

# DISEÑO SISMICO DE MUROS DE ADOBE REFORZADOS CON GEOMALLAS

Daniel Torrealva

DI - SIC - 2009 - 01  
LIMA, SETIEMBRE 2009

# DISEÑO SÍSMICO DE MUROS DE ADOBE REFORZADOS CON GEOMALLAS

Daniel Torrealva



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

DISEÑO SÍSMICO DE MUROS DE ADOBE REFORZADOS CON GEOMALLAS

Autor: Daniel Torrealva

Composición y diagramación: Editora & Comercializadora CARTOLAN E.I.R.L.

Tiraje: 500 ejemplares

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2009-12320

ISBN: 978-9972-659-98-0

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin previa autorización escrita del autor y el editor de la misma.

Impreso en el Perú.

## PROLOGO DEL AUTOR

El año 1998 un sismo de regular intensidad ocurrido en Cochabamba, Bolivia produjo daños considerables en las viviendas de adobe que son mayoritarias en la zona. Mediante un aporte del Banco Mundial, el gobierno de Bolivia empezó un proceso de reconstrucción de viviendas rurales en adobe para lo cual fui convocado como asesor técnico. Mi experiencia en el refuerzo sísmico de viviendas de adobe se limitaba a utilizar materiales naturales como la caña, bambú y madera, los cuales no era posible implementar en el proyecto debido a su escasa disponibilidad en la zona afectada. Finalmente se optó por un refuerzo que combinaba el concreto armado y tensores de acero, materiales industriales que si era factible conseguir. En el año 2001 una experiencia similar en El Salvador con la diferencia que eran decenas de miles las viviendas rurales afectadas o destruidas hizo evidente que se debía buscar un material de refuerzo alternativo y de producción industrial para construcciones de adobe que reemplace a los materiales naturales que tradicionalmente habían sido estudiados como refuerzo sísmico de estas construcciones.

Con la asesoría del Profesor Fernando Torres, especialista en polímeros se inicio en el 2002, el trabajo de buscar materiales que reemplacen las cañas verticales y horizontales usadas como refuerzo sísmico en viviendas de adobe por elementos industriales, sugiriendo que para la caña chancada horizontal se usaran las geomallas de polipropileno de amplia utilización en proyectos de geotecnia.

En el año 2003 tuve la experiencia de realizar una pasantía de estudio en el Instituto Getty de Conservación de Los Ángeles donde Francois Leblanc, Jefe de los Proyectos de Campo y Mary Hardy, Jefa del Proyecto TERRA me apoyaron para realizar un proyecto semilla de investigación experimenta usando las geomallas como refuerzo sísmico exterior de construcciones históricas de adobe dada su compatibilidad con el material de base y durabilidad frente a agentes externos. En este proyecto se realizó el primer ensayo de simulación sísmica donde se demostró la eficacia de esta técnica de refuerzo. A este proyecto, le siguieron luego una serie de ensayos realizados por otros investigadores, en los cuales por razones de costo utilizaron mallas de menor calidad y diferentes configuraciones de refuerzo. Estos ensayos corroboraron la conveniencia de usar geomallas biaxiales con características de resistencia y durabilidad certificadas. Esta técnica de refuerzo se está aplicando en diversos proyectos de reconstrucción de viviendas rurales después del sismo del 15 de Agosto en Pisco.

Si bien los ensayos de simulación sísmica representan con mucha fidelidad la eficacia o no de las soluciones en estudio, las conclusiones no pueden ser sino comparativas entre ellas dada la dificultad de establecer a priori relaciones matemáticas que se puedan corroborar con estos ensayos, y mientras ello no sea posible el adobe seguirá siendo considerado un material "no ingenieril".

Los ensayos de simulación sísmica sin embargo han demostrado que el conjunto adobe-malla tiene un comportamiento sustancialmente diferente de todas las otras técnicas de refuerzo experimentadas hasta entonces, ya que se trata de un material compuesto con una casi perfecta compatibilidad para la transmisión de esfuerzos de compresión y

tracción entre ellos lo cual abre la posibilidad de realizar ensayos de caracterización de propiedades estructurales como la resistencia a flexión y fuerza cortante cíclica en forma similar a los que se utilizan en materiales normales de ingeniería.

La propuesta de diseño de muros de adobe reforzados con geomallas que aquí se presenta por primera vez se basa en proyectos de investigación realizados por alumnos de tesis de pre y posgrado: Yván Espinosa y Cecilia Cerrón en los ensayos de flexión en tres puntos de muros verticales de adobe reforzados y tartajeados con barro, Silvana Ojeda en el ensayo del muro a corte cíclico coplanar, Gonzalo Peralta en los ensayos de muros verticales en flexión usando un tarrajeo de cemento/arena y Patricia Santillán en los ensayos de muros horizontales a flexión en cuatro puntos, a todos ellos mi reconocimiento y gratitud por el trabajo realizado.

Queda aun mucho por trabajar en esta línea de investigación pero se ha demostrado que por primera vez es posible estudiar el adobe reforzado como un material que sigue las leyes de la mecánica convencional en forma similar a la de otros materiales de uso común en ingeniería.

Daniel Torrealva

# CONTENIDO

---

1. Introducción.	7
2. Las geomallas como refuerzo en construcciones de adobe.	8
3. Comprobación experimental de la eficacia de las geomallas como material de refuerzo.	9
4. Resistencia a la fuerza cortante en el plano del muro.	10
5. Resistencia a la flexión fuera del plano.	15
6. Base conceptual para el diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomallas.	20
7. Análisis sísmico de las edificaciones de adobe reforzado.	22
8. Procedimiento de diseño.	25
9. Ejemplo de diseño.	25
10. Referencias.	31



## DISEÑO SÍSMICO DE MUROS DE ADOBE REFORZADOS CON GEOMALLAS

*Daniel Torrealva*

Profesor Principal del Departamento de Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica del Perú

### 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de ser la tierra en sus diversas formas de utilización el material de construcción más usado en el mundo, desde el punto de vista técnico esta clasificado como un material “no ingenieril”. Esto significa que no se le pueden aplicar las técnicas de análisis y diseño que son corrientes para otro tipo de materiales como la madera, el acero, la albañilería de ladrillo reforzada y el concreto armado. Dos son las principales causas para esta clasificación: la nula resistencia a la tracción del material que no permite el comportamiento elástico en solicitaciones que involucren esfuerzos cortantes o de tracción y la imposibilidad de normalizar su fabricación y con ello sus características mecánicas. Otros materiales cuya resistencia intrínseca a tracción es despreciable desde el punto de vista estructural como la albañilería simple y el concreto simple han resuelto esta limitación mediante refuerzos de acero que se integran al material original creando materiales compuestos donde el refuerzo de acero toma las tracciones y corte que dichos materiales no son capaces de soportar.

En muchos países donde se utiliza la construcción con tierra y además se encuentran en zonas de alta sismicidad se han propuesto una serie de técnicas de refuerzo para este tipo de construcciones. Particularmente en el Perú que es uno de los países donde más se ha desarrollado la técnica de refuerzo sísmico de construcciones de adobe, el proceso empieza luego del terremoto de Huaraz en 1970.

Dentro de las técnicas de refuerzo propuestas en nuestro medio, algunas de las cuales están validadas por la actual norma de construcción NTE.080, las más comunes son:

- Refuerzo interior de caña, caña vertical entera cada 40 a 60 centímetros y caña vertical chancada cada tres hiladas formando una malla interior de caña.
- Vigas soleras de madera o concreto armado conectadas con refuerzos verticales.
- Mallas de acero electrosoldadas colocadas en ambas caras de los muros en forma equivalente a vigas y columnas esquineras y revestidas de mortero de cemento arena.
- Vigas y columnas de concreto armado.
- Tensores de acero horizontales, especialmente usados en construcciones históricas.
- Llaves de madera en esquinas, también usadas principalmente en construcciones históricas.

Otras técnicas de refuerzo no muy comunes involucran el uso de canastillas interiores de alambre soldado, fibras de carbono y cintas de polímero colocadas como confinamiento exterior de los muros.

