



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

CURSO 2010- 2011



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE ADOBE REFORZADOS CON GEOMALLA ANTE ESFUERZOS CÍCLICOS LATERALES



Universidad de Sevilla | Sergio Astorga Pantoja

Tutor: Mario Solís Muñiz Fecha: Noviembre de 2011

Agradecimientos

Durante mi estancia Erasmus en l'Université de Savoie, estuve a punto de hacer el proyecto de fin de carrera. Sin embargo, tomé consciencia de que la universidad en la que debía llevar a cabo dicha tarea debía ser la Universidad de Sevilla. Universidad en la que he gastado los cinco últimos años de mi vida para llegar a ser alguien de provecho.

Decidí que mi proyecto debía tener un sentido de existencia. Tras consultar varios proyectos, fue este el que más se ajustó al perfil que buscaba. Fue entonces cuando, junto con mi tutor Mario Solís, me embarqué en el mundo de las construcciones en adobe y los estudios para mejorar su comportamiento.

Durante prácticamente el último año, hemos estado repasando datos y conclusiones que parecían llegar a ninguna parte. Datos y más datos para lograr desencriptar el comportamiento del adobe reforzado. Tras largas reuniones y el gran apoyo por parte de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP) en la persona de Patricia Santillán, pudimos alcanzar los resultados que se recogen en este proyecto.

Esta obra marca el final de un ciclo, un ciclo de años de estudios, alegrías y sinsabores. Por ello, este proyecto no es sólo un proyecto sobre las construcciones de adobe y su mejora para soportar los sismos. Este proyecto es el resultado de un cúmulo de despropósitos que me han encaminado hasta la realidad actual.

Y en este aspecto han tenido especial importancia las personas con las que he compartido estos últimos años: los paseos a la escuela con José Manuel Gutiérrez, las horas de clase compartidas con Juan Manuel Reina, los buenos ratos pasados con Kike Ruix, las bromas de Miguel Feberero, los paseos al césped con Antonio Menacho, los interminables almuerzos con David Gavira, Antonio Moreno, Carlos Peláez y José María Galindo, la vuelta a casa con María Sambruno, el estudio compartido en la biblioteca con Germán Ramos, las discusiones en la comida con José Luís Calvo y Javier González, los ratos en el centro de cálculo con Alejandro Ruíz, los paseos por la escuela con Manuel Sánchez, Sergio Jarana y Sara Couso, o las reuniones de estudio con Pedli Calderón.

Todos ellos buenos momentos que pasarán a nuestra memoria, para dar lugar a nuevas experiencias y nuevos hechos que difícilmente igualarán a esta época de universidad.

Aunque el principal pilar de sustento durante todos estos años, han sido los que siempre se han encontrado cerca, ayudando en buenas y en malas decisiones adoptadas. Dirigiendo el proyecto cuando se desviaba, orientándolo y dejándolo en el buen camino, con comprensión y buenas palabras. Sin ellos, difícilmente hubiera acabado bien este proyecto que en poco tiempo dejará de ser proyecto para convertirse en Ingeniero. Gracias papá y mamá.

Por ello y por mucho más, gracias a todos los que han hecho posible, consciente o inconscientemente, que este proyecto se haga realidad...

Índice general

1.	Adobe	17
	1.1. Introducción al adobe	.17
	1.2. Características del Adobe	.20
2.	Consideraciones previas	25
	2.1. Introducción al proyecto	25
	2.2. Algunas reseñas técnicas	.26
	2.3. Investigaciones llevadas a cabo por la PUCP hasta la fecha	28
	2.4. Principales factores de colapso de las viviendas de Adobe	32
3.	Ensayos de cortante en muros	34
	3.1. Introducción	34
	3.2. Caracterización de los muros ensayados	35
	3.3. Características de los materiales constituyentes del muro	38
	3.3.1. Adobe empleado	.38
	3.3.2. Geomalla utilizada	.41
	3.4. Datos de los ensayos	.43
	3.5. Desarrollo de los ensayos	.45
	3.5.1. Muro 1 de 25cm de espesor	.48
	3.5.2. Muro 2 de 40cm de espesor	.67
	3.6. Análisis de resultados experimentales	.77
4.	Tratamiento de datos	84
	4.1. Envolventes de los muros de Adobe	.84
	4.2. Obtención de la ley de comportamiento a cortante de los muros de 25cm de	
	espesor	86
	4.3. Obtención de la ley de comportamiento a cortante de los muros de 40cm de	
	espesor	89
	4.4. Obtención de la ley de comportamiento a compresión a partir de la ley a	
	cortante	93

Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales

5. Modelos numéricos desarrollados

5.1. Características del modelo numérico10)0
5.1.1. Tipos de elementos empleados en el modelado10)1
5.1.1.1. Modelado tipo lámina10	01
5.1.1.2. Modelado tridimensional10)2
5.2. Resultados obtenidos de los modelos numéricos10)3
5.2.1. Estudio del comportamiento lineal10)4
5.2.1.1. Modelo lineal tipo lámina10	06
5.2.1.2. Modelo lineal tridimensional10	09
5.2.2. Estudio del comportamiento no lineal11	14
5.2.2.1. Estudio del comportamiento no lineal del segundo ciclo11	.5
5.2.2.1.1. Modelo no lineal tipo lámina para el segundo ciclo11	.7
5.2.2.1.2. Modelo no lineal tridimensional para el segundo ciclo12	1
5.2.2.2. Estudio del comportamiento no lineal del tercer ciclo122	2
5.2.2.2.1. Modelo no lineal tipo lámina para el tercer ciclo124	4
5.2.2.2. Modelo no lineal tridimensional para el tercer ciclo	8
5.2.3. Conclusiones12	<u>29</u>

6. Aplicación a un ensayo de compresión diagonal

	6.1. Introdu	ucción al ensayo de compresión diagonal	130
	6.1.1.	Ensayo de compresión diagonal	
	6.1.2.	Muretes ensayados	
	6.1.3.	Ensayos llevados a cabo	
	6.2. Resulta	idos obtenidos de los ensayos	135
	6.3. Modelo	o numérico del ensayo de compresión diagonal	137
	6.3.1.	Modelos numéricos lineales	140
	6.3.2.	Modelos numéricos no lineales	
7.	Conclusiones g	enerales	157
8.	Bibliografía		160
9.	Anejos		163

Modelo lineal tipo lámina	163
Modelo no lineal tipo lámina	165
Modelo lineal tridimensional	168
Modelo no lineal tridimensional	170
	Modelo lineal tipo lámina Modelo no lineal tipo lámina Modelo lineal tridimensional Modelo no lineal tridimensional

Índice de figuras

Capítulo 1

1.1.	Castillo de Yazd en Irán	17
1.2.	Muralla de Taroudant en Marruecos	.17
1.3.	Caral en Perú	18
1.4.	Chan Chan en Perú	18
1.5.	Valdemaluque en Soria, España	19
1.6.	Método de ejecución del tapial	21
1.7.	Método de ejecución de la quincha	.22
1.8.	Ladrillos de adobe	23

Capítulo 2

2.1.	Cinturón de fuego	26
2.2.	Plataforma inclinada para la realización de ensayos	28
2.3.	Ensayo de modulo de vivienda a escala real	29
2.4.	Refuerzo de muros de adobe con valla de alambre	30
2.5.	Inyección de lechada	31
2.6.	Colapso de una vivienda debido a un sismo	33
2.7.	Colapso de una estructura debido a humedades	33

3.1.	Construcción de un muro de adobe	34
3.2.	Envoltura de geomalla del muro y enlazado mediante rafia	36
3.3.	Composición de los muros	36
3.4.	Esquema del ensayo de corte	37
3.5.	Pila de ladrillos de adobe para la caracterización del material	38
3.6.	Esquema de ensayo y medidas de las pilas de ladrillos de adobe	39
3.7.	Leyes de compresión de los pilares ensayados	39
3.8.	Ley de compresión del primer pilar ensayado	40
3.9.	Resultados del ensayo de compresión sobre las pilas	40
3.10.	Geomalla	41
3.11.	Muro ensayado y colapsado	43
3.12.	Sistema para determinar el desplazamiento unitario de los transductores D4 y	
D5		45
3.13.	Carga cíclica aplicada al muro 1 de 25cm	47
3.14.	Primer semiciclo positivo de carga aplicada sobre el muro 1 de 25cm	48
3.15.	Primer ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm	48
3.16.	Primer semiciclo negativo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm	49

3.17. Primer ciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm49	
3.18. Segundo ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D250)
3.19. Segundo semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm50	
3.20. Fenómeno de creación de grietas en el muro51	
3.21. Segundo ciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante,	
para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm52	
3.22. Segundo semiciclo negativo de carga aplicada sobre el muro 1 de 25cm52	
3.23. Segundo ciclo de carga completo en la ley de comportamiento a cortante,	
para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm53	
3.24. Final de la etapa del segundo ciclo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm54	
3.25. Primeros dos ciclos de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm54	
3.26. Tercer semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm55	
3.27. Tercer ciclo de carga positivo sobre el muro 1 para el desplazamiento	
relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm56	;
3.28. Tercer ciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm57	
3.29. Tercer semiciclo negativo aplicado sobre el muro 1 de 25cm	
3.30. Tercer ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm58	
3.31. Cuarto ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm58	
3.32. Cuarto semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm59	
3.33. Cuarto semiciclo negativo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm59	
3.34. Cuarto semiciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante,	
para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm60	
3.35. Cuarto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm60	
3.36. Proceso de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm61	•
3.37. Ciclos de carga positivos en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm62	
3.38. Diagramas de comportamiento a cortante positivos de todos los transductores	
en el muro 1 de 25cm63	i
3.39. Disposición de los transductores en el muro63	
3.40 Proceso de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 25cm64	
3.41. Diagramas de comportamiento a cortante positivos de todos los transductores	
en el muro 2 de 25cm64	•
3.42. Proceso de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 3 de 25cm	
3.43. Diagramas de comportamiento a cortante positivos de todos los transductores	
en el muro 3 de 25cm65	

3.44.	Resultado final del ensayo sobre el muro 3 de 25cm	.66
3.45.	Resultado tras el primer ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm	67
3.46.	Primer ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm	68
3.47.	Segundo ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm	68
3.48.	Resultado tras el segundo ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm	.69
3.49.	Tercer ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm	69
3.50.	Resultado tras el tercer ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm	.70
3.51.	Cuarto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm	.70
3.52.	Resultado tras el cuarto ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm	.71
3.53.	Quinto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm	.71
3.54.	Resultado tras el quinto ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm	72
3.55.	Sexto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el	
despla	azamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm	.73
3.56.	Resultado final del ensayo sobre el muro 2 de 40cm	.73
3.57.	Diagramas positivos de comportamiento a cortante de todos los transductores	
en el i	muro 2 de 40cm	.74
3.58.	Diagramas positivos de comportamiento a cortante de todos los transductores	
en el i	muro 1 de 40cm	.75
3.59.	Resultado final del ensayo sobre el muro 1 de 40cm	75
3.60.	Diagramas positivos de comportamiento a cortante de todos los transductores	
en el i	muro 3 de 40cm	.76
3.61.	Resultado final del ensayo sobre el muro 3cde 40cm	.76
3.62.	Diagramas positivos de comportamiento a cortante de los muros 1 de 25 y	
40cm		78
3.63.	Diagramas positivos de comportamiento a cortante de los muros 2 de 25 y	
40cm		78
3.64.	Diagramas positivos de comportamiento a cortante de los muros 3 de 25 y	
40cm		79
3.65.	Proceso de ensayo del muro 1 de 40cm de espesor	.83

4.1.	Leyes de comportamiento a cortante que dan lugar los sensores D1, D2 y D3	
junto	a la envolvente del muro 2 de 25cm de espesor	84
4.2.	Envolventes de los muros de 25cm de espesor	86
4.3.	Ley de comportamiento a cortante media junto con las envolventes de los	
muro	s de espesor 25cm	87
4.4.	Comparación entre la ley de comportamiento a cortante adoptada y la	
aprox	imada en los muros de 25cm	88
4.5.	Envolvente de los muros de 40cm de espesor	89

4.6.	Ley de comportamiento a cortante media junto con las envolventes de los	
muro	s de espesor 40cm	.91
4.7.	Comparación entre la ley de comportamiento a cortante adoptada y la	
aprox	imada en los muros de 40cm	92
4.8.	Leyes de comportamiento a cortante de los muros de 25 y 40cm	92
4.9.	Situación de carga	.93
4.10.	Modelo de tensiones tangenciales puras	.94
4.11.	Punto infinitesimal del muro	.94
4.12.	Leyes de comportamiento a cortante y compresión de los muros de 25cm	.96
4.13.	Leyes de comportamiento a cortante y compresión de los muros de 40cm	.97
4.14.	Leyes de comportamiento a compresión de los muros de 25 y 40cm	.98

5.1.	Elemento Shell63	101
5.2.	Elemento Solid45	102
5.3.	Mallado de la simulación del muro en 3D	103
5.4.	Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de	
25 y 4	Ocm, con los puntos en que se aplica la carga en el primer ciclo	105
5.5.	Desplazamientos horizontales del modelo 2D lineal para muros de 25cm en el	
prime	r ciclo	106
5.6.	Tensiones tangenciales del modelo 2D lineal para muros de 25cm en el primer	
ciclo		107
5.7.	Desplazamientos horizontales del modelo 2D lineal para muros de 40cm	
en el j	primer ciclo	107
5.8.	Tensiones tangenciales del modelo 2D lineal para muros de 40cm en el primer	
ciclo		108
5.9.	Desplazamientos horizontales del modelo 3D lineal para muros de 25cm en el	
prime	r ciclo	109
5.10.	Tensiones tangenciales del modelo 3D lineal para muros de 25cm en el primer	
ciclo		110
5.11.	Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 3D lineal para muros de	
25cm	en el primer ciclo	110
5.12.	Desplazamientos horizontales del modelo 3D lineal para muros de 40cm en el	
prime	r ciclo	111
5.13.	Tensiones tangenciales del modelo 3D lineal para muros de 40cm en el primer	
ciclo		112
5.14.	Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 3D lineal para muros de 40cm	
en el j	primer ciclo	112
5.15.	Leyes de comportamiento a compresión experimentales de los muros de 25 y	
40cm.		114
5.16.	Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de 25 y	
40cm,	, con los puntos en que se aplica la carga en el segundo ciclo	.116
5.17.	Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en	
el seg	undo ciclo	117

5.18. Tensiones tangenciales del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en el	
segundo ciclo	118
5.19. Tensiones en dirección horizontal del modelo 2D no lineal para muros de 25cm	
en el segundo ciclo	118
5.20. Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm	
en el segundo ciclo	119
5.21. Tensiones tangenciales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el	
segundo ciclo	119
5.22. Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 2D no lineal para muros de	
40cm en el segundo ciclo	120
5.23. Energía de deformación del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el	
segundo ciclo	120
5.24. Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de 25	
y 40cm, con los puntos en que se aplica la carga en el tercer ciclo	.123
5.25. Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en	
el tercer ciclo	124
5.26. Tensiones tangenciales del modelo 3D no lineal para muros de 25cm en el	
tercer ciclo	.125
5.27. Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 2D no lineal para muros de	
25cm en el tercer ciclo	125
5.28. Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en	
el tercer ciclo	126
5.29. Tensiones tangenciales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el	
tercer ciclo	.127

6.1.	Esquema del ensayo de compresión diagonal	131
6.2.	Murete de adobe ensayado	.133
6.3.	Esquema del ensayo de compresión diagonal	134
6.4.	Rigidez a cortante de los muretes ensayados	135
6.5.	Parámetros necesarios para determinar la rigidez a cortante	136
6.6.	Modelo de elementos finitos para un ensayo de compresión diagonal	137
6.7.	Modelo de elementos finitos para un ensayo de compresión diagonal	138
6.8.	Desplazamientos verticales en el murete cuando se somete a 4000N, para un	
mode	lo tipo lámina	.140
6.9.	Desplazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para un	
mode	lo tipo lámina	.141
6.10.	Tensiones horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para un	
mode	lo tipo lámina	.141

6.11. Ter	nsiones verticales en el murete cuando se somete a 4000N, para un	
modelo ti	ipo lámina	142
6.12. Ter	nsiones tangenciales en el murete cuando se somete a 4000N, para un	
modelo ti	ipo lámina	142
6.13. Des	splazamientos verticales en el murete cuando se somete a 4000N, para	
un model	o tridimensional	144
6.14. Des	splazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para	
un model	o tridimensional	144
6.15. Ter	nsiones horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para	
un model	o tridimensional	145
6.16. Ter	nsiones verticales en el murete cuando se somete a 4000N, para	
un model	o tridimensional	146
6.17. Ter	nsiones tangenciales en el murete cuando se somete a 4000N, para	
un model	o tridimensional	146
6.18. Des	splazamientos verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para	
un model	o tipo lámina	148
6.19. Des	splazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para	
un model	o tipo lámina	149
6.20. Ter	nsiones horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para un	
modelo ti	ipo lámina	149
6.21. Ter	nsiones verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un	
modelo ti	po lámina	150
6.22. Ter	nsiones tangenciales en el murete cuando se somete a 5000N, para un	
modelo ti	po lámina	151
6.23. Des	splazamientos verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para	
un model	o tridimensional	152
6.24. Des	splazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para	
un model	o tridimensional	153
6.25. Ter	nsiones horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para	
un model	o tridimensional	153
6.26. Ter	nsiones verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un	
modelo ti	ridimensional	154
6.27. Ter	nsiones tangenciales en el murete cuando se somete a 5000N, para un	
modelo ti	ridimensional	154

Índice de tablas

Capítulo 4

Tabla 4.1: Datos para la creación de una ley de comportamiento media en los muros de 25cm	86
Tabla 4.2: Datos experimentales para conformar la ley de comportamiento a cortante adoptada en los muros de 25cm	87
Tabla 4.3: Datos para la creación de una ley de comportamiento a cortante media en los muros de 40cm	90
Tabla 4.4: Datos experimentales para conformar la ley de comportamiento a cortante adoptada en los muros de 40cm	91
Tabla 4.5: Datos para la ley de comportamiento a compresión de los muros de 25cm	96
Tabla 4.6: Datos para la ley de comportamiento a compresión de los muros de 40cm	97

Capítulo 5

Tabla 5.1: Esfuerzos y desplazamientos experimentales alcanzados por los murosde 25cm en el primer ciclo	104
Tabla 5.2: Esfuerzos y desplazamientos experimentales alcanzados por los muros	
de 40cm en el primer ciclo	105
Tabla 5.3: Esfuerzos y desplazamientos experimentales alcanzados por los muros	
de 25cm en el segundo ciclo	115
Tabla 5.4: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 40cm en el segundo ciclo	115
Tabla 5.5: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 25cm en el tercer ciclo	122
Tabla 5.6: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 40cm en el tercer ciclo	122

36
3

Resumen

Con amplia experiencia en el sector, la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP) ha estado desarrollando métodos de ayuda para la construcción de viviendas de adobe en el Perú.

El adobe es el principal material de construcción del país debido al bajo poder adquisitivo de sus habitantes. Se sirven de los pocos medios que poseen y del paraje que les rodea para abastecerse de dicho material.

Las construcciones en adobe son una solución barata y respetuosa con el medio ambiente. La edificación con este material apenas ha evolucionado desde los primeros tiempos del hombre, siguen aún empleándose métodos ancestrales de construcción en adobe.

Sin embargo, desde hace unos años la Universidad se ha dado cuenta del grave peligro que corren las personas que habitan este tipo de edificaciones. Los terremotos de la zona provocan el colapso de las estructuras y su consecuente derrumbe.

Por ello, en la PUCP se han dedicado a buscar métodos de refuerzo de las estructuras baratos y fáciles de adquirir con el objetivo de evitar el desprendimiento de las estructuras.

Recientemente, se ha hallado que la aportación de un polímero plástico llamado geomalla a la estructura de adobe mejora netamente la reacción general cuando se somete a sismos. Esta técnica está actualmente desarrollándose y mejorándose.

El presente proyecto pretende colaborar en la consecución de mejoras para conseguir el propósito planteado por la Universidad.

El objetivo que se persigue es la obtención de parámetros resistentes que faciliten el diseño futuro de nuevas construcciones. Obteniendo la ley $\tau - \gamma$ que gobierna el comportamiento de los muros de adobe, puede llevarse a cabo este fin.

Para llevarlo a buen término se llevaron a cabo una serie de experimentos, en la Universidad, de muros sometidos a carga lateral cíclica y que servirán de apoyo al proyecto.

El proyecto pretende tratar dichos ensayos y observar si se puede obtener la ley de comportamiento a cortante que los gobierna. Se comprobará si esto es viable mediante la comparación de los resultados experimentales con resultados numéricos proporcionados por un programa de elementos finitos.

Por otro lado, se analizará numéricamente el comportamiento de un murete sometido a un ensayo de compresión diagonal, para comprobar la validez de este ensayo. Se analizará también la validez de la aplicación de normas existentes para la extracción de resultados del mismo.

