

DISEÑO DE MALLAS ELECTROSOLDADAS PARA EL REFORZAMIENTO DE VIVIENDAS DE ADOBE

Por: Ángel San Bartolomé y Daniel Quiun
Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

Se trata de plantear una teoría que permita diseñar sísmicamente en forma sencilla a las mallas electrosoldadas que simulan vigas y columnas de confinamiento, y que aplicadas en viviendas existentes, les proporcionaron un buen comportamiento ante los terremotos del 2001 y 2007.

1. INTRODUCCIÓN

Las mallas electrosoldadas, que simulan vigas y columnas de confinamiento, se diseñan para soportar las acciones sísmicas transversales al plano de los muros de adobe “w”, en kg/m^2 , donde la carga de rotura “w” es proporcionada por la norma sísmica E.030 [1]. Estas mallas se comercializan en rollos de 90cm de ancho con 30 a 50m de largo y se recubren tarrajéandolas con mortero 1:5 (Fig.1).

Las mallas a diseñar son las esquineras (“columnas”) y las longitudinales a colocar en los bordes superiores de los muros (“vigas soleras”).

Este diseño aplica para viviendas de adobe existentes y nuevas. Debe considerarse que las mallas están compuestas por alambres de 1mm de diámetro, espaciados cada $\frac{3}{4}$ ” (cocada cuadrada), presentan una resistencia a la rotura de 220 kg/m ; asimismo, si una capa de malla no fuese suficiente, puede emplearse 2 y hasta 3 capas.



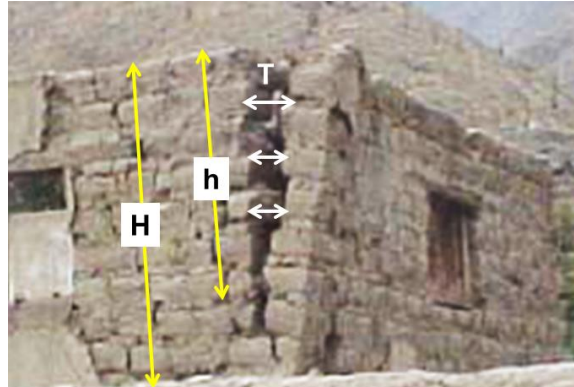
Fig.1. Malla electrosoldada, instalación y recubrimiento.

2. DISEÑO DE MALLAS ESQUINERAS

Estas mallas no necesitan anclar ni en la cimentación ni en el techo, por tanto, para reforzar viviendas existentes no se necesita desmontar el techo. Esto se debe a que los muros de adobe se deforman principalmente por fuerza cortante, existiendo poca curvatura por flexión.

Puesto que la falla por desgarramiento en el encuentro entre muros transversales se propaga desde arriba hacia abajo (Fig.2), para el cálculo de la Tracción "T" en el encuentro entre muros, puede trabajarse con una altura efectiva $h = \frac{3}{4} H$, donde "H" es la altura total del muro.

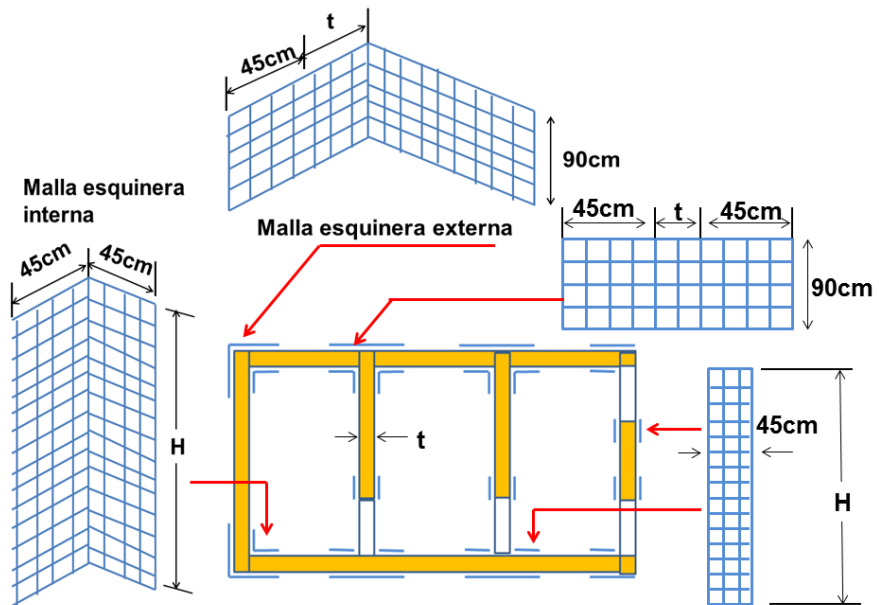
Fig.2. Propagación de la falla por desgarramiento entre muros perpendiculares.



