

Estructuras de confinamiento, arriostramiento y entramados en fábricas de tierra, llevadas a simulación en software de elementos finitos.

Galarza, José Luis ^(*,1), **Hernández, Francisco** ⁽²⁾

(*) Departamento de Arquitectura y Artes, Sección Arquitectura y Urbanismo, Universidad Técnica Particular de Loja, jlgalarza@utpl.edu.ec, +5937 3701444 ext. 2541

(1) Universidad Politécnica de Madrid.

(2) Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen Estudio y valoración de estructuras de confinamiento, arriostramiento y entramados utilizados en fábricas de tierra, de tipo adobe mediante el uso de un software de elementos finitos, en este caso (Abaqus versión estudiantil). Las estructuras corresponden a tipos comunes utilizados en España por Europa y Ecuador, Perú, Paraguay y Bolivia por Latinoamérica, y que han sufrido modificaciones en el proceso de fabricación, dosificaciones y morfología del material para mejorar la rigidez, estabilidad de muros así como la disipación eficiente de energía de las cargas aplicadas a una vivienda de planta única y transmitidas a una cimentación de hormigón ciclópeo. Los datos utilizados en la simulación corresponden a las características físicas, mecánicas, geométricas y resistencia del adobe; encontrados en ensayos de caracterización realizados en la Capilla “Tausa Vieja” en Cundinamarca- Colombia y serán llevados a la interacción del muro con estructuras no convencionales de hormigón armado pero sin dificultad de autoconstrucción.

Palabras clave Confinamiento, Arriostramiento, Entramado, Adobe, Análisis de Elementos Finitos.

1 Introducción

Habitiera en 1995 expone: El potencial de la tierra cruda como material de construcción ha perdido credibilidad y sus propiedades, sus amplias posibilidades se han ido olvidando y desacreditando especialmente en países en vías de desarrollo y áreas rurales, potenciándose el prejuicio de ser considerado material poco resistente ante amenazas naturales, factores que dependen más de cómo se construye que del material empleado para ello: la estabilidad de un sistema constructivo no depende exclusivamente de los materiales empleados, sino de cómo éstos se combinan y del planteamiento de la estructura de la edificación en función de los riesgos del lugar y el tipo de suelo, al igual que la existencia de insectos como la “vinchuca” en las construcciones de adobe se debe a la existencia de cavidades entre los adobes que propician su hábitat. Esto constituye una barrera sociocultural, institucional y/o política al empleo de lo que se ha descrito como una tecnología apropiada, siempre dentro de contextos concretos. (Serrano, 1995)

El presente estudio consiste en una recopilación y concretización de información estructural de fábricas de tierra, con un primer modelo de geometría y tipo de aparejo obtenido de viviendas construidas con muros de adobe y caña brava (arundo donax) al norte del Perú, además la utilización de resultados de ensayos realizados en torno a la estabilización del adobe en sus características estructurales provienen del estudio de la Capilla “Tausa Vieja” en Cundinamarca-Colombia con resistencias óptimas resultado de caracterizar física, química y mecánicamente los bloques de adobe sustraídos con fines de investigación (Juan Carlos Rivera, 2005). Es preciso indicar que la condición del suelo usado corresponde al sitio de origen, todo esto enmarcado en el documento Norma Técnica de Edificación del Perú (E.0.80, 1999)

Luego se describen tres modelos adicionales diseñados hacia la simulación que incluyen el tipo de confinamiento estructural, el detalle de armado entre el aparejo de adobe con un marco de hormigón armado; para terminar con una valoración de tipo geométrica y constructiva de escogimiento del sistema más óptimo de aplicación fundamentado en los resultados.

El modelo numérico se lo realiza específicamente para ingresarlo al software ABAQUS para elementos finitos, seleccionado porque tiene los atributos necesarios para comprender el comportamiento de estructuras ante dinámicas bastante parecidas a la realidad, por ello se utiliza una calibración para bloques de adobe. (Wilson Rodriguez, 2009)

2 Objetivos

2.1 General

Determinar el comportamiento estructural de modelos comparativos de adobe en aparejo (EC) y sistemas mixtos de hormigón armado con relleno de adobe (EC-EA-EN) mediante modelos tridimensionales y numéricos con variaciones de optimización de rigidez bajo condiciones de carga.