Todas estas técnicas de alguna manera incrementan la resistencia sísmica de las edificaciones de tierra pero ninguna de ellas ha sido reconocida como una solución de ingeniería ante la imposibilidad de poder determinar a priori su nivel de resistencia ni poder establecer por otro lado la cantidad de refuerzo necesario para alcanzar una seguridad deseada. En otras palabras existen técnicas de refuerzo más o menos efectivas pero no existen herramientas de ingeniería que puedan usarse para analizar o diseñar con esas técnicas.

## 2. LAS GEOMALLAS COMO REFUERZO EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE

En la búsqueda de un material de refuerzo que sea compatible con el adobe, tenga propiedades estándar y sea fácil de implementar, las geomallas biaxiales aparecen como el material de refuerzo por excelencia para las construcciones de tierra. Recientes experimentos han demostrado que la geomalla forma con el adobe un material compuesto donde esta toma las tracciones y aquel las compresiones en la misma forma que las varillas de acero son refuerzo del concreto.

El material de refuerzo propuesto posee propiedades estándar de resistencia y rigidez, siendo fabricado de mantas de polímero de alta densidad, las cuales son perforadas a intervalos regulares y luego estiradas en ambas direcciones a temperatura y fuerza controlada, a fin de obtener una malla biaxial con aberturas rectangulares, nudos rígidos y costillas flexibles (Figura 1). Este material es muy utilizado como refuerzo de subrasantes en pistas sobre terrenos inestables, como refuerzo de muros de tierra armada y otras aplicaciones geotécnicas, siendo así que se promociona como el refuerzo de estructuras de tierra para obras de ingeniería. Se encuentran disponibles en varios modelos según sus características mecánicas.



Figura 1. Geomalla biaxial de nudos rígidos.

Se realizaron ensayos de tracción en la geomalla biaxial utilizando la norma ASTM D6637-01 (Figura 2). Los resultados de las fuerzas obtenidas en la probeta de 0,25 m de ancho y para cada dirección se muestran en la Figura 3.



Fig. 2: Ensayo de tracción en la geomalla biaxial

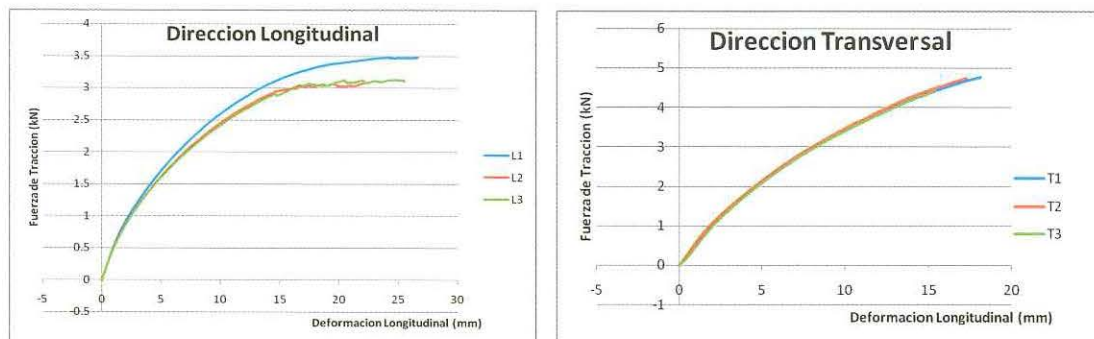


Fig. 3: Resultados del ensayo de tracción en la geomalla biaxial

La resistencia por metro de ancho es 14kN en la dirección longitudinal y 19.2 kN en la dirección transversal. Estos resultados son cercanos a los proporcionados por el fabricante de las geomallas.

### 3. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE LAS GEOMALLAS COMO MATERIAL DE REFUERZO.

La idea de utilizar geomallas como refuerzo de construcciones de adobe nació en el año 2001 después de que investigadores de la PUCP viajaron a El Salvador como asesores en la reconstrucción de viviendas destruidas por los sismos ocurridos en Enero y Febrero de ese año. La imposibilidad de conseguir cañas para utilizarlas como refuerzo de construcciones de adobe, hizo que se planteara la necesidad de crear un refuerzo industrial que reemplazara las cañas de bambú utilizadas como refuerzo interior, planteándose la posibilidad de usar tubos de PVC en vez de las cañas verticales y geomallas en vez de la caña chancada horizontal.

Sin embargo no fue sino hasta el año 2004 en que la investigación experimental con geomallas como refuerzo de muros de adobe empezó en la Pontificia Universidad Católica del Perú (Referencia 2) mediante la comparación de muros reforzados con diversos materiales industriales, entre ellos la geomalla, sometidos a fuerza horizontal cíclica. En el año 2005 se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP y con el apoyo del Instituto Getty de Conservación, el primer ensayo de simulación sísmica en un módulo de adobe a escala natural completamente reforzado con geomalla biaxial y tarrajado la mitad del módulo (Referencia 6) (Figura 4).



Figura 4. Módulo de adobe reforzado con geomalla y parcialmente tartajado, antes del ensayo de simulación

#### 4. RESISTENCIA A LA FUERZA CORTANTE EN EL PLANO DEL MURO.

Desde el punto de vista de la resistencia sísmica, una de las principales propiedades de los muros estructurales es su capacidad de resistir fuerza cortante coplanar, la cual puede ser obtenida por medio de ensayos cíclicos dividiendo la fuerza horizontal entre la sección transversal del muro. En dos diferentes proyectos de investigación (Referencia 2 y Tesis de Silvana Ojeda PUCP) se ensayaron tres muros de similar geometría, el muro M1 sin refuerzo, el Muro M2 reforzado con geomalla pero sin tarrajeo y el M3 con refuerzo y tarrajeo de barro.

Los resultados muestran que en el caso del muro M1 sin refuerzo, el comportamiento es prácticamente elástico hasta que alcanza su máxima resistencia ( $0.18\text{kg/cm}^2$ ), luego de lo cual se producen unas cuantas grietas diagonales en ambos sentidos (Figura 5). La curva fuerza-deformación de la Figura 6 muestra una fuerza máxima de  $38\text{kN}$  y después hay una pendiente negativa, lo que implica la falla del sistema.



Figura 5. Muro sin refuerzo ensayado a corte cíclico

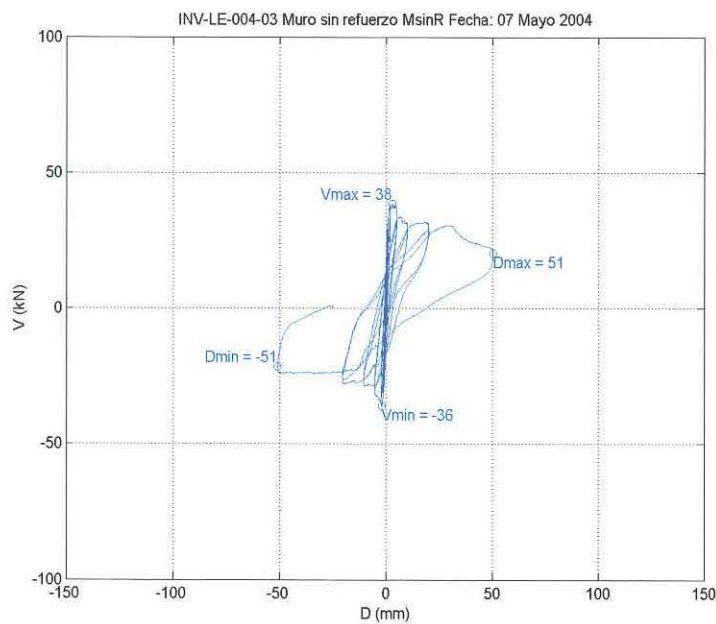


Figura 6. Fuerza cortante vs. Desplazamiento horizontal, muro sin refuerzo.

En el muro M2 envuelto con la geomalla, se aprecia un esquema de grietas similar al del muro sin refuerzo alcanzando prácticamente la misma fuerza cortante máxima (Figura 7). Sin embargo el comportamiento post fisuración es muy diferente, ya que después de ese límite el comportamiento es dúctil con gran capacidad de deformación manteniendo el nivel de resistencia elástica, lo que se puede apreciar en el grafico fuerza-deformación de la Figura 8.