Capítulo 1 *Adobe*

1.1. Introducción al Adobe

La tierra fue considerada por los antiguos un elemento de ciencia. Formó junto con el agua, el aire y el fuego, uno de los elementos primigenios en que se sustentaron las primeras civilizaciones. Ésta constituyó una de las primeras y más certeras manifestaciones de la naturaleza de la que el hombre tomó consciencia. Cada uno de los elementos que componían el mundo poseían unas características específicas; por ejemplo, la tierra era considerada fría y seca según los atributos otorgados por los presocráticos.

Desde tiempos ancestrales el hombre ha construido con tierra cruda debido a su disponibilidad ilimitada y a la facilidad de ejecución. Los orígenes de este tipo de construcción se remontan a los primeros asentamientos humanos. Se han encontrado restos de construcciones en adobe a lo largo y ancho del mundo: desde Europa hasta América pasando por los rincones más inesperados de Asia y África, figuras 1.1 y 1.2. Este material se ha empleado en la construcción de diversos tipos de edificaciones, entre las que destacan fortificaciones como murallas y castillos o edificios de uso agrícola como molinos y graneros.





Figura 1.2: Muralla de Taroudant en Marruecos

Las tecnologías utilizadas antiguamente se siguen llevando a cabo en la actualidad. De este modo, no han perdido vigencia la tierra compactada (el tapial) o los bloques de adobe construidos con madera, caña o fibras vegetales (la quincha).

Se encuentran ejemplos de construcciones con tierra apisonada en la antigua ciudad de Caral en Perú, imagen 1.3, con alrededor de 5000 años de antigüedad o en la ciudad precolombina de Chan Chan, imagen 1.4, que data del 600 o el 700 d.C., y que es la ciudad de adobe más grande de América, llegando a tener en su apogeo alrededor de cien mil habitantes.

construida con la arcilla roja del propio terreno en el que se asienta.

Existen también ejemplos peninsulares como la Alhambra¹ (Castillo Rojo) de Granada

Figura 1.3: Caral en Perú

Figura 1.4: Chan Chan en Perú

Esto conlleva que la investigación sobre el adobe tenga que abarcar diversos campos. Debe tratar tanto la mejora de las nuevas construcciones como la rehabilitación de edificios históricos. No obstante, existen varios códigos y normativas internacionales y nacionales que intentan subsanar algunas de las deficiencias que posee la construcción en adobe. Entre éstas, cabe destacar la norma E.080 ADOBE².

Actualmente, la construcción en adobe está adquiriendo cada vez más interés por ser un material respetuoso con el medio ambiente y que puede ser reciclado. Siempre y cuando no se mezcle con elementos artificiales, puede ser reintegrado en la naturaleza cuando se pretenda demoler la construcción. No contiene ninguna sustancia tóxica en sí por ser un elemento natural.

En estos momentos, se realizan diversas edificaciones de moderna construcción en adobe en varios países donde se creía que su uso se encontraba abandonado. Su especial interés radica en que es tan maleable que puede adquirir tan diverso número de formas como queramos. Permite la realización de formas suaves y redondeadas con un buen acabado, además de su frescura en verano y calidez de invierno. Otra de las ventajas es la fácil y rápida construcción y derrumbe de una parte o la totalidad de la obra para ampliar o edificar de nuevo e incluso instalar nuevos servicios.

A su vez, últimamente ha aumentado el interés del estudio de conservación y rehabilitación de edificios históricos que hayan sufrido un deterioro importante a lo largo de sus años de vida. Se pretenden desarrollar métodos que ayuden a conservar el patrimonio histórico construido en adobe.

¹ "Earth buiding in Spain". M.C. Jiménez, I. Cañas. Abril 2005.

² "Norma E.080 Adobe. Reglamento nacional de edificaciones". SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Lima- Perú. 2006.

Las construcciones en adobe se realizan en las zonas donde hay menos recursos económicos. Cerca del 30% de la población mundial habita en este tipo de edificaciones³. Podemos encontrar construcciones actuales de adobe en África, Oriente Medio o América Latina. En el continente asiático, hay cerca de 50 millones de casas en adobe mientras en Europa este tipo de construcciones se ha abandonado dando paso a la construcción en nuevos materiales; aunque aún persisten obras antiguas en esta zona.

Figura 1.5: Valdemaluque en Soria, España

Este material se encuentra mayormente localizado en zonas de alto riesgo sísmico y, por ello, requieren especial atención a la hora de elegir la tierra y la manera de llevar a cabo la obra. La importancia de la solución adoptada es vital; según el tipo de ésta, la seguridad ante sismos puede aumentar de manera exponencial.

La falta de datos experimentales sobre el comportamiento del adobe junto con la forma de construcción artesanal hace que estas construcciones tengan un control de calidad muy bajo. Es por ello que cada vez que se produce un terremoto, colapsan las estructuras fabricadas con adobe produciendo innumerables pérdidas humanas y económicas.

Como consecuencia, en la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP) llevan cerca de 40 años trabajando para conseguir obtener parámetros del comportamiento del adobe tal que las casas se mantengan en pie tras colapsar debido a los movimientos de tierra. Se han ensayado desde módulos de viviendas a escala real hasta muros pasando por pilares, investigando el comportamiento de los adobes con refuerzos naturales integrados de uso masivo.

La importancia de este tipo de construcciones en Perú es latente. Perú, con alrededor de 28 millones de habitantes, es uno de los países más habitados de Sudamérica. Aunque es actualmente una economía emergente, aproximadamente el 31% de la población se sitúa bajo el umbral de la pobreza. Es por ello que se precisa de un material abundante y barato para dar cobijo a una población sin medios económicos para permitirse un hogar.

La PUCP tiene actualmente el objetivo de concienciar y demostrar que el uso de refuerzos mejora notablemente el comportamiento sísmico de las estructuras de adobe, consiguiendo salvaguardar la vida de sus ocupantes.

³ "Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos: Tutor". Marcial Blondet. Abril 2003.

1.2. Características del Adobe

El adobe es una composición de arcilla y arena que da lugar a una masa pastosa. Con esta masa se puede fabricar ladrillos secándose al sol. La composición del adobe es de aproximadamente un 40-50% de arena, 15-25% en limos y un 20-35% en arcilla⁴ aunque normalmente depende de varios factores como la composición del terreno y de los agregados que se efectúen.

La parte más importante es el componente que mantiene cohesionado los elementos del material; que debe contener una porción importante de arcilla. Para la elaboración del adobe, es recomendable retirar las piedras mayores de 5mm y los elementos extraños tales como material orgánico.

Según la norma E.080 Adobe, el suelo debe contener alrededor de un 10 a 20% de arcilla, de un 15 a un 25% de limo y alrededor del 55 al 70% de arena; aunque los rangos pueden variar cuando los adobes que se fabriquen se encuentren estabilizados. No deben emplearse suelos orgánicos, pues producen el agrietamiento en la retracción y la disminución de la capacidad portante.

Los ladrillos deben ser macizos presentando tan sólo perforaciones perpendiculares en la parte del asiento. La forma de los adobes debe ser de planta cuadrada o rectangular. Para los adobes rectangulares el largo debe ser del doble del ancho, con una relación de largo y altura de 4 a 1, y una altura inferior a 8cm.

Típicamente, los muros son mezcla de arcilla, arena y limos; aunque pueden presentar agregados como cal, yeso o cemento. Dichos estabilizadores producen morteros más resistentes aunque de mayor costo que los refuerzos naturales.

La tierra empleada debe presentar un aspecto homogéneo, estando limpia de raíces y de restos vegetales. Es aconsejable testear el tipo de tierra que se dispone antes de realizar la construcción. Cuanto más arcilloso es el suelo, más arena se debe agregar para estabilizar la mezcla. Una vez efectuada la mezcla, debe dejarse secar al sol entre 25 y 30 días vigilando el agrietamiento durante el secado. Si el secado se da al sol y sin aportación de fibras, la retracción es mayor. Puede dar lugar a fisuras indeseables y estropear los ladrillos.

⁴ www.ecohabitar.org

Para trabajar con tierra cruda, se pueden emplear diferentes técnicas. La mayor parte de ellas son ancestrales y se han mantenido, con algunas variaciones, hasta nuestros días. Las más importantes son las siguientes:

- El tapial:

Consiste en la compactación de la tierra previamente situada en un encofrado mediante la aplicación de golpes, logrando una menor retracción y una mayor resistencia.

Para ésta técnica, las proporciones aconsejadas del adobe son de un 15% en grava, del 40% en arena, un 20% en limos y el resto de arcilla.

El encofrado se monta y desmonta horizontalmente realizando la construcción por módulos.

Figura 1.6: Método de ejecución del tapial

- La quincha o el taquezal:

Se basa en la inclusión de trozos de paja o de cañas de bambú en los ladrillos de adobe. El añadido tiene la misión de absorber las vibraciones que tienen lugar en la estructura, gracias a su comportamiento elástico, se mejora el comportamiento ante sismos. Su montaje es fácil y, en caso de colapso, la estructura no sufre daños importantes.

Figura 1.7: Método de ejecución de la quincha

La abundancia de la tierra lo convierte en un elemento barato de fácil empleo con poco gasto energético. También se debe tener en cuenta las excelentes propiedades térmicas de las construcciones con este tipo de elemento. Este material posee unas excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico. La tierra tiene una gran capacidad de inercia térmica, que consiste en almacenar calor durante las horas más calientes del día, cediéndolo en las horas más frías. El aislamiento acústico es debido a la mala transmisión que poseen las partículas de tierra a transmitir las vibraciones sonoras.

Por ser un elemento natural, transpirable y constituido por material inorgánico, permite la autorregulación de la humedad interna evitando condensaciones internas. Estas propiedades también permiten que la tierra ni se incendie ni se pudra, pudiendo prevalecer en el tiempo.

Como contrapunto, la realización de construcciones con adobe está supeditada al tipo de tierra que se emplee. Según la tierra utilizada, las edificaciones tendrán unas características u otras. Precisa también una gran implicación del constructor puesto que no cualquier ladrillo puede emplearse para la construcción.

Este tipo de edificaciones no es especialmente indicado en zonas de alta densidad pluviométrica o muy húmedas, ya que el adobe se vuelve maleable en dichas condiciones. Además, el adobe puede absorber la humedad del suelo por capilaridad por lo que se debe aislar tierra y suelo, evitando el contacto con los estratos más húmedos.

Puede deshacerse con la lluvia así que se aconseja enlucirlos con materiales aislantes como la cal, junto con arcilla y arena. De otro modo, requerirá un mantenimiento continuo cubriendo las zonas dañadas con capas de barro. Del mismo modo, durante el proceso de secado, se debe proteger los ladrillos frente a agentes externos.

El proceso de secado es lento y precisa de una infraestructura que logre un buen fraguado del adobe, para lo que se requiere una vigilancia constante durante la consolidación. Los ladrillos deben girarse para que su secado sea uniforme; el secado uniforme reduce la posibilidad de aparición de grietas. La zona idónea de fraguado es un espacio horizontal y limpio en que no pueda penetrar el agua pero sí el viento. De este modo, un espacio óptimo sería un lugar seco bajo techo de paja que permita la ventilación y protección del ladrillo.

Figura 1.8: Ladrillos de adobe

Los principales problemas que suelen presentar los ladrillos fabricados en adobe se deben a la falta de control de la tierra o el aislamiento frente a la lluvia y la humedad natural; aunque también pueden darse problemas en la disposición de la cimentación de la estructura.

La cimentación puede estar constituida en piedra o cemento, pero siempre debe hacerse con un tipo de material que sea impermeabilizante a la humedad del suelo y que evite el contacto entre adobe y suelo. Las estructuras de adobe son realmente duraderas. Las estructuras existentes más antiguas fueron realizadas con este material. En climas secos y cálidos, son especialmente útil este tipo de construcciones, presentando su principal debilidad a la hora de sobreponerse a movimientos sísmicos. Por ello, también es importante la aparición de asientos diferenciales que introducen esfuerzos tangenciales en juntas y en zonas próximas a las esquinas. Esta deficiencia puede subsanarse en parte mediante un buen revestimiento. El revestimiento consigue aislar y proteger al muro de la humedad y la erosión. El revestimiento puede constar de cemento o de tierra estabilizada.

La resistencia del adobe disminuye a medida que aumenta la humedad en el interior debido a las partículas higroscópicas presentes en los materiales utilizados. Del mismo modo, esta humedad repercute en la pudrición de elementos internos. En caso de deterioro externo debido a aparición de grietas, se puede usar una mezcla de cal y arena junto con yeso para conseguir una reparación adecuada.

En las construcciones de adobe en Perú, el mortero y los ladrillos suelen estar hechos de los mismos materiales. El comportamiento de cada uno de ellos es muy diferente y la mezcla dista mucho de ser homogénea.

Capítulo 2 *Consideraciones previas*

2.1. Introducción al proyecto

El objetivo de este proyecto es el estudio de la vulnerabilidad a cortante de las construcciones en adobe a fin de evitar el colapso de la estructura cuando se somete a esfuerzos sísmicos.

Aunque se han llevado a cabo innumerables ensayos de muros de adobe a lo largo y ancho del mundo, aún son pocos los ensayos realizados en comparación con otros tipos de materiales.

El comportamiento heterogéneo de la unión adobe- geomalla da lugar a conductas nuevas e impredecibles que es necesario constatar. Así, mientras que el adobe rompe frágilmente y la malla dúctilmente, el comportamiento de los dos materiales combinados debe aún caracterizarse.

Para ello, se ha llevado a cabo en la universidad PUCP una serie de experiencias con el objetivo de simular los efectos de los temblores de tierra sobre muros de espesores de 25 y 40cm reforzados con geomalla.

Lo que se pretenderá será desarrollar modelos numéricos mediante el programa de elementos finitos ANSYS, para obtener gracias a ellos una ley de comportamiento válida que defina el comportamiento del muro según el espesor del mismo. Este modelo debe ser susceptible de ser extrapolado a otros casos para caracterizar el comportamiento de cualquier muro.

El trabajo llevado a cabo, procura contribuir a la creación de una base de datos de resultados que ayude al diseño o la ejecución en futuras intervenciones de rehabilitación o refuerzo de las estructuras. El fin es el obtener una serie de medidas satisfactorias de mejora de características mecánicas, capaces de corregir el comportamiento estructural ante solicitaciones de carga horizontales; y, de este modo, aumentar la seguridad de las construcciones.

Esto es sólo el principio de una investigación más ambiciosa que pretende desarrollar guías y parámetros de comportamiento para la aplicación al diseño de construcciones en adobe seguras y confortables. Es decir, se pretende definir las especificaciones técnicas para conseguir un diseño sismorresistente adecuado.

2.2. Algunas reseñas técnicas

Perú se encuentra en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica de Sudamérica. Conocida como el anillo de fuego del Pacífico, esta zona concentra la mayor actividad sísmica y volcánica del planeta. Ello es debido al lecho del océano Pacífico sobre el cual descansan varias placas tectónicas que se encuentran en constante movimiento, deslizando entre sí y acumulando tensiones. Cuando estas tensiones se descargan producen movimientos de tierra que pueden incluso llegar a provocar tsunamis según la zona en que se produzca el epicentro del sismo.

Figura 2.1: Cinturón de fuego

Sin embargo, ésta ha sido la franja en que han confluido las antiguas culturas de gran tradición en la construcción en tierra. Entre ellas, cabe destacar la cultura inca y la cultura española, de las cuales se conservan hoy en día algunas construcciones. El tipo de construcción predominante era el tapial y la quincha.

Las construcciones se caracterizaban por ser de una y hasta tres alturas, pero tras un terremoto en 1746 se prohibió la construcción de casas de más de una altura. Actualmente, el número de casas en adobe es de alrededor de dos millones y medio de unidades; lo cual representa un 40% del total de vivienda construida.

El origen del uso de la tierra como elemento constructivo tiene como fundamento el que, al humedecerse, ésta se convierte en maleable gracias a la arcilla plástica que contiene. Al secarse se endurece logrando una buena resistencia a compresión, no así a tracción en que su resistencia se ve notablemente mermada.

Típicamente, las construcciones en adobe de Perú son de tierra simple; es decir, tierra sin refuerzos ni cocido. La forma constructiva más importante en estas estructuras es el muro. Los muros son los elementos estructurales de mayor uso. Su principal característica es una

buena capacidad resistente tanto a esfuerzos cortantes como a flexión. Sin embargo, durante un terremoto, el muro sufre esfuerzos de tracción que la tierra es incapaz de absorber.

Como consecuencia de estos esfuerzos, el muro se agrieta y se fragmenta en pedazos que caen, disminuyendo la resistencia neta del muro y propiciando la caída del techo y los elementos aledaños al mismo.

Para evitar esto, se puede armar la tierra empleando elementos capaces de resistir los esfuerzos a tracción. De este modo, se aprovechan las capacidades mecánicas del conjunto de los materiales adobe y refuerzo.

Los refuerzos de las construcciones en tierra, deben ser continuos en los muros ya que las solicitaciones de carga sísmica pueden causar esfuerzos de tracción en cualquier punto de la estructura. Por ello, deberán ser colocados a ambos lados del muro, recubiertos de un enlucido que los proteja frente a factores ambientales.⁵

De manera habitual, el adobe trabaja en condiciones de microfisuración y el buen comportamiento frente a sismo se lo confiere la resistencia a tracción de los refuerzos provistos. Hasta hoy, se han probado varios refuerzos de manera experimental tales como cañas, cuerdas naturales o artificiales, tubos de PVC o mallas plásticas como la geomalla.

La normativa en que se basa el presente proyecto es la "Norma E.080 Adobe" recogida en el "Reglamento nacional de edificaciones", realizado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. Entre otros aspectos, la norma sugiere distorsiones angulares menores a 0.05; en caso contrario, se deberá rigidizar la edificación. A partir de este valor, la obra colapsa irremediablemente.

⁵ "Norma E.080 Adobe. Reglamento nacional de edificaciones". SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Lima- Perú. 2006.

2.3. Investigaciones llevadas a cabo por la PUCP hasta la fecha

Desde el terremoto acaecido en 1974, la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP) ha estudiado el comportamiento y estabilidad de las construcciones de tierra en áreas sísmicas.

Los primeros trabajos surgieron con objeto de determinar las características de la mampostería de adobe. Se ensayaron muros con cargas estáticas. Posteriormente, se investigó con plataformas inclinables en las cuales se ensayaron módulos completos de casas a escala real. En este tipo de ensayos se comprobaron gran cantidad de refuerzos tales como caña, madera o alambre. Se investigó también sobre el comportamiento a tracción y a compresión del adobe de mampostería mediante ensayos específicos.

Figura 2.2: Plataforma inclinada para la realización de ensayos

Posteriormente, se comenzaron con los ensayos de compresión diagonal sobre muretes, tratándose de averiguar el comportamiento de los muretes ante esfuerzos cortantes y de flexión.

Así, se logró determinar el refuerzo más eficiente atendiendo al precio respecto a la cantidad de esfuerzo soportado. Este refuerzo constó en introducir cañas verticales enteras en el interior de los muros. Las cañas mejoran notablemente la resistencia y la capacidad de deformación de los muros ensayados.

A continuación, se continuaron ensayando muros de mampostería de adobe, atendiendo a la influencia de las propiedades de los materiales en la resistencia. En concreto, se realizaron 246 ensayos de muretes a compresión diagonal y 5 muros a escala natural. De ello, se dedujo que la arcilla era el principal componente del adobe, pues es el elemento que

proporciona la ligadura de partículas de mortero y adobes. La arcilla, a su vez, es una de las responsables de la contracción que, al secarse, produce las fisuras en los ladrillos. La aparición de fisuras puede controlarse mediante la adición de paja o arena gruesa al mortero.

Figura 2.3: Ensayo de módulo de vivienda a escala real

También se llevaron a cabo ensayos sísmicos en módulos de viviendas de adobe empleando una mesa vibratoria unidireccional. Se sometieron los módulos a sismos simulados de amplitud creciente. Así, se ensayaron especímenes sin techo, con y sin refuerzo; tal y como recomienda el Reglamento Nacional de Construcciones del Perú⁶.

El principal resultado obtenido fue que ante un sismo de alta intensidad, las construcciones no reforzadas colapsan tras la separación de los muros en sus esquinas. Para subsanar estos problemas, se puede introducir refuerzos horizontales y verticales que impiden la aparición de grietas diagonales y la consecuente separación entre muros. También se contrastó la eficacia de la tierra armada con mallas internas de caña para evitar la falla frágil, y el colapso y caída de la estructura.

En 1994, comenzaron a estudiarse nuevas posibilidades para el refuerzo de obras en adobe ya existentes. El estudio se centró en aumentar la resistencia sísmica de las viviendas mediante refuerzos externos, a fin de retardar el colapso. Con este objetivo, se probaron refuerzos formados por sogas, tablas de madera o mallas de gallinero electrosoldadas de acero. Se determinó que la solución más eficiente fue la de refuerzo de mallas electrosoldadas en el interior de los muros mediante un enlucido de cemento⁷.

⁶ "Norma E.080 Adobe. Reglamento nacional de edificaciones". SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Lima- Perú. 2006.