2.2 Específicos

a) Describir las categorías estudiadas de los tipos de estructura para el confinamiento, arriostramiento y entramado de muros con el uso de adobe.

b) Diseño de los modelos de comparación estructural aplicando confinamiento, arriostramiento y entramados con adobe estabilizado y hormigón armado.

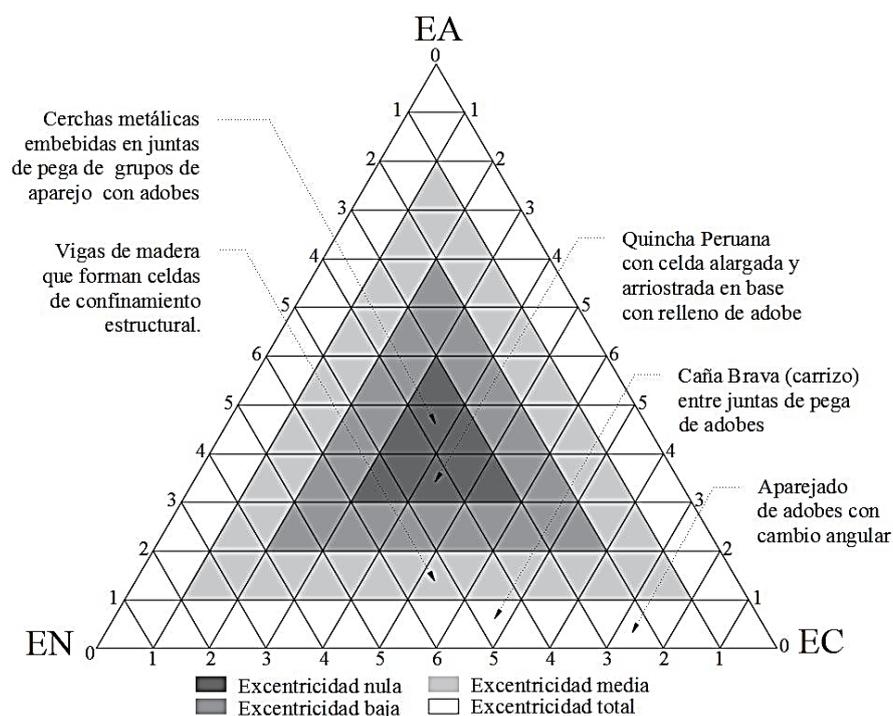
c) Simulación de modelos tridimensionales en el software ABAQUS para elementos finitos bajo condiciones de carga y especificaciones constructivas óptimas en la unión muro de adobe - estructura

3 Hipótesis

El estudio del comportamiento <simulado en computador> de sistemas estructurales de confinamiento, arriostramiento y entramado en la construcción de muros de adobe en marcos estructurales de hormigón armado, sobre cimentaciones ideales será la base para entender el comportamiento de viviendas tradicionales en tierra de una sola planta y seleccionar el sistema de mayor eficiencia para resistir movimientos importantes producidos por cargas verticales y/o laterales

4 Los Tipos de Estructura (categorías para estudio)

Fig. 1. Pirámide de valoración para categorizar estructuras en la construcción con tierra.



Interpretación: La Fig.1 corresponde al resumen de la valoración de un total de ocho sistemas, tomando como punto de partida un esquema de tipologías (Minke, 2005) que involucra la rigidez, geometría, estabilidad y disipación de energía como factores fundamentales al momento de escoger un modo estructural. Así, tenemos:

Estructura Excentricidad Nula: Cuando la estructura posee sistemas de confinamiento estructural, confinamiento propio del bloque de adobe (EC), arriostramiento por diagonales (EA) y entramados ortogonales (EN). Posiblemente se encuentra bien reforzada y disminuye condiciones de deformación o colapso.

Estructura Excentricidad Baja: Se encuentra un poco desviado hacia 1 o 2 de los sistemas; esto conlleva a pensar en un comportamiento normal con uno de los sistemas como regulador de los restantes.