Figura 7. Ensayo de corte del muro enmallado y sin tarrajeo

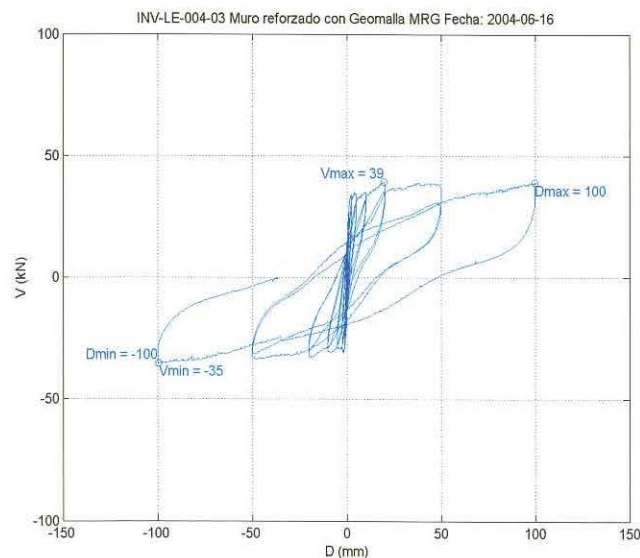


Figura 8. Fuerza cortante vs. Desplazamiento horizontal de muro enmallado sin tarrajeo.

En el caso del muro M3, reforzado y tarrajado el esquema de grietas es muy diferente de los anteriores, según se aprecia en la Figura 9. Las grietas son mucho más cortas y distribuidas en toda la superficie del muro por efecto de la malla embebida en el tarrajeo. La grafica Fuerza – Deformación (Figura 10) muestra unos ciclos histereticos con capacidad de absorción de energía y un valor máximo de cortante luego del cual el muro pierde resistencia por causa del desprendimiento del tarrajeo, y que la malla se comporte ya no como refuerzo integrado al muro sino como elemento de confinamiento semejante al Muro 2 continuando su capacidad de deformación.



Figura 9. Muro enmallado y tarrajado ensayo de corte cíclico horizontal.

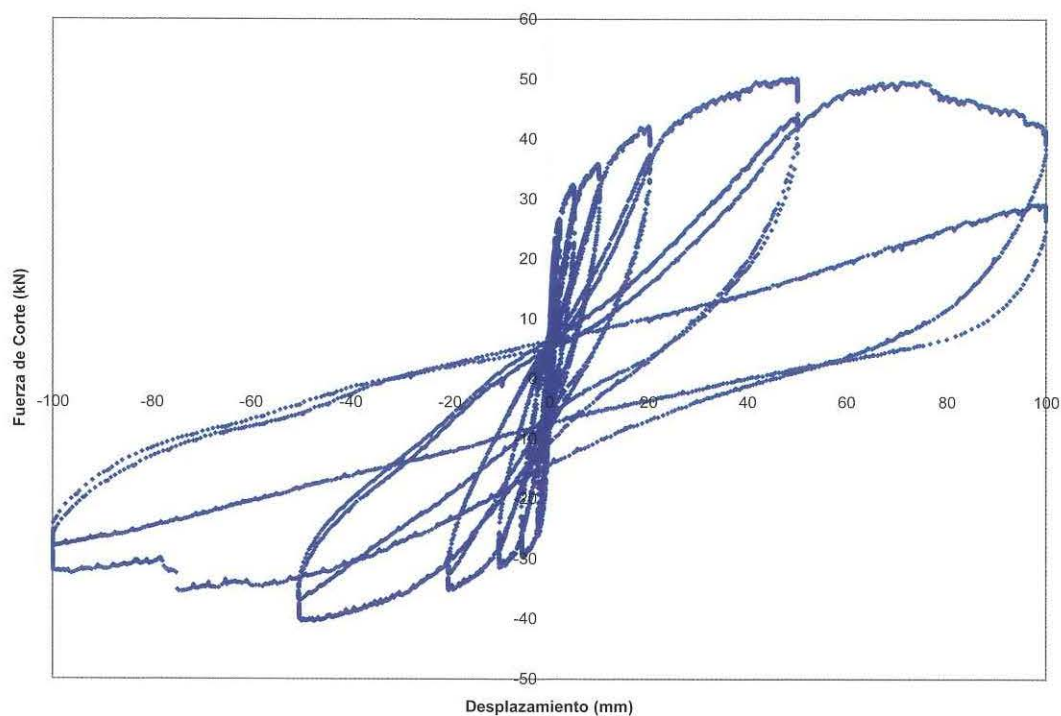


Figura 10. Fuerza cortante vs. Desplazamiento horizontal de muro enmallado y tarrajado.

En la Figura 11 se puede apreciar que, en su estado final, el Muro 3 está interiormente deteriorado sin embargo la malla de refuerzo suministra el confinamiento necesario para que se pueda desarrollar gran capacidad de deformación y se mantenga la integridad del muro.



Figura 11. Deterioro interno del muro después de haber perdido el tarrajeo.

Como el Muro 3 tenía diferente espesor, para hacer las comparaciones de comportamiento en los tres muros se optó por graficar la envolvente de la rama positiva de las curvas fuerza – desplazamiento y utilizar las variables de esfuerzo cortante y distorsión angular. De este gráfico (Figura 12), se aprecia que a medida que se producen los sucesivos ciclos de carga, y para una distorsión angular del 2.5% equivalente a un esfuerzo cortante medio de 0.04 MPa, se produce una paulatina disminución de la resistencia al corte tendiendo al nivel de resistencia del muro M2 sin tarrajeo..

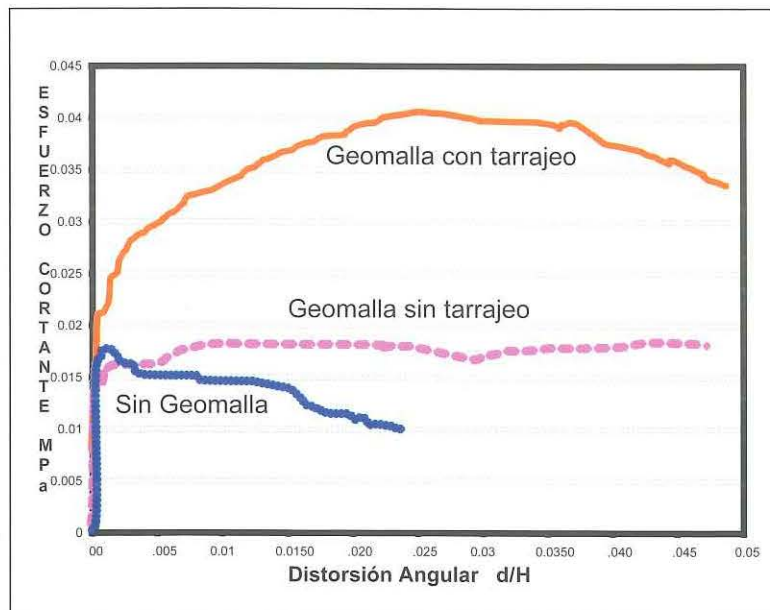


Figura 12. Curvas comparativas Esfuerzo Cortante vs. Deformación Angular.

## 5. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN FUERA DEL PLANO.

La resistencia al momento flector es una propiedad importante en todo elemento que se use con fines estructurales., en el caso de los muros de adobe, esta propiedad es importante para determinar su capacidad de resistir fuerzas perpendiculares al plano del muro que producen momento flector en lugares críticos como las esquinas superiores de los muros.

Se realizaron ensayos de muros envueltos con geomallas y tarrajeados con barro sometidos a fuerza concentrada transversal. Los muros son de dimensiones de 0.80m de ancho, 1.60m de altura y 0.22m de espesor. Se ensayaron tres muros en posición vertical con fuerza concentrada al centro de la altura y tres muros en posición horizontal con dos fuerzas concentradas a los tercios de la luz para simular lo más posible la acción de momento flector puro.

