

REFUERZO DE TRABES ACARTELADAS DE CONCRETO REFORZADO DEFICIENTES A CORTANTE CON ENCAMISADOS DE MALLA ELECTROSOLDADA Y MORTERO

Arturo Tena¹, Obed Hernández²

¹ Profesor-Investigador, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, Av. San Pablo, 180, Azcapotzalco 02200 México, D.F., México, e-mail: atc@correo.azc.uam.mx

² Departamento de Proyectos, SEPSA del Sur, Veracruz, México, e-mail: obedhernandez@sepsacv.com.mx

RESUMEN

Se presenta un estudio experimental exploratorio donde ocho trabes que fueron diseñadas y ensayadas para fallar claramente en cortante, y cuyo daño fue substancial, fueron reparadas utilizando una malla electrosoldada con aberturas de 5 cm x 5 cm y recubiertas con un mortero estructural (grout) de 2 cm de espesor. Se realizó el ensaye de las ocho trabes de concreto reforzado reparadas ante carga monótona creciente, y sus curvas carga-desplazamiento se comparan con las de las trabes originales. La reparación con la malla electrosoldada permitió que la capacidad de deformación y la resistencia de cada uno de los elementos aumentara, en algunos casos de manera notable.

Palabras clave: reparación, refuerzo, rehabilitación, encamisados de malla y mortero, concreto reforzado, trabes acarteladas, falla a cortante

REINFORCED CONCRETE HAUNCHED BEAMS DEFICIENT IN SHEAR REHABILITATED WITH JACKETING OF MORTAR AND WELDED WIRE MESH

ABSTRACT

An exploratory experimental study is presented where eight beams previously designed and tested to fail in shear, where the previous testing damage was substantial, were repaired using a beam jacketing consisting of a light-gauge steel wired mesh covered with 2 cm thick grout. Repaired beams were tested under monotonic loading and the obtained load-displacement curves were compared with those obtained for the original beams. The tested jacketing technique was effective, as higher deformation and load capacities were achieved by the repaired beams.

Keywords: retrofit, reinforcement, rehabilitation, jacketing of mortar and welded wire mesh, reinforced concrete, haunched beams, shear failure

1. INTRODUCCIÓN

La reparación de elementos de concreto reforzado dañados por sismo con encamisados convencionales, donde normalmente se amplía la sección transversal proporcionando refuerzo longitudinal y transversal adicional (por ejemplo, Alcocer 1993, Jirsa 2004) o se emplean camisas de celosía metálica (por ejemplo, Del Valle et al. 1988, Foutch et al. 1989, Tena-Colunga et al. 1996, González et al. 2007) resulta normalmente engorrosa, sucia y, además, en muchas ocasiones lidera a un aumento importante de la masa de la estructura.

En ocasiones, no es tan necesario aumentar la capacidad a flexión de los elementos originales que justifique el ampliar de manera substancial la sección transversal del elemento y agregar refuerzo longitudinal adicional, perforando además conexiones y/o sistemas de piso para garantizar la continuidad del refuerzo longitudinal. A veces sólo se requiere aumentar la capacidad resistente a cortante de vigas para evitar que éste sea el mecanismo de falla del elemento, con lo cual se puede propiciar que el elemento aumente su capacidad de deformación y cambie su mecanismo de falla a uno de flexión.

Por ello, resulta atractivo explorar opciones económicas, como el uso de mallas electrosoldadas recubiertas con mortero, que permitan conseguir este objetivo. El uso de este tipo de mallas ya se ha probado con mucho éxito para el refuerzo de muros de mampostería (por ejemplo, Ruiz 1995, Alcocer et al. 1996, Ruiz y Alcocer 1998, Zepeda et al. 2000, Alcocer 2004), y la técnica ha mostrado ser tan efectiva, que por ello ahora se incluye como una de las modalidades de refuerzo permitidas por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004 2004).

En este trabajo se presentan y resumen los resultados de un estudio experimental exploratorio donde ocho trabes que fueron diseñadas y ensayadas para fallar claramente en cortante, y cuyo daño fue substancial, fueron reparadas utilizando una malla electrosoldada con aberturas de 5 cm x 5 cm y recubiertas con un mortero estructural (grout) de 2 cm de espesor. La malla se fijó a las paredes de las trabes de manera similar a cómo se hace para reparar a muros de mampostería con esta técnica. Los detalles del estudio se reportan en Hernández (2007).

2. ESPECÍMENES DE PRUEBA A REPARAR

Se repararon con malla electrosoldada ocho trabes (dos prismáticas, seis acarteladas) de las diez que fueron diseñadas y ensayadas para fallar a cortante ante cargas monótonas crecientes (Archundia 2004, Archundia et al. 2005 y 2006, Tena-Colunga et al. 2008), y cuya geometría general se describe en las figuras 1 a 3 para los elementos con y sin refuerzo transversal. En la figura 1 y en la tabla 1 se utiliza la letra griega α para identificar al ángulo de acartelamiento (en grados) de las vigas de sección variable; en el caso particular de trabes prismáticas, $\alpha=0^\circ$ (tabla 1).

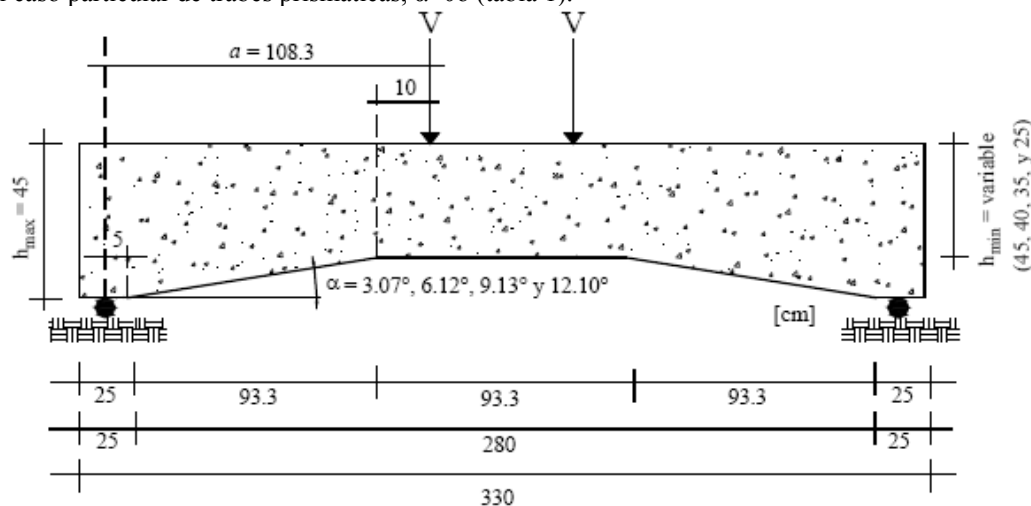


Figura 1. Geometría y cargas de los especímenes de prueba (Archundia et al. 2005).

Dado que en la investigación de referencia el objetivo era conocer el mecanismo de resistencia y deformación de trabes acarteladas deficientes a cortante, los especímenes fueron llevados en la medida de lo posible al colapso, por lo que el daño ocasionado fue muy grande, como se ilustra en la figura 4.

Para algunos, un nivel de daño como el mostrado en la figura 4 es irreparable, y muy seguramente lo es desde un punto de vista económico, sobre todo si la deformación permanente es difícil de revertir. Sin embargo, era interesante explorar con estos especímenes tan dañados si utilizando técnicas de reparación relativamente fáciles y económicas se podían restaurar al menos sus capacidades de deformación y de resistencia originales, -sino es que se pudieran incluso mejorar-, para confirmar o desmentir algunas ideas preconcebidas en el gremio sobre este tema y que, en realidad, no están sustentadas en evidencia experimental.

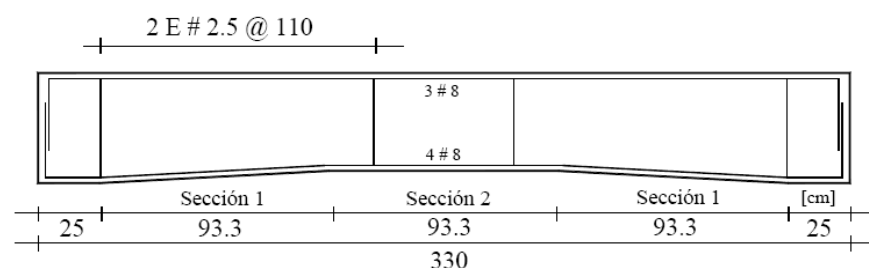


Figura 2. Armado del elemento TASCα1-R0, $\alpha=3.07^\circ$ (Archundia *et al.* 2005).