Las mallas esquineras internas tendrán 90cm de ancho total y se extenderán verticalmente toda la altura del muro (H), doblando 45cm a 90° en cada muro (Fig.3).

Las mallas esquineras externas estarán compuestas por varias franjas continuas de altura 90cm, traslapadas verticalmente 10cm, hasta completar la altura total del muro. La longitud total de cada franja es igual a $2t + 90\text{cm}$, donde "t" es el espesor del muro.

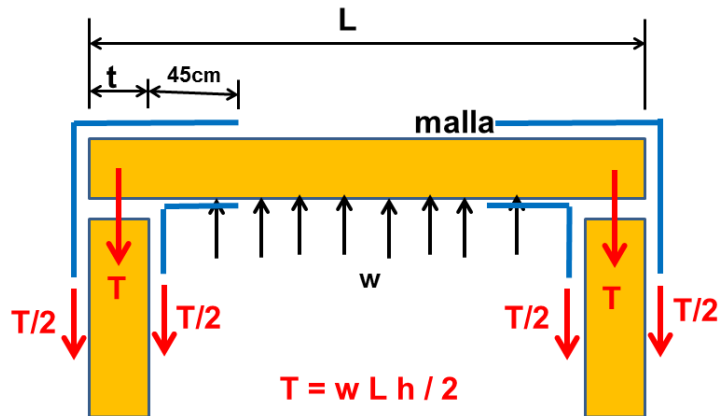
Fig.3. Mallas esquineras y otras verticales.



Luego de que el sismo genere la fisura vertical en el encuentro entre los muros transversales, tal como se muestra en la Fig.4, el muro se articulará en sus extremos y por equilibrio se determinará: $T = \frac{1}{2} w L h$ (en kg).

Esta fuerza de tracción se reparte entre las 2 mallas instaladas en cada esquina ($\frac{1}{2} T$) y deberá verificarse que la fuerza de rotura actuante no sobrepase la resistencia de la malla a tracción (220 H, en kg).

Fig.4. Diseño de Malla Esquinera.

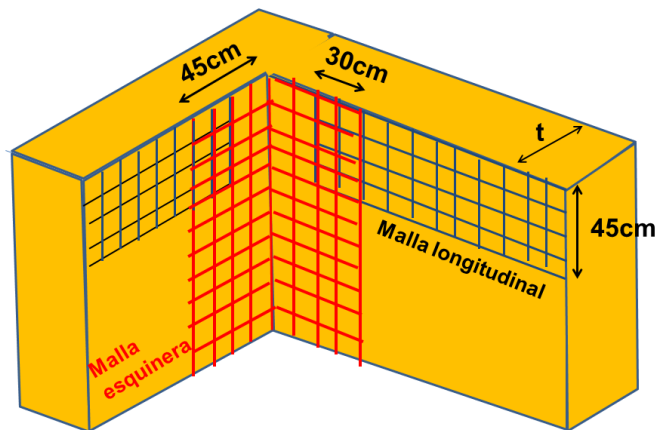


3. DISEÑO DE LAS MALLAS LONGITUDINALES

Estas mallas se instalan en la parte interna y externa cubriendo el borde superior de los muros, para simular una solera de confinamiento.

El ancho de estas mallas es 45cm y su longitud se traslapa 30cm con las mallas esquineras (Fig.5). En la zona central del muro la malla longitudinal debe ser continua.

Fig.5. Malla longitudinal y su traslape con la Malla Esquinera.



Las mallas se diseñan para controlar la grieta de tracción por flexión localizada en la parte central del muro, la misma que se propaga desde arriba hacia abajo (Fig.6). Puesto que el momento flector es máximo en la parte central superior del muro y nulo en la base, podrá trabajarse con un momento flector promedio repartido a lo largo de la altura ($\frac{1}{2} M$). Asimismo, podrá suponerse que el muro se encuentra arriostrado en 3 bordes, con el borde superior libre y con una longitud libre $a = L - 2 t$.

Fig.6. Propagación de la falla por flexión en el centro del muro y variación del momento flector "M" en la altura.



Tal como se muestra en la Fig.7, el momento flector "M" en la zona central superior, por unidad de altura, puede ser encontrado mediante la tabla 12 de la Norma E.070 [2], ver Anexo, admitiéndose que el muro está arriostrado en sus 3 bordes, mediante la expresión:

$M = m w a^2$, donde: "m" es un coeficiente adimensional de momentos y $a = L - 2 t =$ longitud del borde libre (Fig.7). Para el diseño de la malla usar $\frac{1}{2} M$.