### 5.1 Ensayos en flexión de muros verticales.

En el caso de los muros verticales, uno de ellos fue sin refuerzo y dos con refuerzo de geomalla y tarrajeo de barro. La figura 6 muestra una secuencia de fotos con los desplazamientos crecientes en flexión transversal y la generación y propagación de grietas de flexión en uno de los muros reforzados, con un comportamiento muy similar al de un elemento de concreto armado. El máximo desplazamiento alcanzado en el centro de la luz fue de 50mm en comparación con el desplazamiento máximo del muro no reforzado que fue de 2mm al momento de alcanzar su resistencia máxima. La fuerza máxima lateral fue de 11kN según se puede apreciar en las curvas comparativas del muro sin refuerzo y el reforzado, (Figura 7). El máximo desplazamiento de 50mm se debió a que desplazamientos mayores podrían poner en riesgo la estabilidad del sistema de ensayo, por esta razón no se pudo ensayar el muro hasta su resistencia última quedando la incógnita si fallaría por tracción con rotura de malla o por compresión del adobe.



Figura 13. Secuencia del ensayo a flexión mostrando el comportamiento compatible entre geomalla y adobe.

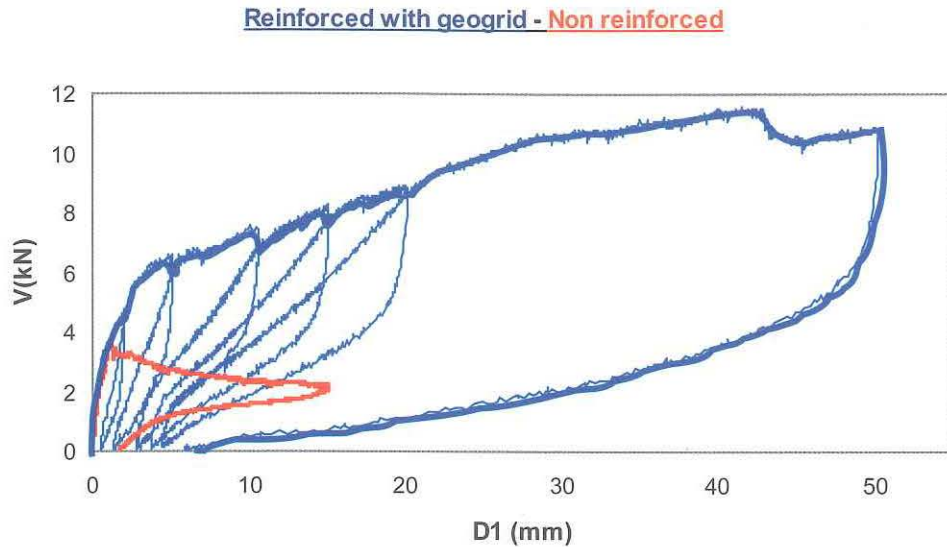


Figura 14. Curvas comparativas de Fuerza vs Desplazamiento horizontal entre muros reforzados y sin refuerzo.

En muros verticales, el cálculo del momento flector resistente por el conjunto adobe-malla debe considerar la influencia del peso propio de la parte superior del muro por efecto de la geometría.

## 5.2 Ensayos de vigas de adobe en flexión.

Se decidió luego ensayar tres muros en posición horizontal para poder eliminar la influencia del peso propio en la capacidad resistente a momento del muro y para poder llevar el ensayo hasta la rotura. En este caso los tres muros fueron reforzados ya que un muro de adobe sin refuerzo no sería capaz de soportar su peso propio en forma horizontal simplemente apoyado. También se pudo colocar las cargas verticales en los tercios de la luz para tener un tercio central donde la influencia de la fuerza cortante fuera mínima.

El primer muro se ensayó en forma monotónica con carga creciente hasta alcanzar un desplazamiento vertical máximo de 100mm donde se produjo una falla superficial por corte en los tercios laterales del muro horizontal. El segundo muro se ensayó con el procedimiento de carga y descarga eligiendo los desplazamientos de 5, 10, 20, 50mm y 100mm, en ninguno de estos muros se produjo la rotura de la malla.

En todos los casos, el comportamiento del muro horizontal fue similar al muro ensayado en posición vertical y a su vez similar al comportamiento de vigas de concreto armado ensayadas a flexión pura. La formación de grietas de tracción por flexión en primer término y luego la aparición de grietas de corte superficial en los tercios extremos del espécimen, tal como se aprecia en la figura 15.



Figura 15. Ensayo a flexión de muro de adobe reforzado. La distribución de grietas corresponde a un material compuesto.

El tercer muro se ensayó en forma semejante al segundo pero luego de la última fase de carga y descarga de 100mm, se continuó cargando el espécimen hasta que se produjo la falla por rotura de la malla (Figura 16). En este caso la carga última alcanzada fue de 12.60kN (Figura 17), valor muy aproximado a la carga máxima calculada tomando en cuenta la resistencia última de la malla en tracción por un brazo de palanca equivalente al espesor del muro que fue 12.35kN.



Figura 16. Falla en flexión por rotura de la geomalla en tracción.

En base al comportamiento observado en los ensayos de carga y descarga en muros verticales, se puede afirmar que el conjunto adobe malla, cuando está tarrajado, posee un comportamiento elástico no lineal, con gran capacidad de deformación y disipación de energía.

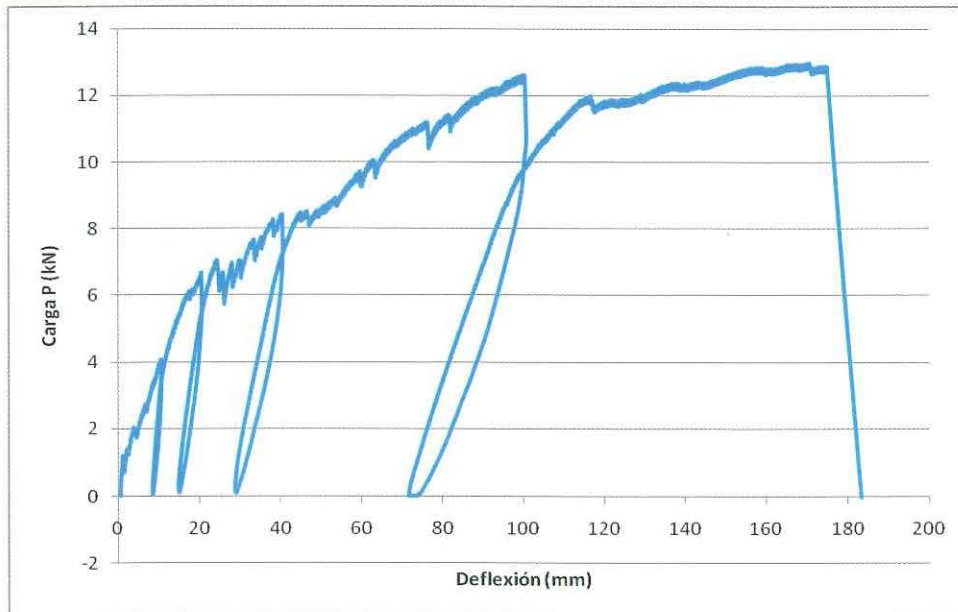


Figura 17. Gráfico Fuerza -Desplazamiento del muro horizontal ensayado a la rotura.

### 5.3. Inspección de los especímenes post ensayo.

Luego de los ensayos se inspeccionaron los muros determinando que la ubicación de las grietas de flexión en la parte central de los muros coincide con las juntas de mortero (Figura 18) y se propaga en todo el espesor del muro. En la zona de máximo esfuerzo cortante correspondiente al tercio lateral, las grietas también se produjeron mayoritariamente por las juntas como se aprecia en la Figura 19 aunque en algunos casos se noto la falla de adobes.

En el ensayo que se llevó hasta la rotura de la malla de refuerzo, se encontraron fisuras en la zona de máxima compresión en algunas unidades, lo que indica que el adobe trabajó hasta su resistencia ultima, sin embargo la falla de flexión por compresión del adobe no se llega a producir pues la geomalla actúa como elemento de confinamiento eficaz que impide la pérdida de material por compresión manteniendo el equilibrio de fuerzas hasta que la falla se produce por rotura de la malla en tracción.