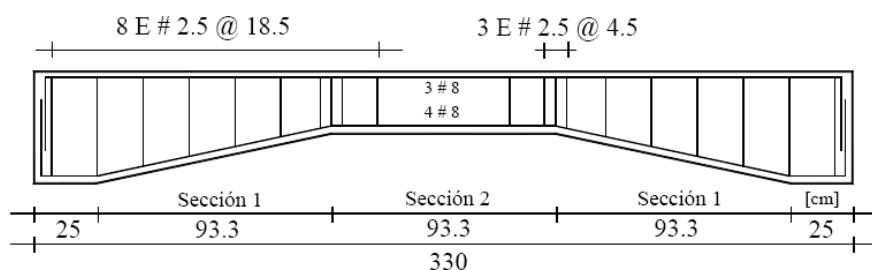


Figura 3. Armado del elemento TASCα4-R1, $\alpha=12.10^\circ$ (Archundia *et al.* 2005).

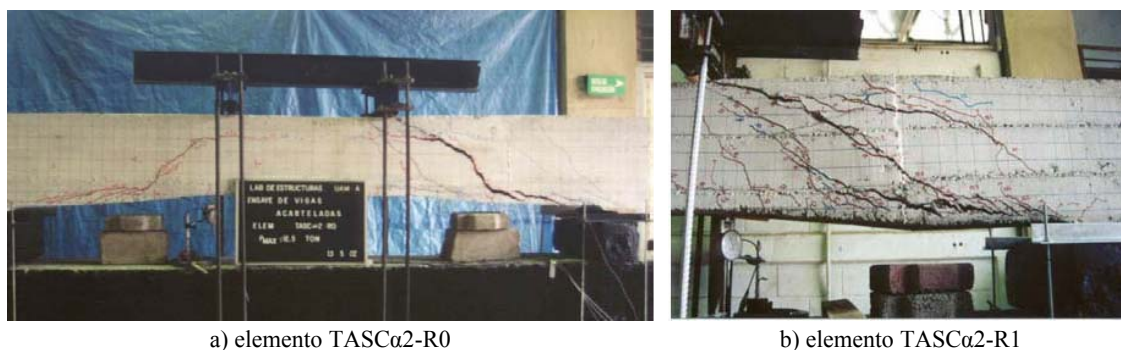


Figura 4. Daño último presentado en las trabes con y sin refuerzo transversal (Archundia *et al.* 2005).

Tabla 1. Tipificación de los armados de los especímenes ensayados por Archundia *et al.* (2005).

Trabe	α	Refuerzo flexión			Refuerzo cortante	
		Superior	Inferior	Cartelas	Centro	Vértice
TASCα0-R0	0°	3#8	4#8	1E#2.5 (armado)	1E#2.5 (armado)	-
TASCα1-R0	3.07°	"	"	1E#2.5 (armado)	1E#2.5 (armado)	-
TASCα2-R0	6.12°	"	"	1E#2.5 (armado)	1E#2.5 (armado)	-
TASCα3-R0	9.13°	"	"	1E#2.5 (armado)	1E#2.5 (armado)	-
TASCα4-R0	12.10°	"	"	1E#2.5 (armado)	1E#2.5 (armado)	-
TASCα0-R1	0°	"	"	7E#2.5 @ 18.5 cm	1E#2.5 @ 18.5 cm	3E#2.5 @ 18.5 cm
TASCα1-R1	3.07°	"	"	7E#2.5 @ 18.5 cm	1E#2.5 @ 18.5 cm	3E#2.5 @ 18.5 cm
TASCα2-R1	6.12°	"	"	7E#2.5 @ 18.5 cm	1E#2.5 @ 18.5 cm	3E#2.5 @ 14 cm
TASCα3-R1	9.13°	"	"	7E#2.5 @ 18.5 cm	1E#2.5 @ 18.5 cm	3E#2.5 @ 7.5 cm
TASCα4-R1	12.10°	"	"	7E#2.5 @ 18.5 cm	1E#2.5 (armado)	3E#2.5 @ 4.5 cm

Dada la cantidad de refuerzo longitudinal que contienen los elementos originales, que fueron sobre reforzados para garantizar que fallaran a cortante (figuras 2 y 3, tabla 1), a-priori se consideraba muy difícil cambiar el modelo de falla de cortante a uno de flexión utilizando una malla relativamente ligera, como se describe más adelante. En teoría, la malla incrementaría ligeramente la resistencia a cortante aún para los especímenes que disponían de refuerzo transversal (especímenes R1, tabla 1). Sin embargo, se consideraba que el aporte más importante de la malla sería el que permitiera distribuir el agrietamiento de manera más uniforme y, con ello, proporcionarles a las vigas mayor capacidad de deformación, como se había observado previamente en el uso de este tipo de refuerzo en la reparación de muros de mampostería confinada (Ruiz 1995, Alcocer et al. 1996, Ruiz y Alcocer 1998).

Lamentablemente, se perdieron para su reparación las trabes TASC α 2-R0 y TASC α 2-R1 en el manejo de los especímenes en el laboratorio, dado que por error se incluyeron dentro del material de desecho del laboratorio de la UAM-A.

3. PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN DE LAS TRABES

3.1 Preparación de las trabes dañadas

Debido a que las trabes de concreto reforzado sufrieron una deformación permanente importante a consecuencia del ensaye previo, se intentó corregir o revertir esto mediante un dispositivo con base en unos tensores, dos perfiles de acero estructural y un gato hidráulico, que se montó como se muestra en la figura 5 para intentar llevar a la viga a su condición original, es decir, que no tuviera una deformación permanente significativa. Se procedió de esta manera para las ocho trabes que se repararon.



Figura 5. Corrección de flecha utilizando una viga de reacción y gatos hidráulicos.

Toda vez que se corrigió la flecha, se prepararon las superficies de las trabes, es decir, se quitaron todos los fragmentos que estaban sueltos para rellenar las grietas.

Previo al relleno de las grietas y encamisado de las trabes, es necesario preparar su superficie de manera que esta se encuentre rugosa, como se muestra en la figura 6, para que el mortero nuevo se adhiera bien y no se desprenda súbitamente. Las trabes se amartelinaron con cincel y martillo. Es de suma importancia que se descubra el acero de refuerzo, ya que con esto podemos garantizar una buena adherencia entre el mortero fresco y el concreto endurecido. Además, para mejorar la adherencia entre el concreto viejo, el acero de refuerzo descubierto y el mortero fresco es muy importante el empleo de materiales epóxicos. En este estudio se empleó un material comercialmente conocido como Festerbond (Fester 2009), un compuesto líquido blanco (lechoso) formulado a base de resinas estireno-acrílicas en dispersión, con características de adhesividad, resistencia a la humedad, tensión, abrasión e impacto. Por otra parte, se debe tener particular cuidado en la revisión del acero de refuerzo, ya que si el diámetro disminuyó, entonces se debe sustituir, puesto que indicaría que éste fluyó notablemente a tensión y, por

tanto, no es confiable suponer que seguirá trabajando adecuadamente con el concreto viejo ante nuevas solicitaciones de carga, pues seguramente la adherencia entre el concreto y el acero existente fue notablemente debilitada. En este caso en particular, no fue necesario.



Figura 6. Preparación de la superficie de la trabe.

Se utilizó un mortero expansivo comercial denominado Festergrout NM 450 (Fester 2009) para rellenar las grietas, de manera que cubriera aquellas partes de la trabe en las que se desprendió el concreto. Este mortero, una vez aplicado, se expande al secarse, de tal manera que rellena perfectamente la oquedad, quedando como una superficie resistente. El fabricante especifica el modo de aplicación de este material: sólo se debe mezclar con agua y está listo para ser aplicado dependiendo de qué tan fluido se requiera el material. Conforme a la ficha técnica del fabricante, la resistencia a la compresión a los 28 días para una fluidez alta puede ser de hasta 494 kg/cm² (Fester 2009). En la figura 7 se muestra el sellado de una grieta bastante grande (quizá la más grande de las reparadas) que se rellenó empleando este material.