Una vez que se calcula " $\frac{1}{2} M$ ", se le divide entre un brazo de palanca $z = 0.9 t$, para hallar la tracción promedio en la malla: $T = M / z$. De este modo, la carga de rotura "T" deberá ser menor que la resistencia de la malla: 220 kg/m, en caso contrario se agregará 1 o 2 capas de malla.

Nota: otra forma más conservadora de determinar "M" es suponiendo que la franja superior está biarticulada, con lo cual: $M = 1/8 w a^2$.

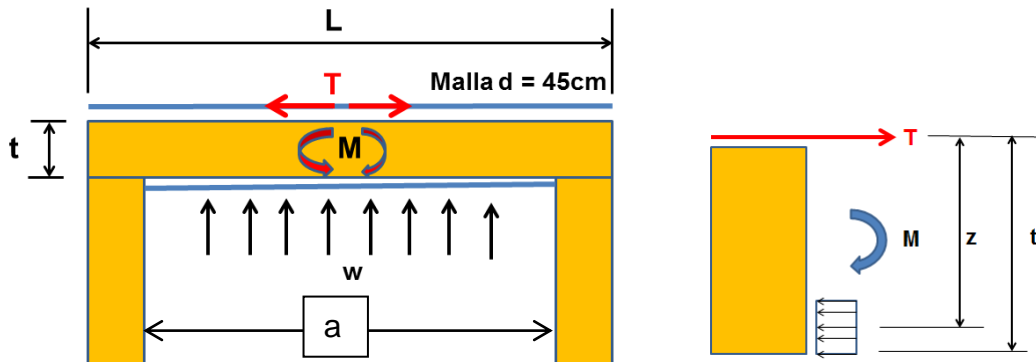


Fig.7. Diseño de la Malla Longitudinal.

4. INTEGRACIÓN DE LAS MALLAS Y EL MURO

Para que las mallas funcionen integralmente con el muro, sin desprenderse durante el sismo, es necesario interconectarlas con alambre #8 ("conector"), que pasen a través de perforaciones de 5x5 cm distanciadas cada 50cm, y doblen 10cm a 90° en los extremos (Fig.8). Estas perforaciones deben rellenarse con mortero 1:5, y en su lugar puede emplearse paja rafia (Fig.9) que pase a través de perforaciones más pequeñas espaciadas @ 25cm.

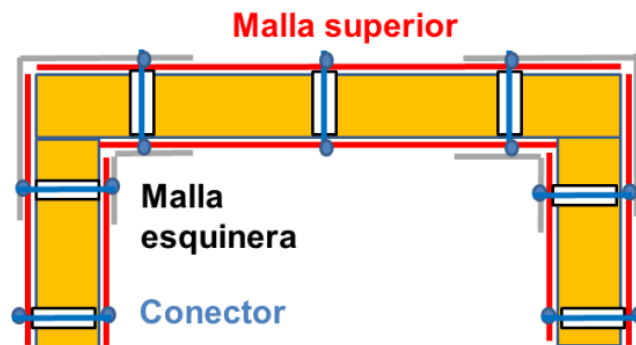


Fig.8. Distribución de conectores @ 50cm.

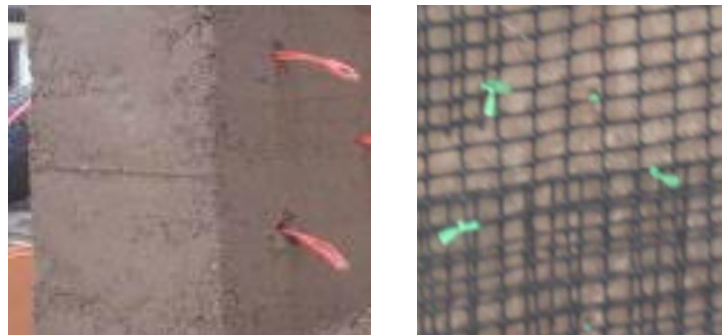


Fig.9. Conectores de paja rafia @ 25cm.

5. SECUENCIA EN LA INSTALACIÓN DE LAS MALLAS

La secuencia ordenada que se sigue para instalar las mallas, es la siguiente:

1. Limpiar toda la zona donde irán las mallas. Para el caso de viviendas existentes, debe removerse el tarrajeo (Fig.10). si es que existe.
2. Realizar las perforaciones de 5x5 cm @ 50cm donde irán los conectores (Fig.11).



Fig.10. Eliminación del tarrajeo.



Fig.11. Perforaciones @ 50cm.

3. Instalar el conector y taponar la perforación con mortero 1:5 (Fig.12).

Fig.12. Instalación del conector y taponado de la perforación.



4. Instalación de la malla fijándola con chapas (Fig.13) o retazos de madera o lata, clavándola al muro @ 25cm. Se evitará la formación de bolsones. Luego se doblará el conector a 90° y se fijará al muro con chapas o retazos de lata o madera, clavándolo con doble clavo de 2 ½ pulgadas (figuras 14 y 15).