⁷ "Adobe reforzado con mallas de alambre: Ensayos de simulación sísmica y aplicación a construcciones reales". Daniel Quiun, Angel San Bartolomé, Luís Zegarra. 2004.

Figura 2.4: Refuerzo de muros de adobe con valla de alambre

Estas soluciones lograron aumentar de manera considerable la seguridad ante terremotos de las viviendas, puesto que la resistencia se incrementó y se controló el desplazamiento máximo. Se lograron obtener parámetros para soportar sismos leves sin que la estructura cayese; sin embargo, el colapso siguió produciéndose.

Hace pocos años, se comenzó a investigar sobre nuevos refuerzos con materiales industrializados. En este aspecto, se desarrolló el uso de elementos plásticos con un comportamiento similar al de los refuerzos ya contrastados. Se resolvió que los materiales industriales aumentaban aún más la resistencia y la capacidad de deformación de los muros, obteniendo mejores resultados que con los materiales anteriormente ensayados.

De estos ensayos, se estimó que el mejor esfuerzo posible era el colocar geomalla embebida dentro de los muros y recubiertas de mortero de barro. El tarrajeo circundante reduce el espesor de las grietas. El siguiente objetivo fue optimizar la cantidad de geomalla a fin de economizar al máximo en los materiales.

Se investigó la cantidad necesaria de geomalla a colocar y los puntos estratégicos para evitar la ruina de la estructura. Se decidió que la cantidad precisa era la que recubría todo el muro y además quedaba conectada entre sí mediante elementos de enlace. Así mismo, se determinó que las mallas no estandarizadas no son fiables ni seguras y que las mallas debían cubrir todas las zonas de los muros de la estructura.

Últimamente, se ha comenzado una investigación para obtener buenos resultados en las reparaciones de fisuras ya producidas sobre construcciones en tierra. Se concluyó que el método más efectivo era el de inyección de lechada de barro.

Dicho barro debía ser lo más parecido posible al barro original de la pared para lograr el mejor comportamiento posible. Tras la reparación de los muros, se aplicaba un ensayo de carga lateral cíclica, observando que las nuevas grietas aparecían por diferentes zonas a las registradas originalmente. El mayor problema cuando se inyectaba la lechada era la penetrabilidad del barro líquido. Cuanto menor era el espesor de la grieta, más fluido debía ser el líquido y menores las partículas de que lo componían.

Figura 2.5: Inyección de lechada

Se estudió también la relación entre la velocidad en que se crean las fisuras y la rapidez de secado. Se denotó que la velocidad de secado era una variable crucial en la formación de fisuras. Esto es, a menor velocidad de secado, menor será el número y espesor de las fisuras. Paulatinamente, se ensayaron estos métodos en campo, siendo los primeros emplazamientos experimentales sitios históricos de Lima. Tras observar el buen comportamiento de estos métodos, se optó por la tecnificación de los procedimientos de inyección.

Como consecuencia de todos los datos recopilados, se desarrollaron dos manuales de construcción saludable y sismorresistente de viviendas de adobe reforzadas con geomalla; uno de ellos para regiones áridas y otro para regiones lluviosas. Estos manuales se acompañaron de cursos de formación práctica con el objetivo de instruir y concienciar a la gente en materia de seguridad ante terremotos.

En nuestros días, todos los esfuerzos de la PUCP se han centrado en comprobar el comportamiento de muros y pilares reforzados con geomalla, ante esfuerzos de cortante y flexión. A partir de estas tentativas, se pretende determinar modelos analíticos y modelos numéricos susceptibles de ser extrapolados a otros muros, de los cuales pueda conocerse su comportamiento sin necesidad de llevar a cabo ensayos destructivos.

Es en este último punto es en el que se basa el presente proyecto, tratando de encontrar parámetros de comportamiento en los muros reforzados a través de un modelo de elementos finitos, que a su vez puedan ser aplicables a otros muros sin necesidad de ser ensayados.

2.4. Principales factores de colapso de las viviendas de Adobe

El colapso en este tipo de estructuras se suele producir por esfuerzos de origen sísmico o debido a problemas de humedades que reducen la capacidad portante del adobe.

Los principales factores influyentes en el colapso de las estructuras son las de:

- Suelos blando bajo cimentación.
- Baja calidad de mano de obra y materiales.
- Bajo espesor de los muros.
- Inadecuada concepción de los vanos.
- Débil conexión entre muros con techos y otros muros.
- Falta de mantenimiento de las cubiertas de teja y de barro.

Durante el proceso de colapso sísmico, se produce una aparición paulatina de grietas de tracción diagonales cada vez de mayor tamaño. Estas grietas van mermando la capacidad de carga de la estructura, produciendo la desconexión de los muros y la posterior caída del techo.

En los primeros compases del terremoto, la estructura sufre un movimiento cíclico de tracción- compresión que provoca el agrietamiento sucesivo de los muros. El muro sufre una breve fase de comportamiento elástico que cesa cuando aparecen las primeras fisuraciones que producen los esfuerzos de tracción.

Inmediatamente después, y a medida que aumenta la amplitud del sismo, tiene lugar el comportamiento inelástico en que comienzan a aparecer grietas cada vez de mayor envergadura. Las grietas comienzan en las esquinas de la parte superior o inferior del muro.

Sometidas a esfuerzos cíclicos continuos, las grietas se van haciendo cada vez más amplias y los muros van separándose entre sí, perdiendo su estabilidad lateral y desplomándose fuera de su plano. Se producirá, por tanto, la pérdida de la capacidad portante y el colapso consecuente de la obra. La falla se produce de manera frágil.

Figura 2.6: Colapso de una vivienda debido a un sismo

La humedad influye en gran manera sobre el colapso de las estructuras. La falta de impermeabilización de cubiertas y techos, puede causar la destrucción de los edificios de adobe. A través de los elementos estructurales puede introducirse el agua que satura las paredes produciendo, en primer lugar, el desprendimiento de partículas finas y, posteriormente, el derrumbe total o parcial de la pared colapsando la estructura.

Figura 2.7: Colapso de una estructura debido a humedades

Cuando las hiladas inferiores de bloques de adobe se saturan de la humedad del suelo, las condiciones mecánicas de resistencia a la tensión se reducen. Esto permite que los empujes verticales y laterales no encuentren una resistencia efectiva, produciendo el colapso estructural.

El problema se hace patente cuando surgen pequeñas goteras. Se recomienda por ello la reparación de las fisuras del techo antes del comienzo de la época invernal para subsanar este problema.

Según las investigaciones realizadas, la geometría de las nuevas edificaciones en tierra armada debe realizarse considerando muros anchos y poco esbeltos, habitaciones preferiblemente cuadradas, distribuciones en planta simétricas y vanos, como ventanas o puertas, centrados y pequeños.

Capítulo 3 Ensayos de cortante en muros

3.1. Introducción

Los ensayos de los muros ante carga cíclica lateral conllevan una preparación tanto de materiales como consideraciones a hacer de las cuales derivará el resultado final. Este apartado pretende indicar algunas de las particularidades utilizadas para lograr una mejor comprensión de los resultados.

El principal interés de estos ensayos es determinar una ley de comportamiento que presente tensión tangencial respecto a deformación angular, a partir de la cual conocer el comportamiento que podrían tener los muros ante terremotos.

Se ensayará una serie de muros macizos sometidos a cortante para controlar el comportamiento en muros en función del espesor. Se asume que el comportamiento de estos muros ensayados puede ser extrapolable a muros de mayor longitud.

Figura 3.1: Construcción de un muro de adobe

3.2. Descripción de los muros ensayados

La gran diversidad tipológica de los ladrillos de adobe, no permite una caracterización unificada para el material de adobe. Las características del material depende de las condiciones del suelo, el secado de los ladrillos, la adición de otros productos de estabilización o la forma dada al ladrillo.

En este apartado, se pretenden caracterizar los muros ensayados, sobre los cuales se calcularán y diseñarán los modelos numéricos de comportamiento. Los ensayos se han realizado sobre muros de 25 y 40 centímetros de espesor.

El modelo adoptado asemeja al modelo propuesto por Calderini y Lagomarsino (2008)⁸, que supone el muro como un material composite homogéneo, con una mezcla de bloques de adobe y mortero más geomalla, como material isótropo. Se ha comprobado que este modelo es adecuado para muros homogéneos.

Los muros tendrán una disposición cuadrada de 150cm de lado. Se encuentran formados por piezas de adobe de 40x40x10cm para los de 40cm de espesor, y de 40x25x10cm para los de 25cm. Los ladrillos empleados son ladrillos sin cocer con una composición de 5 partes de tierra por 1 de arena gruesa y 1 de paja. Esta combinación tiene el objetivo de atenuar los efectos de fisuración por contracción del adobe durante el secado.

Los ladrillos sin pre compresión tienden a fallar a cargas laterales pequeñas. Además, introducen errores en los resultados experimentales. Si se compactan los bloques de adobe, además de aumentar la densidad específica hasta los $19 - 20 \frac{kN}{m^3}$, mejora la rigidez a compresión alrededor de $5MPa^9$.

El mortero de unión de los adobes debe presentar algo más de calidad que los ladrillos, sin agregados para mantener un resultado plausible en la realidad. Las juntas verticales y horizontales tendrán una anchura de aproximadamente de 1cm.

Para levantar el muro se dispuso en primera instancia las maestras asentando los adobes a nivel sobre mortero de 1cm de barro. Posteriormente, se alineó la hilada amarrando un cordel de rafia entre adobes; así es como se completa la primera hilada. Para el resto de hiladas, se prosigue humedeciendo previamente la zona del adobe que se ponía en contacto para evitar que el adobe se seque demasiado rápido, y logrando una mejor adherencia entre filas consecutivas. Cabe destacar que se intercaló la posición de los adobes entre hiladas consecutivas para mejorar el comportamiento general. Se estima que la resistencia a compresión de cada bloque de ladrillo es de unos 3MPa¹⁰.

⁸ "Identification of shear parameters of masonry panels through the in- situ diagonal compression test". A. Brignola, S. Frumento, S. Lagomarsino, S.podestà. 2007.

⁹ "Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials". C. Jayasinghe, R. S. Mallawaarachi. 2009.

¹⁰ "Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Crescendio Valdés, Villa Clara, Cuba". B. Saroza, M. A. Rodríguez, J. M. Menéndez, I. J. Barroso. Julio 2008.

No obstante, la resistencia a compresión de los adobes utilizados en este proyecto para el muro fue calculada en la PUCP. Su valor fue de alrededor de $1MPa^{11}$.

El muro se recubrió a ambos lados con refuerzo de una malla de polipropileno o geomalla. El anclaje de geomalla se dejó embebida 15cm en los cimientos de hormigón.

Del mismo modo, se ataron las mallas de los dos lados del muro mediante cintas de rafia de 70cm de longitud, solapándose entre ellas una longitud de 15cm. Las rafias se dispusieron cada 30cm en la horizontal. Se prestó especial atención al amarre en esquinas y zonas donde pudieran existir conflictos. Esta geomalla sirve a modo de arriostramiento horizontal aportando una mayor rigidez a los muros.

Figura 3.2: Envoltura de geomalla del muro y enlazado mediante rafia

Figura 3.3: Composición de los muros

¹¹ "PFC Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomalla". G. Montoya. 2010.
Sobre esto se dispuso un tarrajeo de barro efectuado con la misma composición que tienen los ladrillos de los muros para uniformizar lo máximo posible el espécimen de ensayo. El recubrimiento tiene una proporción de tierra arena de 1 a 1, con un tarrajeo de 2cm de espesor. Antes de aplicar el mortero, se limpia previamente el polvo sobre el muro y se humedece ligeramente el mismo.

La base se constituyó como cimentación en hormigón ciclópeo de proporción de 1:12 y con un 50% de piedra grande. Las dimensiones de la base de los muretes serán: 35x45x180cm. En la parte superior se dispuso una viga de hormigón de dimensiones 25xex180cm; siendo e el espesor del muro que se ensaya. Esta viga tenía el objetivo de lograr una buena transmisión de la fuerza aplicada sobre el muro.

La viga se distribuyó para que actuara como un elemento infinitamente rígido que transmitiera de manera perfecta todas las cargas en el interior del muro. La carga se encontraba aplicada a lo largo de la viga; es decir, en la mayor longitud.

Del mismo modo, se dispusieron en la cara ancha del muro cinco transductores de movimiento con el fin de poder registrar los movimientos durante el ensayo y contrastar así los resultados acaecidos en distintos puntos de los muros.



El esquema del sistema y las dimensiones del muro, se resumen en la figura 3.4.

180cm Figura 3.4: Esquema del ensayo de corte

Es de destacar que el diseño de los muros se realizó para soportar una carga máxima de 60kN y para un desplazamiento máximo de 180mm. Además, debido a las distintas combinaciones de arcilla y arena, cada bloque tendrá unas propiedades que se deberán determinar.

La ley de comportamiento del muro se determinará a partir del ensayo lateral cíclico de corte. Se busca obtener nuevos procedimientos para la caracterización del material compuesto adobe- geomalla sometido a esfuerzos cíclicos laterales.

3.3. Características de los materiales constituyentes del muro

El objetivo de este apartado es la caracterización de los materiales que integran los muros. Entre ellos, geomalla y tipo de adobe son los más importantes. El mortero se efectuará a partir del adobe que constituye los ladrillos.

3.3.1. Adobe empleado

Las características del adobe empleado, se obtuvieron de ensayos de pilas de ladrillos de adobe sometidas a compresión. Los ladrillos de adobe tienen dimensiones cuadradas de 22x22cm.



Figura 3.5: Pila de ladrillos de adobe para la caracterización del material

La disposición de los bloques y del transductor se muestra en la figura 3.5. Se disponen dos transductores verticalmente a fin de registrar el desplazamiento vertical provocado y obtener a partir de este la deformación. Uno de ellos se sitúa en la cara vista del espécimen y la otra en la cara posterior.

En concreto, se ha ensayado tres pilas de adobe. Estos ensayos permiten caracterizar la ley de comportamiento a compresión de la mampostería de adobe sin reforzar.



Figura 3.6: Esquema de ensayo y medidas de las pilas de ladrillos de adobe

Las dimensiones y la disposición exacta del transductor de desplazamiento se muestran en la figura 3.6. La carga se aplicará en la parte superior mientras la inferior quedará empotrada al suelo.

De esta manera se obtienen los resultados de las gráficas 3.7.



Figura 3.7: Leyes de compresión de los pilares ensayados

En la figura 3.7 se observa cómo el pilar 1 alcanza una mayor resistencia de compresión. Las otras dos pilas, tienen una resistencia algo menor aunque su variación es muy baja. Las discrepancias pueden deberse a la forma constructiva de la pila. Además las juntas de

mortero de adobe que producen discontinuidades en el material también influyen en este comportamiento. Aun así las discrepancias son mínimas, pudiéndose dar validez a los ensayos realizados.

El módulo de elasticidad inicial de cada pilar se ha estimado aproximadamente como la pendiente de la recta que partiendo del origen acapara un mayor número de puntos de la ley de comportamiento. La descripción gráfica de método hecho se muestra en la imagen 3.8.



Figura 3.8: Ley de compresión del primer pilar ensayado

La media de estas tres pendientes de los tres ensayos de pilas es el módulo de elasticidad que se adoptará, y viene dado por:

E = 766. 7579 MPa

Los resultados sobre los pilares tras los ensayos se muestran en la imagen 3.9. Las grietas que aparecen son casi verticales. Al aplicar la carga de compresión vertical, se producen tracciones en el plano perpendicular al de carga. Ante esta solicitación de cargas a tracción, el adobe rompe originando las grietas observadas.



Figura 3.9: Resultados del ensayo de compresión sobre las pilas

3.3.2. Geomalla utilizada

La geomalla es un material polimérico capaz de mejorar ostensiblemente el comportamiento estructural del adobe. Este material actúa como la armadura de tracción de las construcciones en hormigón armado, absorbiendo las tensiones de tracción en el elemento constructivo.

La geomalla está constituida por polipropileno de alta densidad y su objetivo es reforzar internamente la estructura y los materiales que rodea. Los valores medios de tensión a distintas deformaciones se recogen en las especificaciones técnicas del material que vendrán proporcionadas por el fabricante.



Figura 3.10: Geomalla

Ante un sismo, se pretende que la geomalla impida el colapso de la estructura. No obstante, tras el temblor, la estructura podría necesitar una remodelación completa para volver a ser habitable. La estructura podría quedar dañada irreversiblemente pero la geomalla debe evitar su derrumbe. Debe colocarse a ambos lados del muro y solapados entre sí al menos 15cm entre ambos lados, asegurando la conexión entre ambas mallas mediante cuerdas de rafia.

La geomalla presenta las siguientes características:

- Retícula rectangular de polipropileno con abertura máxima de 5cm.
- Elongación máxima del 2%.
- Gran flexibilidad.
- Resistencia ante rayos ultravioletas.

Al estar formada por una malla abierta, puede rellenarse con otros materiales formando un material compuesto, aumentando la rigidez del conjunto. Ofrece una buena resistencia a la deformación cuando se instala garantizando la transferencia de las cargas. La principal característica es su alta resistencia a la tracción que posibilita al conjunto el soportar cargas dinámicas.

De eficacia contrastada, la geomalla es de aplicación incluso a antiguas construcciones pudiendo integrarse el material en las paredes sin afectar a los cimientos. Su principal ventaja radica en ofrecer una buena durabilidad y una gran resistencia a la corrosión a bajo coste.

Los ensayos realizados en la Pontificia Universidad Católica de Perú sobre la geomalla concluyeron que la resistencia a tracción de la misma dependía de si la carga se aplicaba en dirección transversal o longitudinal. Los datos entre una y otra dirección difieren en alrededor de un 50%, siendo la tensión de rotura para los ensayos en la dirección transversal de unos $25 \frac{kN}{m}$, y en la dirección longitudinal de $15 \frac{kN}{m}$ ¹².

⁴²

¹² "PFC Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomalla". G. Montoya. 2010.

3.4. Datos de los ensayos

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP).

La base de la cimentación se encontraba encastrada y fija al suelo. La parte superior se componía de una viga de hormigón encargada de transmitir los esfuerzos aplicados en su menor sección a lo largo de todo el lado del muro, pasando plenamente los esfuerzos tangenciales al muro.

Para evitar que el muro gire como sólido rígido o sufra una torsión en su propio plano, se ha dispuesto un sistema de rigidizadores que mantengan su cara inferior y superior paralela; es decir, se ha colocado un sistema de sujeción encargado de evitar el giro de la sección, permitiendo el desplazamiento de secciones transversales entre sí.



Figura 3.11: Muro ensayado y colapsado

La máquina empleada era capaz de producir esfuerzos horizontales, originando ensayos laterales cíclicos. Tiene la capacidad de cargar el muro tanto a izquierda como a derecha. Ejerciendo cíclicamente este movimiento con diferentes amplitudes, se consigue simular la acción de un sismo y efectuar satisfactoriamente el ensayo. Tal y como especifica la norma NTE E.080 ADOBE, se ensayaron en total seis muros; tres para cada espesor; esto es, tres muros de espesor 25cm y otros tres de espesor 40cm. Todos ellos reforzados con geomalla, por lo que las características específicas de cada muro serán diferentes¹³.

Los ciclos de carga comienzan con amplitud nula y su valor va aumentando desde 2mm y hasta los 150mm. El valor de estos desplazamientos se controla mediante el transductor D1.

Más concretamente, los muros de 25cm de grosor fueron sometidos a ciclos de 2, 15, 40 y 80mm; mientras los de 40cm se someterán a 2, 15, 40, 80, 120, 150mm. A estos últimos se les sometió a una mayor fuerza por tener mayor capacidad portante.

Los ciclos de carga se aplicaron dos veces para consolidar la fase de carga en los muros de 40cm. Sin embargo, a los muros de 25cm se le aplicará tan sólo un ciclo de carga de 2mm de amplitud; el resto de ciclos para ese muro sí que se aplicará dos veces.

Es necesario comentar también que los ciclos aplicados constan de una fase positiva a la que se llamará semiciclo positivo. En el diagrama de aplicación de fuerza, esta etapa viene caracterizada por una aplicación de fuerza positiva o hacia la derecha.

La segunda parte del ciclo de aplicación de la carga es el semiciclo negativo, homólogo del positivo cuando la fuerza aplicada es negativa o hacia la izquierda.

¹³ "Norma E.080 Adobe. Reglamento nacional de edificaciones". SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Lima- Perú. 2006.

3.5. Desarrollo de los ensayos

En las próximas líneas se relata pormenorizadamente los desarrollos de los ensayos de corte desde el reposo absoluto. Los datos fueron almacenados en una hoja Excel; entre ellos, se tomaron datos de la fuerza cortante aplicada junto con el tiempo de muestreo y el consecuente desplazamiento producido en cada uno de los transductores.

Tratar los datos del ensayo conlleva un especial cuidado cuando se comprueba el cortante. El principal problema que presenta el cortante en su determinación, radica en que las tensiones no se distribuyen uniformemente sobre el área. Otro problema a tener en cuenta es que el esfuerzo cortante y el de flexión van siempre acoplados.