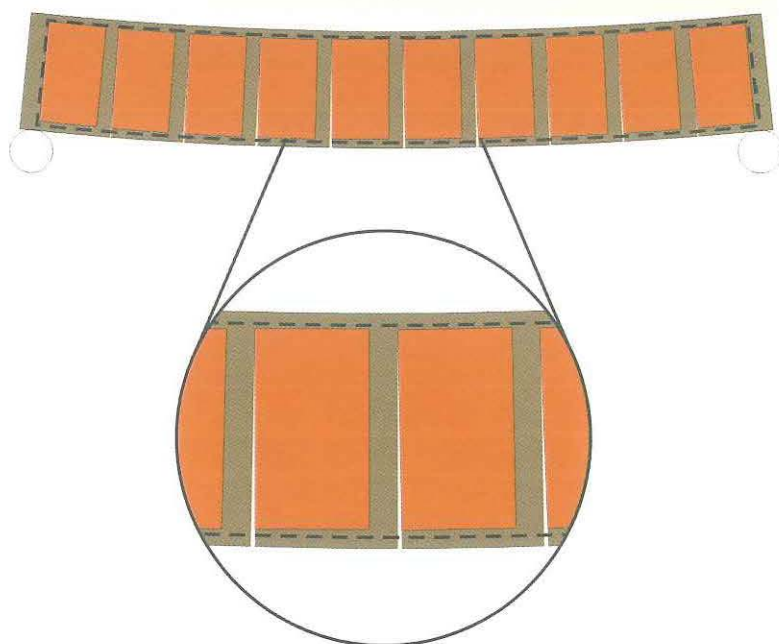


Figura 18. Esquema que muestra la ubicación de las grietas en el ensayo a flexión.



Figura 19. Estudio pos ensayo del muro. Se aprecian las grietas por las juntas en la zona central por flexión y en la lateral por corte.

## 6. BASE CONCEPTUAL PARA EL DISEÑO SÍSMICO DE MUROS DE ADOBE REFORZADOS CON GEOMALLAS.

En esta sección se exponen los conceptos necesarios para realizar el diseño de muros de adobe reforzados con geomallas y sometidos a acciones principalmente de fuerzas sísmicas.

Las hipótesis que se deben cumplir para este objetivo son las siguientes:

1. Los muros están completamente reforzados con geomallas por ambas caras.
2. Las geomallas de ambas caras están conectadas entre si y a través del muro cada 30cm aproximadamente horizontal y verticalmente.
3. Los muros se tarrajean con barro con paja embebiendo en ello a las geomallas.
4. Los muros así reforzados son los suficientemente esbeltos para generar un comportamiento predominantemente de flexión para fuerzas transversales al plano, lo cual se estima que se consigue para una esbeltez mayor a 5.
5. Los esfuerzos de compresión por el efecto combinado de la carga vertical y el momento flector coplanar no son relevantes debido a la poca altura de las edificaciones de adobe en áreas sísmicas.

Para que una construcción de adobe que cumple con estas hipótesis tenga la categoría de sismorresistente, los muros, que son los elementos estructurales deben resistir los esfuerzos de corte en el plano del muro y los efectos de flexión perpendicular al plano del muro que generan las fuerzas sísmicas. Estas condiciones son independientes de si la construcción posee o no un diafragma rígido horizontal.

### 6.1 Criterio de diseño por corte coplanar.

En base al comportamiento observado en el ensayo de corte coplanar se puede afirmar que existe un valor máximo del esfuerzo cortante que puede soportar un muro de adobe que corresponde al valor de 0.04MPa el mismo que esta asociado a una distorsión angular de 2.5%. En los tres muros ensayados se aprecia también que el valor máximo del esfuerzo cortante en etapa elástica es de 0.02MPa.

Entre el esfuerzo cortante máximo de la etapa elástica y el valor ultimo del esfuerzo cortante se produce un incremento no lineal de la resistencia el cual se debe a que la malla de refuerzo embebida en el mortero de enlucido aporta resistencia adicional al tiempo que se van generando un patrón de grietas uniformemente distribuido en todo el muro.

Para distorsiones angulares mayores a 2.5%, el esfuerzo cortante comienza a disminuir producto del desprendimiento del tarrajeo y el consecuente deterioro interno del muro de adobe el cual comienza a fracturarse pero se mantiene en posición por el efecto de confinamiento que le produce la malla de refuerzo. Se aprecia también la tendencia de la curva de cortante, a aproximarse al valor del esfuerzo correspondiente al muro enmallado y sin tarrajeo. El ensayo se llevo hasta una distorsión angular de 5% sin que se produzca la falla del refuerzo, por lo que se estima que la máxima distorsión angular puede ser aun mayor. Este fenómeno se puede interpretar como la "fluencia" de muros de adobe en corte coplanar.

Los valores promedio de resistencia al esfuerzo cortante en un muro de adobe reforzado con geomalla serían entonces los siguientes:

Esfuerzo cortante máximo elástico = 0.02MPa (0.20 kg/cm<sup>2</sup>)  
 Esfuerzo cortante ultimo = 0.04MPa (0.40 kg/cm<sup>2</sup>)

De acuerdo a lo observado en los ensayos, luego de la etapa elástica el refuerzo de geomalla debe tomar toda la fuerza cortante para permitir la deformación del muro y la consiguiente disipación de energía hasta alcanzar el valor ultimo de fuerza cortante asociada a un esfuerzo de 0.04MPa luego de lo cual el deterioro interno del muro no permite incrementos de fuerza cortante.

Un criterio conservador de diseño por corte coplanar debe entonces asegurar que la malla de refuerzo soporte fuerzas de tracción asociadas a un esfuerzo de corte de 0.4kg/cm<sup>2</sup>, luego de lo cual se asegura un comportamiento inelástico del muro con disipación de energía por deformación en ciclos histeréticos.

La resistencia requerida del refuerzo (**fg**) por unidad de longitud se calcula entonces con la siguiente expresión:

$$f_g = (S) (v_u) (b) (1/N) \quad (1)$$

Donde:

**fg** = Resistencia de la malla por unidad de longitud al 5% de elongación.

**S** = Factor que asegura el comportamiento inelástico debido a que la geomalla es linealmente elástica hasta la rotura (S= 1.3).

**b** = Espesor bruto del muro incluyendo el tarrajeo.

**v<sub>u</sub>** = Esfuerzo cortante último que resiste un muro de adobe reforzado con geomalla.  
 Para muros tarrajeados con barro = 0.04MPa (0.4 kg/cm<sup>2</sup>).

**N** = Numero de capas de malla en el muro en ambas caras.

No se considera en este criterio, el tarrajeo de muros con estabilizantes que incrementen sustancialmente la rigidez y resistencia del mortero cambiando el comportamiento observado, como pueden ser los morteros de cemento/arena.

## 6.2 Criterio de diseño por flexión.

Las siguientes conclusiones se basan en la observación y resultados experimentales de los ensayos de flexión en secciones de muros de adobe reforzados con geomallas:

- La resistencia a flexión de la sección está gobernada por la resistencia última a tracción del refuerzo.
- Las grietas de tracción por flexión del muro se originan y propagan a través de las juntas entre mortero y unidad de adobe.

- La falla por compresión de los adobes no es influyente debido al confinamiento producido por la geomalla.

La resistencia a flexión por unidad de longitud **Mr** se determina multiplicando la resistencia nominal **Mn** por un factor de reducción  $\Phi$  con la siguiente fórmula:

$$Mr = \Phi Mn = (\Phi) (fg) (d) \quad (2)$$

Donde:

$\Phi$  = Factor de reducción de la resistencia a flexión ( $\Phi = 0.9$ )

**fg** = Resistencia última a tracción de la geomalla por unidad de longitud.

**d** = Distancia de la fibra extrema en compresión del muro, sin considerar el mortero de tarrajeo, al centroide del refuerzo en tensión. Usualmente d es igual al espesor neto del muro.