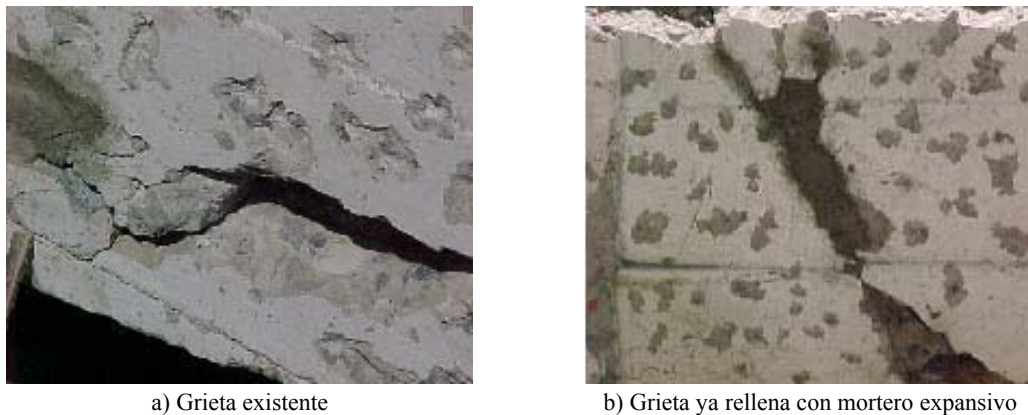


Figura 7. Relleno de grietas con mortero expansivo.

Hubo un par de casos donde se presentó un daño tan severo en la trabe que se optó por remover gran parte del concreto para poder repararla de manera adecuada. El más severo de estos casos correspondió a la trabe TASCα3-R1 (figura 8a). Estos casos son de especial interés, ya que permitirá estudiar un poco y de manera indirecta la diferencia entre rellenar grietas y reemplazar material como parte de la técnica de reparar trabes con encamisados de malla y mortero.

Toda vez que se preparó la superficie, se cimbró la sección de la viga que lo requería (figura 8b). Antes de cimbrar, se limpió muy bien la superficie de colado con la ayuda de un compresor de aire y un cepillo de alambre para remover todas las partículas no adheridas y polvos. El siguiente paso fue preparar

la sección removida para su posterior colado. Para ello, se utilizó primero un adhesivo que permitiera unir el concreto nuevo al concreto viejo, por lo que se utilizó el material comercial Festerbond, que permite que no se forme una junta fría, ayudando a adherir adecuadamente el concreto nuevo con el concreto viejo. Es necesario que la superficie de contacto esté limpia y seca, libre de partículas y además, colar el elemento inmediatamente después de aplicar Festerbond en la superficie de contacto, ya que se seca rápidamente (figura 8c). El Festerbond debe aplicarse también en el acero, ya que permite también unir el acero de refuerzo existente con el concreto nuevo, haciendo que la reparación sea más eficiente. De otra forma, la función del concreto nuevo sería de un relleno que se desprendería rápidamente.



a) Material dañado removido



b) Cimbrado



c) Aplicación de Festerbond en superficie dañada



d) Colado del concreto de reemplazo



e) Curado en condiciones ambientales

Figura 8. Procedimiento de reparación de la trabe TASCα3-R1, reemplazando el concreto dañado.

El concreto utilizado como material de reemplazo se elaboró con una revolvedora eléctrica cuya capacidad nominal es de medio saco de cemento (figura 8d). La resistencia nominal de diseño de este concreto de reemplazo fue $f'_c=250$ kg/cm², según la dosificación reportada en Hernández (2007). Después de haber colado las secciones de reemplazo de las trabes, éstas se curaron en condiciones ambientales para que el concreto nuevo alcance una buena resistencia. Para evitar que el concreto perdiera humedad, se recubrieron por encima con papel de sacos de cemento saturados en agua, los cuales se siguieron humedeciendo por espacio de una semana (figura 8e).

3.2 Encamisado de las trabes con malla electrosoldada y mortero

Toda vez que se prepararon las ocho trabes disponibles, el siguiente paso fue encamisarlas con una malla electrosoldada conocida comercialmente como multimalla ferretera (DeAcero 2009). La abertura de la malla electrosoldada utilizada es de 5 cm (figura 10a), el calibre del acero es 14 (2.10 mm) y su esfuerzo nominal de fluencia es $f_y=5000$ kg/cm².

Se empleó esta malla dado que, por lo cerrado del cuadrículado (cada 5 cm), parece ideal para el refuerzo de elementos como vigas y columnas, dado que las mallas que se han empleado en la reparación de muros de mampostería tienen una abertura de 15 cm, y esa separación parece inadecuada para ubicarla en trabes si se desea proporcionarles mejores características de deformación y de confinamiento.

Antes de iniciar el encamisado formal de las trabes, como se comentó anteriormente, se prepararon las superficies de éstas y se martelinaron (figura 6), dado que es necesario que la superficie de contacto sea rugosa para que se adhiera perfectamente el concreto viejo con el mortero que se aplica.

Para poder encamisar a las trabes, el primer paso es cortar la malla en las dimensiones requeridas. La medida comercial de la malla es de 1.4 m x 20 m, por lo que se tuvo que cortar de acuerdo a lo requerido por cada trabe. La malla se cortó para que se pudieran colocar de manera continua en la cara inferior y en las dos caras laterales de la trabe, anclándose en la cara superior de la misma dejando dos cuadros para ello, es decir, de manera que se pudiera hacer una sección C que se anclara en la cara superior de la trabe, dado que éstas son de sección rectangular (figura 9a). Obviamente, esta condición de anclaje es muy favorable y se puede argumentar con justificación que en edificios sería imposible anclar la malla de esta manera por la presencia de la losa. Sin embargo, precisamente la presencia de la losa permitiría utilizar un mecanismo de anclaje sencillo donde la malla se fijara precisamente en la losa (figura 9b), cuya eficiencia se planea estudiar más adelante con el ensaye de vigas de sección T.

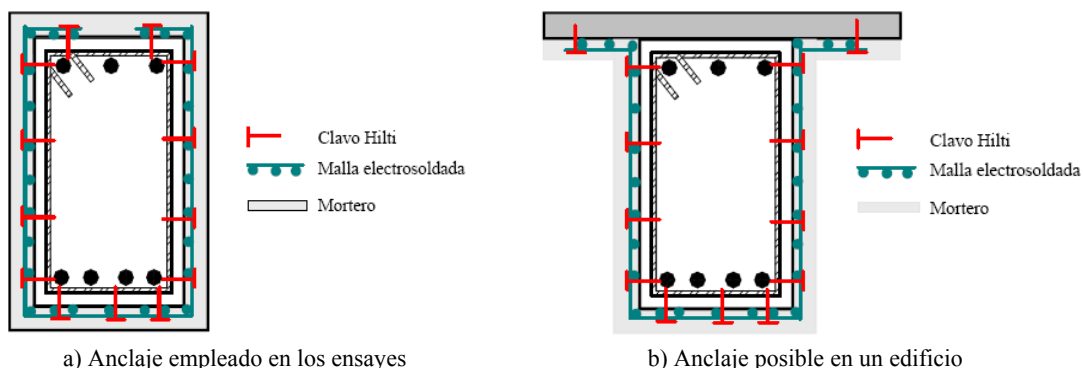


Figura 9. Detalle del encamisado de trabes con malla electrosoldada y mortero.

En las trabes con grados de acartelamiento importantes (9o y 12o), hubo necesidad de cortar la malla en tres secciones, las dos cartelas y la sección prismática, y anclar mediante el traslape de la malla en la zona de intersección.

Una vez cortada la malla según se requería, se procedió a colocarla en contacto directo con las caras externas de la trabe y anclarla (figuras 10a y 11). Se usaron clavos comerciales HILTI (Hilti 2009)

del tipo X-DNI -22P8 (figura 10b) y arandelas de 36 mm de diámetro (figuras 10a y 11), de tal manera que se fijara lo mejor posible la malla en la trabe. Se utilizó una separación entre fijadores de 20 cm en la dirección horizontal (cada 4 cuadros, figuras 10a y 11) y 10 cm en la dirección vertical (cada 2 cuadros, figuras 9a y 11).



a) Fijado de la malla de 5x5 cm



b) Clavo HILTI X-DNI-22-P8

Figura 10. Procedimiento de anclaje de la malla electrosoldada a las trabes.