Por ello, se adoptará como tensión tangencial la tensión media que resulta de dividir la fuerza cortante por el área transversal del muro. Éste área es de 150xEspesor del muro en cuestión.

Para determinar la tensión tangencial, se usará:

$$\tau = \frac{\text{Cortante}}{\text{Área transversal}} = \frac{V}{A_T}$$

La medida de la distorsión angular depende de la posición de cada transductor. Las deformaciones angulares se pueden aproximar como el cociente de la diferencia entre desplazamientos y la separación entre transductores. Para los tres primeros transductores, la fórmula para determinar las deformaciones, para los transductores D1, D2 y D3, es:

$$\gamma_{xy} = \frac{\text{Variación de desplazamientos}}{\text{Separación entre transductores}} = \frac{\Delta D}{L}$$

Los transductores inclinados D4 y D5 proporcionan las distorsiones γ_{xy} , girando las deformaciones que registran. D4 y D5 miden la deformación a partir del desplazamiento relativo que registra cada uno entre dos puntos del muro. Los dos están dispuestos a 45° entre sí; por lo que, mediante un cambio de coordenadas, se puede determinar las distorsiones asociadas a estos dos transductores.



Figura 3.12: Sistema para determinar el desplazamiento unitario de los transductores D4 y D5

La fórmula general para girar las deformaciones un ángulo θ hasta los ejes globales, es:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cdot \cos(2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cdot \sin(2\theta)$$

$$\gamma_{xy}(\theta) = -(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cdot \sin(2\theta) + \gamma_{xy} \cdot \cos(2\theta)$$

Las deformaciones angulares ε_x , ε_y y γ_{xy} están expresadas en ejes globales y para obtener las de los ejes transversales, basta con sustituir los ángulos de los ejes de coordenadas.

$$\theta = 45^{\circ} \rightarrow \varepsilon(45^{\circ}) = \varepsilon_{x'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\gamma_{xy}}{2}$$
 (1)

$$\theta = 45^{\circ} + 90^{\circ} \rightarrow \varepsilon(135^{\circ}) = \varepsilon_{y'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\gamma_{xy}}{2}$$
 (2)

Restando las ecuaciones (1) y (2):

$$\epsilon_{x'} - \epsilon_{y'} = \frac{\gamma_{xy}}{2} - \frac{\gamma_{xy}}{2} = \gamma_{xy}$$

Las deformaciones tangenciales se determinan a partir de las deformaciones medidas mediante dos transductores a 45°.

Con las tensiones tangenciales y las deformaciones obtenidas de los datos experimentales, puede observarse el comportamiento del muro. La determinación de la curva adimensional de comportamiento a cortante se obtiene a partir de la tensión tangencial y de la distorsión angular. Se requiere conocer la dependencia entre esos dos parámetros.

Seguidamente se muestra dicha dependencia a lo largo de los ciclos de carga aplicados. En primer lugar, se tratarán los muros de 25cm de espesor para proceder a continuación con los de 40cm de espesor.

El ensayo se controlará en desplazamientos, aplicándose las cargas necesarias para que el muro alcance el desplazamiento requerido. Las fuerzas aplicadas para lograr dicho movimiento cíclico viene representado por la figura 3.12 para el muro 1 de 25cm.



Figura 3.13: Carga cíclica aplicada al muro 1 de 25cm

Para controlar los movimientos, se empleará como movimiento de control el transductor D1, aunque también se comentarán aspectos sobre el desplazamiento proporcionado por el resto de transductores.

A continuación, se desarrollará el proceso de ensayo del muro 1 de 25cm de espesor y del muro 2 de 40cm, comentando pormenorizadamente los aspectos más importantes que tienen lugar, y hablando resumidamente de los ensayos del resto de muros.

3.5.1 Muro 1 de 25cm de espesor

El primer ciclo de carga tiene una amplitud de 2mm. Como se comentó anteriormente, este muro sufrirá tan sólo un ciclo de carga de 2mm. El ciclo positivo produce el movimiento hacia la derecha que se muestra en la figura 3.14.



Figura 3.14: Primer semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

Este punto de carga no produce agrietamientos en el muro. En este instante, el muro se encuentra casi en zona elástica, sufriendo tracciones poco importantes y susceptibles de ser absorbidas por el adobe. El muro comienza a cargarse desde el reposo hasta alcanzar un desplazamiento de 2mm en la cabeza del muro. Posteriormente, el muro se descarga quedando en el interior una fuerza hacia la izquierda, lo que indica que se ha alcanzado la plastificación.



Figura 3.15: Primer ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

En el gráfico de la figura 3.15, se observa cómo el muro se carga con ruido; esto se debe a la anisotropía del material que provoca la alineación de las partículas para que su disposición ayude a soportar los esfuerzos. La recta de descarga se produce por un camino distinto del de carga por lo que se observa que se produce un daño remanente en el interior del muro.



El primer ciclo negativo hace deslizar el muro hacia la izquierda.

Figura 3.16: Primer semiciclo negativo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

En este semiciclo se aplica una fuerza en sentido positivo o hacia la derecha, que distorsiona la figura del muro. Se provoca la compresión de las fibras que anteriormente se encontraban traccionadas y viceversa. Otro aspecto importante es la aparición de daño en las esquinas del muro. Este hecho puede indicar efectos de flexión en el muro que se hayan acoplado a los del cortante aplicado.



Figura 3.17: Primer ciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

El muro se carga hacia la izquierda hasta alcanzar una amplitud de 2mm y vuelve por una recta de descarga distinta. Se alcanza deformación nula cuando la tensión vuelve a ser positiva; es decir, el muro queda cargado hacia la derecha. La tensión máxima alcanzada en este tramo se da para una tensión de $\tau_{max} = 0.0203$; lo que proporciona una fuerza aplicada sobre el muro de 7612.5 *N*.

El ensayo continúa hasta producir amplitudes de 15mm. El desplazamiento positivo o hacia la derecha aplicado, produce los resultados recogidos en la figura 3.18.





Para lograr reproducir dicho movimiento de 15mm en el muro, es necesario aplicar una carga de 13500*N*. Destaca también el efecto final en que aumenta el desplazamiento sin necesidad de aumentar la carga. El ruido en ese punto está asociado a la aparición de fracturas en el muro.



Figura 3.19: Segundo semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

El segundo ciclo comienza con una fuerza que mantiene al muro en la posición nula, fuerza interna remanente; y, progresivamente, se va impulsando el muro hacia la derecha. A medida que aparece la influencia del cortante, comienzan a surgir grietas en la parte inferior del muro. Las mayores grietas aparecen en el lado opuesto al movimiento que se ocasiona, y en la base debido a los efectos de flexión comentados anteriormente.

Estas grietas son el resultado de comportamientos no elásticos tras sufrir una tensión de tracción excesiva que induce al colapso estructural del adobe. El daño irreversible se produce definitivamente cuando la tensión aplicada en la zona acaba con su rigidez.

El remanente de fuerza alcanzado en este punto es superior al alcanzado en el ciclo anterior. Esto se debe a que el daño producido es mayor por lo que la plastificación también crece.

Para explicar la forma de las grietas en el muro, se deben tener en cuenta las condiciones de contorno. La pared se encuentra sometida a una fuerza en el borde superior estando empotrada en la base tal y como se aprecia en la figura 3.20.



Figura 3.20: Fenómeno de creación de grietas en el muro

La fuerza aplicada F, provoca tracciones en la línea oblicua de en medio representada en azul. Como el material adobe es muy frágil ante esfuerzos de tracción, y las tensiones, flechas rojas, someten al muro en la línea media a tracciones. Cuando este esfuerzo se hace suficiente, surgen las grietas perpendiculares a las líneas de tensión; es decir, diagonales en el muro y paralelas a la línea azul. Las grietas teóricas deberían aparecer en el muro con forma oblicua o diagonal, esto se encuentra reflejado en los experimentos realizados en los seis muros.

La parte negativa del segundo ciclo continúa con el comportamiento esperado y que siguió el primer ciclo. La anchura y la cantidad de las grietas va en aumento y su origen se concentra en la base del muro. Este efecto es causa de problemas de empalme con una cimentación demasiado rígida que introduce los efectos de flexión en el muro.



Figura 3.21: Segundo ciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm



Figura 3.22: Segundo semiciclo negativo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

A continuación, se vuelve a reproducir otro ciclo de misma amplitud que el anterior. Cada uno de los ciclos siguientes se reprodujo dos veces, a fin de consolidar la fase en el muro. El segundo ciclo completo se muestra en la figura 3.23.



Figura 3.23: Segundo ciclo de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

El primer tramo del segundo ciclo es el más rígido y se encuentra por encima de la recarga, segunda parte del ciclo, para alcanzar el mismo desplazamiento de 15mm. Se aprecia fácilmente cómo durante la primera fase, la energía de ruptura, representada por el área bajo la curva, es mayor que la de la segunda fase.

La explicación para este fenómeno es que, en primera instancia, la energía se invierte en la ruptura de los enlaces y la formación de nuevas grietas, mientras que posteriormente las grietas ya han sido creadas y la energía se disipa en el deslizamiento de las partículas del muro entre sí. Se invierte menos energía en el segundo proceso que en el primero.

También se aprecia cómo las curvas de carga toman forma de lazo. A partir de la forma del primero, se van formando lazos nuevos de menor amplitud y más horizontales, por precisar una menor carga, al ser recargados e invertir casi toda la energía en disipación.



Figura 3.24: Final de la etapa del segundo ciclo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

A simple vista, no puede apreciarse gran diferencia en el muro entre el final del segundo ciclo y el primer semiciclo negativo en la segunda etapa. Han aparecido cuatro grietas diagonales, que son las verdaderamente importantes pues serán las que harán colapsar el muro en posteriores ciclos.

Si se comparan los dos primeros ciclos de carga, se aprecia que la primera recta de carga se encuentra por encima de la del segundo ciclo puesto que debe romper los enlaces por primera vez y para ello se necesita mayor energía que para pasar por segunda vez. Este hecho puede observarse en la figura 3.25.



Figura 3.25: Primeros dos ciclos de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

Los lazos de carga son más inclinados conforme aumenta el daño en el muro; se produce una mayor deformación aplicando una menor carga. Esto significa que la rigidez a cortante disminuye. Los lazos deben ser funciones simétricas impares respecto al origen.

El tercer ciclo produce un movimiento máximo de 40mm en la parte superior del muro con respecto a la base. Para originar dicho desplazamiento, ha sido necesario aplicar al muro una fuerza de alrededor de 16725*N*. El resultado del primer tramo positivo del tercer ciclo se presenta a continuación en la figura 3.26.



Figura 3.26: Tercer semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

Se produce un desplazamiento en la parte superior del muro de 40mm hacia la derecha. Las nuevas grietas que han aparecido se han marcado en azul en la imagen y continúan por el camino que abrieron las fracturas originadas en la fase anterior. Se van haciendo cada vez más amplias y comienzan a tomar un camino diagonal a través del muro.

Se observa cómo las fracturas adoptan una longitud importante, aunque en la zona más alejada del encastramiento siguen sin aparecer grietas. El muro comienza a perder su estabilidad y capacidad portante. El efecto de la flexión pierde interés cuando comienzan los grandes desplazamientos.



Figura 3.27: Tercer ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

El proceso de carga continúa desde el punto final el segundo ciclo de carga. Se observa que cada vez es mayor la fuerza que permanece al final del ciclo. Por último, también se debe hacer hincapié en las crestas superiores que se forman antes de alcanzar el pico más alto en la curva de comportamiento. En este entorno, el muro no opone resistencia al incremento de deformaciones. Parece que en estos puntos es donde se abren las grietas.

La parte negativa del tercer ciclo presenta el mismo aspecto que el ciclo negativo del segundo ciclo. Como el muro ya se encuentra algo dañado, el ciclo es de baja pendiente, que indica la ruptura de nuevos enlaces.

En el final, presenta un tramo con ruido horizontal. La recta de descarga vuelve con una rigidez parecida a la de carga y devolviendo prácticamente la misma energía al muro cosa que indica que la ruptura en el ciclo negativo no consume tanta energía como en el positivo. Implica que se precisará menor carga para llevar a cabo el semiciclo negativo. La representación de este semiciclo negativo puede verse en la imagen 3.28.





En la siguiente figura, se muestra la aparición de las nuevas grietas en este semiciclo negativo; en concreto, las nuevas grietas aparecidas son las que se encuentran inclinadas hacia la derecha. En esta etapa, se uniformizan las grietas originadas.



Figura 3.29: Tercer semiciclo negativo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

El tercer ciclo completo se presenta en la figura 3.30.



Figura 3.30: Tercer ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

Como siempre, el primer semiciclo presenta una mayor rigidez que el segundo. Se observa cómo el lazo de carga consume más energía de lo que luego aporta la descarga creando esa histéresis que disipa energía en el muro. La histéresis es sobre todo consecuencia de las imperfecciones del material, aunque también intervienen otros factores.

Por último, el muro se sometió a un último ciclo de amplitud 80mm. Esta última fase es la que provoca el daño total y colapso de la estructura. La primera parte del ciclo se muestra seguidamente en la figura 3.31.



Figura 3.31: Cuarto ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

En este ciclo de carga se puede observar fácilmente el colapso del muro cuando la carga cae repentinamente. Carga y desplazamiento siguen aumentando hasta alcanzar los 8*cm*. El esfuerzo requerido para producir el colapso definitivo del muro es de 17362.5*N*.



Figura 3.32: Cuarto semiciclo positivo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

Al alcanzar los 80mm, surgen nuevas grietas diagonales que llegan a recorrer todo el muro de esquina a esquina. Este es el verdadero síntoma de que el muro se acerca a un colapso inevitable. Las grietas se distribuyen de igual modo bajo la superficie y la geomalla es el elemento encargado de mantener cohesionado el conjunto. Los daños son más apreciables en la zona inferior, con fracturas de gran espesor que casi han separado el espécimen de la cimentación.

La parte negativa del ciclo continúa con la tónica predominante, produciendo nuevas grietas distribuidas perpendicularmente a las líneas de tensión generadas.



Figura 3.33: Cuarto semiciclo negativo de carga aplicado sobre el muro 1 de 25cm

En la figura 3.34 el daño es más severo, pudiéndose apreciar como la unión entre la base y la cimentación se encuentra destrozada y las grietas ya han alcanzado una anchura excesiva.



Figura 3.34: Cuarto semiciclo de carga negativo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

El comportamiento representado en el gráfico 3.34 es altamente irregular. El muro se carga hacia la izquierda por una recta de pendiente elevada, tras la cual se produce una dilatación sin aumento de la fuerza neta. Tras esta situación, se alcanza el máximo desplazamiento con un descenso de la fuerza. Esto que indica que el muro se ha fracturado completamente y se ha producido la ruina de la estructura.

Este cuarto ciclo de carga es el más irregular de todos los vistos hasta el momento. Comienzan a aparecer efectos de ruido, no linealidades y grandes fluctuaciones que no permiten conocer a priori el comportamiento del muro.



Figura 3.35: Cuarto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

En la primera fase del cuarto ciclo, figura 3.36, se representa el pico de carga que colapsa al muro. Posteriormente, el muro se recarga en el siguiente semiciclo y se aprecia que el pico desaparece debido a que los enlaces que existían anteriormente se rompieron y ahora no oponen resistencia.

La fuerza remanente que queda en el muro se puede consultar en el gráfico y su valor es de unos 1125*N*.

Atendiendo al proceso completo de carga para la deformación angular obtenida a partir del desplazamiento relativo entre los transductores D1 y D2, se obtiene la siguiente situación en que se presentan todos los ciclos sufridos por el muro 1 hasta el colapso.



Figura 3.36: Proceso de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

En la figura 3.36, se muestran todos los ciclos de carga aplicados en el muro, diferenciándose entre cada uno de ellos a través de los colores. La carga comienza con el ciclo rojo de carga que es a su vez el que más rigidez requiere, para alcanzar los 2mm. Una vez dañado el muro, el segundo ciclo de carga, ciclo azul, requiere menos carga para desarrollar el desplazamiento que se le exige.



Figura 3.37: Ciclos de carga positivos en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 1 de 25cm

El tercer ciclo aumenta la rigidez cuando se supera el desplazamiento alcanzado en el segundo ciclo. Se observa que al reproducir el tercer ciclo por segunda vez el pico final se encuentra por encima de la primera pasada. Esto quiere decir que el muro ha plastificado aún más y se ha alcanzado en el muro un desplazamiento superior a 40mm.

El último ciclo de 80mm es el más irregular como ya se ha comentado. Muestra una característica bajada brusca de la fuerza cuando el muro colapsa. El resto de transductores arroja resultados similares.

Como cabría esperar, la situación de los transductores influye en la deformación desarrollada. El resultado de los transductores es parecido en todos los casos, como se observa en la figura 3.38.



Figura 3.38: Diagramas de comportamiento a cortante positivos de todos los transductores en el muro 1 de 25cm

En la figura 3.38 se muestran todos los ciclos de carga positivos registrados por todos los transductores en el ensayo cíclico lateral del muro 1. El canal D1-D2 es el que se ha comentado en los párrafos anteriores. La relación entre los sensores D4 y D5, proporciona resultados muy alejados del resto, por lo que se excluirá su uso para la definición de la ley de compresión en el tratamiento de datos.

La figura 3.39 muestra la disposición de los transductores. Los transductores emplazados en diagonal son los correspondientes a D4 y D5, que no recogen bien los datos de desplazamientos producidos en el muro, como se ha comentado anteriormente.



Figura 3.39: Disposición de los transductores en el muro

El resto de muros ensayados de espesor 25cm reproducen el mismo comportamiento y no presenta gran interés el comentarlos pormenorizadamente.

El resultado para los otros dos muros de 25cm de espesor, se muestran a continuación. En primer lugar se exponen los resultados para el muro 2 de 25cm, dejando para más adelante el muro 3 de 25cm.



Figura 3.40: Proceso de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 25cm



Figura 3.41: Diagramas de comportamiento a cortante positivos de todos los transductores en el muro 2 de 25cm

Los diagramas de esfuerzo obtenidos para el segundo muro ensayado se parecen mucho a los del primario. De nuevo, el diagrama obtenido mediante el movimiento relativo de los transductores D4 y D5 se alejan bastante de la media de resultados. A falta de datos, este error deberá achacarse tanto a la mala situación como al registro de datos de los transductores.



El tercer muro de 25cm ofrece los resultados mostrados en la imagen 3.42. y 3.43.

Figura 3.42: Proceso de carga completo en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 3 de 25cm



Figura 3.43: Diagramas de comportamiento a cortante positivos de todos los transductores en el muro 3 de 25cm

Entre los tres muros ensayados, el que presentó un mayor deterioro fue el último. El muro 3 de 25cm es el más deteriorado tras el ensayo. El resultado final del ensayo se presenta en la figura 3.44.



Figura 3.44: Resultado final del ensayo sobre el muro 3 de 25cm

En este caso, el daño es tan importante en el muro que incluso el mortero cae permitiendo ver la geomalla. La deformación máxima alcanzada ha llegado a superar ligeramente el valor de 0.05, tal y como se observa en las figuras 3.40 a 3.43. Las zonas en que el daño ha sido mayor son los encuentros en la viga superior y en la base, donde hay concentraciones de tensión, mientras que lejos de estos puntos las tensiones se han repartido uniformemente.

3.5.2. Muro 2 de 40cm de espesor

Se comentarán algunos aspectos relacionados con los muros de 40cm de espesor. Se ha elegido como referente el muro ensayado número 2 porque es del que se posee una mayor información. Los muros de espesor 40cm se ensayaron hasta alcanzar una amplitud de ciclo de 160mm.

En este sentido, se comentarán los sucesos acaecidos durante la consecución del ensayo, disertando sobre los aspectos en que influirán y las conclusiones derivadas de los hechos. Se utilizará también en este caso el desplazamiento relativo entre D1 y D2 para caracterizar los resultados.

El proceso de carga comienza desde el reposo absoluto y va incrementándose la fuerza aplicada hasta alcanzar un desplazamiento de 2mm.



Figura 3.45: Resultado tras el primer ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm

Tras el primer ciclo de carga, aparecen las primeras grietas en el mortero, producidas por la fuerza aplicada hacia la derecha. La carga máxima que fue necesaria aplicar para llegar a este punto fue de 23400*N*.



Figura 3.46: Primer ciclo de carga positivo en la ley de comportamiento

a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm

Este primer ciclo es muy parecido al del muro de 25cm; sin embargo, en este caso se resolvió aplicar dos veces la carga. Al comienzo de la aplicación, se observa un ruido producido como consecuencia de la ordenación de elementos internos.

El segundo ciclo tiene una amplitud de 15mm. La fuerza máxima necesaria para desarrollar dicho desplazamiento en el muro es de 43440N.



Figura 3.47: Segundo ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm

Este ciclo, vuelve a los cauces normales anteriormente relatados, con el primer ciclo de carga por encima del segundo y manteniendo la carga remanente al final de ciclo.