Estructura Excentricidad Media: En este caso la desviación es media y puede acoger dos de los tres sistemas reguladores. Posiblemente el comportamiento estructural mejore pero la forma y geometría de planta del muro disminuya la función de toda la envolvente.

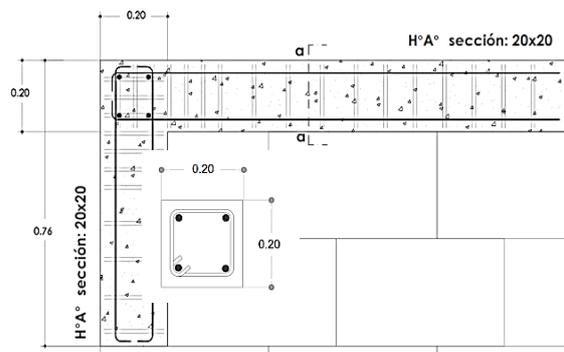
Estructura Excentricidad Alta: Se basa en usar particularmente uno solo de los tres sistemas en factor de los recursos y se trata de un comportamiento favorable para ciertas cargas y solicita diseño de adherencia de estructura con los bloques de adobe.

5 Los Materiales

5.1 Hormigón Armado

Se realiza la caracterización de los modelos mediante la adopción de materiales mejorados, en la estructura con un hormigón armado convencional con $f'c=210$ Kg/cm²; una densidad de 2300 a 2400 Kg/m³ y una tensión a la rotura de 370 kg/cm².

Fig. 2. Armado de unión viga superior con columna corta para modelo M2A y unión de columna-viga para modelo M3A.



Acero de refuerzo con varillas corrugadas de 12 y 14 mm de sección circular, con una variante en el elemento de unión del muro de adobe con el H°A° que será acero (varillas) embebido en la columna corta y/o en la viga, para luego introducirse en la junta del muro (Ver Fig.2)

La unión entre la riostra diagonal en el modelo M4A, se muestra en la Fig.3

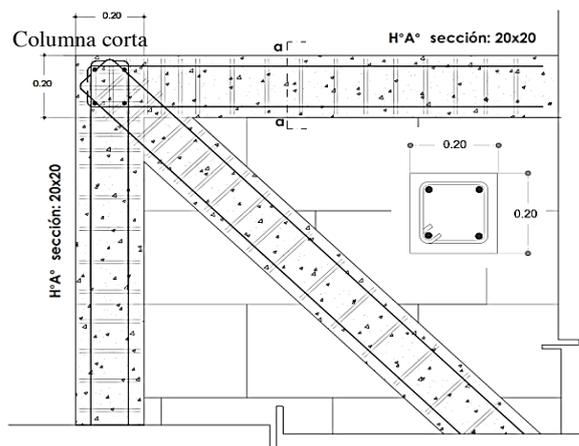


Fig. 3. Armado de unión viga superior con columna y riostra diagonal para modelo M4A

5.2 Adobe

El muro de adobe está formado por el aparejado de unidades de tierra cruda seca al sol (adobes), aglutinados con barro que hace también de mortero de pega; son unidades moldeadas en formatos rectangulares y con adición de elementos orgánicos e inorgánicos con dimensiones de 38x18x8cm, con resistencia a cortante de 0,025 N/mm² y un módulo de Poisson de 0,25 a 0.30.

Tabla 1 Caracterización Física, Química y Mecánica del Adobe (Juan Carlos Rivera, 2005)

Características Físicas*	Unidad	Resultados	Características Químicas	Unidad	Resultados
Humedad	%	3,3	Si	%	65,90
Contenido de materia orgánica	%	4,8	Al	%	15,88
Peso específico	Kg/m ³	1770	Fe	%	4,75
pH	U	5	Ca	%	2,55
Límite de consistencia líquido	%	44	Na	%	0,57
Límite de consistencia plástico	%	25	K	%	2,83
Gravas	%	10	Mg	%	2,10
Arenas	%	18	Características Mecánicas	Unidad	Resultados
Finos (arcillas)	%	72	Resistencia a la compresión	MPa [N/mm ²]	3,04
			Resistencia a flexión-Módulo	MPa [N/mm ²]	0,41

* RIVERA J.C., MUÑOZ E.E., Caracterización Estructural de Materiales de Sistemas Constructivos en Tierra: El Adobe, Rev. Int. De Desastres naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 5 (2) 13 p.