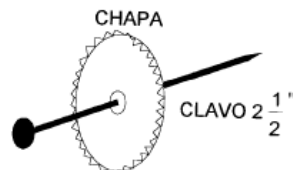


Fig.13. Instalación de la malla y fijación con clavo y chapa.

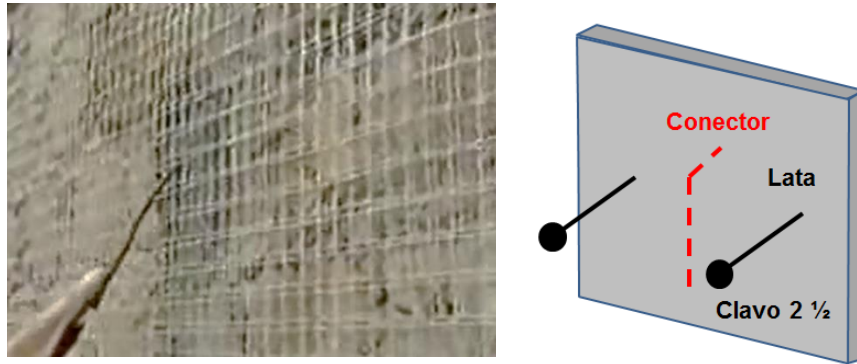


Fig.14. Doble del conector y fijación con 2 clavos y lata.

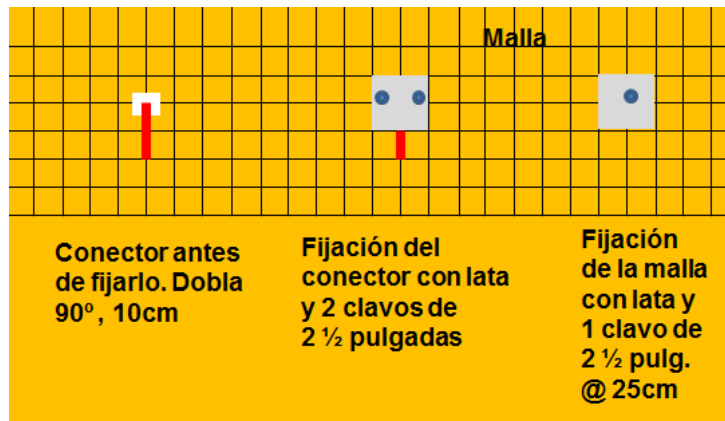
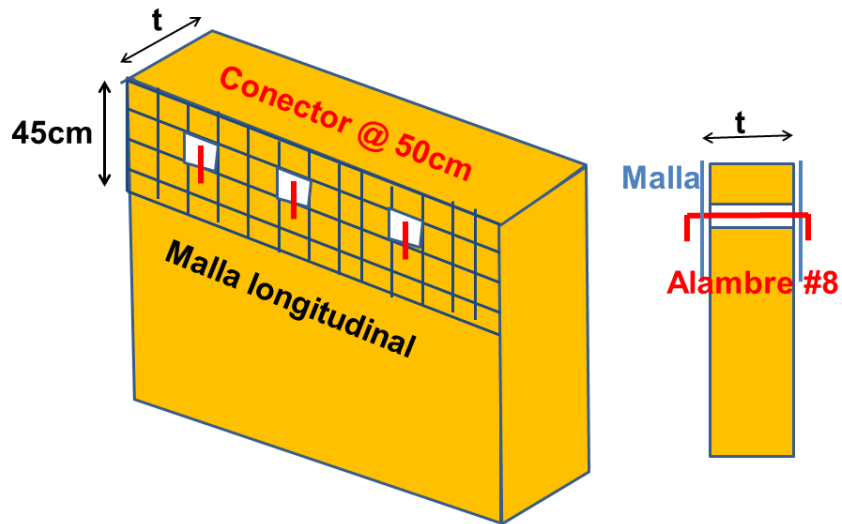


Fig.15. Ejemplo de fijación de la malla longitudinal y sus conectores.

5. Proteger a las mallas recubriéndolas con un tarrajeo cemento-arena fina 1:5 (Fig.16).

Fig.16. Tarrajeo de la malla con mortero 1:5.