Después de que la malla electrosoldada se fijó a la trabe, se procedió a completar el encamisado repellándolas con mortero (figura 9a). Se utilizó mortero de relleno fino (conocido también como grout), como se hace en la reparación de los muros de mampostería (según NTCM-2004 2004), con relación de cemento arena 1:2.5. En este caso no se utilizó cal. Este mortero de relleno es equivalente al mortero tipo I utilizado para pegar piezas de mampostería según lo establecen las NTCM-2004 (2004) y, por ello, la resistencia a la compresión de diseño esperada es $f^*_j=125 \text{ kg/cm}^2$. Lamentablemente, no se ensayaron cilindros o cubos que permitieran reportar las resistencias estadísticas de los morteros empleados en el encamisado de las trabes.



Figura 11. Vistas del anclaje de la malla electrosoldada con las trabes.

Es importante que el repellado se realice con mano de obra calificada, de tal manera que el espesor del repellado sea aproximadamente de 2 cm, de manera que no se incremente demasiado el peso de la trabe. El espesor del repellado de mortero aplicado en las trabes reparadas es de 2 cm, pero en algunos sitios de difícil aplicación pudo resultar ligeramente menor, dado que no se empleó cimbra. Cabe señalar que la calidad del repellado no fue la óptima, tomando en cuenta que lo realizaron entusiastas alumnos de licenciatura como parte de sus talleres de ingeniería civil y no obreros calificados. Las trabes reparadas con el encamisado de malla electrosoldada y mortero se muestran en la figura 12.

En la tabla 2 se identifica la nomenclatura utilizada para identificar a las trabes reparadas, sus dimensiones finales (conforme a la figura 13) y cuantías de refuerzo, tomando en cuenta que la malla electrosoldada tiene aberturas de 5x5 cm y el diámetro del alambre es de 2.1 mm, además que el espesor

del encamisado de mortero es de 2 cm por cara. Como se observa de las tablas 1 y 2, se adicionó el término RM a la nomenclatura original de las trabes (tabla 1) para identificar a los elementos reparados con el encamisado (tabla 2).



Figura 12. Vista de las trabes reparadas con el encamisado de malla electrosoldada y mortero.

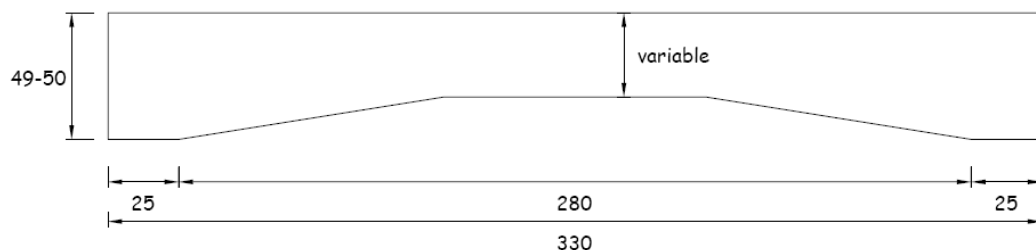


Figura 13. Dimensiones finales de las trabes acarteladas reparadas.

Tabla 2. Características finales de las trabes reparadas con encamisado de malla y mortero.

TRABE	L (cm)	L' (cm)	b (cm)	h_1' (cm)	H_2' (cm)	ρ %
TASC α 0-R0-RM	330	280	27	49	49	0.00346
TASC α 1-R0-RM	330	280	27	49	44	0.00346
TASC α 3-R0-RM	330	280	27	49	35	0.00346
TASC α 4-R0-RM	330	280	27	49	30	0.00346
TASC α 0-R1-RM	330	280	27	50	50	0.00346
TASC α 1-R1-RM	330	280	27	49	44	0.00346
TASC α 3-R1-RM	330	280	27	49	35	0.00346
TASC α 4-R1-RM	330	280	27	49	29	0.00346

4. ENSAYE DE LAS TRABES REPARADAS

4.1 Protocolo de ensaye

El protocolo de ensaye fue similar al empleado para los especímenes originales (figura 1, Archundia 2004, Archundia et al. 2005 y 2006, Tena-Colunga et al. 2008). Por tanto, los ensayos se

realizaron en una viga de reacción acondicionada con un dispositivo mecánico-hidráulico. En la figura 14a se muestra al elemento TASC α 4-R1-RM montado en el dispositivo.

El dispositivo de carga consistió en sujetar las traves de prueba a una viga de reacción mediante dos placas dobles de acero estructural en la parte superior y dos perfiles armados en la parte inferior en cada extremo, y tensadas mediante cuatro barras roscadas de 1½ pulgadas (3.81 cm) por extremo sujetadas mediante tuercas. Se utilizaron dos gatos hidráulicos con capacidad de 25 Ton cada uno para aplicar las cargas al espécimen, los cuales se colocaron en la parte inferior de la viga de reacción. Las cargas se aplican a las traves a un tercio de su claro, que en el caso de las traves acarteladas coincide justamente con los vértices del acartelamiento (figuras 1 y 14). Para medir las cargas aplicadas se utilizaron celdas de carga (figuras 14a y 14b); estas celdas se conectaron a un equipo de adquisición de datos (TDS) para la captura simultánea de datos. En el centro del claro se ubicó un extensómetro para medir la deformación máxima del espécimen durante la prueba experimental (figuras 14a y 14c), el cual también estaba conectado al equipo TDS.

Para los apoyos del espécimen, se emplearon dos placas dobles de acero que a su vez descansaban sobre unos cubos de concreto (figura 14).



a) Vista general del montaje



b) Detalle de una de las celdas de carga



c) Extensómetro al centro del claro

Figura 14. Trave TASC α 4-R1-RM montada en el dispositivo de ensayo.

4.2 Patrones de agrietamiento

Los patrones de agrietamiento y su evolución para cada una de las traves reparadas se discuten y documentan con detalle en Hernández (2007). A continuación solo se discutirán brevemente algunos aspectos relevantes.

En las figuras 15 a 22 se presentan las fotografías de cada una de las traveses reparadas con su patrón final de agrietamiento, junto con un par de mapeos de agrietamiento a deflexiones previas a la falla, la inicial y una intermedia, para entender su evolución.

En las figuras 15 y 16 se muestra la evolución de daño de las dos traveses prismáticas reparadas con encamisado de malla y mortero y que originalmente una no dispone de refuerzo por cortante (TASC α 0-R0-RM, figura 15) y la otra cuenta con un refuerzo mínimo por cortante (TASC α 0-R1-RM, figura 16).

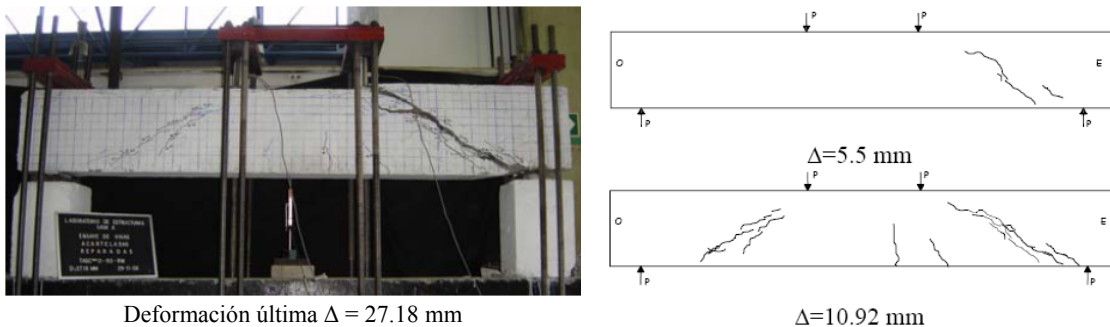


Figura 15. Evolución del agrietamiento de la trabe TASC α 0-R0-RM.

En cuanto a los patrones de agrietamiento, se observa que ambos especímenes fallan por tensión diagonal, pero como era de esperarse, el ancho y amplitud de la grieta de falla del elemento originalmente sin refuerzo por cortante es mayor (figura 15). En ambos elementos la presencia de la malla de alambre electrosoldado fomenta que se distribuya el agrietamiento en tensión diagonal y se presenten algunas grietas incipientes de flexión en la zona central antes de la falla, sobre todo si se comparan con los patrones de agrietamiento de los elementos originales (no mostrados, Archundia 2004, Archundia et al. 2005). También es importante destacar que la falla en los dos especímenes reparados (figuras 15 y 16) se presentó exactamente del mismo lado que en los elementos originales (no mostrados, Archundia 2004, Archundia et al. 2005), por lo que la reparación de las grietas con mortero expansivo y el encamisado no pudieron revertir la mayor vulnerabilidad del lado más dañado.

