México D.F., 6 de octubre de 2004.
- [8] HAMED, E., AND RABINOVITCH, O. Lateral out-of-plane strengthening of masonry walls with composite materials. *Journal of Composites for Construction* 14, 4 (2010), 376–387.
- [9] HARAJLI, M.H., ELKHATIB, H., SAN-JOSE, J. Masonry Walls Strengthened Using Fibre Textile-Mortar System: Experimental Evaluation of Out-of-Plane Cyclic Response. In *CSHM-3* (Ottawa-Gatineau, Canada, 2010), pp. 19–32.
- [10] HOLLER, S., BUTENWEG, C., NOH, S., AND MESKOURIS, K. Computational model of textile-reinforced concrete structures. *Computers & Structures* 82, 23-26 (2004), 1971–1979.
- [11] MAALEJ, M., LIN, V., NGUYEN, M., AND QUEK, S. Engineered cementitious composites for effective strengthening of unreinforced masonry walls. *Engineering Structures* 32, 8 (2010), 2432–2439.
- [12] MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE. Building Code Requirements for Masonry Structures. ACI 530-05, 2005.
- [13] ORTLEPP, R., HAMPEL, U., AND CURBACH, M. A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening. *Cement and Concrete Composites* 28, 7 (2006), 589–597.
- [14] PAPANICOLAOU, C., TRIANTAFILLOU, T., AND LEKKA, M. Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials* 25, 2 (2011), 504–514.
- [15] PAPANICOLAOU, C. G., TRIANTAFILLOU, T. C., PAPATHANASIOU, M., AND KARLOS, K. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading. *Materials and Structures* 41, 1 (Feb. 2007), 143–157.
- [16] SATHIPARA, N., MAYORCA, P., NESHELI, K., GURAGAIN, R., AND MEGURO, K. Experimental study on in-plane and out-of-plane behavior of masonry wallettes retrofitted by PP-band meshes. *SEISAN KENKYU* 57, 6 (2005), 530–533.
- [17] WIBERG, A. *Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composites*. PhD thesis, Royal Institute of Technology of Sweden, 2003.