Figura 3.48: Resultado tras el segundo ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm

Tras la finalización del segundo ciclo, el agrietamiento es notable. Durante el proceso de carga, se escuchó un ruido en el muro que produjo un salto de carga en los sensores. Este ruido significó la ruptura interna de los ladrillos y la consecuente pérdida de rigidez.

Durante el tercer ciclo, dejan de aparecer grietas abriéndose las ya existentes. La amplitud en este caso es de 40mm. La carga que produce dicho desplazamiento es de 56880*N*.



Figura 3.49: Tercer ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm



Figura 3.50: Resultado tras el tercer ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm

Aparecen nuevas grietas, grietas azules en la imagen, que van recorriendo toda la zona central del muro. En este punto, comienza a actuar la geomalla como refuerzo para absorber las tensiones de tracción.

El cuarto ciclo desarrolla una amplitud de 80mm.



Figura 3.51: Cuarto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm

La fuerza máxima necesaria para desplazar el muro los 80mm requeridos, es de 50880*N*. Lo que significa que la carga necesaria para alcanzar los 8cm de desplazamiento es menor a la que se precisó anteriormente. El muro ya ha colapsado y la geomalla es la encargada de absorber los esfuerzos. El ciclo se presenta con sus rasgos característicos, dando lugar, al final del ciclo, a los resultados observados en la imagen 3.52.



Figura 3.52: Resultado tras el cuarto ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm

En este ciclo no surgen más grietas sino que las existentes se siguen abriendo más y más. Durante la fase negativa del primer ciclo, se desprende el enlucido de la zona central como se aprecia en la imagen 3.52. Además, tras el comienzo de la segunda fase del ciclo, los daños llegan a afectar al lado derecho del muro.

Durante el quinto ciclo se alcanzan los 12cm de desplazamiento. El gráfico de carga tiene una forma inusual conforme a lo que se ha visto.



Figura 3.53: Quinto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm

El ciclo no presenta especial interés, el hecho más destacable es que la rigidez cae de una manera notoria. El muro no opone apenas rigidez hasta que comienza a llegar a la zona de los 120mm. Esta zona no se encuentra dañada y, por tanto, opone resistencia a la fuerza; de ahí el aumento de la rigidez cerca de los desplazamientos de 120mm. La fuerza que se necesita para alcanzar dicho desplazamiento sigue descendiendo, esta vez hasta un valor de 36240*N*.



Figura 3.54: Resultado tras el quinto ciclo de carga sobre el muro 2 de 40cm

En este caso se produce la ruina absoluta de la estructura incluso la ruptura parcial de la geomalla. En esta fase se ha llevado el comportamiento del conjunto hasta las últimas consecuencias. En los primeros compases del ciclo se escucha como se produce la ruptura en la malla y como la zona de anclaje a la viga collar se rompe. Este hecho puede observarse en la parte superior del muro.

Cuando comienza el primer semiciclo negativo se rompe el cable que empleaba el transductor D5 dejando de medir. El proceso se detuvo para volver a colocar el transductor. Es también en este punto cuando la zona de tarrajeo de la derecha cae dejando al descubierto la geomalla. En el siguiente semiciclo comienza la ruptura de la geomalla. El muro ya ha colapsado y más allá de los 12cm de recorrido el muro caerá de forma irremediablemente.

El último ciclo de carga procuró someter al muro a un desplazamiento de 16cm. Para ello, se requirió tan sólo una fuerza de 16080N.


Figura 3.55: Sexto ciclo de carga en la ley de comportamiento a cortante, para el desplazamiento relativo de D1- D2 del muro 2 de 40cm

La característica que presenta una fuerza tan baja da lugar al pico que presenta la ley de comportamiento. El muro está ya tan perjudicado que no se requiere apenas fuerza para alcanzar los 16cm. La rigidez a cortante presenta poca inclinación, no necesitándose una carga muy elevada para alcanzar el desplazamiento indicado.



Figura 3.56: Resultado final del ensayo sobre el muro 2 de 40cm

Esta última fase se efectúa a modo de comprobación del comportamiento del muro. El muro ya había colapsado en la etapa anterior y la geomalla había roto. En esta fase se hace patente este hecho y se comprueba cómo el muro ha roto irreversiblemente.

El diagrama tensión- deformación, teniendo en cuenta el resto de transductores, de los ciclos positivos de carga se muestra en la figura 3.57.



Figura 3.57: Diagramas positivos de comportamiento a cortante de todos los transductores en el muro 2 de 40cm

Estas gráficas muestran las mismas características que los diagramas de los muros de 25cm. Así, todos los transductores describen un comportamiento similar de los muros.

Este último ensayo ofrece el comportamiento típico de las construcciones bajo la acción de un terremoto. Se presentarán ahora las curvas de comportamiento de cada uno de los muros de 40cm. Similares características presentan el resto de muros ensayados. Para el muro 1 de 40cm de espesor, el diagrama de tensión- deformación tiene el aspecto recogido en la figura 3.58.



Figura 3.58: Diagramas positivos de comportamiento a cortante de todos los transductores en el muro 1 de 40cm



Figura 3.59: Resultado final del ensayo sobre el muro 1 de 40cm

La forma de ruptura del muro 1 es parecida a la del 2. Sin embargo, en el muro 2 el resultado final es más exagerado por la caída de la terraja. De nuevo el enlucido rompe primero dejando a la vista la malla. La malla a su vez rompe pero se mantiene cohesionada con el resto de elementos como una unidad.

El muro 3 también conlleva el comportamiento de sus predecesores. Los diagramas de tensión- deformación no difieren en gran medida.



Figura 3.60: Diagramas positivos de comportamiento a cortante de todos los transductores en el muro 3 de 40cm



Figura 3.61: Resultado final del ensayo sobre el muro 3 de 40cm

El resultado de este tercer muro es análogo al resto, con la ruptura en el centro del muro y la desconexión del espécimen en las esquinas superior e inferior en primer lugar.

3.6. Análisis de resultados experimentales

A la vista de los resultados, puede decirse que el daño se hace irreversible cuando la fuerza aplicada hace que la tensión en el centro del muro sea máxima, acabando con la rigidez en esa zona.

Aunque el muro colapsa y la estructura queda inservible, el conjunto no cae; se mantiene en pie, gracias a la geomalla. El adobe reforzado ofrece una buena respuesta, además de tener una fácil reparación.

Las grietas aparecen en las zonas que se someten a tracciones que agotan la rigidez del material; estas zonas son normalmente esquinas. En construcciones reales, esto se traducirá en la aparición de fracturas en dinteles de puertas y ventanas con trayectoria diagonal a partir del punto de apertura.

Cuando surgen las grietas, se abandona el comportamiento elástico, el ensayo se vuelve caótico no pudiéndose predecir la evolución posterior del test. Se tiene una gran incertidumbre sobre cuál será el siguiente efecto que se generará en el muro. Esto es debido a la aparición de efectos no lineales que influyen en el comportamiento.

La malla ha mejorado de manera notoria la resistencia. Si se cuantifica la mejora en términos de resistencia, la geomalla aumenta la resistencia del conjunto en aproximadamente un 65%¹⁴. De todas maneras, la albañilería de adobe es realmente la que marca la diferencia a la hora de mejorar el comportamiento sísmico. Entre los elementos de albañilería, el elemento crucial es el tipo de arcilla y tierra empleada, aunque típicamente las rupturas suelen producirse por la zona del mortero.

Cada arcilla posee un módulo de elasticidad que varía ostensiblemente. El proceso de fabricación, a su vez, es un aspecto importante a tener en cuenta. Según el tipo de secado que se lleva a cabo el material de albañilería tendrá unas propiedades u otras.

Comparando los resultados de los muros de 25 y 40cm, encontramos que los primeros precisan de un menor esfuerzo cortante para desarrollar la misma deformación conseguida en los muros de 40cm. Esto puede confirmarse a la vista de los diagramas de esfuerzo que se han estado utilizando hasta el momento.

Las comparaciones entre los diagramas de los muros se recogen en las figuras 3.62, 3.63 y 3.64. En dichos diagramas se observa también como los muros de 40cm de grosor alcanzan una mayor deformación tangencial debido a que en sus ensayos se les sometió a una mayor amplitud de carga que a los de 25cm.

Por tanto, puede decirse que los muros de 40cm de espesor son más dúctiles que los de 25cm, en el sentido en que logran una mayor deformación antes de alcanzar la ruptura. Presentan, por ello, una mayor rigidez los muros de 40cm tal y como debe suceder puesto que

¹⁴ "Reforço de paredes de adobe: caracterização experimental de uma solução de reforço sísmico". Universidade de Aveiro, Portugal. 2009.

tienen un mayor grosor y una mayor cantidad de material que opone una mayor resistencia a la fuerza que se aplica.



Figura 3.62: Diagramas positivos de comportamiento a cortante de los muros 1 de 25 y 40cm

Los dos primeros muros ensayados denotan cómo el muro de 25cm alcanza una menor deformación angular y, por consiguiente, un menor esfuerzo cortante. En este caso, el máximo esfuerzo alcanzado y que produce el colapso en el primer muro de 25cm es de 17352.9N; mientras que el muro de 40cm desarrolla una fuerza de 58872.3N.



Figura 3.63: Diagramas positivos de comportamiento a cortante de los muros 2 de 25 y 40cm

El caso observado en la figura 3.63 es similar al observado en la figura 3.62; presenta las mismas características con una deformación y esfuerzo menor en los muros de 25cm con

respecto a los de 40cm. La máxima carga alcanzada en el muro de 25cm, a partir de la cual se considera que ha roto el muro irreversiblemente, es de 24866.64N. El muro de 40cm alcanza su máximo valor de carga para 56899.92N, muy parecido al caso del muro 1.



Figura 3.64: Diagramas positivos de comportamiento a cortante positivos de los muros 3 de 25 y 40cm

La figura 3.64 continúa con lo observado en el resto de muros. Esta figura proporciona unos valores de esfuerzo máximo de 28461.56N para el tercer muro de 25cm, y de 54975.47N para el muro 3 de 40cm de espesor.

Los muros 2 y 3 de 25cm tienen un esfuerzo de rotura muy parecido, mientras que en el muro 1 esta misma fuerza cae un tercio. Este hecho es el que produce una menor distorsión angular en el muro 1 de 25cm; al aplicarse una menor fuerza, se desarrollará una menor deformación.

El muro 1 por tanto rompe antes que sus homólogos de 25cm. Ello se debió a una peor preparación del muro en sí. La preparación y fabricación del muro 1 de 25cm fue deficiente con respecto al resto de 25cm; sin embargo, se tendrá en cuenta también sus resultados en apartados posteriores a fin de no perder información de los resultados de los ensayos.

El resto de resultados se adaptan bastante bien a lo esperado con una carga cercana a la rotura de 28000N para los muros de 25cm y de 58000N para los de 40cm.

Las imágenes de los muros durante el ensayo muestran cómo las esquinas son las que primero se agotan. El tarrajeo indica que las primeras grietas se producen en el centro del muro ensayado. Estas situaciones se repiten en todos los casos estudiados.

Otro aspecto interesante de los ensayos es el poder observar pormenorizadamente el proceso de colapso ante carga lateral: desde el reposo absoluto hasta la ruina irremediable del muro. Seguidamente se presenta la secuencia de ruptura del muro 1 de espesor de 40cm a fin de corroborar este proceso.

Universidad de Sevilla

Sergio Astorga Pantoja



Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales



Universidad de Sevilla

Sergio Astorga Pantoja



Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales



Figura 3.65: Proceso de ensayo del muro 1 de 40cm de espesor

En las primeras fases, se producen grietas diagonales en el centro del muro; en sucesivos ciclos de carga, las grietas van provocando la fractura del muro y la caída del adobe de tarrajeo. Se va dejando a la vista la geomalla y el interior dañado del muro. La geomalla envuelve el conjunto y lo mantiene, en la medida de sus posibilidades con una cierta estabilidad. En las últimas fases del ensayo, empieza a abrirse la geomalla dando pie a la caída de las lascas de adobe en que se han convertido los ladrillos.

Capítulo 4

Tratamiento de datos

4.1. Envolventes de los muros de Adobe

Comentados los ensayos realizados en la PUCP, se procede con el tratamiento de datos para conformar modelos numéricos aproximados. La falta de datos experimentales sobre el adobe hace más dificultosa la creación de modelos numéricos de muros.

Antes de proceder con los modelos, se tomarán los datos necesarios para conformarlos a partir de los experimentos. Los ensayos efectuados proporcionarán parámetros que desarrollen de manera satisfactoria el comportamiento del muro. Para la realización de los modelos, se precisa describir el comportamiento del muro mediante una ley de comportamiento a compresión o a tracción.

En este caso, la ley que se obtendrá será de la ley de comportamiento a cortante experimental a partir de las envolventes de los ensayos de muros. La ley de comportamiento a compresión se relacionará con la de cortante a partir de la forma de aplicación de la carga. Dicha ley de compresión será la encargada de describir el comportamiento no lineal de ensayo del muro.

En los ensayos se ha observado que la primera carga de cada ciclo, que produce el primer daño, es la más rígida; a partir de ella, se generan las primeras grietas causantes de la ruina de la estructura. Se puede obtener una ley de comportamiento a partir de la envolvente de cada test, aprovechando la propiedad de estas primeras cargas. Dicha ley permitirá simular el comportamiento no lineal del muro en el modelo numérico.



Figura 4.1: Leyes de comportamiento a cortante que dan lugar los sensores D1, D2 y D3 junto a la envolvente del muro 2 de 25cm de espesor

No se tendrá en cuenta el movimiento relativo introducido por los transductores D4 y D5. Como se ha comentado anteriormente, su calibración no se ajusta al valor del resto de transductores. En la figura 4.1 se muestra la envolvente del muro 2 de 25cm sobre las leyes a cortante generadas por medio de los sensores D1, D2 y D3. Puede comprobarse cómo la envolvente, línea más gruesa, se ajusta perfectamente el proceso de carga a cortante.

La envolvente concuerda tanto con el comportamiento positivo o a derechas como con el comportamiento negativo o a izquierdas. Para describir la ley de comportamiento, sin embargo, se utilizará tan sólo la parte positiva de los diagramas. El modelo aplicará sólo una fuerza a derechas para simular el ensayo.

La envolvente se obtiene mediante una función de Matlab que permite calcular los puntos que rodean el gráfico de comportamiento a cortante. La función proporciona los puntos que envuelven la ley de comportamiento. Este comando es convhull y determina los puntos de la envolvente compleja de la gráfica; es decir, proporciona coordenadas en abscisas y coordenadas.

Se va a proceder a obtener la ley tau- gamma que ofrezca una ley de comportamiento global para los muros trabajando a cortante. Por tanto, se determinará la ley $\tau - \gamma$, que describa el comportamiento a cortante para cada grupo de tres muros. El espesor del muro tendrá una especial importancia para de describir el comportamiento ante una fuerza aplicada. Así, se efectuarán dos leyes de comportamiento a cortante, una para cada espesor de muro ensayado.



Figura 4.2: Envolventes de los muros de 25cm de espesor

En la figura 4.2, se muestran las envolventes positivas de los tres muros ensayados de 25cm. El primer muro es el que presenta una menor envolvente al aplicarse sobre él una menor carga que produjo una menor deformación, como ya se ha comentado anteriormente. La ley de comportamiento a cortante se tomará como la media de los datos experimentales.

4.2. Obtención de la ley de comportamiento a cortante de los muros de 25cm de espesor

Se han tomado varios puntos significativos para conformar el comportamiento. El muro 1 tendrá influencia en la primera parte del proceso mientras que, a partir de que el muro 1 rompe, sólo se tendrán en cuenta los muros 2 y 3.

Tras el proceso selectivo, se optó por construir la ley de comportamiento a cortante a partir de los siguientes puntos medios de las tres envolventes:

Deformación tangencial	Tensión tangencial cortante		
$1.081 \cdot 10^{-3}$	0.028603		
$3.924 \cdot 10^{-3}$	0.042290		
$5.890 \cdot 10^{-3}$	0.043587		
$6.536 \cdot 10^{-3}$	0.044733		
$7.664 \cdot 10^{-3}$	0.046220		
$8.534 \cdot 10^{-3}$	0.046987		
0.01096	0.049072		
0.01143	0.049473		
0.01251	0.050397		
0.01373	0.053860		
0.01500	0.055310		
0.01600	0.056445		
0.01700	0.057575		
0.01800	0.058710		
0.01900	0.059840		
0.02000	0.060980		
0.02100	0.062115		
0.02200	0.063245		
0.02385	0.065345		
0.02600	0.066160		
0.02800	0.066915		
0.02999	0.067665		
0.03327	0.068905		
0.03600	0.069380		
0.03801	0.069730		
0.04000	0.070080		
0.04200	0.070430		
0.04401	0.070780		
0.04587	0.071105		
0.05364	0.071105		

Tabla 4.1: Datos para la creación de una ley de comportamiento a cortante media en los muros de 25cm Estos datos proporcionan una ley de comportamiento media uniforme y suave. La ley de comportamiento ante cortante se muestra en la imagen 4.3.



Figura 4.3: Ley de comportamiento a cortante media junto con las envolventes de los muros de espesor 25cm

Para el modelo numérico, es preciso limitar el número de puntos. Cuanto menor sea el número de puntos, más rápida será la ejecución del programa. Tras limitar los puntos del comportamiento, se obtiene la aproximación siguiente:

Deformación tangencial	Tensión tangencial cortante		
0	0		
$6.794 \cdot 10^{-4}$	0.027990		
$5.890 \cdot 10^{-3}$	0.043587		
$6.536 \cdot 10^{-3}$	0.044733		
0.02385	0.065345		
0.03327	0.068905		
0.04587	0.071105		
0.05364	0.071105		

Tabla 4.2: Datos experimentales para conformar la ley de comportamiento a cortante adoptada en los muros de 25cm

La aproximación adoptada es bastante buena para caracterizar el comportamiento experimental. Se han eliminado los puntos que aportaban poca información. Con tan sólo ocho puntos, se consigue describir el comportamiento a cortante de los muros de 25cm. En la imagen 4.4, se observa la comparación entre las dos leyes.



Figura 4.4: Comparación entre la ley de comportamiento a cortante adoptada y la aproximada en los muros de 25cm

El error relativo al adoptar la aproximación en lugar de la experimental media es de alrededor del 2.77%. El error absoluto se determinará cuando se construya el modelo y se comparen datos experimentales y numéricos.

4.3. Obtención de la ley de comportamiento a cortante de los muros de 40cm de espesor

Del mismo modo se obtiene la ley de comportamiento para los muros de 40cm de grosor. Las envolventes de estos tres muros, obtenidas del mismo modo que las de los muros de 25cm, presentan comportamientos más uniformes.



Figura 4.5: Envolventes de los muros de 40cm de espesor

Los puntos medios que se han adoptado para describir la ley de comportamiento ante cortante son:

Deformación tangencial	Tensión tangencial cortante		
$6.476 \cdot 10^{-4}$	0.041613		
$9.997\cdot 10^{-4}$	0.046583		
$1.115 \cdot 10^{-3}$	0.048150		
$1.190 \cdot 10^{-3}$	0.049146		
$1.231 \cdot 10^{-3}$	0.049687		
$1.476 \cdot 10^{-3}$	0.052720		

Sergio Astorga Pantoja

$1.694 \cdot 10^{-3}$	0.054847
$1.930 \cdot 10^{-3}$	0.056860
$2.195 \cdot 10^{-3}$	0.059117
$2.729 \cdot 10^{-3}$	0.063000
$3.192 \cdot 10^{-3}$	0.065523
$3.555 \cdot 10^{-3}$	0.067027
$4.000 \cdot 10^{-3}$	0.068147
$4.500 \cdot 10^{-3}$	0.069160
$5.000 \cdot 10^{-3}$	0.070167
$5.500 \cdot 10^{-3}$	0.071333
$6.000 \cdot 10^{-3}$	0.071830
$6.500 \cdot 10^{-3}$	0.072600
$7.000 \cdot 10^{-3}$	0.073357
$7.500 \cdot 10^{-3}$	0.074870
$8.000 \cdot 10^{-3}$	0.075627
8.500 \cdot 10 ⁻³	0.076383
$9.000 \cdot 10^{-3}$	0.077357
9.500 \cdot 10 ⁻³	0.077900
0.01000	0.078660
0.01050	0.079410
0.01100	0.078957
0.01150	0.080927
0.01200	0.081800
0.01259	0.082340
0.01292	0.083187
0.01421	0.084020
0.01438	0.084523
0.01500	0.085433
0.01563	0.086357
0.01597	0.086880
0.01650	0.087547
0.01700	0.088193
0.01757	0.088963
0.01800	0.089377
0.01850	0.089927
0.01059	0.090433
0.01958	0.090967
0.01998	0.091270
0.02000	0.091445
0.02100	0.002520
0.02100	0.072330
0.02133	0.092745
0.02200	0.094350
0.02230	0.094830
0.03385	0.094860
0.00000	0.071000

Tabla 4.3: Datos para la creación de una ley de comportamiento a cortante media en los muros de 40cm



Figura 4.6: Ley de comportamiento a cortante media junto con las envolventes de los muros de espesor 40cm

Deformación tangencial	Tensión tangencial cortante		
0	0		
$1.476 \cdot 10^{-3}$	0.052720		
$2.195 \cdot 10^{-3}$	0.059117		
$2.729 \cdot 10^{-3}$	0.063000		
$4.000 \cdot 10^{-3}$	0.068147		
$7.000 \cdot 10^{-3}$	0.073356		
0.01422	0.084020		
0.01700	0.088193		
0.02200	0.093745		
0.02250	0.094350		
0.02372	0.094830		
0.03385	0.094860		

También se trata la gráfica eliminando puntos para describir el comportamiento con el menor número de puntos posible.