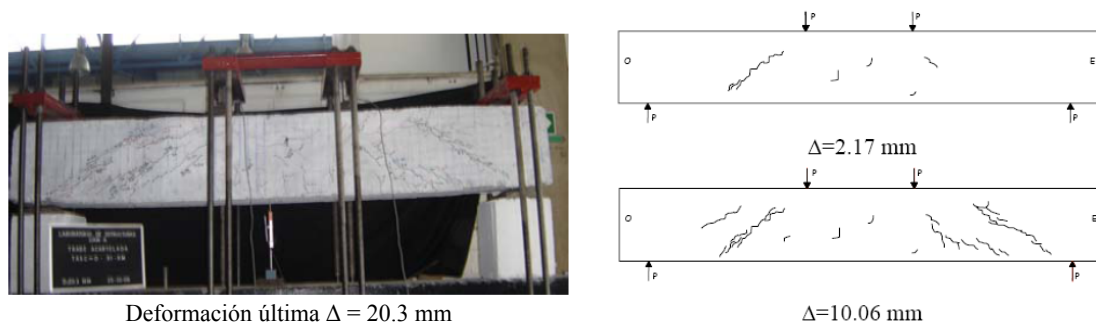


Figura 16. Evolución del agrietamiento de la trabe TASC α 0-R1-RM.

También cabe destacar que de manera relativamente sorpresiva, el elemento reparado que originalmente no cuenta con refuerzo transversal (TASC α 0-R0-RM, figura 15) alcanzó un desplazamiento mayor a la falla que aquél que originalmente contaba con refuerzo por cortante (TASC α 0-R1-RM, figura 16), a pesar que en este último el agrietamiento se distribuye más uniformemente y los anchos de grieta son menores.

En las figuras 17 y 18 se muestra la evolución de daño de las dos traveses acarteladas con un ángulo de tres grados reparadas con encamisado de malla y mortero, donde una no dispone originalmente de refuerzo por cortante (TASC α 1-R0-RM, figura 17) y la otra si cuenta con un refuerzo mínimo por cortante (TASC α 1-R1RM, figura 18).

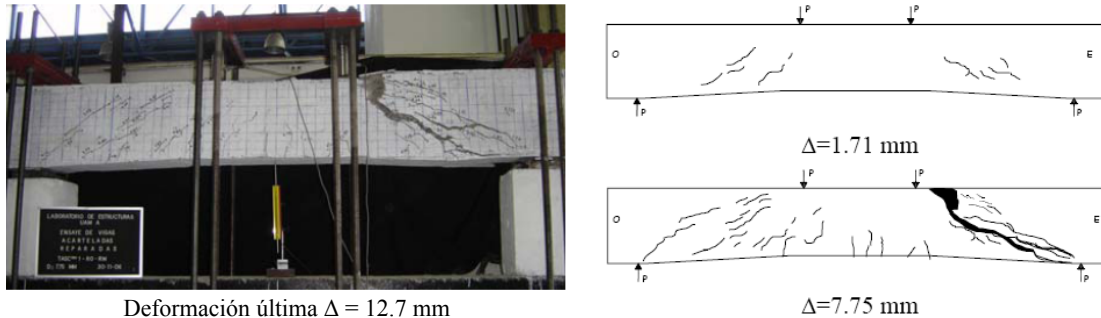


Figura 17. Evolución del agrietamiento de la trabe TASCα1-R0-RM.

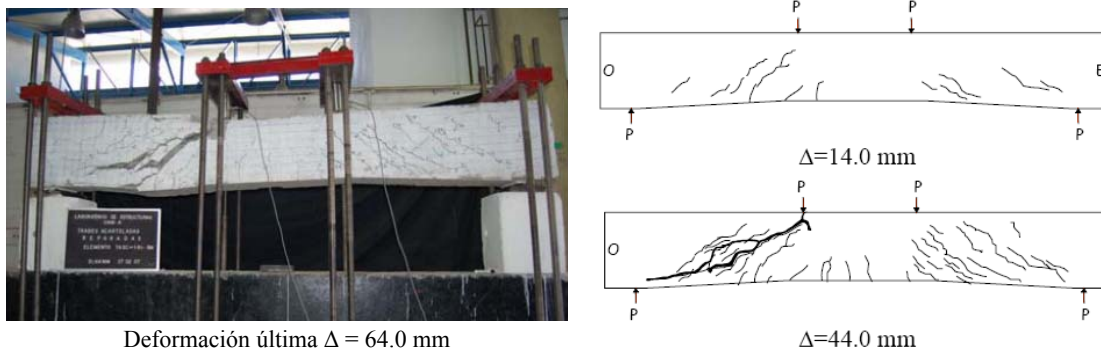


Figura 18. Evolución del agrietamiento de la trabe TASCα1-R1-RM.

Se pueden hacer observaciones similares en cuanto a los patrones de agrietamiento y su progreso: se observa que fallan por tensión diagonal exactamente del mismo lado que fallaron los elementos originales (no mostrados, Archundia 2004, Archundia et al. 2005); que la presencia de la malla de alambre electrosoldado fomenta que se distribuya más uniformemente el agrietamiento en tensión diagonal y se presenten algunas grietas incipientes de flexión en la zona central antes de la falla en comparación con los patrones de agrietamiento de los elementos originales (no mostrados, Archundia 2004, Archundia et al. 2005). En estos casos, el ancho y la amplitud de la grieta de falla de los dos elementos es similar, pero cabe destacar que en el elemento que originalmente dispone de refuerzo por cortante se presenta una flecha mucho mayor que en el elemento cuyo único refuerzo por cortante lo constituye la malla electrosoldada.

En las figuras 19 y 20 se muestra la evolución de daño de las dos trabes acarteladas con un ángulo de nueve grados reparadas con encamisado de malla y mortero: TASCα3-R0-RM (figura 19) y TASCα3-R1-RM (figura 20). En general, se pueden repetir las mismas observaciones en cuanto a los patrones de agrietamiento y su progreso que las hechas para las trabes acarteladas de tres grados; sin embargo, hay un par de aspectos dignos de mención. El primero es relativo con la trabe TASCα3-R1-RM, en la cual se reemplazó el concreto dañado (figura 8) en lugar de sólo inyectar grietas (figura 7). Como resultado importante se observa que la falla por tensión diagonal se presentó en el lado opuesto a la sustitución del material, es decir, falló en el extremo opuesto que en el elemento original (no mostrado, Archundia 2004, Archundia et al. 2005). Esto indica que, a diferencia de la técnica de reparación de las grietas con mortero expansivo, la sustitución de material fue efectiva en cuanto a que pudo revertir, junto con el encamisado, la mayor vulnerabilidad del lado más dañado. El segundo punto importante es destacar la gran capacidad de deformación de ambos elementos, que como se ha comentado en otros estudios, por una parte es consecuencia de la geometría del acartelamiento, pero también es notablemente favorecida por la presencia de la malla.



Deformación última $\Delta = 60.0$ mm

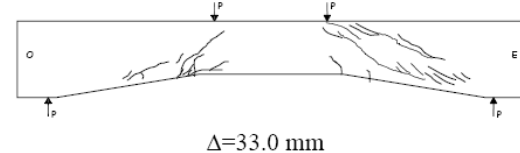
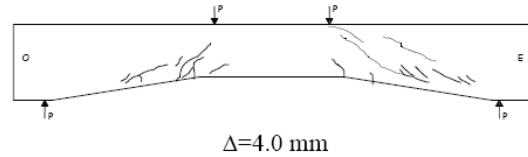


Figura 19. Evolución del agrietamiento de la trabe TASCα3-R0-RM.



Deformación última $\Delta = 99.0$ mm

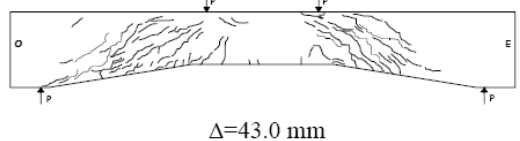
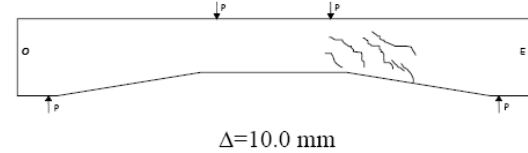


Figura 20. Evolución del agrietamiento de la trabe TASCα3-R1-RM.