Se toman los datos con una muestra de 17 probetas con adobes de la Capilla Tausa Vieja.

5.3 Caña Brava (*Arundo donax* y *Phragmites australis*)

El nombre científico es *Arundo donax* (tipo de bambú), y una segunda especie es *Phragmites australis* y se trata del carrizo o caña brava que se utiliza preferentemente en sistemas ortogonales de tejido en malla con revestimiento de barro o co-

nocido como <bahareque> y en este caso se toma al arundo dónax y su disposición longitudinal del material para conformar una matriz interna al muro que pueda ayudar a su estabilización para mejor distribución de las cargas, con resistencia a la compresión de 14 and 18 N / mm² , Modulo de elasticidad: 18400 N / mm² , resistencia a la tracción: 4.18 N / mm² , resistencia al corte de 1.1 N / mm² , densidad 790 y 800 kg/m³ y módulo de Poisson de 0.30.

Tabla 2 Propiedades y resistencia de los materiales (Rea Lozano, 2012)

	Caña Brava (Arundo dónax)	Caña Brava	Adobe	Hormigón Armado
Peso específico (Kg/m³)	790	160	1770	2300
Módulo de elasticidad (Kg/m²)	18	18	65,0018	2,00 E+05
Módulo de Young	18	18	2,90E+13	2,00 E+05
Coefficiente de Poisson	0,30	0,30	0,25	0,18

REA LOZANO, Verónica, Uso de la Caña Guadua como material de construcción: Evaluación Medioambiental frente a Sistemas Constructivos Tradicionales, Universidad Politécnica de Madrid, 2012, pág. 23.

6 Modelos y método utilizado

En base a la combinación de las EA + EC + EN estudiados, con base geométrica estructural cuadrangular y vanos proporcionados para resistencia a movimientos sísmicos, se somete a análisis de simulación cuatro modelos que han mejorado su rigidez estructural. Para los sistemas de soporte en pórticos y anillos de confinamiento se utiliza el hormigón armado tratando de disminuir su sección para aumentar la función del relleno con fábricas de tierra como adobe y/o BTC mejorado. Se incluye una carga aproximada de cubierta con teja y soleras de pino de 1457,24 Kg. Se inicia con modelos numéricos y luego tridimensionales requeridos por el software Abaqus usado en su versión estudiantil.

6.1 Modelo M1A_EC+EN

Conformado por un muro de 2,98m de altura, 3,78m de ancho y un espesor e=0,38m con bloques de adobe tipo A1 que miden 0,38x0,18x0,08m. Se trata de dos hiladas horizontales y paralelas entre juntas horizontales y una hilada vertical entre juntas verticales interiores de caña brava (arundo dónax). En el modelo M1A (Fig.2.) al tratarse de un muro con adobe ubicados bidireccionalmente, el software

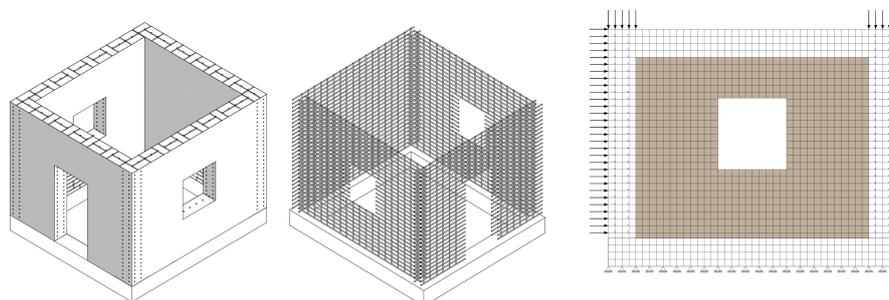


Fig.2 Modelo tridimensional y numérico del sistema M1A

no retenía la información de más de 30 elementos y el muro contenía un número de 2071 bloques por ello se procedió a realizar el mismo ensayo usando un macro modelo (Mersch, 2015) en el cual se toma al bloque de adobe y a la junta como un solo elemento y la correspondencia existe pues el mortero

6.2 Modelo M2A_EC+EA

Posee la misma medida del modelo M1A, (ver Fig.3) pero con adobes en aparejo soportados por una base perimetral lineal (cadena) con “dientes” en sus esquinas que se alinean con la esquina de adobe; y la misma disposición se crea en la parte superior una viga o solera con los dientes hacia abajo. En la unión de esquina habrán varillas verticales hasta $\frac{1}{4}$ de la longitud a cada extremo de la altura total - 0,76m-.