Tabla 4.4: Datos experimentales para conformar la ley de comportamiento a cortante adoptada en los muros de 40cm

En este caso se precisan doce puntos para describir completamente el comportamiento del muro ante la carga cíclica.

El error de adoptar una gráfica de comportamiento u otra es del 1.65%. La curva de comportamiento ajusta mejor en el caso de los muros de 40cm que en los de 25cm. Esto

puede deberse a una mayor dispersión de los datos de los muros de 25cm con respecto a estos nuevos de 40cm.



La comparación entre curvas de comportamiento a cortante se muestra en la figura

Figura 4.7: Comparación entre la ley de comportamiento a cortante adoptada y la aproximada en los muros de 40cm

Si se comparan las leyes a cortante de los muros de 25cm con los de 40cm, se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.8. La ley para los muros de 40cm es más rígida que para los de 25, aunque la deformación de rotura del muro se da antes.



Figura 4.8: Leyes de comportamiento a cortante de los muros de 25 y 40cm

4.7.

4.4. Obtención de la ley de comportamiento a compresión a partir de la ley a cortante

La necesidad de obtener una ley a compresión a partir de una ley a cortante radica en que el modelo numérico que se desarrollará en apartados sucesivos, requerirá una ley de comportamiento a compresión. Con dicha ley el programa podrá simular el comportamiento del ensayo en el tramo no lineal. El modelo de comportamiento numérico del muro considera el muro como un elemento elastoplástico.

Tras la selección de datos de los experimentos, se procede con el tratamiento de los mismos para conseguir una ley de compresión a partir de la ley de cortante. Se utilizarán las propiedades de la tensión tangencial pura aprovechando la forma de aplicación de la cargas.

Debido a la forma de aplicación de la carga, se introducen también efectos de torsión en el muro. El estado de tensiones se origina a partir de la aplicación de fuerza mostrada en la figura 4.9.



Figura 4.9: Situación de carga

Dicha situación de carga genera un estado de tensiones tangenciales puras. El estado se caracteriza por tener el mismo valor las tensiones a compresión y a cortante. La situación de tensión se presenta en la figura 4.10.

Mientras las tensiones se consideran iguales, las deformaciones se relacionarán con las tensiones a partir de la relación que existe entre las constantes de elasticidad E y el módulo de cizalladura G.

Se supondrá que las tensiones tangenciales permanecen constantes mientras que las tensiones se escalarán mediante el mismo factor que relaciona las constantes G y E a partir de las fórmulas de la elasticidad.



Figura 4.10: Modelo de tensiones tangenciales puras

Si se tomara un punto infinitesimal del muro, se tendría una distribución de tensiones como la mostrada en la figura 4.11.



Figura 4.11: Punto infinitesimal del muro

El estado tensional de este punto viene definido por la siguiente matriz:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F \\ 0 & F & 0 \end{pmatrix}$$

Las tensiones principales originan un estado de tensiones tal como el que se aprecia en la figura 4.10. Dicho estado es un estado de tensiones tangenciales puras. Las deformaciones se relacionan con las tensiones a partir de las fórmulas de la elasticidad:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\epsilon}_{ij} &= \frac{1+\nu}{E} \boldsymbol{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \boldsymbol{\sigma}_{kk} \cdot \boldsymbol{\delta}_{ij} \\ \boldsymbol{\epsilon}_{ij} &= F \cdot \frac{1+\nu}{E} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

La relación entre tensión normal aplicada y deformaciones es el factor de $\frac{1+\nu}{F}$.

El módulo de Young y de cizalladura se relacionan entre sí mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{E} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{2} \cdot (\mathbf{1} + \mathbf{v})$$

Hay un factor entre ambas leyes de: $2 \cdot (1 + v)$. Si se sustituye en la expresión de las deformaciones el valor del módulo de elasticidad por el módulo de cizalladura a partir de la ecuación que relaciona a ambas, se obtiene la siguiente deformación normal en función de G:

$$\epsilon_{ij} = F \cdot \frac{1+\nu}{E} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = F \cdot \frac{1+\nu}{G \cdot 2 \cdot (1+\nu)} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = F \cdot \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Si se toma el elemento no nulo ε_{yz} ; sabiendo cuál es la relación de la deformación angular con esa deformación normal, puede determinarse el valor que adoptarán las deformaciones tangenciales:

$$\varepsilon_{yz} = \mathbf{F} \cdot \frac{1}{2 \cdot \mathbf{G}} = \frac{\gamma_{yz}}{2}$$
 $\gamma_{yz} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{G}}$

Como se ha visto con los círculos de Mohr, las tensiones tangenciales a 45° son iguales a las tensiones normales a 45° , mientras las deformaciones se relacionan mediante la expresión anterior.

$$\sigma_{ij}(45^\circ) = \tau_{ij}(45^\circ)$$

Por tanto, las tensiones y las deformaciones se relacionan según la siguiente expresión:

$$\sigma_{ij}(45^{\circ}) = \tau_{ij}(45^{\circ}) = G \cdot \gamma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{ij}$$

La ley de comportamiento a compresión precisará tan sólo reducir las deformaciones angulares a la mitad de la ley de comportamiento a cortante para determinarla. Esto es, por definición:

$$\varepsilon_{ij}(45^{\circ}) = \frac{\gamma_{ij}(45^{\circ})}{2}$$

Las conjeturas realizadas se han efectuado teniendo en cuenta que el muro conforma un todo: material isótropo homogéneo formado por geomalla, mortero de adobe y ladrillos de adobe.

El módulo de elasticidad es una propiedad que deberá ser determinada. En este caso, los muros están formados por elementos dispares, y este factor habrá de conocerse por medio de los experimentos. A partir de la ley de comportamiento a compresión, se puede adoptar una zona aproximadamente lineal cuya pendiente sea dicho módulo de elasticidad.

Se precisa también determinar el módulo de Poisson. Hay una gran disparidad de criterios para determinar dicho factor, en la consulta de numerosos artículos sobre el estudio

del comportamiento del adobe, se decidió adoptar como coeficiente de Poisson: $v = 0.35^{15}$; según las características de los materiales usados. La norma E.080 ADOBE, propone un coeficiente de Poisson de: v = 0.25 para el adobe sin reforzar¹⁶.

Efectuando el cambio descrito anteriormente, se obtienen los resultados de la figura 4.12 y la tabla 4.5.



Figura 4.12: Leyes de comportamiento a cortante y compresión de los muros de 25cm

Deformación unitaria	Tensión normal		
0	0		
$3.397\cdot\mathbf{10^{-4}}$	0.027990		
$2.945 \cdot 10^{-3}$	0.043587		
$3.268 \cdot 10^{-3}$	0.044733		
0.01193	0.065345		
0.01664	0.068905		
0.02294	0.071105		
0.02682	0.071105		

Tabla 4.5: Datos para la ley de comportamiento a compresión de los muros de 25cm

En la gráfica 4.12 se muestran las leyes de comportamiento ante solicitación de cortante y ante compresión normal. La tabla 4.5 muestra los ocho puntos que describen el comportamiento a compresión del muro.

¹⁵ "Earthquake response predication and retrofitting techniques of adobe structures". Z. Cao, H. Watanabe. Agosto 2004.

¹⁶ "Norma Técnica de Edificación Adobe E.080 ADOBE". Pontificia Universidad Católica de Perú. 1999.

El módulo de elasticidad para el muro se toma como la pendiente del primer tramo lineal, definido por los dos primeros puntos de los datos de la tabla 4.5. El tramo lineal, en este caso, es el formado por el intervalo entre el origen y el primer punto adoptado. Para los muros de 25cm de espesor, el módulo de Young que se adoptará será:

$$\mathbf{E} = \frac{0.027990}{3.397 \cdot 10^{-4}} = 82.3962 \text{ MPa}$$

Prestando atención a los diagramas de los muros de 40cm, se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.13 y la tabla 4.6.



Figura 4.13: Leyes de comportamiento a cortante y compresión de los muros de 40cm

Deformación unitaria	Tensión normal		
0	0		
$7.380 \cdot 10^{-4}$	0.052720		
$1.098 \cdot 10^{-3}$	0.059117		
$1.365 \cdot 10^{-3}$	0.063000		
$2.000 \cdot 10^{-3}$	0.068147		
$3.500 \cdot 10^{-3}$	0.073356		
$7.110 \cdot 10^{-3}$	0.084020		
8.500 \cdot 10 ⁻³	0.088193		
0.01100	0.093745		
0.01125	0.094350		
0.01186	0.094830		
0.01693	0.094860		

Tabla 4.6: Datos para la ley de comportamiento a compresión de los muros de 40cm

El módulo de elasticidad se determina en este caso del mismo modo anterior. El primer tramo definido en la tabla 4.6 define su valor a partir de la pendiente definida por los dos primeros puntos. El módulo de Young para los muros de 40cm de espesor será:

$$\mathbf{E} = \frac{0.05272}{7.380 \cdot 10^{-4}} = 71.4363 \text{ MPa}$$

Las rigideces del tramo lineal son similares en ambos casos. A priori, se supondría que el muro de mayor espesor tendría una mayor resistencia por contener más geomalla; pero, como puede apreciarse, sus valores se asemejan. Las discrepancias se deben a errores en las aproximaciones tomadas o a la diferencia en la fabricación de unos muros respecto a los otros.



Figura 4.14: Leyes de comportamiento a compresión de los muros de 25 y 40cm

Las fuerzas que caracterizarán los muros, según la gráfica adoptada, se obtienen multiplicando los valores característicos por el área del muro que se quiera evaluar. Por ejemplo, la resistencia de compresión de los muros de 25cm se obtiene multiplicando la tensión máxima de la tabla 4.5 por un área de 37500mm² (1500mm x 25mm):

Resistencia a compresión = 0.071105MPa $\cdot 37500$ mm² = 26.67kN

Empleando la misma metodología anterior para los muros de 40cm, con la tabla 4.6 y un área de 60000mm² (1500mm x 40mm), se obtiene la resistencia a compresión para los muros de 40cm:

Resistencia a compresión = 0.094860MPa \cdot 60000mm² = 56.92kN

Se observa una alta discrepancia de resultados. Es plausible, y esperado, que la resistencia a compresión sea mayor en el muro de mayor espesor, pero no con tanta diferencia.

Como se ha comentado anteriormente, se adoptará como tramo lineal de comportamiento de los muros, el tramo formado por los dos primeros puntos descritos en la ley de comportamiento, definida en las tablas 4.5 y 4.6.

De este modo, puede adoptarse un valor de límite elástico definido por la tensión en dicho punto. Para los muros de 25cm, y según la tabla 4.5, el límite elástico que se supondrá será:

Límite elástico = $0.027990MPa \cdot 37500mm^2 = 10.49kN$

Para los muros de 40cm, ha de tomarse el primer punto de la tabla 4.6 para determinar este límite multiplicando la tensión por el área efectiva de los muros de 40cm:

Límite elástico = $0.052720MPa \cdot 60000mm^2 = 31.63kN$

Los resultados prosiguen el comportamiento visto anteriormente para la resistencia a compresión. Se puede afirmar entonces que el comportamiento a cortante de los muros de mayor espesor mejora en unas 3 veces el del muro de menor espesor.

Estos valores de esfuerzos son los mismos a compresión que a cortante por haberse supuesto que el muro está sometido a un estado de tensiones tangenciales puras. Una vez recopilados todos los datos necesarios para el desarrollo de los modelos numéricos, se procede con la caracterización de dichos modelos y los resultados proporcionados, en contraposición con lo observado experimentalmente.

Capítulo 5 Modelos numéricos desarrollados

5.1. Características del modelo numérico

Para contrastar el comportamiento numérico y experimental de los muros de adobe ensayados, se emplea el programa de elementos finitos ANSYS. El objetivo será comparar los resultados obtenidos por camino experimental y numérico. Posteriormente se analizará un ensayo de compresión diagonal para comparar los resultados con correlaciones obtenidas que permiten caracterizar el material a partir de este ensayo¹⁷.

Para cada espesor, se constituirán cuatro modelos. Los modelos suponen material homogéneo e isótropo, y tratan de describir completamente el comportamiento del muro mediante un sistema lineal 2D, un sistema no lineal 2D, un sistema lineal 3D y, por último, un sistema no lineal 3D.

Los modelos no harán distinciones entre ladrillos de adobe, morteros y geomalla. De hecho, con los resultados obtenidos, no se puede hacer distinciones entre todos estos elementos y constituirlos en el modelo por separado. No se tiene información sobre el comportamiento por separado de los componentes. Todos los ensayos se han llevado a cabo ejecutando los muros como una entidad.

Las unidades que se usarán serán Newtons (N) y milímetros (mm); así, las rigideces vendrán dadas en Mega Pascales (MPa).

El modelo será controlado en fuerza; es decir, se aplicarán fuerzas en el contorno del modelo y no desplazamientos. Por medio de esta fuerza, se obtendrán los desplazamientos producidos en cada caso. La validez de los resultados de dichos desplazamientos se corroborará a través de los resultados experimentales. El objetivo de controlar el programa en fuerza, es aminorar la influencia de la carga en el centro del muro, dejando notar su efecto principalmente en los bordes donde se aplica y contrarresta la carga, zona inferior de empotramiento.

El programa de elementos finitos basa su fundamento en subdividir el sistema en pequeños subespacios llamados elementos sobre los cuales aplica la teoría de elasticidad individualmente para posteriormente unir las soluciones y formar una solución conjunto. El resultado buscado es resolver el problema complejo dividiéndolo inicialmente en problemas simples, para posteriormente unirlos.

El código de texto que se introducirá en el programa ANSYS se encuentra en los Anejos indicándose en cada uno de ellos la misión de los comandos empleados.

¹⁷ "The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry". C. Calderini, S. Cattari, S. Lagomarsino. 2010.

5.1.1. Tipos de elementos empleados en el modelado

En primera instancia, se justificará y expondrán las cuestiones por las cuales se ha adoptado los tipos de elementos para los modelos 2D y los modelos 3D. Los elementos de estos dos tipos de modelos deben ser diferentes por la configuración de la geometría. Un elemento que funcione bien para un modelado 2D, no funcionará del mismo modo para un modelado tridimensional.

5.1.1.1 Modelado tipo lámina

Para el modelo tipo lámina, el elemento adoptado es el Shell63. Este elemento es plano capaz de soportar esfuerzos tanto de membrana como de flexión. Por tanto, puede aplicarse fácilmente sobre el elemento la fuerza cortante. Consta de cuatro nodos con seis grados de libertad cada uno de ellos: translaciones y rotaciones en todos los ejes.



Figura 5.1: Elemento Shell63

El elemento Shell63 es, a su vez, el elemento más simple que ofrece buenas aproximaciones a la solución cuando se le somete a carga de cortante.

Aunque el problema a tratar sea un problema tanto de deformación plana como de tensión plana y lo más lógico sea adoptar un elemento de deformación plana tipo Plane182, este tipo de elementos introduce grandes errores. Normalmente, se emplean para modelar estructuras planas, aunque en este caso, y debido a que toda la carga se aplica en el plano del elemento, se produce un problema debido a los nodos coplanarios.

El problema de nodos coplanarios es debido a la forma del elemento. El elemento consta de cuatro nodos, cada uno de los cuales tienen dos grados de libertad en

desplazamiento, pero no opone ninguna rigidez al giro. Como los nodos de todos los elementos forman parte del mismo plano, no presentan rigidez ante el giro, se dará un resultado falso.

Para visualizar este efecto, se puede introducir un elemento que rigidice una esquina del muro, observando como el desplazamiento cae significativamente, adquiriendo valores similares a los obtenidos cuando se usa el elemento Shell63. Los elementos Shell63 no sufren este problema porque tienen rigidez ante giros en el mismo plano. Este aspecto no se tratará aquí por carecer de relevancia.

5.1.1.2 Modelado tridimensional

Para los modelos tridimensionales se optó por emplear elementos Solid45. También podría haberse adoptado el mismo tipo de elementos que para los modelos tipo lámina, pero este tipo de elementos es más eficiente para modelos 3D. Los elementos Solid45 permiten dar espesor físico al conjunto, por lo que es el idóneo para los modelos tridimensionales.



Figura 5.2: Elemento Solid45

El elemento se define mediante ocho nodos. Cada nodo posee tres grados de libertad en translación. Puesto que en este caso los nodos no son coplanarios, no existirá ningún problema del tipo comentado en el apartado 5.1.1.1. Admite cargas en todas sus caras, siendo un elemento simple que ofrece buenos resultados.

5.2. Resultados obtenidos de los modelos

Descritos los principales aspectos que se han tenido en cuenta para la creación de los modelos numéricos, se procede a comentar los aspectos más interesantes de la simulación numérica de los muros sometidos a sismos.

El modelo utilizará un mallado de bloques cuadrados, en el caso tipo lámina, o de cubos en el caso tridimensional como se muestra en la figura 5.3.



Figura 5.3: Mallado de la simulación del muro en 3D

El mallado empleado y la fuerza de contorno que se aplica al modelo se muestran en la figura 5.3. Este mallado es el que mejor se ajusta a la metodología del problema. La fuerza aplicada se muestra también en la imagen; se aplica hacia la derecha simulando un semiciclo positivo. La fuerza se reparte uniformemente entre los nodos que definen la zona superior del muro. Esto consigue a la vez una mayor simplicidad de cálculo y de diseño, reproduciendo bien la realidad.

Tal y como se ha definido la ley de comportamiento a cortante, para simular el comportamiento de los ciclos de carga, bastará con aplicar sólo un escalón de carga en lugar del ciclo de carga completo con el que se efectuaron los ensayos.

A fin de comprobar la validez de los modelos, se probará en primer lugar la validez de la simulación en el tramo lineal, aplicando una carga neta sobre el muro algo menor al límite elástico del comportamiento.

Se observará separadamente el comportamiento lineal de cada modelo y el valor experimental al que llegan los resultados mediante un análisis estático de carga. Para ello, se compararán los desplazamientos lineales y experimentales en el primer ciclo de carga.

5.2.1. Estudio del comportamiento lineal de todos los muros

Se quiere determinar la fuerza cortante que mantiene los modelos en la zona lineal y comprobar que el desplazamiento se mantiene en valores del mismo orden de los obtenidos en los ensayos. Se supone que el comportamiento lineal se produce tan sólo en el primer ciclo de carga. Determinando experimentalmente dicha fuerza, se consigue obtener el punto en que el muro alcanza el límite elástico.

La fuerza que produce un movimiento de 2mm sobre los muros se obtiene nuevamente de los ensayos de los muros en el primer ciclo de carga. Se procederá calculando el máximo desplazamiento producido en el transductor D1, que continuará siendo el dispositivo de referencia, por encontrarse en la parte superior del muro, por ser el lugar donde se aplica la carga en los test.

Se buscará en dicho ciclo de 2mm de carga el desplazamiento máximo ocurrido en D1 y la carga que ha generado dicho desplazamiento. La carga media de las fuerzas obtenidas para los tres muros de cada espesor, será la que se aplicará sobre el modelo. Con ello, se espera obtener un resultado próximo a la media de los desplazamientos provocados, que debe ser de aproximadamente 2mm en este caso.

En la tabla 5.1, se muestran los valores alcanzados para cada muro en el primer ciclo del transductor D1, para los muros de 25cm de espesor.

	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Media
Desplazamiento (mm)	1.9928	2.2304	2.1118	2.1117
Fuerza cortante (N)	7425.48	9315.23	9366.06	8702.25

Tabla 5.1: Esfuerzos y desplazamientos experimentales

alcanzados por los muros de 25cm en el primer ciclo

Se adopta para los modelos de los muros una fuerza media de **8702.25N**; o una tensión tangencial de 0.2320MPa, que provoca en los muros un desplazamiento medio de **2.1117mm**. Como puede apreciarse, el desplazamiento originado en el muro en el ciclo de 2mm es superior al que se esperaba. Esto se debe sobre todo a efectos no lineales que se dejan ya notar en el muro.

La fuerza cortante obtenida se aplicará sobre el muro es inferior a la carga elástica que provoca la plastificación según la ley de comportamiento adoptada. Al aplicar la carga, el muro continúa en la zona elástica. La carga que hace plastificar el muro se encuentra alrededor de: 0.027990MPa $\cdot 37500$ mm² = 10496.2N, según lo obtenido en el apartado anterior y a partir de los resultados experimentales observados en la tabla 4.5.

Para los muros de 40cm, los resultados sobre el primer ciclo de carga se muestran en la tabla inferior.