En las figuras 21 y 22 se muestra la evolución de daño de las dos trabes acarteladas con un ángulo de 12 grados reparadas con encamisado de malla y mortero: TASCα4-R0-RM (figura 21) y TASCα4-R1-RM (figura 22). En general, se pueden repetir las mismas observaciones generales en cuanto a los patrones de agrietamiento y su progreso que las hechas para el resto de las trabes. En particular, el comportamiento es muy similar al observado en las trabes con ángulo de acartelamiento de nueve grados, sobre todo en cuanto a la importante deformación que pueden desarrollar que es consecuencia del ángulo de acartelamiento y de la presencia de la malla. Cabe destacar que al momento de la prueba, el espécimen TASCα4-R1-RM (figura 22) no se pudo someter a un desplazamiento mayor a 65 mm, por circunstancias que limitaron la capacidad de respuesta del equipo empleado, así que este desplazamiento no es precisamente el último que pudiera haber alcanzado este espécimen, como se podrá juzgar del patrón de agrietamiento mostrado (en comparación a otros experimentos).



Deformación última $\Delta = 88.0$ mm

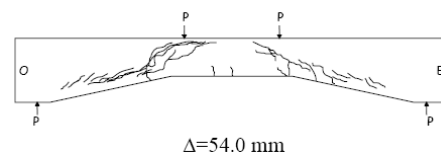
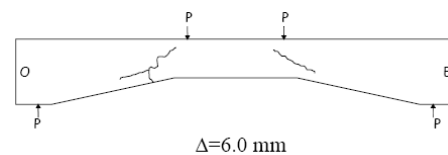


Figura 21. Evolución del agrietamiento de la trabe TASCα4-R0-RM.

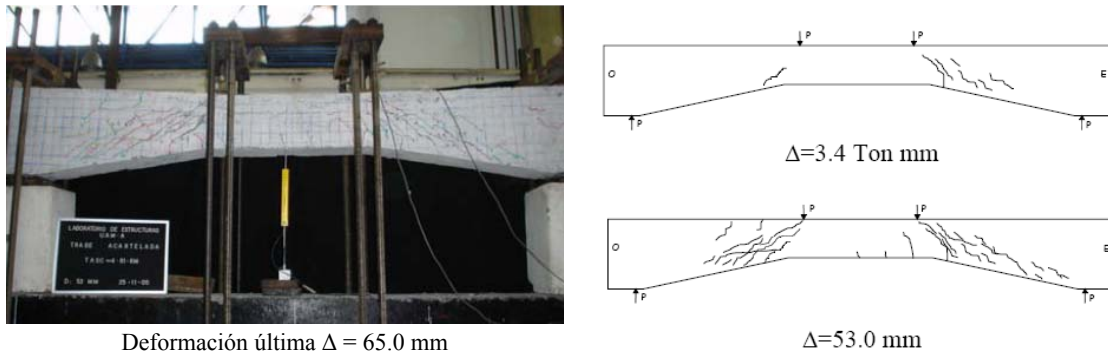


Figura 22. Evolución del agrietamiento de la trabe TASCα4-R1-RM.

Aspectos relevantes a destacar son la participación de la malla, la eficiencia de los conectores utilizados y su distribución, así como el encamisado en sí. En todos los especímenes ensayados se observó que la malla efectivamente trabaja y se deforma (figura 23), participando activamente en la capacidad resistente y de deformación de los elementos reparados. Los conectores utilizados y su distribución fueron efectivos y tuvieron un comportamiento muy satisfactorio, pues en ningún elemento se observó que los conectores o su arandela se desprendieran o aflojaran de la viga. El encamisado con mortero fue efectivo, dado que no se desprendió del elemento en etapas prematuras de carga, y sólo se presentaron desconchamientos de la camisa en etapas avanzadas de carga y deformación, ya cercanas a la falla, lo cual es más que aceptable.

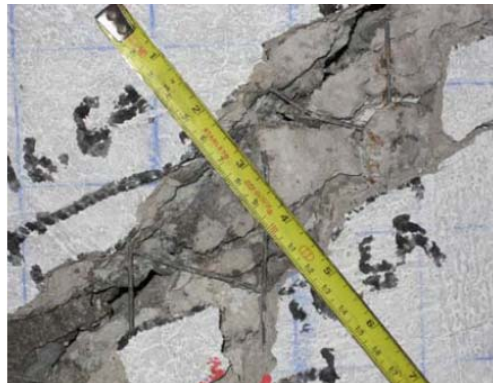


Figura 23. Detalle donde se aprecia la deformación de la malla de alambre electrosoldado.

4.3 Capacidad de carga y de deformación

A partir del estudio de las curvas carga-deformación de cada elemento reparado se definieron los cortantes y deformaciones de agrietamiento y cuando se presenta la carga máxima, mismos que se reportan en la tabla 3. En los especímenes que contienen originalmente un refuerzo mínimo por cortante (elementos R1-RM) se aprecia que el desplazamiento al que se desarrolla el cortante máximo (Δ_{urm}) se incrementa a medida que aumenta el ángulo de acartelamiento. En términos generales, la capacidad de deformación aumenta a medida que el ángulo de acartelamiento aumenta. En contraste, en términos generales el cortante resistente (V_{urm}) disminuye a medida que aumenta el ángulo de acartelamiento, lo cual es más claro para los elementos R1-RM y, como se ha discutido antes, esto también se debe a un menor volumen de concreto utilizado y a la disminución del peralte efectivo donde se presenta la grieta principal por tensión diagonal (Archundia et al. 2006, Tena-Colunga et al. 2008).

Tabla 3. Cortantes y desplazamientos experimentales al primer agrietamiento y a la carga máxima.

Elementos originales	$f'c$ (kg/cm ²)	Vu (ton)	Δu (mm)	Elementos reparados	$Vagr$ (ton)	Δagr (mm)	$Vurm$ (ton)	Δurm (mm)	$Vu/Vurm$	$\Delta u/\Delta urm$
TASC α 0-R0	334	7.50	7.82	TASC α 0-R0-RM	8.47	5.50	15.67	12.84	2.09	1.64
TASC α 1-R0	321	6.75	8.88	TASC α 1-R0-RM	3.63	3.42	27.00	28.30	4.00	3.19
TASC α 3-R0	236	3.75	7.85	TASC α 3-R0-RM	4.10	9.04	9.08	25.28	2.42	3.22
TASC α 4-R0	281	3.00	12.46	TASC α 4-R0-RM	1.70	6.06	5.30	33.82	1.77	1.77
TASC α 0-R1	315	25.00	23.86	TASC α 0-R1-RM	0.90	0.54	34.91	25.26	1.40	1.40
TASC α 1-R1	269	20.00	36.43	TASC α 1-R1-RM	8.26	14.04	14.44	33.76	0.69	0.69
TASC α 3-R1	288	12.00	41.64	TASC α 3-R1-RM	6.62	10.06	17.87	43.46	1.28	1.28
TASC α 4-R1	212	8.00	40.36	TASC α 4-R1-RM	3.41	11.64	8.74	52.44	1.09	1.09

5. COMPARACIÓN CON LOS ELEMENTOS ORIGINALES

Para valorar si la técnica de reparación con encamisado de malla electrosaldada y mortero es efectiva, forzosamente se tiene que comparar su comportamiento experimental con respecto al de los elementos originales. En secciones anteriores ya se realizaron algunas observaciones sobre cómo el encamisado con malla permitió una distribución más uniforme de las grietas por tensión diagonal y la aparición de algunas grietas por flexión en los modelos reparados con respecto a los originales. Por ello, en la figura 24 se comparan las curvas carga-desplazamiento de los elementos originales con respecto a los reparados con encamisados cuando no se utilizó refuerzo transversal (modelos R0) y en la figura 25 cuando se cuenta con un refuerzo mínimo por cortante (modelos R1). En la tabla 3 también se comparan los cortantes y desplazamientos máximos de las trabes originales (Vu y Δu) con las reparadas ($Vurm$ y Δurm).

De la figura 24 se aprecia que, en términos generales, los elementos reparados con encamisados (RM) desarrollan una mayor resistencia y capacidad de deformación que los elementos originales, tanto para el elemento prismático como para las trabes acarteladas. Un caso excepcional fue el obtenido en la reparación de la trabe acartelada de tres grados (TASC α 1-R0-RM), donde el incremento de la capacidad resistente y deformación es la más notable (tabla 3, figura 24). También se nota una mejora ostensible en el comportamiento del elemento prismático reparado (TASC α 0-R0-RM) con respecto al original. En general, se observa que el incremento en la capacidad de deformación aumenta conforme aumenta el ángulo de acartelamiento pero, en contraste, el incremento en resistencia disminuye a medida que aumenta el ángulo de acartelamiento, salvo el ya comentado caso excepcional del elemento TASC α 1-R0-RM. En general, se observa que la rigidez inicial de los elementos reparados es mayor que la de los originales, a excepción del elemento con un ángulo de acartelamiento de 12 grados (TASC α 4-R0-RM).