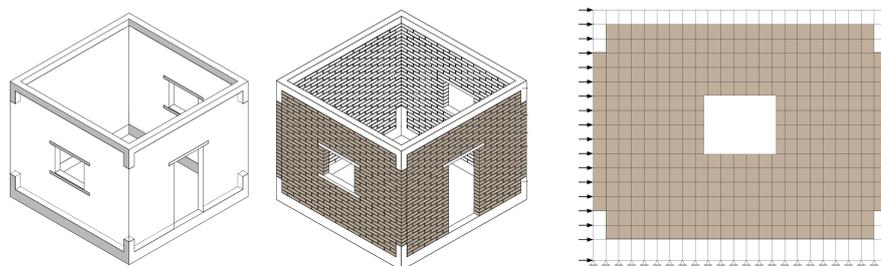


Fig. 3. Modelo tridimensional y numérico del sistema M2A

6.3 Modelo M3A_EC+EN

Posee la dimensión del modelo M1A, pero ahora se toma en consideración una estructura entramada ortogonalmente con particiones entre 0,70 y 1,00m que contienen adobes del tipo A1. La sección de los elementos de cuadrícula son de H°A° de sección = 0,07m. (Ver Fig.4)

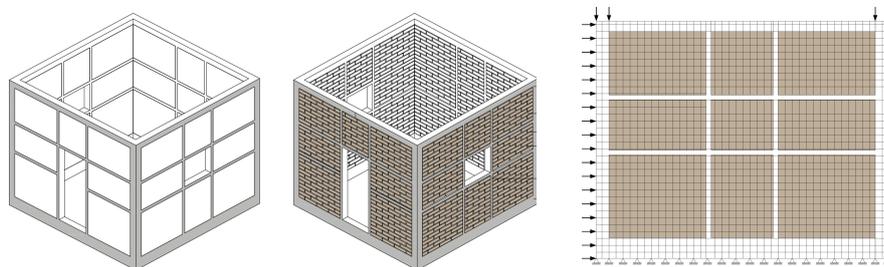


Fig. 4. Modelo tridimensional y numérico del sistema M3A

6.4 Modelo M4A_EC+EA

Posee la dimensión del modelo M1A, (Ver Fig.5) un arriostramiento con elementos diagonales de 0,08m de sección, con vigas y cadenas de H°A° de 0,20m; más un dintel de resistencia a compresión en el vano formado. Los adobes son del tipo A1 con recortes y aumentos de mortero de junta por la geometría trapezoidal de las particiones. Las esquinas no poseen columnas pero poseen uniones mediante varillas de 0,76m.

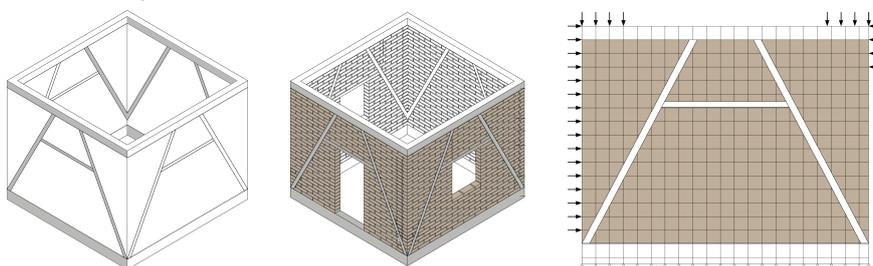


Fig. 5. Modelo tridimensional y numérico del sistema M4A

7 Resultados

El gráfico arrojado muestra el área donde se aplicó la carga lateral (oscuros) que transmiten los esfuerzos a los bloques contiguos, presionando la junta, pero cuando se encuentran con la caña brava mantienen su posición; al parecer en este caso las cañas horizontales parecen dispensables y esto prevé un nuevo estudio para verificar su inclusión en la malla. (Ver Fig.6)