	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Media
Desplazamiento (mm)	2.2469	2.5459	2.4394	2.4107
Fuerza cortante (N)	21251.23	19719.05	15887.93	18952.73

Tabla 5.2: Esfuerzos y desplazamientos experimentales alcanzados por los muros de 40cm en el primer ciclo

En este caso, se precisa una fuerza de alrededor de **18952**.**73N** o una tensión de 0.3158MPa para provocar un desplazamiento de **2**.**4107mm**. También este caso da lugar a un desplazamiento por encima del esperado por los efectos no lineales. Sin embargo, cuando se aplica esta carga, el modelo sigue encontrándose en la zona lineal de la ley de comportamiento propuesta, pues la carga es inferior a los $0.052720MPa \cdot 60000mm^2 = 31632N$ que provocarían el abandono de dicha zona elástica, de acuerdo a lo observado en el primer tramo de la curva experimental para muros de 40cm de la tabla 4.6.

La situación de carga permanecerá en la zona elástica y se muestra en la figura 5.4.



Figura 5.4: Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de 25 y 40cm, con los puntos en que se aplica la carga en el primer ciclo

En la imagen 5.4 se muestran los puntos en que se simularán los modelos de 25 y 40cm, y que se han obtenido a partir de los datos experimentales de los muros, tablas 4.2 y 4.4. Puede apreciarse fácilmente que ambos puntos se encuentran en el dominio elástico de su comportamiento, fijado por el primer tramo recto y lejos de la carga que provoca la plastificación.

5.2.1.1 Modelo lineal tipo lámina

Los desplazamientos laterales hacia la derecha del modelo tipo lámina para los muros de 25cm, se muestran en la imagen 5.5.



Figura 5.5: Desplazamientos horizontales del modelo 2D lineal para muros de 25cm en el primer ciclo

El reparto de desplazamientos a lo largo del muro es plausible. El valor del desplazamiento en el medio del muro se obtiene a través de los resultados nodales que proporciona el programa. La cuantía del desplazamiento en el punto medio del muro es de 2.8982mm. Este desplazamiento se determina tras aplicar la fuerza en la parte superior del muro de 8702.25N.

El resultado arroja un error del 37.24% respecto a los resultados experimentales. El error no es nada descabellado teniendo en cuenta las aproximaciones que se han llevado a cabo. Esto quiere decir que las simplificaciones del comportamiento de los tres materiales: mortero, ladrillos y geomalla; no se precisa de un modelado complicado para simular el comportamiento en esta primera fase.

Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales





La distribución de tensiones tangenciales se expone en la imagen de arriba. Como ya indicaban los resultados experimentales, las mayores tensiones tangenciales se producen en el centro del muro. Por esta zona era donde continuaban las grietas aparecidas en las esquinas.

Los desplazamientos laterales de los muros de 40cm en el modelo tipo lámina se representan en la imagen 5.7.



Figure 5.7: Desplazamientos horizontales del modelo 2D lineal para muros de 40cm en el primer ciclo

En este caso, el desplazamiento producido en el punto en que se ubica el transductor D1 tiene un valor de 4.5503mm. Este valor se encuentra alejado del valor medio obtenido en los desplazamientos experimentales, que es 2.4107mm. Se lleva a doblar el valor del desplazamiento. En los ensayos hay elementos que oponen resistencia a la fuerza que no se modelan en este modelo numérico tan simplificado. El error en este caso crece hasta un valor del 88.75%. El error cometido es considerable y denota un procedimiento mal dirigido a priori.



Figura 5.8: Tensiones tangenciales del modelo 2D lineal para muros de 40cm en el primer ciclo

Las tensiones se reparten a lo largo del muro de la misma manera que lo hacía con los muros de 25cm, como se ve en la figura 5.8. La tensión máxima es algo menor que de la que provoca el abandono de la zona de comportamiento lineal que en este caso era: 0.050251. Este modelo pronostica la aparición de grietas en el centro del muro, hecho avalado por la experiencia.
5.2.1.2 Modelo lineal tridimensional

El modelo 3D lineal debe presentar un comportamiento similar al observado en el modelo tipo lámina.

Los resultados para los muros de 25cm de espesor se muestran en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11.



Figura 5.9: Desplazamientos horizontales del modelo 3D lineal para muros de 25cm en el primer ciclo

Tal y como se muestra en la figura, el desplazamiento del punto medio difiere del desplazamiento sobre el borde del muro. A la vista de la distribución de tensiones, el resultado es bueno y coherente. Así, donde se encuentra emplazado el transductor D1 el desplazamiento es de 2.8781mm; ofreciendo el modelo tridimensional un resultado más preciso que el del modelo tipo lámina. El error cometido empleando este modelo es del 36.29%. Puede decirse que el modelo numérico lineal tridimensional aproxima bien el ensayo del muro en esta primera fase.

El reparto cualitativo no es tan bueno como los resultados cuantitativos puesto que se esperaría un reparto de desplazamientos más uniformizados en las cercanías de los puntos de aplicación de la carga.



Figura 5.10: Tensiones tangenciales del modelo 3D lineal para muros de 25cm en el primer ciclo

La distribución de tensiones continúa en el camino de los modelos laminares; es decir, los modelos tipo lámina, con tensiones tangenciales máximas en el centro del muro y mínimas en los bordes laterales. Se observa como la forma que adopta la distribución de tensiones en el espesor del muro es una cruz que alcanza su máximo valor en la superficie del muro.



Figura 5.11: Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 3D lineal para muros de 25cm en el primer ciclo

Con el resultado de la tensión equivalente de Von Mises, se pueden predecir los puntos de rotura del muro y seguir su evolución ayudándose de las distribuciones de tensiones tangenciales y normales.

Puede apreciarse en la imagen 5.11 cómo las tensiones superiores se producen en las esquinas inferiores del muro, punto en que aparecerán las primeras grietas. Estas grietas seguirán el camino del mayor valor de tensiones prosiguiendo su camino hacia el punto medio donde las tensiones tangenciales son mayores.

También cabe destacar que los resultados logrados se reparten de manera uniforme, puesto que se ha considerado el muro como un todo; es decir, un solo material que en realidad se encuentra formado por tres materiales. En la realidad la distribución de estos materiales es lo que crea el camino de la grieta. El mortero es el primero que rompe y el que dirige la grieta allá donde este se encuentra.



Si se tratan ahora los resultados del modelo numérico tridimensional de los muros de 40cm de espesor, se obtendrá los resultados de la figura 5.12.

Figura 5.12: Desplazamientos horizontales del modelo 3D lineal para muros de 40cm en el primer ciclo

Este modelo ofrece resultados dispares frente a lo obtenido en el modelo de los muros de 25cm. La distribución de desplazamientos es parecida pero su valor es muy superior a los dos milímetros del primer ciclo de carga. En el punto en que se encuentra el transductor referencia, el desplazamiento hacia la derecha es de 4.3967mm; lo que proporciona un error del modelo de 82.38%. El error es muy parecido al del modelo tipo lámina para estos mismos muros de 40cm; lo que podría indicar que la ley de comportamiento no esté bien definida.



Figura 5.13: Tensiones tangenciales del modelo 3D lineal para muros de 40cm en el primer ciclo

Una vez más, se encuentra la misma distribución de tensiones tangenciales, aunque en este caso las tensiones máximas llegan a alcanzar la parte superior del muro.

La tensión equivalente de Von Mises se reparte del mismo modo que el modelo 3D lineal para los muros de 25cm. Las grietas comienzan a crecer en el punto donde esta tensión es máxima.



Figura 5.14: Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 3D lineal para muros de 40cm en el primer ciclo

Puede aceptarse la validez de los modelos lineales aduciendo resultados similares a la experiencia. La disparidad en algunos resultados se debe al gran número de aproximaciones realizadas para conseguir llegar a caracterizar el modelo: simplificadores del modelado, etc. Este hecho es debido sobre todo a la falta de conocimientos relativos a las propiedades del material adobe que hace más difícil la realización del modelo numérico.

En términos cualitativos, los datos numéricos ofrecen una buena aproximación. Las zonas de mayor tensión observadas en los modelos anteriores, coinciden con las zonas donde experimentalmente aparecen las primeras grietas.

La evolución hacia el colapso del muro mantiene invariable la tensión principal menor mientras va aumentando la segunda tensión principal. Esto conlleva un aumento de la tracción en detrimento de la compresión¹⁸.

¹⁸ "Identification of shear parameters of masonry panels through the in- situ diagonal compression test". A. Brignola, S. Frumento, S. Lagomarsino, S. Podestà. 2009.

5.2.2. Estudio del comportamiento no lineal

Para el estudio del comportamiento no lineal, se requiere una ley de comportamiento que describa la evolución del muro al aplicarle carga. La ley de comportamiento que se introducirá será a cortante. Estas leyes de comportamiento han sido calculadas en apartados anteriores. La figura 5.15 muestra la ley de comportamiento que rige los muros de 25 y 40cm.



Figura 5.15: Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de 25 y 40cm

Como cabría esperar, el muro de 40cm requiere una tensión superior para alcanzar el colapso que su homólogo de 25cm. Sin embargo, rompe a menor deformación, antes que el muro de 25cm.

Se puede considerar que el muro de 25cm de espesor es más dúctil que el de 40cm. Los muros de 25cm consiguen un mayor desarrollo o deformación antes de alcanzar la rotura.

Indicados los comportamientos que requerirán los modelos para su correcto funcionamiento, se procede a comprobar en conducta no lineal de los ensayos comparados con los modelos numéricos.

5.2.2.1 Estudio del comportamiento no lineal del segundo ciclo

Se comprueba en este caso el segundo ciclo de carga del ensayo. Se tiene ya la certeza de que el muro ha plastificado por lo que entrará en juego el carácter no lineal de los modelos. El segundo ciclo de carga tiene una amplitud de 15mm. Para dicho desplazamiento el muro aún no habrá colapsado, pero empieza a mostrar signos de ruptura en la base, unión con la cimentación.

Se procederá de la misma manera que para el primer ciclo de carga. Se estimará la fuerza cortante que origina el desplazamiento de 15mm y el desplazamiento real alcanzado.

Los resultados experimentales para los muros de 25cm, tomando como elemento de referencia el transductor D1, se recogen en la tabla 5.3.

	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Media
Desplazamiento (mm)	15.1754	15.3494	15.2458	15.2569
Fuerza cortante (N)	11454.12	12980.56	15148.29	13194.32

Tabla 5.3: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 25cm en el segundo ciclo

Como ya se ha hecho anteriormente, el dato que se empleará en los modelos será el valor medio de los datos proporcionados por los tres muros. En términos promediados, para alcanzar el desplazamiento de **15.2569mm** sobre los muros de 25cm, se ha precisado una fuerza media cortante de **13194**.**32N** tal y como muestra en la tabla 5.3; lo que corresponde a aplicar una tensión de: $\frac{13194.32N}{37500mm^2} = 0.3518MPa$. Dicha tensión se encuentra por encima del límite de elasticidad tomado.

En lo referente a los muros de 40cm, para dar lugar al segundo ciclo de carga se necesito la fuerza y el desplazamiento que se muestra en la tabla 5.4.

	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Media
Desplazamiento (mm)	15.5877	15.4884	15.5817	15.5526
Fuerza cortante (N)	38792.75	36802.50	35028.22	36874.49

Tabla 5.4: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 40cm en el segundo ciclo

La fuerza media aplicada en los muros de 40cm de espesor es de **36874**. **49N**, lo cual indica que la tensión aplicada sobre los muros de 40cm de espesor es del orden de: $\frac{36874.49N}{_{60000mm^2}} = 0.6145$ MPa. El desplazamiento promedio que se origina es de **15.5526mm**.

La configuración de carga se encuentra en ambos casos en la zona de plastificación tras superar el límite elástico; la situación de carga se muestra en la imagen 5.16.



Figura 5.16: Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de 25 y 40cm, con los puntos en que se aplica la carga en el segundo ciclo

Los puntos en que se simularán los modelos numéricos se muestran en la figura 5.16. Estos puntos de trabajo se sitúan tras el punto de límite elástico pero muy próximo a él, indicando el principio del comportamiento plástico y la teórica aparición de las fracturas.

Para introducir los puntos de comportamiento no lineal, se emplea el comando MELAS de ANSYS que se aplica a materiales con elasticidad variable en las direcciones del espacio. Este comando requiere una temperatura, así que se supondrá que el ensayo se ha realizado a 25°C. También se supondrá que la elasticidad tiene el mismo valor en todas las direcciones del espacio, material isótropo.

5.2.2.1.1 Modelo no lineal tipo lámina para el segundo ciclo

Aplicando la fuerza sobre el modelo no lineal tipo lámina para los muros de 25cm, se obtienen los resultados de las figuras 5.17, 5.18 y 5.19.



Figura 5.17: Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en el segundo ciclo

Los desplazamientos muestran una distribución cualitativa similar a la de los modelos lineales. Sin embargo, el desplazamiento se aleja mucho del comportamiento esperado. Se sabe que el muro plastifica tras superar el primer ciclo, entrando en juego el comportamiento no lineal. Al llegar al punto de trabajo, el punto medio del muro tiene un desplazamiento de tan sólo 4.3943mm por los 15mm, que se genera en los ensayos de muros.

El desplazamiento es mucho menor al esperado de 15mm. El tramo lineal concordaba bien pero a medida que se supera dicho tramo, los comportamientos experimentales y numéricos comienzan a divergir.



Figura 5.18: Tensiones tangenciales del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en el segundo ciclo

Las tensiones tangenciales también se distribuyen cualitativamente del mismo modo que lo observado anteriormente; no se aprecia una variación acentuada. El principal problema se encuentra a la hora de describir el suceso numéricamente.



Figura 5.19: Tensiones en dirección horizontal del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en el segundo ciclo

En la distribución de tensiones en dirección horizontal puede comprobarse que la tensión máxima se encuentra en la base y en la zona superior. Esto puede deberse a efectos de la torsión que introduce la forma de aplicación de la fuerza.

En lo referente a los muros de espesor 40cm, los resultados son también similares en forma pero no en cuantía.





Aunque el valor del desplazamiento obtenido numéricamente de 8.5106mm mejora con respecto a lo esperado para el segundo ciclo de 15mm de amplitud, queda aún muy alejado de los 15mm que se debería conseguir. Aunque aumenta el valor respecto al modelo laminar de los muros de 25cm, mejorando los resultados.



Figura 5.21: Tensiones tangenciales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el segundo ciclo

Las tensiones tangenciales prosiguen con la tónica que se ha observado hasta el momento.



Figura 5.22: Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el segundo ciclo

La distribución cualitativa de tensiones equivalentes de Von Mises tampoco varía ostensiblemente al variar el comportamiento lineal a no lineal.



Figura 5.23: Energía de deformación del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el segundo ciclo

Por último, resulta interesante comentar los aspectos relativos a la energía de deformación almacenada en el muro durante el proceso no lineal. Se ve en la imagen como la energía se concentra en la zona de unión entre la base y el muro. Este va a ser el motivo principal por el cual las grietas comenzarán en esta zona. La concentración de energía en este punto, se empleará en primera instancia para desplazar las partículas de adobe y hacerlas deslizar entre sí, hasta almacenar la energía necesaria para provocar la ruptura frágil del material.

5.2.2.1.2 Modelo no lineal tridimensional para el segundo ciclo

Este modelo no pudo simularse debido a que el modelo se vuelve rápidamente inestable. Este hecho es debido a que el método de cálculo va introduciendo al iterar pivotes de valor muy bajo próximos a cero.

Cuanto más bajo sea el valor de los pivotes, más inestable se hará el sistema de ecuaciones que resuelve el problema dando lugar a inestabilidades en la solución.

Más concretamente, el valor bajo de los pivotes introduce desplazamientos excesivos en el modelo, lo que da lugar a una solución que hace que los elementos se distorsionen demasiado.

Físicamente, la fuerza que se aplica supera la fuerza máxima de resistencia a compresión de la ley de comportamiento a compresión aproximada; lo que hace distorsionar demasiado a los elementos que conforman el modelo. La distorsión de los elementos se hace tal que el modelo numérico no reconoce ninguna resistencia por parte de los elementos.

Este comportamiento se observa tanto en los muros de grosor 25cm como en los de 40cm. Se produce una rotura total del muro anulando la capacidad portante que podría proporcionarle en el ensayo real la geomalla.

Este hecho indica que el modelo creado uniendo diferentes elementos dista mucho de asemejar a la realidad y no es una buena aproximación para la simulación del comportamiento real del muro sometido a carga lateral cíclica.

El modelo laminar, sin embargo, sí había conseguido proporcionar un resultado que asemejaba bastante a lo obtenido en simulaciones precedentes, aunque a la vista de los resultados de este último ensayo se deberá tener reticencias a la hora de aceptar los resultados del modelo.

5.2.2.2 Estudio del comportamiento no lineal del tercer ciclo

El tercer ciclo tiene una amplitud de aproximadamente 40mm. La forma de proceder será similar a la ya adoptada para el primer y segundo ciclo.

Comprobando los archivos generados durante los ensayos, se obtiene que, para alcanzar un desplazamiento de 40mm en el muro, fue necesario aplicar la carga que se expone en la tabla 5.5.

	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Media
Desplazamiento (mm)	40.2668	40.5103	40.4652	40.4141
Fuerza cortante (N)	13966.27	16032.62	20536.31	16845.07

Tabla 5.5: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 25cm en el tercer ciclo

Existe una gran disparidad de resultados de aplicación de carga, no siendo este dato medio en este caso muy fiable. Sin embargo, el valor necesario a aplicar debe encontrarse no muy lejos de los valores descritos en la tabla 5.5.

El valor medio de desplazamiento alcanzado experimentalmente para el tercer ciclo en los muros de 25cm es de **40.4141mm** mientras que la fuerza a aplicar para alcanzar este desplazamiento promediado es **16845.07N**. Esta fuerza equivale a aplicar una tensión de: $16845.07N/_{37500mm^2} = 0.4492MPa$.

Para muros de 40cm, los resultados experimentales ofrecen los datos expuestos en la tabla 5.6.

	Muro 1	Muro 2	Muro 3	Media
Desplazamiento (mm)	40.5577	41.1589	40.7101	40.8089
Fuerza cortante (N)	48936.15	37418.07	38650.47	41668.23

Tabla 5.6: Esfuerzos y desplazamientos alcanzados por los muros de 40cm en el tercer ciclo

Los muros de 40cm requieren una fuerza media a cortante de **41668**.23N, o una tensión de $\frac{41668.23N}{_{60000mm^2}} = 0.6945$ MPa, para generar un desplazamiento neto de **40**.8089mm. Se observa también una gran disparidad entre datos experimentales con una variación de la fuerza de algo más de 10000N entre ensayos. Esto puede ser un síntoma de la aleatoriedad en el comportamiento real del muro.

La zona de trabajo en que se encuentra el tercer ciclo de carga. Se encuentra en la parte de plastificación del muro aunque aún no llega a la franja en que la ley de comportamiento indica la ruptura del muro. La situación aproximada se indica en el gráfico 5.29.



Figura 5.24: Leyes de comportamiento a cortante experimentales de los muros de 25 y 40cm, con los puntos en que se aplica la carga en el tercer ciclo

En la gráfica 5.29 se muestran las leyes de compresión de todos los muros junto con los puntos en que se produce la simulación de los modelos numéricos para los muros de 25 y 40cm. Su situación, como ya se ha indicado, se encuentra en la zona de plastificación. Un aspecto importante a comentar es que los puntos de simulación descritos en la gráfica, no dan lugar a la misma deformación. Ello dará lugar a grandes disparidades en los desplazamientos numéricos.

Resta comprobar mediante el modelo numérico la veracidad de los datos y dar validez o no a los modelos empleados. Se comenzará por los modelos que han dado más problemas en resultados anteriores, modelos tipo laminar.

5.2.2.1 Modelo no lineal tipo lámina para el tercer ciclo



El modelado tipo lámina del muro de 25cm está representado por la figura 5.30.

Figura 5.25: Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en el tercer ciclo

El reparto de desplazamientos en el muro sigue el modo parabólico ya observado en modelos laminares anteriores. El máximo desplazamiento alcanzado en la zona del transductor es de 5.6102mm, en lugar de los 40mm esperados del tercer ciclo. El resultado cuantitativo es malo ofreciendo el modelo mucha más rigidez de la que debería tener para poder desarrollar un mayor desplazamiento.

Esta no es la distribución de desplazamientos que sucede en realidad aunque su reparto puede considerarse como una buena aproximación. La distribución real debe ser más uniforme cerca de la zona superior de aplicación de la carga. El modelo no se comporta en ningún caso como cabría esperar. No se ajusta a la realidad de los experimentos.

Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales



Figura 5.26: Tensiones tangenciales del modelo 3D no lineal para muros de 25cm en el tercer ciclo

Las tensiones tangenciales muestran una distribución plausible a tenor de lo observado. La distribución no puede tampoco darse por buena aunque es aceptable.