De la figura 25 también se aprecia que, en términos generales, los elementos reparados con encamisados (RM) desarrollan una mayor resistencia, rigidez inicial y capacidad de deformación que los elementos originales, tanto para el elemento prismático como para las trabes acarteladas. Sin embargo, en estos casos el aumento de resistencia es, en general, proporcionalmente menor que el observado para los elementos sin refuerzo transversal.

Aquí el caso más excepcional lo constituye nuevamente el obtenido en la reparación de la trabe acartelada de tres grados (TASC α 1-R1-RM), donde la capacidad resistente obtenida es menor que la del elemento original (tabla 3). Esto se debe al siguiente hecho que se detectó posteriormente a la realización de la prueba. Revisando el registro de las lecturas de las celdas de carga, se observó una diferencia considerable de las cargas registradas entre sí, que lamentablemente no se detectó durante el ensaye para revisar la celda y/o corregir lo que lo estuviera ocasionando, y esto originó que básicamente se obtuvieran dos curvas experimentales cortante-desplazamiento del centro de claro, una para el lado izquierdo y otra para el lado derecho, como se ilustra en la figura 26. Como la falla ocurrió de lado izquierdo y justamente

en ese lado la celda de carga registró cargas menores, por lo tanto, la curva que se toma como más representativa y que se muestra en la figura 25 es precisamente la del lado izquierdo, puesto que la falla de la trabe ocurrió ahí.

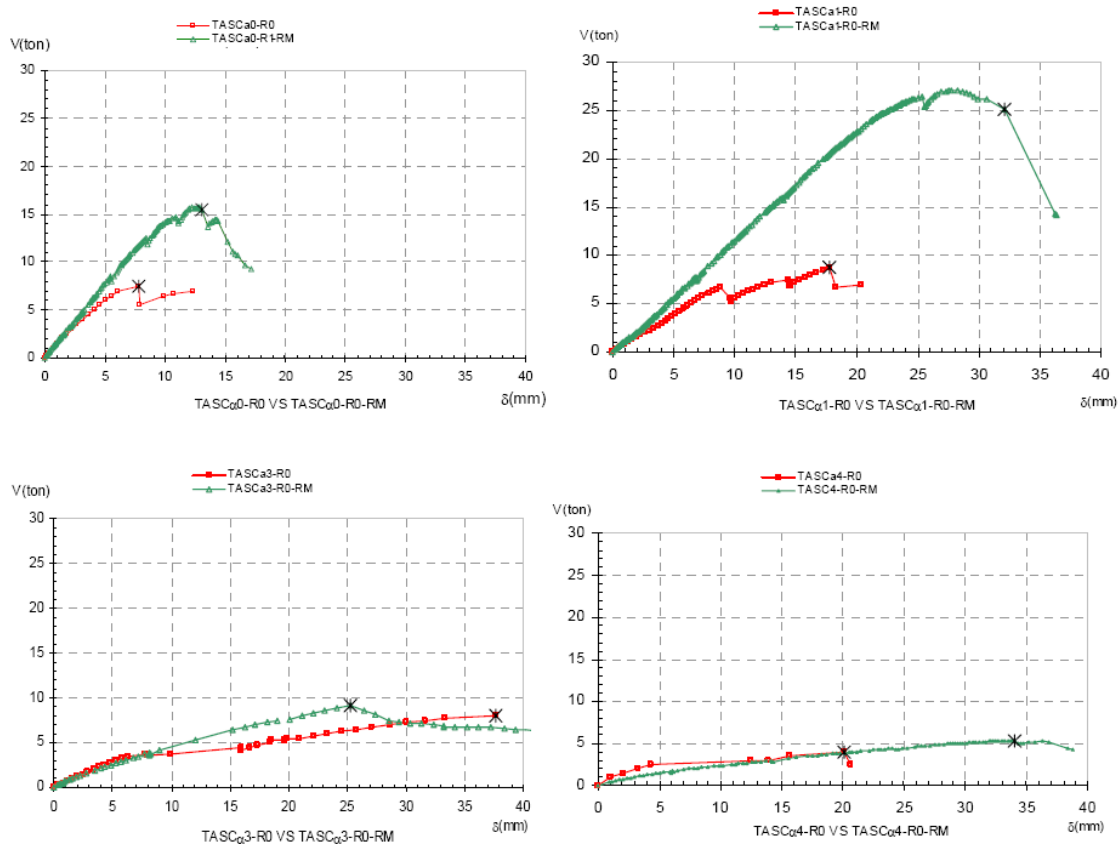


Figura 24. Comparación de curvas carga-desplazamiento (V-Δ) entre elementos sin refuerzo transversal (originales y reparados).

En general, también se observa de la figura 25 que el incremento en la capacidad de deformación aumenta conforme aumenta el ángulo de acartelamiento pero, en contraste, el incremento en resistencia disminuye a medida que aumenta el ángulo de acartelamiento, salvo el ya comentado caso excepcional del elemento TASCα1-R1-RM. Nuevamente, sólo se observa una disminución de la rigidez inicial en elemento reparado con un ángulo de acartelamiento de 12 grados (TASCα4-R1-RM).

En términos generales, se puede afirmar para todos los elementos reparados que el incremento en resistencia de los especímenes se explica por la participación de la malla y la camisa de mortero, el incremento en rigidez por la efectividad del inyectado de grietas y el ligero aumento de la sección transversal de los elementos por el encamisado, y que el incremento en la capacidad de deformación se debe a la participación de la malla de acero electrosoldada, la cual es favorecida por la eficiencia del anclaje con los conectores Hilti empleados.

Con base en los resultados que se presentan y discuten, se puede afirmar que la técnica de refuerzo con encamisado de malla electrosoldada y mortero es una técnica efectiva en vigas, pues en términos generales mejora la capacidad resistente y de deformación de los elementos originales y, en el peor de los casos, su comportamiento no es inferior al de los elementos originales. Se ha mostrado que en términos generales mejora notablemente el desempeño de elementos sobrerreforzados diseñados para fallar a

cortante, por lo que su aplicación para reparar vigas subreforzadas y cuya deficiencia a resistir el cortante sea más moderada, condiciones más cercanas a las vigas utilizadas en edificios antiguos, es prometedora, lo que deberá valorarse en ensayos futuros.

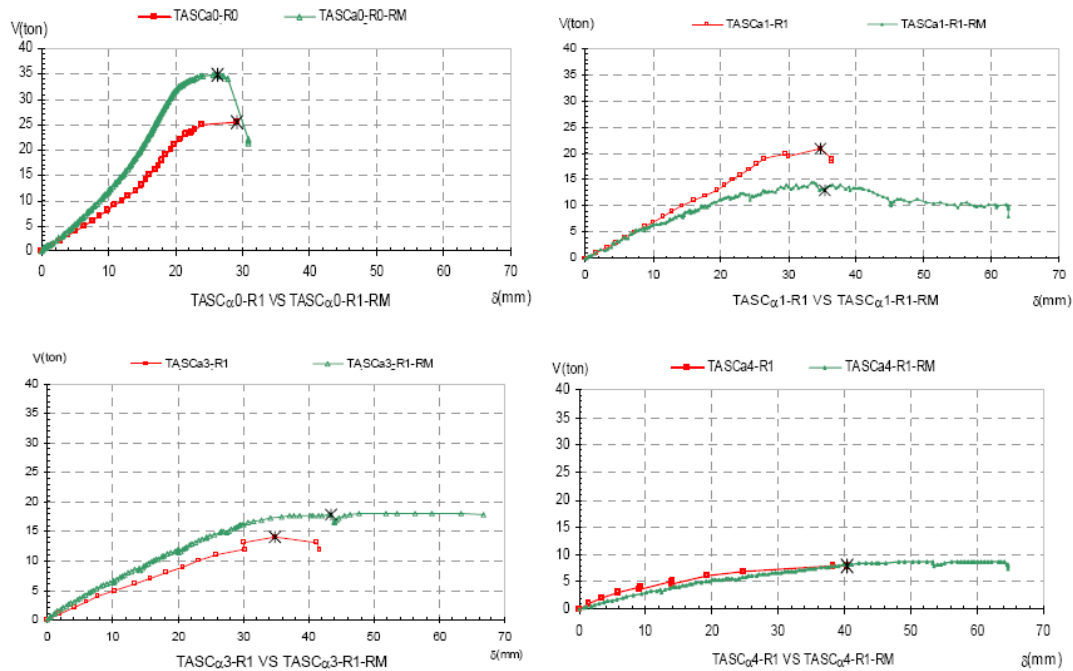


Figura 25. Comparación de curvas carga-desplazamiento (V-Δ) entre elementos con refuerzo transversal (originales y reparados).