## 7. ANÁLISIS SÍSMICO DE LAS EDIFICACIONES DE ADOBE.

El análisis de esfuerzos en general, para las construcciones de adobe ha tenido los problemas de su casi nula resistencia a tracción con el consiguiente impedimento para aplicar métodos elásticos de análisis, y la incertidumbre sobre si es válido o no realizar un análisis sísmico considerando diafragma rígido. Con el uso de las geomallas como refuerzo se abre la posibilidad de utilizar los diversos programas de análisis elástico para determinar la respuesta dinámica sísmica de este tipo de construcciones para lo cual es necesario un trabajo previo de validar modelos en base a las características de las mallas que se usen. A continuación se analizan la pertinencia para este material, de asumir algunas hipótesis comunes en el análisis sísmico de edificaciones.

### 7.1 ¿Masa concentrada o masa distribuida?

En el análisis sísmico de edificaciones en general, el tipo de análisis depende entre otros factores, de la distribución de masas en el edificio, así, se pueden considerar dos tipos de análisis, el de masa concentrada en los pisos, típico de las construcciones aporticadas y el de masa distribuida. Para el caso de edificaciones de adobe el tipo apropiado es el de masa distribuida debido a que las paredes de adobe contribuyen con un porcentaje importante de la masa total que puede llegar hasta el 90% en el caso de construcciones de un piso con techo liviano como es el caso de las construcciones en la costa peruana.

### 7.2 ¿Diafragma rígido o flexible?

Otra consideración importante para el análisis es determinar si se debe realizar un análisis considerando diafragma de techo rígido o flexible. Normalmente los techos en las construcciones de tierra son de madera y se considera que un techo de este tipo no puede asegurar un comportamiento de diafragma rígido, olvidando que el concepto de diafragma rígido es relativo y depende también de la rigidez de los elementos verticales en este caso los muros de adobe.

Para darnos una idea tomemos un muro de adobe que tenga 60 centímetros de espesor, pero con un módulo de elasticidad que es entre 10 y 15 veces menor que la albañilería de ladrillo tendría una rigidez lateral equivalente a un muro de ladrillo de 4 a 6 cm de espesor. En este caso un techo de madera de conexión clavada adecuadamente unido a los muros podría actuar como un diafragma rígido para definir el comportamiento sísmico de la edificación, o en todo caso estaría más cerca de ese comportamiento que de un comportamiento de diafragma totalmente flexible. En este sentido, aquellos muros sobre los cuales se apoyan las vigas o viguetas de madera estarán mejor integrados que aquellos que no soportan la carga del techo, sin embargo tratándose de muros que son reforzados con geomallas, se pueden especificar detalles constructivos que permitan conseguir la integración de todos los muros con los entrepisos o techos.

### 7.3 ¿Análisis manual o automatizado?

La pregunta que se trata de responder en este acápite es ¿Es posible representar el comportamiento real de las edificaciones de adobe mediante programas de elementos finitos?

Para ello hay que tener en cuenta que en construcciones de adobe sin reforzar, la resistencia a esfuerzos de tracción es prácticamente nula lo que hace imposible utilizar programas que consideran un comportamiento elástico de las edificaciones. Sin embargo en el caso de construcciones de adobe reforzadas con geomallas, se ha demostrado con los experimentos dinámicos y estáticos que el conjunto se comporta como un material compuesto soportando compresiones y tracciones en niveles semejantes además de tener un comportamiento elástico aunque no lineal.

Por otro lado, un análisis manual simplificado que reparta el cortante sísmico proporcional a las rigidez lateral de los muros podría ser lo suficientemente representativo como para definir el tipo y calidad de refuerzo necesario por corte. La ventaja de un análisis con elementos finitos es que en un mismo análisis se tienen los esfuerzos de corte coplanar, los de tracción horizontal y los de flexión fuera del plano, además de la concentración de esfuerzos producto de las aberturas de puertas y ventanas en los muros. En el caso de un análisis manual simplificado, los esfuerzos de tracción y de flexión fuera del plano tendrían que ser evaluados independientemente.

### 7.4 Determinación del cortante basal.

El Reglamento Nacional de Edificaciones a través de la Norma Técnica E030 determina el cortante basal de diseño para estructuras convencionales y deriva a la Norma Técnica E080 la determinación del cortante basal de diseño para construcciones de adobe.

La actual norma NTE 080 contiene dos consideraciones particulares con respecto a la NTE 030 en primer lugar un factor de reducción de fuerza sísmica implícito equivalente a 2, lo que puede ser observado por comparación de la tabla 1 en la NTE 030 con la tabla 3 de la NTE 080 y en segundo lugar un factor de amplificación de la respuesta estructural respecto de la aceleración del suelo igual a 1 basado en el casi nulo rango elástico del material.

En base al comportamiento observado en ensayos de simulación sísmica de módulos de adobe reforzados con geomalla o mallas de polipropileno, se aprecia que el comportamiento se asemeja al de un material elástico producto de la influencia de la malla en el adobe, lo cual podría conducir a que se produzca un cierto grado de amplificación de la respuesta estructural.

Por otro lado, de los ensayos estáticos en corte cíclico y en flexión se aprecia también una capacidad de disipación de energía importante da lugar a asumir con toda propiedad un factor de reducción de fuerza sísmica por comportamiento inelástico.

El calculo del cortante basal para muros de adobe reforzados con geomalla es un tema en que todavía queda un camino por recorrer, por un lado existe una amplificación de la respuesta estructural que no se producía con otros tipos de refuerzo y por otro una capacidad de disipación de energía que justifica el uso de un factor de reducción R en forma similar a otros materiales convencionales. Otra variable importante a tener en cuenta es el valor del amortiguamiento en etapa pos elástica, que en el caso del adobe o tierra en general es mas alto que en los materiales convencionales.

Se cuenta en la actualidad con una importante cantidad de información producto de los múltiples ensayos de simulación sísmica que se han realizado en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP con esta técnica de refuerzo con los cuales se puede estimar el valor de la amplificación estructural y con datos de los ensayos estáticos con los cuales se puede estimar un valor de R apropiado. Se espera que en un futuro cercano se culmine el proceso de esta información que dará nuevos datos para replantear el análisis sísmico de construcciones de adobe reforzadas.

La técnica de refuerzo con geomallas esta actualmente validada por la NTE 080 mediante una adenda realizada en el año 2007 por lo que la aplicación de la norma actual para el calculo del cortante basal y la aplicación de geomallas como material de refuerzo esta oficialmente permitida.

Un aspecto importante a considerar es que el criterio de diseño propuesto asegura un comportamiento inelástico de los muros independientemente del valor del cortante sísmico basal.

En conclusión, en el caso de construcciones de adobe reforzadas con geomallas se pueden tomar las siguientes consideraciones para el análisis sísmico:

1. Considerar un modelo de masas distribuidas.
2. Considerar diafragma rígido en los entrepisos y techos.
3. Realizar de preferencia un análisis por elementos finitos.
4. Aplicar la norma NT E080 para el cálculo del cortante basal.

Alternativamente se puede realizar un análisis simplificado para determinar el corte basal en cada muro y una estimación del momento fuera del plano.

**8. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.**

Una vez que se han hallado las fuerzas en cada muro por algún método de análisis apropiado, el procedimiento para diseñar el refuerzo de geomalla es como sigue:

1. Con la fuerza cortante en el plano de cada muro determinar el nivel de esfuerzo cortante dividiendo entre la sección transversal neta del muro, restando las aberturas de puertas y/o ventanas si las hubiera.
2. Si el esfuerzo cortante es menor que 0.02MPa entonces el muro se comportará elásticamente y el refuerzo aplicado puede tener condición de refuerzo mínimo.
3. Si el esfuerzo cortante está entre 0.02 y 0.04MPa quiere decir que se ha sobrepasado el límite elástico inicial y el refuerzo de geomalla debe tomar conservadoramente el corte máximo que puede soportar el muro reforzado para lo cual se usa la expresión (1)
4. Si el esfuerzo cortante es mayor de 0.04MPa el muro entrará en el rango inelástico con deterioro significativo del muro de adobe lo cual se asegura usando el refuerzo estipulado en la misma expresión (1).
5. Una vez definida la resistencia a tracción del refuerzo, se determina el momento resistente de la sección por unidad de longitud según la expresión (2) y se verifica que sea mayor que los momentos generados por las aceleraciones perpendiculares al plano del muro.
6. Si los momentos flectores actuantes por efecto de la fuerza fuera del plano son mayores al momento resistente, se puede colocara capas de malla adicional u otro tipo de malla mas resistente en las zonas que lo requieran.