6. EJEMPLO NUMÉRICO DE DISEÑO

6.1 Diseño de la Malla Esquinera

Se va suponer:

L = longitud total del muro = 4.5m

t = espesor del muro = 0.3m

w = carga de rotura = $Z U C1 \gamma t$ [1]

$Z = 0.4$, factor de zona, costa del Perú

$U = 1$, factor de uso (vivienda)

$C1 = 0.9$ (el muro está arriostrado por las mallas)

$\gamma = 1600 \text{ kg/m}^3$ = peso volumétrico del adobe

$w = 0.4 \times 1 \times 0.9 \times 1600 \times 0.3 = 173 \text{ kg/m}^2$

$H = 3\text{m}$ = altura total

$h = \frac{3}{4} H = 2.25\text{m}$ = altura efectiva para hallar T

$T = \frac{1}{2} w L h = \frac{1}{2} \times 173 \times 4.5 \times 2.25 = 876 \text{ kg}$

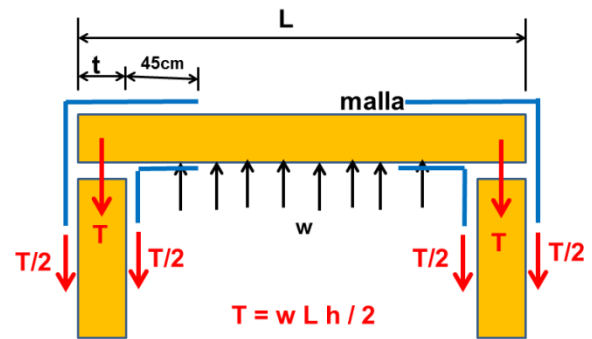


Fig.17. Diseño de malla esquinera.

Para cada malla: $\frac{1}{2} T = 438 \text{ kg}$, repartida a lo largo de la altura: $438 / 3 = 146 \text{ kg/m}$. La fuerza actuante (146 kg/m) es menor que la resistencia de la malla (220 kg/m), por lo que no se necesita colocar otra capa de malla.

6.2 Diseño de la Malla Longitudinal Superior

Se va a trabajar con los mismos datos empleados para el diseño de la malla esquinera.

L = longitud total del muro = 4.5m

t = espesor del muro = 0.3m

w = carga sísmica de rotura = $Z U C_1 \gamma t = 173 \text{ kg/m}^2$

$a = L - 2 t = 4.5 - 2 \times 0.3 = 3.9\text{m}$ = longitud libre

H = altura total = 3.0m

Suponiendo que el muro está arriostrado en 3 bordes, e ingresando a la tabla 12 de la Norma E.070 [2], ver Anexo, se obtiene:

$$H / a = 3 / 3.9 = 0.77$$

$m = 0.094$ = coeficiente de momento

$M = m w a^2 = 0.094 \times 173 \times 3.9^2 = 247 \text{ kg-m/m}$ = momento flector en la zona central superior.

Asumiéndose que $M = 0$ en la base del muro, entonces el momento promedio a lo largo de la altura del muro será: $M = \frac{1}{2} \times 247 = 124 \text{ kg-m/m}$.

Para un brazo de palanca $z = 0.9 t = 0.9 \times 0.3 = 0.27\text{m}$, la tracción en la malla resulta: $T = M/z = 124 / 0.27 = 459 \text{ kg/m}$. La tracción actuante (459 kg/m) resulta 2.09 veces mayor que la resistencia de la malla (220 kg/m), por lo que debe emplearse 2 capas de malla (Fig.19) en la zona central superior. La segunda capa debe extenderse la mitad de la longitud libre: $\frac{1}{2} a \approx 2\text{m}$.

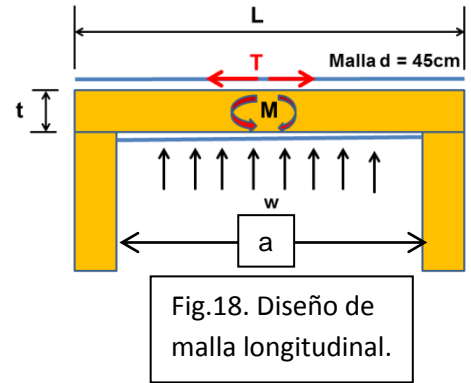
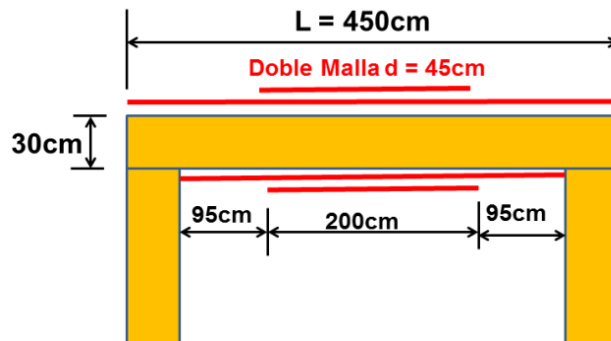


Fig.19. Doble malla longitudinal.



7. ANÁLISIS DEL EJEMPLO NUMÉRICO MEDIANTE EL SAP2000

Con la finalidad de verificar los resultados numéricos del análisis hecho manualmente en el acápite 6, se modeló al muro en diseño mediante el programa SAP2000.