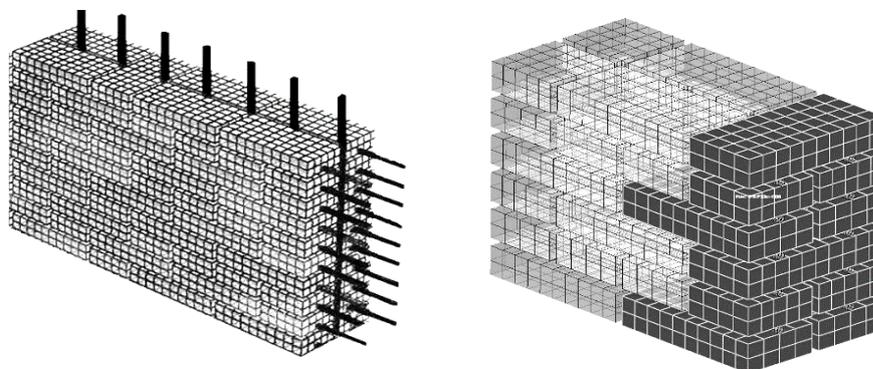


Fig.6 Posición de la caña brava al interior del murete de adobe + aparejo de adobe

En el modelo M2A 1 <las columnas cortadas> son fundamentales para mantener encadenamiento superior y se descubre que la acción de ésta es repartir las cargas uniformemente en la parte superior de los muros de adobe, y a su vez impide su volcamiento. La malla inicial fue irregular al encontrar vanos, pero se calibró de modo ortogonal. El modelo carece de dinteles y esto ocasiona que los datos arrojados sean imprecisos. (Ver Fig.7)

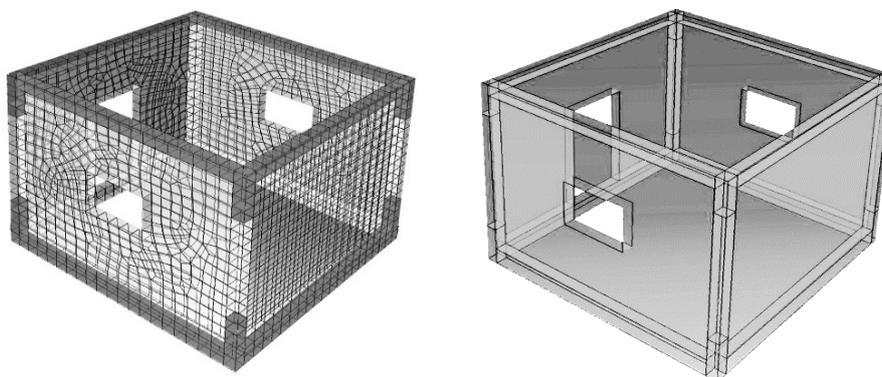


Fig. 7 Coloración de particiones de muro de adobe + Entramado de H°A°

El modelo M3A muestra la acción de todo un entramado de estructura de hormigón armado con relleno de adobe, que el programa que las cargas superiores y laterales el software se anulan y disminuyen progresivamente de modo eficiente aunque prevé sectores vulnerables como pequeños muretes sobre los dinteles de vanos.

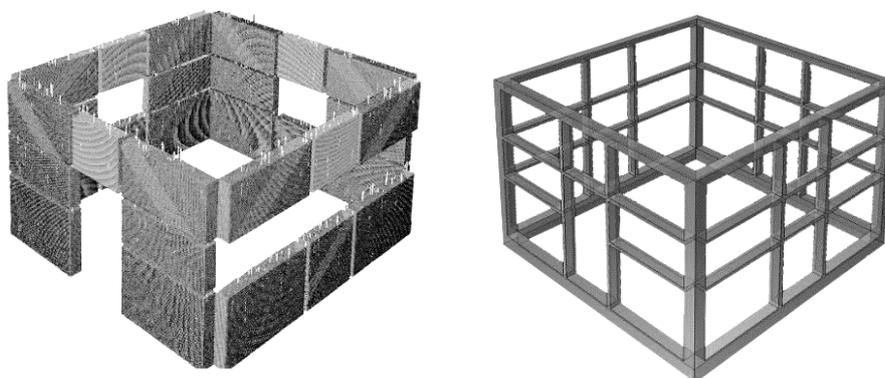


Fig. 8 Unión de los anillos superior e inferior de H°A° con muro de adobe + Vectores de fuerza.