**9. EJEMPLO DE DISEÑO**

**9.1 Análisis de cargas sísmicas**

Sea un modulo de adobe de 4.00 m. de ancho por 6.00 m. de largo y 3.00 m. de altura. Los muros tienen un espesor de 0.40m y un peso específico de 18000 N/m<sup>3</sup>. Se considera un techo ligero de 2000 N/m<sup>2</sup> de peso.

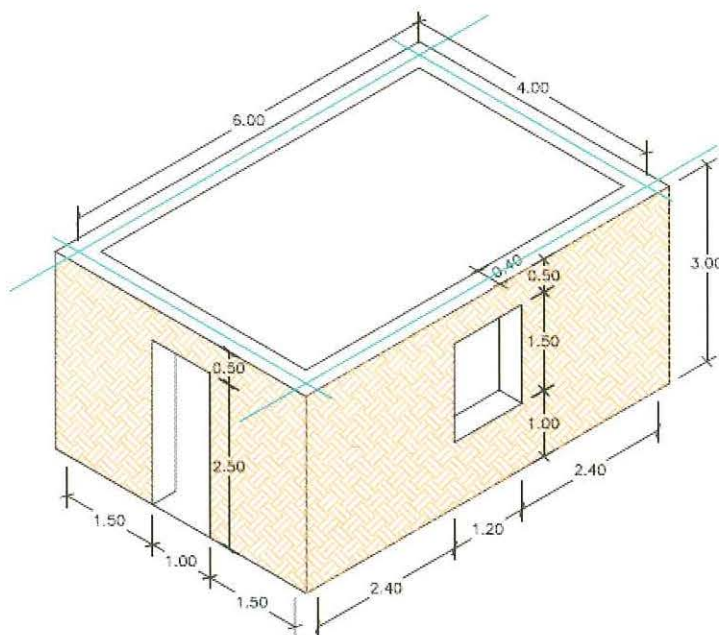


Figura 20. Modelo de análisis

Calculo de la fuerza sísmica horizontal

Según la NTE 080:

$$H = S U C P$$

Donde:

S: Factor de suelo.

Tipo	Descripción	Factor S
I	Rocas o suelos muy resistentes con capacidad portante admisible $\geq 3 \text{ Kg/cm}^2$	1,0
II	Suelos intermedios o blandos con capacidad portante admisible $\geq 1 \text{ Kg/cm}^2$	1,2

U: Factor de uso.

Tipo de las Edificaciones	Factor U
Colegios, Postas Médicas, Locales Comunes, Locales Públicos	1,3
Viviendas y otras edificaciones comunes	1,0

U: Coeficiente sísmico:

Zonas Sísmica	Coeficiente Sísmico C
3	0,20
2	0,15
1	0,10

P: Peso de la edificación:

Entonces:

$$H = 1.2 \times 1.0 \times 0.2 P = 0.24 P$$

La edificación se modela en el programa SAP con elementos finitos considerando 2 hipótesis para el sistema de techo.

El techo se considera como un diafragma flexible.

El techo se considera como un diafragma rígido.

Se analizan ambas opciones y se consideran los resultados más desfavorables.

### 9.2 Diseño de Muros por cortante coplanar:

Para obtener los esfuerzos cortantes más desfavorables se evalúa la edificación para las dos hipótesis, considerando el 100% de la fuerza sísmica en cada dirección.

Muros en la dirección longitudinal:

Diafragma flexible: Se encierran las zonas en las que el esfuerzo cortante excede el 0.02 MPa. El máximo esfuerzo cortante es de 0.025 MPa.

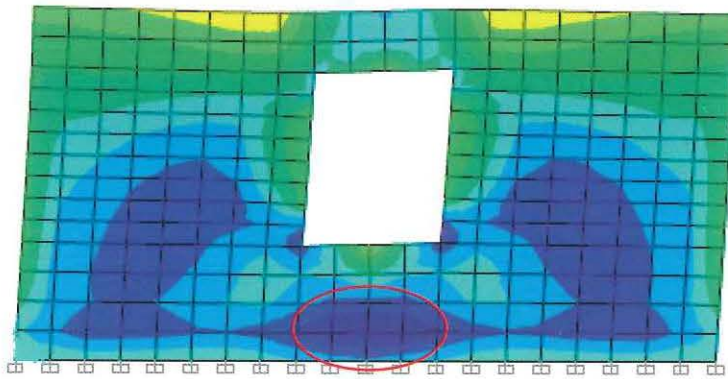


Figura 21. Distribución de esfuerzos cortantes en muro longitudinal para el diafragma flexible.

Diafragma rígido: Se encierran las zonas en las que el esfuerzo cortante excede el 0.02 MPa. El máximo esfuerzo cortante es de 0.038 MPa.

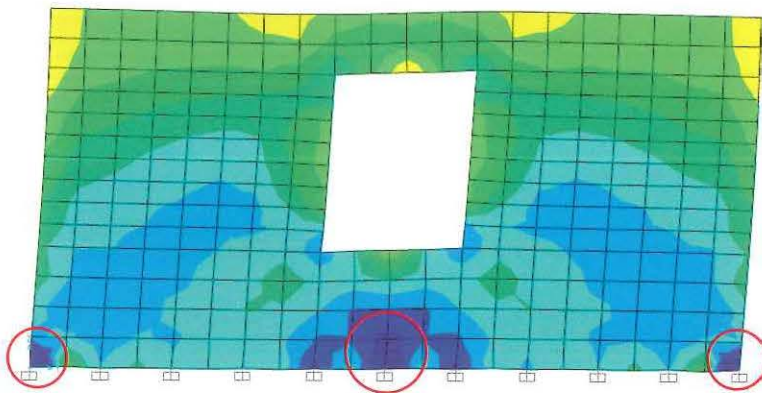


Figura 22. Distribución de esfuerzos cortantes en muro longitudinal para el diafragma rígido.

Dirección Transversal:

Diafragma flexible: El color azul indica las zonas en las que el esfuerzo cortante coplanar excedió el límite de 0.02MPa. El máximo esfuerzo cortante es de 0.03MPa.

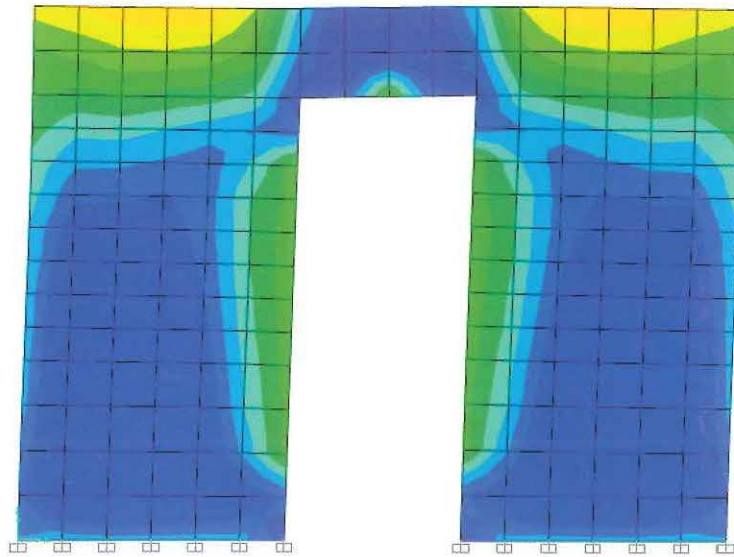


Figura 23. Distribución de esfuerzos cortantes en muro transversal para el diafragma flexible.

Modelo b) Diafragma rígido: El color azul indica las zonas en las que el esfuerzo cortante coplanar excedió el límite de 0.02MPa. El máximo esfuerzo cortante es de 0.03MPa.