7.1 Modelo matemático y datos para el SAP

- a = luz libre = 390cm
- H = altura total = 300cm

- $t = \text{espesor} = 30\text{cm}$
- Elementos finitos tipo Shell $19.5 \times 18.75\text{ cm}$ (total $20 \times 16 = 320$ elementos de adobe)
- $E = \text{módulo de elasticidad del adobe} = 3000\text{ kg/cm}^2$
- $\nu = \text{módulo de Poisson} = 0.25$
- Bordes verticales y horizontal inferior con apoyo articulado (arriostres)
- La carga repartida $w = 173\text{ kg/m}^2$, se multiplicó por el área ($3 \times 3.9\text{ m}^2$) para hallar la carga total, luego se dividió entre el número de nudos libres ($19 \times 16 = 304$), para así obtener la carga concentrada sísmica en cada nudo: $F_y = 6.66\text{ kg}$.

En la Fig.20 se muestra el modelo matemático.

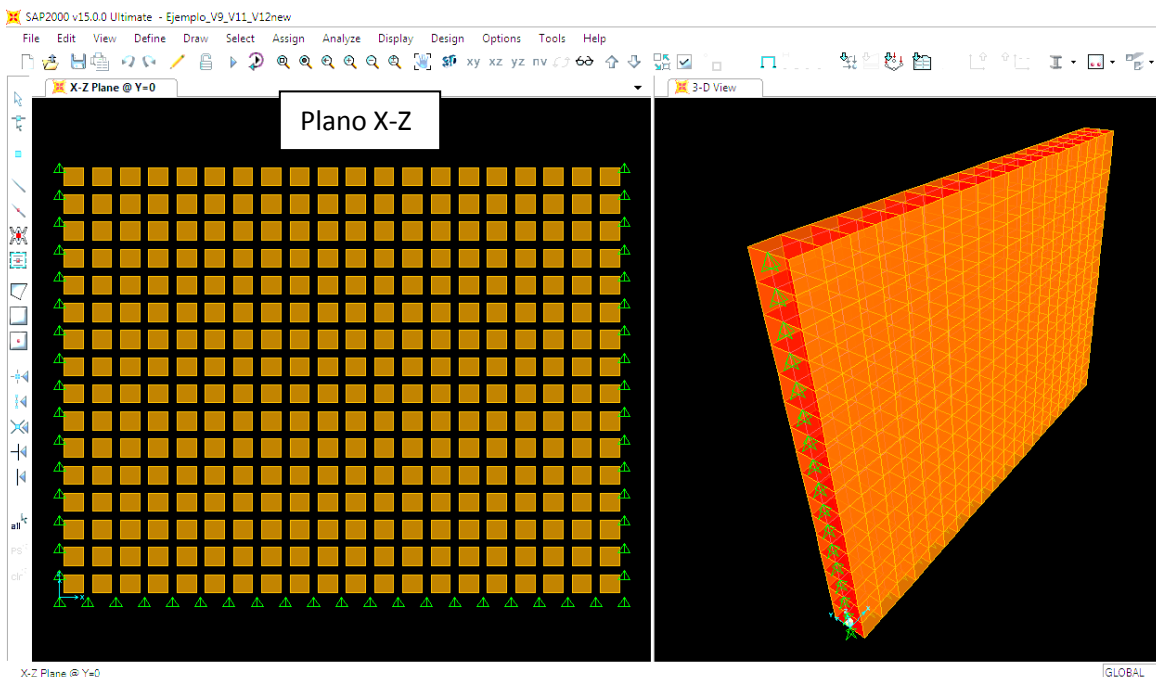


Fig.20. Modelo de elementos finitos para el muro arriostrado en 3 bordes.

7.2 Resultados del SAP

Para el diseño de la malla longitudinal superior se requiere conocer el momento flector en la zona central superior (M). En el ejemplo numérico manual se obtuvo $M = 247\text{ kg-m/m} = 247\text{ kg-cm/cm}$. Aparte se supuso que M variaba linealmente a lo largo de la altura y era nulo en la base. Ver el acápite 6.2.

Para el SAP este momento es M_{11} , y es máximo en el centro superior del muro: $M_{11} = 270 \text{ kg-cm/cm}$ (Fig.21). En el centro es la mitad y en la base es nulo. De este modo, se concluye que no hay mayor diferencia con el análisis manual.