El modelo M4A muestra en su longitud de viga y cadena el nivel de vulnerabilidad del NODO o SURFACE, justo en las uniones de las diagonales con las esquinas inferiores y en la superior a 1/3 de la viga. La malla se determina de manera trapezoidal ya que es un modo real de percibir la distribución de cargas en un relleno con aparejo de adobe de tipo convencional.

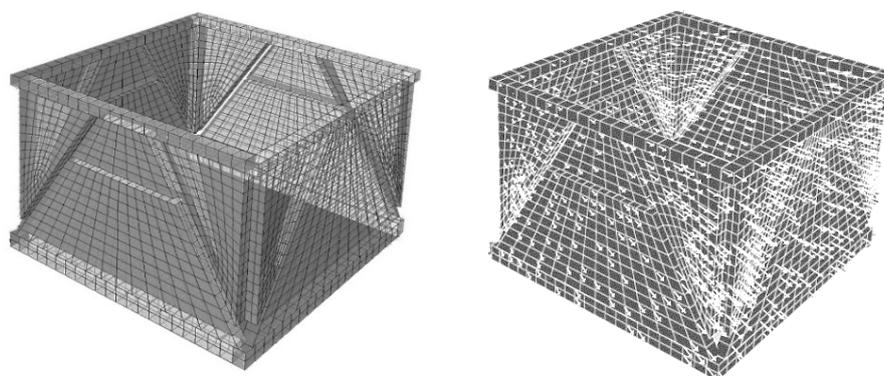


Fig. 9 Direccionamiento de la malla hacia los puntos de unión + Vectores de fuerza

7 Conclusiones

El muro de adobe contribuyó como material de soporte una vez que se integra al material de confinamiento o arriostre, esto permite indagar en sistemas mixtos de pretensión o mejorar las geometrías básicas de sismorresistencia como parte del diseño estructural en construcción con tierra.

Los datos arrojados corresponden a vectores fuerza de resistencia y momentos resultantes de cargas verticales y laterales aplicadas en cada modelo.

El modelo que presentó mayor resistencia a cargas tanto de cubierta (1,7 Ton) como cargas por plantas adicionales (35,0 Ton) es el M2A con los anillos perimetrales dentados en las esquinas con refuerzos de acero embebidos en el muro de adobe y el entramado bidireccional del modelo M3A que es bastante convencional.

8 Referencias

- Binda, L. (2014). Advances in composites applied to masonry. *Materials and Structures* 47 (12), 1969.
- Blondet Marcial, V. G. (2003). ¿Viviendas Sismorresistentes de Tierra?: Una visión a futuro. Iquitos: XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- E.0.80, N. (1999). Norma Técnica de Edificación Adobe. Lima: NTE E.0.80.
- E2392, A. (2010). Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems. West Conshohocken, PA: New Zealand Standards.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y Construcción en Tierra. Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Juan Carlos Rivera, E. M. (2005). *Caracterización Estructural de Materiales de Sistemas Constructivos en Tierra: El Adobe*. Bogotá- Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Mersch, W. V. (2015). *Modelling the seismic response of an unreinforced masonry structure*. Delft: Delft University of Technology.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Kassel_Alemania: Fin de Siglo.
- Serrano, J. S. (1995). *Exposición Iberoamericana de Construcción con tierra. Tecnologías para viviendas de interés social*. CYTED. Bogotá: ESCALA/Habitierra.
- Wilson Rodriguez, M. P. (2009). Calibración de modelos de elementos finitos de muros de adobe por optimización. *Revista Ingeniería e Investigación* Vol 29 N°2, 10-19.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Politécnica de Madrid, Laboratorio de Ingeniería civil de la Universidad Técnica Particular de Loja y Dassault Systems for Abaqus Program. (Student versión).