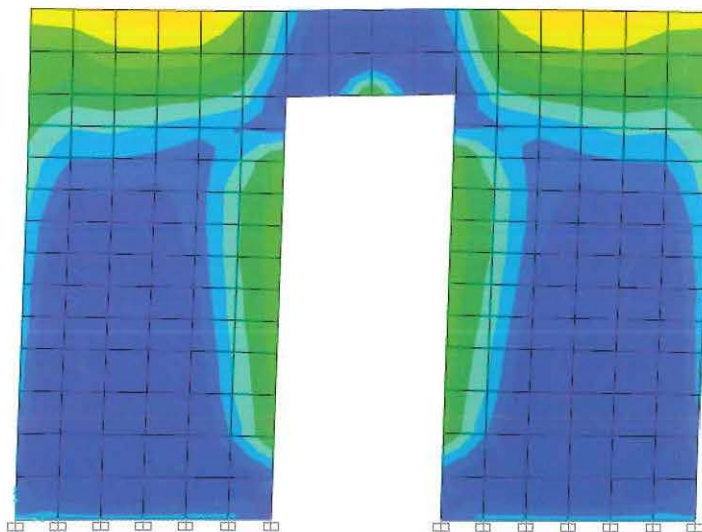


Figura 24. Distribución de esfuerzos cortantes en muro transversal para el diafragma rígido.

De acuerdo entonces al criterio de diseño y aplicando la ecuación 1, tenemos que la fuerza de tracción mínima en la malla de refuerzo ( $f_g$ ) debe ser:

$$f_g = (S) (v_u) (b) (1/N) = (1.3) (0.04\text{Mpa}) (0.44\text{m}) (1/2) = 11,440 \text{ N/m}$$

$$f_g = 11.44 \text{ kN/m}$$

Se ha considerado 2cm adicionales por cada lado debido al tarrajeo.

### 9.3 Diseño por Momento Flector:

Para obtener los momentos flectores más desfavorables se evalúa la edificación para los modelos de techo rígido y techo flexible considerando en ambos casos las siguientes hipótesis de carga:

- Para los muros longitudinales: 100% H en la dirección longitudinal mas 30% H en la dirección transversal.
- Para los muros transversales: 100% H en la dirección transversal mas 30% H en la dirección longitudinal.

En la figura siguiente se muestran los momentos máximos en (kN-m)/m considerando todas las hipótesis de carga.

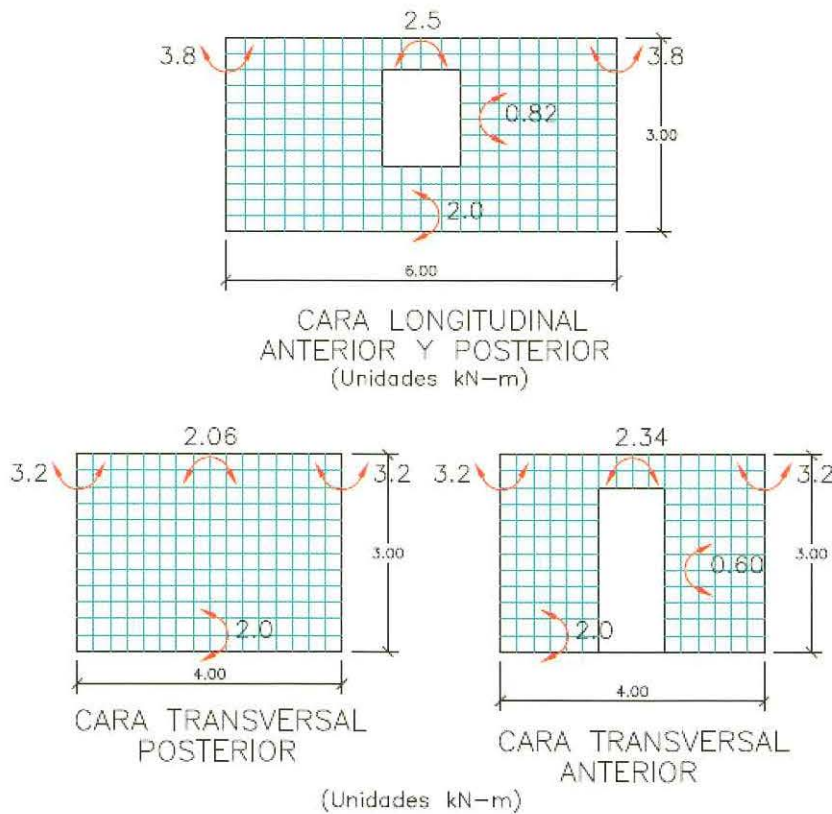


Figura 25. Envolvente de momentos flectores por fuerza fuera del plano.

Según la ecuación 2, el momento resistente usando la resistencia necesaria por corte es:  $M_r = (\Phi) (f_g) (d) = (0.9) (11.44 \text{ kN/m}) (0.4\text{m}) = 4.12 \text{ kN-m/m}$

$$M_r = 4.12 \text{ kN-m/m}$$

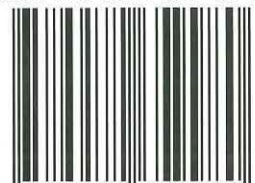
Se demuestra que el momento resistente es mayor que los momentos actuantes por lo que la malla sugerida cubre tanto los esfuerzos de corte hasta el rango inelástico y los esfuerzos de flexión fuera del plano.

---

## 10. REFERENCIAS

1. Bariola J, J. Vargas, D. Torrealva, G. Ottazzi. 1988. "Earthquake Resistant Provisions for Adobe Construction in Peru". 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto, Japan. 2-10 August, 1988. Page VIII-1153. Tomo VIII. ISBN 4-89580-010-5
2. Blondet M, I. Madueño, D. Torrealva, G. Villa García, and F. Ginocchio. 2005. "Using Industrial Materials for Construction of Safe Adobe houses in Seismic Areas" Conference International "EARTHBUILD 2005" Sydney, Australia 19-21 enero, 2005
3. Scawthorn C. 1985. "Strengthening of Low-Strength Masonry Buildings: Analytical and Shaking Table Test Results". Dames and Moore San Francisco California. Research Supported by the National Science Foundation USA.
4. Sofronie R, 2004. Performances in Seismic Strengthening of Masonry. (Paper 182) 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C. Canada. Poster # P-205, CD ROM Paper No 182.
5. The International Association for Earthquake Engineering. 1986. Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction. Revised Edition of "Basic Concepts of Seismic Codes" Vol. I, Part 2, 1980. Tokyo, Japan.
6. Torrealva D, Acero J, 2005 Las Geomallas Como Refuerzo Sísmico de Viviendas de Tierra – El Fin de la Vulnerabilidad Sísmica. SISMOADOBE 2005 Lima Perú
7. Torrealva D. 1986. "A Field and laboratory Tested Technique for Retrofitting Adobe Houses in Seismic Areas". Middle East and Mediterranean Regional Conference on Earthen and Low-Strength Masonry Buildings in Seismic Areas. Ankara, Turkey. August 31-September 6, 1986. Page 403
8. Torrealva D, Espinosa Y, Cerron C. 2008 In plane shear and out of plane bending strength of adobe walls externally reinforced with polypropylene grids. 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, October 2008.
9. Torrealva D, 2009, Geogrids as seismic reinforcement for earthen buildings. Geosynthetics 2009 Proceedings, Salt Lake City USA, February 2009
10. Vargas J, Torrealva D and Blondet M. 2007a. Building hygienic and earthquake-resistant adobe houses using geomesh reinforcement. For arid zones. (In Spanish and English). Catholic University of Peru. Fondo Editorial. Lima, Peru.
11. Zegarra L., D. Quiun, A. San Bartolomé, and A. Giesecke. 1997. Reinforcement of Existing Adobe Dwellings 2nd part: Seismic Test of Modules. In Spanish. XI National Congress of civil Engineer. Trujillo, Peru.-37 Estructuras Página 177
12. Zegarra L., D. Quiun, A. San Bartolomé, and A. Giesecke. 2001. Behavior of Reinforced Adobe Dwellings in Moquegua, Tacna and Arica during the 23-06-2001 Earthquake. In Spanish. XIII National Congress of civil Engineer. Puno, Peru. EM-05 Estructuras y Materiales Página 16

ISBN 978-9972-659-98-0



9 789972 659980