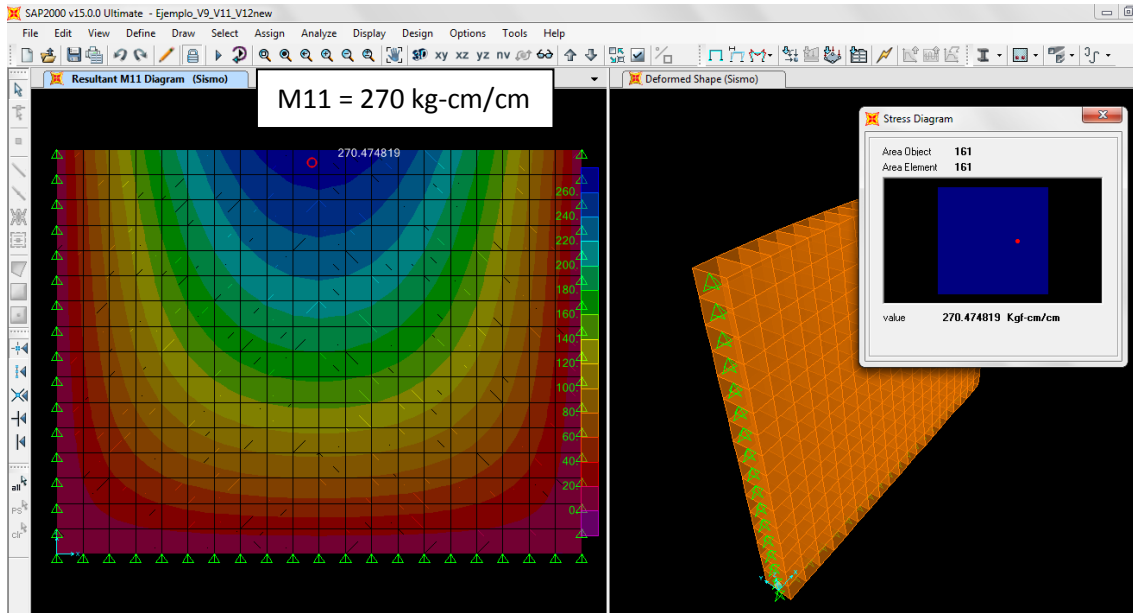


Fig.21. Variación del momento flector M_{11} .

Para el diseño de la malla esquinera se requiere conocer la tracción en el encuentro entre los muros transversales. Esta tracción resultó $T = 876 \text{ kg}$ para el análisis manual (ver el acápite 6.1).

Para el caso del análisis con el SAP, esta tracción se obtiene sumando las reacciones "Ry" (figuras 22 y 23) en uno de los bordes verticales. Estos resultados están tabulados desde arriba hacia abajo en la Tabla 1.

208.06	37.5	42.3	44.96	47.1	48.4	49.0	49.08	48.4	47.06	44.9	41.9	37.7	32.2	24.7	14.1
--------	------	------	-------	------	------	------	-------	------	-------	------	------	------	------	------	------

La suma total de las reacciones de la Tabla 1 es: $T = 817 \text{ kg}$, valor que difiere poco del obtenido manualmente ($T = 876 \text{ kg}$). Sin embargo, en la Tabla 1 se nota una gran reacción en el borde extremo superior (208 kg), para después mantenerse uniforme (46 kg en promedio), y en la cuarta parte inferior del muro, la reacción decrece (Fig.23).