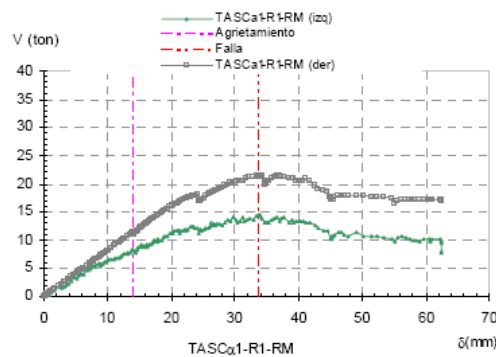


Figura 26. Comparación de curvas carga-desplazamiento (V-Δ) del elemento TASCα1-R1-RM.

6. COMENTARIOS FINALES

Se presentó un estudio experimental exploratorio donde ocho trabes que fueron diseñadas y ensayadas para fallar claramente en cortante (dos prismáticas y seis acarteladas), y cuyo daño fue substancial, fueron reparadas utilizando una malla electrosoldada con aberturas de 5 cm x 5 cm y recubiertas con un mortero estructural (grout) de 2 cm de espesor aproximadamente. La malla se fijó a las

paredes de las trabes de manera similar a cómo se hace para reparar a muros de mampostería con esta técnica.

Se realizó el ensaye de las ocho trabes de concreto reforzado reparadas ante carga monótona creciente, y sus curvas carga-desplazamiento y sus patrones de agrietamiento se compararon con las de las trabes originales. Como se esperaba, la reparación con la malla electrosoldada permitió que la capacidad de deformación y la resistencia de cada uno de los elementos aumentara, en algunos casos de manera notable.

En términos generales, se puede afirmar para todos los elementos reparados que su incremento en resistencia se explica por la participación de la malla y la camisa de mortero, su incremento en rigidez por la efectividad del inyectado de grietas y el ligero aumento de la sección transversal de los elementos por el encamisado, y que el incremento en su capacidad de deformación se debe a la participación de la malla de acero electrosoldada.

Dada la cuantía de refuerzo longitudinal que contienen los elementos originales (sobre reforzados) para garantizar que fallaran a cortante, el modo de falla último siguió siendo por tensión diagonal, pero aunque no se pudo cambiar totalmente el modo de falla, la distribución de daño si es distinta, ya que los patrones de agrietamiento son más uniformes y distribuidos y se presentaron también algunas grietas por flexión. La mejor distribución del agrietamiento está asociado directamente al trabajo de la malla electrosoldada y fue lo que precisamente permitió la mayor capacidad de deformación de los elementos reparados con respecto a los originales. Cabe señalar que el anclaje con conectores instalados con pistola Hilti permitió que la malla electrosoldada trabajara en conjunto con la viga original, ya que la malla se deformó notablemente sin que los conectores se desprendieran de las vigas.

Los resultados obtenidos en este estudio son bastante prometedores sobre la potencial aplicación de esta técnica en la reparación de vigas cuando no se tenga que aumentar sustancialmente su capacidad resistente a flexión, sino sólo mejorar su capacidad a cortante y su capacidad de deformación. Esto se valorará con ensayos adicionales que se planean hacer en vigas subreforzadas y cuya deficiencia a resistir el cortante sea más moderada y fallen esencialmente a flexión, pero con una limitada capacidad de deformación, condiciones más cercanas a las vigas existentes en edificios muy antiguos.

7. AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en la Universidad Autónoma Metropolitana, a quien agradecemos su apoyo y patrocinio parcial. Este trabajo experimental no se hubiera llevado a cabo sin la importante participación de innumerables personas que contribuyeron en distintas capacidades. Los autores agradecen el apoyo recibido de las siguientes personas. A los ingenieros Jonathan Vergara Sánchez y Tomás Rosado Bautista, por su apoyo en la reparación de los modelos. Al técnico académico Leopoldo Quiroz Soto y a los señores Rubén Barrera, José Luis Caballero y Victorio Tenorio, que auxiliaron en la preparación, montaje y ensaye de las trabes acarteladas reparadas. Finalmente, a los M. en I. Hans Israel Archundia Aranda, Victor Hugo Salinas Vallejo y Alejandro Grande Vega por su apoyo en la instrumentación de los elementos y en la captura de datos experimentales.

8. REFERENCIAS

1. Alcocer, S. M. (1993), "RC frame connections rehabilitated by jacketing", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 5, pp. 1413-1431.
2. Alcocer, S. M., Pineda J. A., Ruiz J. y Zepeda J. A. (1996) "Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh", Memorias, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México, junio, Artículo No. 1471, CDROM.

3. Alcocer, S. M. (2004), "Rehabilitación sísmica de estructuras de mampostería", Memorias, VIII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Tlaxcala, México, CDROM.
4. Archundia, H. I. (2004), "Comportamiento a cortante de traves acarteladas de concreto reforzado", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, mayo.
5. Archundia, H. I., Tena A. y González O. M. (2005), "Estudio experimental del cortante estático en traves acarteladas de concreto reforzado", Reporte de Investigación 453, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México, junio ISBN 970-31-0491-6.
6. Archundia, H. I., Tena A. y González O. (2006), "Mecanismos de resistencia y deformación a cortante de traves acarteladas de concreto reforzado", Revista Internacional de Ingeniería en Estructuras, Vol. 11, No. 1, pp. 1-23.
7. DeAcero (2009), "Catálogo: Multimalla ferretera", Ficha técnica disponible en línea en la página web: <http://www.deacero.com>.
8. Del Valle E., Foutch D. A., Hjelmstad K. D., Figueroa-Gutiérrez E., y Tena-Colunga A. (1988), "Seismic retrofit of a RC building: a case study", Memorias, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japón, Vol. VII, pp. 451-456.
9. Fester (2009), "Catálogo de productos para concreto: Adhesivos, morteros", Fichas técnicas disponibles en línea en la página web: <http://www.fester.com.mx>.
10. Foutch D. A., Hjelmstad K. D., Del Valle E., Figueroa E., y Downs R. E. (1989), "The Mexico earthquake of September 19, 1985. Case studies of seismic strengthening for two buildings in Mexico City", Earthquake Spectra, Vol 5, No 1, noviembre, pp. 153-174.
11. González O. M., Guerrero J. J., Gómez B. y Flores F. A. (2007), "Resistencia a fuerza cortante de columnas de concreto reforzadas con camisas de acero", Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 77, pp. 53-70.
12. Hernández, O. (2007), "Reparación de traves acarteladas de concreto reforzado con encamisado de malla electrosoldada y mortero", Proyectos Terminales I y II, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, abril.
13. Hilti (2009), "Manual técnico de productos", Documento disponible en línea en la página web: <http://www.hilti.com.mx>.
14. Jirsa, J. O. (2004), "Seismic retrofit of RC structures using column jacketing or adding structural walls", Memorias, VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Tlaxcala, México, CDROM.
15. NTCM-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre.
16. Ruiz, J. (1995) "Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural", Tesis de maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, diciembre.

17. Ruiz, J. y Alcocer S. (1998), “Desempeño experimental de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas mediante el uso de mallas de alambre”, *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 59, pp. 59-79.
18. Tena-Colunga, A., del Valle E. y Pérez-Moreno D. (1996), “Issues on the seismic retrofit of a building near resonant response and structural pounding”, *Earthquake Spectra*, Vol 12, No 3, agosto, pp. 567-597.
19. Tena-Colunga, A., Archundia-Aranda H. I y González-Cuevas O. M. (2008), “Behavior of reinforced concrete haunched beams subjected to static shear loading”, *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 2, pp. 478-492. doi:10.1016/j.engstruct.2007.04.017.
20. Zepeda, J. A., Pineda J. A y Alcocer S. M. (2000), “Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada”, Reporte interno, Centro de Prevención y Desastres (CENAPRED), D.F., México.