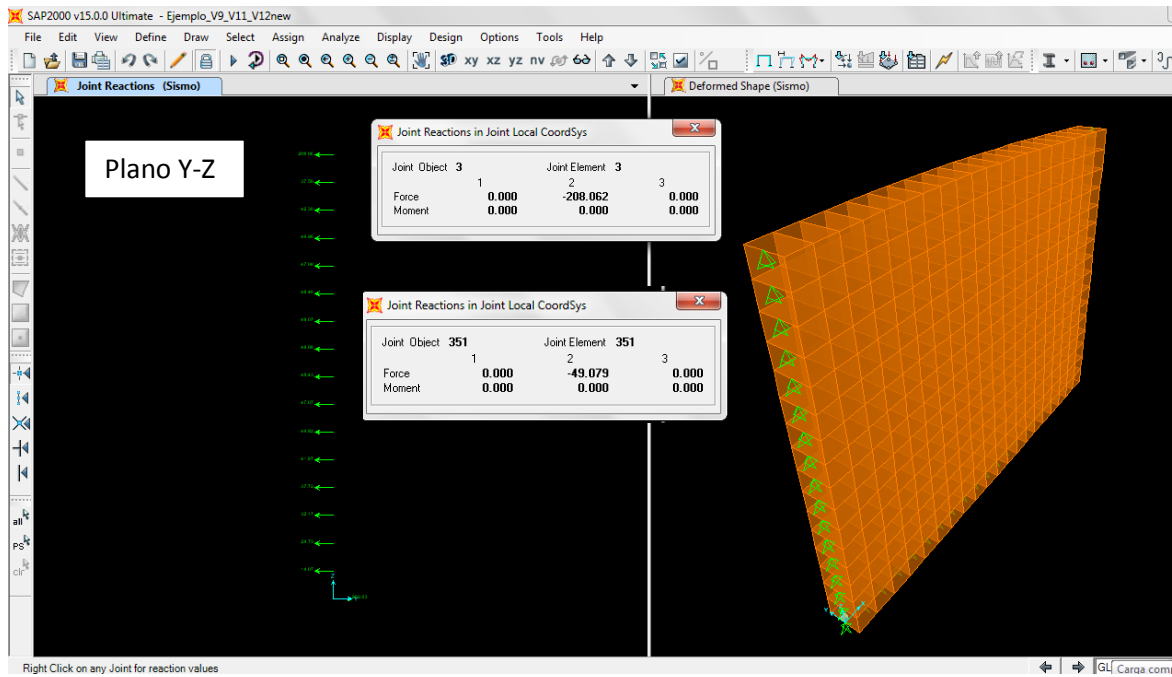
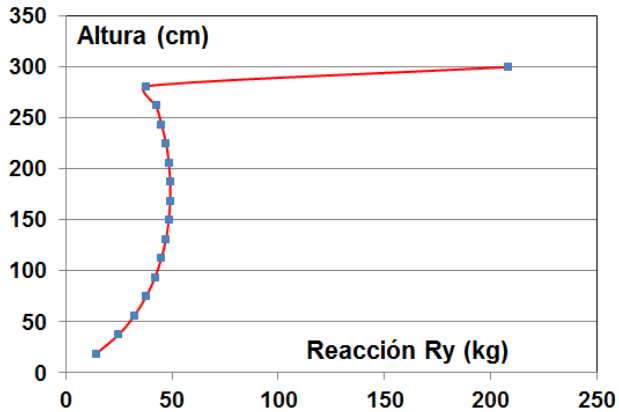


Fig.22. Reacciones "Ry" en uno de los bordes verticales.

Fig.23. Variación de la reacción "Ry" en uno de los bordes verticales.



8. CONCLUSIONES

1. La malla electrosoldada dispuesta en franjas simulando vigas y columnas de confinamiento, demostró su efectividad ante los terremotos del Sur (2001, Mw = 8.4) y el de Pisco (2007, Mw = 8), cuando 10 viviendas existentes, con todos sus defectos, fueron reforzadas en el año 1998. Estas viviendas reforzadas no sufrieron daño alguno, mientras que las viviendas vecinas tuvieron fuertes daños o colapsaron (Fig.24, [3]).



Fig.24. Comportamiento de las viviendas reforzadas con la malla y sin reforzar ante los terremotos del 2001 y 2007.

2. Es necesario realizar ensayos de tracción por flexión en vigas de adobe reforzadas con la malla electrosoldada y recubiertas con mortero, para así determinar el aporte del tarrajeo a la resistencia. En estos ensayos debe variarse la cantidad de capas de malla. Cabe señalar que en el ejemplo numérico resuelto en este artículo, se supuso que sólo la malla aportaba resistencia a flexión.
3. En el ejemplo numérico se trabajó para un muro externo con un coeficiente sísmico $C1 = 0.9$, válido según [1] para muros internos. No se usó $C1 = 1.3$, porque con las mallas los muros cambian de estado, de no arriostrados a arriostrados.
4. Los resultados de la técnica de elementos finitos coincidieron con la técnica manual de cálculo, en la tracción entre muros perpendiculares y en el momento flector superior central.

9. REFERENCIAS

1. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.030, "Diseño Sismorresistente". Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, primera edición, 2006.
2. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.070, "Albañilería". Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, primera edición, 2006.
3. Á. San Bartolomé, 2013. Blog de Investigaciones en construcciones de adobe, tapial, quincha y piedra. <http://blog.pucp.edu.pe/blog/adobetapial>

ANEXO

Tabla 12 de la Norma E.070 “Albañilería” [3]

TABLA 12 VALORES DEL COEFICIENTE DE MOMENTOS "m" y DIMENSION CRITICA "a"								
CASO 1. MURO CON CUATRO BORDES ARRIOSTRADOS								
a = Menor dimensión								
b/a = 1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	∞	
m = 0,0479	0,0627	0,0755	0,0862	0,0948	0,1017	0,118	0,125	
CASO 2. MURO CON TRES BORDES ARRIOSTRADOS								
a = Longitud del borde libre								
b/a = 0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	∞
m = 0,060	0,074	0,087	0,097	0,106	0,112	0,128	0,132	0,133
CASO 3. MURO ARRIOSTRADO SOLO EN SUS BORDES HORIZONTALES								
a = Altura del muro								
m = 0,125								
CASO 4. MURO EN VOLADIZO								
a = Altura del muro								
m = 0,5								