Figura 5.27: Tensiones equivalentes de Von Mises del modelo 2D no lineal para muros de 25cm en el tercer ciclo

Tampoco puede darse por buena la distribución de tensiones equivalentes de Von Mises. Aunque las tensiones aumentan, la zona a lo largo de los ciclos permanece sin aumentar radicalmente como se esperaría al acercarse el muro al colapso.

El modelo tipo lámina de los muros de 40cm cargados hasta alcanzar los 40mm del tercer ciclo, presenta las características mostradas en la figura 5.33.



Figura 5.28: Desplazamientos horizontales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el tercer ciclo

Sus desplazamientos se reparten algo más uniforme que en los muros de 25cm de espesor. La distribución presenta un comportamiento extraño en la parte superior del muro: en la parte central disminuye el desplazamiento. Aunque en el pico el desplazamiento es de 10.578mm, en la parte central este valor cae casi una milímetro hasta los 9.6172mm.

Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales



Figura 5.29: Tensiones tangenciales del modelo 2D no lineal para muros de 40cm en el tercer ciclo

La distribución cualitativa de tensiones apenas aporta información nueva. De hecho, es la misma que se obtiene cualitativamente en el modelado de muros de 25cm.

Los modelos tipo lámina definitivamente no se ajustan nada bien a la experiencia. Si se pretende comprobar el comportamiento veraz de los ensayos, se deben descartar los modelos laminares porque no tienen en cuenta factores reales que son concluyentes a la hora de ofrecer un resultado cierto, como la rigidez a torsión.

Aunque las distribuciones cualitativas de tensiones y desplazamiento son buenas, no reproducen fielmente el comportamiento observado durante el ensayo. Los modelos lámina, por tanto, no son admisibles.

5.2.2.2.2 Modelo no lineal tridimensional para el tercer ciclo

Al igual que se observó en el segundo ciclo, en el modelo los elementos se encuentran excesivamente distorsionados dando lugar al error en la simulación numérica.

Al aplicar una mayor fuerza que en el caso anterior, se asume que los elementos deberían distorsionarse aún más para alcanzar la situación de carga deseada, por lo que los resultados podrían preverse antes de llevarse a cabo la simulación.

También en este caso se sobrepasa la tensión de compresión máxima descrita en la ley de compresión experimental al aplicar la fuerza.

Aunque la fuerza aplicada debe producir un estado de tensiones tangenciales en el muro, se observa también aquí como la suposición no es totalmente cierta puesto que la ley se ha obtenido a partir de dicha suposición.

El resultado obtenido para la simulación tridimensional de los ensayos ha sido decepcionante; en ningún caso, estos modelos tridimensionales podrán aproximar el comportamiento de los ensayos de muros ante carga lateral cíclica.

5.2.3. Conclusiones

El comportamiento descrito en los modelos lineales concuerda bien con la experiencia contrastada en los ensayos. Los datos y comportamientos observados en los resultados, concuerdan más o menos bien con los ensayos.

La fuerza que controla el comportamiento en el muro es la tracción. Una vez se alcanza el límite elástico en un elemento del modelo, las tensiones se redistribuyen comenzando a tomar parte el comportamiento no lineal del muro.

Los muros de adobe reforzados con geomalla poseen un carácter no lineal muy marcado; esto es, los efectos no lineales intrínsecos se dejan notar desde el comienzo de aplicación de carga.

El modelo predice que el colapso del muro surge en las esquinas inferiores donde el muro se encuentra con la cimentación. Las primeras grietas en los ensayos surgían en esta zona. Los modelos predicen que la tensión principal máxima de tracción se produce en el centro del muro.

Las distribuciones de carga y de desplazamientos así como resultados numéricos, no pueden considerarse coherentes con la experiencia. Los datos numéricos no concuerdan perfectamente y los errores introducidos por las aproximaciones que se han llevado a cabo son un elemento determinante para describir el comportamiento. Los modelos numéricos tridimensionales no pueden ser empleados en ningún caso para pronosticar los resultados de un muro reforzado con geomalla sometido a una carga cíclica lateral que asemeje a un sismo.

Los modelos tipo laminares aportan una solución que no es real, así que tampoco se podrán emplear para calcular el comportamiento de los muros en los ensayos. En lo referente a comportamiento lineal, dan lugar a resultados aceptables pero en comportamiento no lineal, los resultados que aportan no tienen rigor. Se deberá evitar o mejorar este tipo de modelos para describir el comportamiento de los muros de adobe.

Como consecuencia de todo lo visto, se puede llegar a la conclusión de que las leyes de comportamiento a partir de ensayos experimentales de muros reforzados con geomalla sometidos a cortante no son una buena aproximación al comportamiento. Estas leyes de comportamiento deberán ser pulidas teniendo en cuenta la influencia de cada uno de los materiales que componen los muros por separado.

No podrá conocerse la evolución de los muros hacia el colapso a no ser que se mejoren las leyes que describen su comportamiento; las cuales deben tener en cuenta la anisotropía del muro por efecto de los diferentes materiales de los que consta.

Aplicación a ensayos de compresión diagonal

6.1. Introducción al ensayo de compresión diagonal

Finalmente se comprobará la ley de comportamiento obtenida en la aplicación de un ensayo de compresión diagonal. Este apartado tiene como objetivo ratificar que la ley a cortante obtenida mediante los ensayos de compresión diagonal de muretes es válida y aplicable a otro tipo de estructuras.

Se efectuará un modelo numérico capaz de reproducir el ensayo de compresión diagonal aportándole como comportamiento el que se ha observado en los ensayos de muros a cortante antes analizados.

No se empleará en el modelo la ley de comportamiento que describe el desarrollo del murete a compresión diagonal, tan sólo se utilizará su geometría y su forma de aplicación de carga para comprobar el camino de carga que sigue.

Por último, se comprobará si las correlaciones entre las cargas aplicadas y las tensiones¹⁹, pueden verificarse mediante la ley de compresión obtenida en los ensayos experimentales de los muros.

¹⁹ "The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry".C. Calderini, S. Cattari, S. Lagomarsino. 2010.

6.1.1. Ensayo de compresión diagonal

El ensayo de compresión diagonal es un ensayo para la determinación de las características de la albañilería de adobe. Se emplea en la determinación de la rigidez a cortante de muretes y consiste en someter las muestras a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales. La carga aplicada, genera esfuerzos de tensión cortante y dando lugar a la falla del murete a lo largo de una grieta aproximadamente vertical y que une las esquinas de carga.

Los muretes se ensayan sometiéndose a una carga de compresión monótona a lo largo de su diagonal. El esfuerzo cortante medio se puede aproximar como la división de la carga máxima entre el área bruta del murete medida sobre la diagonal.



Figura 6.1: Esquema del ensayo de compresión diagonal

En estos ensayos, se aplica una carga de compresión en la diagonal del murete. El colapso del muro viene asociado al desarrollo de una grieta que aparece en el centro del murete. Más concretamente, la fractura aparece en la parte del mortero y a partir de este punto, va aumentando siguiendo el camino de la diagonal del muro por la zona del mortero o a través de los ladrillos de adobe. La fuerza de rotura es la que se obtiene una vez se produce el colapso en el centro del murete.

Este tipo de test también sirve para obtener parámetros del suelo como la cohesión c, o el ángulo de fricción entre partículas del suelo $\mu = tg \alpha$. Para determinarlas se precisa de, al menos dos experimentos que aporten dos picos de carga de compresión diferentes.

Existen varias normas que describen el procedimiento para llevar a cabo entre ellas, cabe destacar el código ASTM²⁰ y la norma RILEM²¹. Este último se basa en un estudio elástico lineal y es más preciso que la ASTM, que emplea el estado límite último para caracterizar los muretes.

Según los procedimientos y recomendaciones de la norma RILEM, a partir de la curva de tensión- deformación se puede determinar la tensión de rotura por corte y el módulo de elasticidad transversal. Este último suele ser aproximadamente el 10% de la resistencia a compresión obtenida por el ensayo de compresión perpendicular estándar.

Para la determinación de los parámetros del murete, el código aconseja realizar el ensayo en, al menos, seis muretes debido a la gran dispersión que ofrecen los resultados.

El ensayo de compresión diagonal puede llevarse a cabo en diferentes tipos de mampostería. Además, a partir de él se puede mejorar las características de los muros a través de los parámetros mecánicos. El ratio entre rigidez y fuerza aplicada determina el comportamiento y el diseño del muro.

El ensayo puede estar alterado si las zonas de mortero no se encuentran bien realizadas o si la tensión es no nula en el centro del muro al comienzo de la aplicación de carga.

²⁰ "ASTM E519/E519M – 10: Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages". 2010.

²¹ "RILEM LUM B6: Diagonal tensile strength test of small wall specimens". 1991.

6.1.2. Muretes ensayados

Los especímenes de ensayo fueron muretes de adobe para cuya fabricación se emplearon los mismos materiales que para la confección de los muros. Se aconseja, según norma, un grosor para los muros de al menos una vez y media la longitud de la pieza de adobe; por ello, se ha adoptado por hacer los muretes cuadrados. La disposición de los ladrillos, debe ser tal que la altura sea aproximadamente igual a la longitud.

El ensayo se realizó sobre tres muretes, efectuados aprovechando los ladrillos sobrantes en la realización del ensayo de muros. Se dispusieron, por tanto, tres muretes cuadrados de adobe de dimensiones 55x55x21cm. Al contrario que los especímenes anteriores, estos muretes carecerán de refuerzo de geomalla, siendo fabricados íntegramente en adobe. Las juntas se ejecutaron con mortero de barro de 1cm de espesor. No se dio ningún tipo de enlucido a los muretes con objetivo de observar a simple vista el recorrido de las fracturas.

Los tres muretes se hicieron del mismo tamaño y fueron construidos con el mismo tipo de piezas y mortero, empleando la misma técnica de construcción para los tres. Tras la ejecución de los muretes, se dejan secar alrededor de 28 días como propone la norma NTE-E.080 ADOBE en buenas condiciones.

Se procuró no perturbar el espécimen al incluir los transductores. Para ello se perforó el muro con un taladro de broca pequeña a fin de que dichos agujeros sirvieran de sustento a los sensores.

La disposición del murete en el ensayo de compresión diagonal y el resultado tras colapso, se muestra en la imagen 6.2.



Figura 6.2: Murete de adobe ensayado

6.1.3. Ensayos llevados a cabo

Los muretes se tratan en sus esquinas con un poco de yeso para asegurar una distribución uniforme de la carga. Sobre este material se dispusieron cabezales metálicos con la misión de distribuir la carga lo más uniformemente posible.

Sobre los muros, se dispusieron dos transductores perpendiculares entre sí y situados a lo largo de las diagonales de los muretes. Las longitudes calibradas de ambos dispositivos de medida son las mismas para poder obtener el módulo de rigidez a cortante. Se dispusieron de manera que fuera posible medir el desplazamiento relativo sobre las diagonales. La distribución y medidas se muestran en la imagen 6.3.



Figura 6.3: Esquema del ensayo de compresión diagonal

Para cada probeta ensayada se tuvo en cuenta la alineación de la carga con el eje de la probeta disponiendo también en esa misma línea las pletinas que repartirían dicha carga. La longitud de apoyo del acero no debía sobrepasar la altura de un ladrillo.

Al principio del ensayo, la carga se aplica lentamente hasta que la pletina superior asienta bien sobre el murete. Una vez hecho esto, puede dar comienzo el ensayo.

El ambiente en que se efectuó las experiencias, fue a temperatura ambiente y con humedad constante. La aplicación de la carga se llevó a cabo a velocidad uniforme mantenida entre el intervalo en que se exige en la norma.

La carga se aplicó hasta la rotura del murete mientras se registraban los datos de carga mediante un archivo Excel.

6.2. Resultados obtenidos de los ensayos

Se puede determinar la rigidez a cortante mediante los resultados de compresión diagonal. La norma mejicana²², dice que se deben ensayar al menos seis para que los resultados puedan considerarse buenos. Sin embargo, sólo se ensayaron tres especímenes. El resultado, por tanto, podrá considerarse bueno con algunas reservas.

A partir de los datos recopilados en el ensayo de compresión diagonal, puede obtenerse la ley de rigidez a cortante gracias a los transductores de desplazamiento dispuestos perpendicularmente entre sí. Para obtener esta ley basta con seguir la normativa ya citada. Esta ley presenta la variación del esfuerzo cortante aplicado en el muro respecto a la deformación angular que provoca dicha carga. Para estimar el cortante, el área que se tiene en cuenta es el que hay a lo largo de la diagonal del murete, tal como dice la norma referenciada al pie de esta página.

Tras el tratamiento de datos recopilados para los tres muros, la ley de comportamiento a cortante obtenida para cada uno de ellos es la dada por la figura 6.4.



Figura 6.4: Rigidez a cortante de los muretes ensayados

Esta norma permite calcular con estos resultados la resistencia a compresión diagonal y la rigidez a cortante. Básicamente, la resistencia a compresión diagonal es la media de las tensiones máximas a cortante que soportan los muretes. La determinación de la rigidez a cortante es algo más dificultosa aunque requiere también de los esfuerzos cortantes máximos de los tres muretes ensayados.

²² "Determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto". Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación de México.2002.

Las tensiones cortantes máximas obtenidas de la gráfica 6.4, se resumen en la tabla

Espécimen	Murete 1	Murete 2	Murete 3
Esfuerzo resistente (MPa)	0.05202	0.08513	0.06450
Tabla 6.1. Esfuerzas resistantas da las muratas			

Tabla 6.1: Esfuerzos resistentes de los muretes

La resistencia a compresión diagonal se obtiene empleando la fórmula siguiente:

$$\nu = \frac{\overline{\nu}}{1+2.5 \cdot c_{v}}$$

El coeficiente c_v indica la máxima variación en los esfuerzos resistentes en los tres ensayos; en este caso: $c_v = 0.08513 - 0.05202 = 0.03311$. La resistencia a compresión diagonal es:

$$v = \frac{v_{\rm m}}{1 + 2.5 \cdot c_{\rm v}} = 0.06208 \, {\rm MPa}$$

La rigidez a cortante precisa de varios parámetros; la ecuación que la determina es la siguiente:

$$G_{m} = \frac{\tau_{2} - \tau_{1}}{\gamma_{2} - 0.00005}$$

Los parámetros requeridos se muestran en la imagen:



Figura 6.5: Parámetros necesarios para determinar la rigidez a cortante

Las medidas necesarias pueden obtenerse fácilmente de los ensayos experimentales. Los valores adoptados para $\gamma_2 y \tau_1$ se han promediado a partir de los datos experimentales obtenidos de los tres muretes. Con estos datos, la rigidez a cortante es:

$$G_{\rm m} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} = 197.1250 \text{ MPa}$$

El módulo de cizalladura obtenido tiene un valor muy alto. Sin embargo, es el que propone el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación de México, según la norma consultada.

6.1.

6.3. Modelo numérico del ensayo de compresión diagonal

Se pretende comprobar las leyes obtenidas en apartados anteriores con el ensayo de compresión diagonal que se tiene. Se probarán los modelos no lineales con el fin de comprobar la situación que se produce en los muretes al ser cargados con una carga que produzca el colapso del mismo.

El espesor de los muretes es de 21cm. Las leyes de comportamiento a cortante se han obtenido para los muros de espesor 25 y 40cm. Sin embargo, en este apartado se busca verificar que la ley de comportamiento aplicada dará buenos resultados en la zona no lineal y no obtener resultados específicos. Se pretende comprobar si las distribuciones de desplazamientos y tensiones son congruentes con la experiencia en la aplicación de esta ley.

Se ejecutarán dos modelos, uno tipo lámina y otro tridimensional. A priori, debido a que el murete tiene un espesor menor que el de la ley de compresión que va a introducirse, los desplazamientos y las tensiones deben ser mayores en este modelo para una misma fuerza aplicada.

Los modelos emplearán el mismo tipo de elementos que se ha usado en los modelos anteriores y el tamaño de elementos será equivalente al ya usado teniendo en cuenta que el murete tiene unas dimensiones de 55x55x21cm. La disposición del murete en el modelo numérico antes de ejecutar el programa se presenta en la figura 6.6.



Figura 6.6: Modelo de elementos finitos para un ensayo de compresión diagonal

La cuantía de la fuerza F de compresión mostrada en la imagen superior, es meramente formal. Se introducirá una fuerza estimativa en el tramo lineal para comprobar la zona lineal y otra que haga plastificar al murete.

Posteriormente, se comprobarán las correlaciones dadas por las normas ASTM²³ y RILEM²⁴, mediante los resultados de los modelos numéricos en la zona lineal y no lineal. Dichas correlaciones relacionan fuerza aplicada en el ensayo de compresión diagonal con tensiones originadas en el murete.

Las correlaciones que propone la norma ASTM, proponen que el ensayo de compresión diagonal produce un campo de tensiones tangenciales uniforme que viene dado por la siguiente fórmula:

$$\tau_{xy} = 0.707 \cdot \frac{P}{A} (1)$$

El código RILEM considera que el campo de tensiones en el murete a compresión diagonal no es uniforme; dicho campo fue evaluado por Frocht en 1931 y se basa en considerar el murete como material elástico homogéneo isótropo. De este modo, adopta como estado máximo de tensiones principales en el centro del panel, las siguientes expresiones:

$$\sigma_{x} = \sigma_{y} = -0.58 \cdot \frac{P}{A} \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = 1.1 \cdot \frac{P}{A} \quad (3)$$

Ello da lugar a la distribución de tensiones proporcionadas por la figura 6.7. En dicha figura se compara el estado de tensiones de una norma y de otra, proporcionado por los circulos de Mohr.



Figura 6.7: Modelo de elementos finitos para un ensayo de compresión diagonal

²³ "ASTM E519/E519M – 10: Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages". 2010.

²⁴ "RILEM LUM B6: Diagonal tensile strength test of small wall specimens". 1991.

Como puede apreciarse en la figura 6.7, la norma ASTM considera que el ensayo de compresión diagonal asemeja a un estado de tensiones tangenciales puras, mientras que el código RILEM lo considera como un estado en que las compresiones tienen mayor importancia a las tensiones tangenciales.

En referencia a los parámetros de las ecuaciones (1), (2) y (3), P representa la fuerza aplicada sobre la diagonal en el ensayo de compresión diagonal mientras que A es el área bajo la diagonal, que en este caso, tiene un valor de 1633.8cm².

A continuación se estudiará si dichas aproximaciones son buenas para casos de modelos lineales laminares y tridimensionales, y para modelos no lineales también laminares y tridimensionales. Con ello se pretende evaluar el grado de validez de las fórmulas propuestas por las normas.

También se comentará cualitativamente el grado de validez del modelo numérico, observando si el comportamiento que conlleva concuerda con lo apreciado experimentalmente en los ensayos de compresión diagonal llevados a cabo.

6.3.1. Modelos numéricos lineales

En primer lugar, se estudiará el caso de los modelos en la zona lineal. Para que el modelo se encuentre en dicha zona, en base a la ley de compresión a compresión adoptada, la fuerza de compresión aplicada P deber ser menor a 4573N. Se prueba a aplicar una fuerza de 4000N, asegurando que el modelo se encuentra en la zona lineal.

Los resultados para el modelado laminar del ensayo de compresión se muestran en las figuras 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11.



Figura 6.8: Desplazamientos verticales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tipo lámina

Los desplazamientos verticales dominan sobre el resto. En la imagen 6.8 se observa cómo se reparten en la simulación. El punto de mayor desplazamiento es el punto superior donde se aplica la carga, distribuyéndose uniformemente lejos de los puntos de aplicación y de empotramiento.

Alrededor del empotramiento, punto inferior, los desplazamientos van disminuyendo. Se produce un esfuerzo de compresión en la diagonal del murete tal y como ocurre en el ensayo. Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales



Figura 6.9: Desplazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tipo lámina

En los desplazamientos horizontales, se observa la simetría característica de este ensayo. Cuando se aplica la carga en el borde superior, los extremos derecho e izquierdo del muro se desplazan hacia el exterior produciendo esfuerzos de tracción a lo largo de la diagonal del murete donde se encuentra aplicada la carga.



Figura 6.10: Tensiones horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tipo lámina

Las tensiones horizontales se distribuyen sobre el muro como se esperaba; esto es, las tensiones máximas se producen en el centro del murete originando tensiones de tracción en ese punto. Con esta configuración, el murete deberá romper por tensiones de tracción a lo largo de la diagonal de aplicación de carga.





En la figura 6.11 puede verse cómo las máximas tensiones verticales se alcanzan en las estribaciones del punto de carga y de empotramiento, mientras lejos de estos puntos, la tensión se uniformiza. La tensión vertical de compresión se invierte en el interior en aumentar las tensiones horizontales en el sentido de la tracción.



Figura 6.12: Tensiones tangenciales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tipo lámina

Las tensiones tangenciales mostradas en la figura 6.12 son algo más complejas de interpretar, existiendo antisimetría de carga respecto a la diagonal.

Si ahora se evalúan las fórmulas de Frocht, anteriormente descritas para el código RILEM, en la zona central del muro se obtienen los siguientes resultados:

$$\sigma_{x} = \sigma_{y} = -0.58 \cdot \frac{P}{A} = -0.58 \cdot \frac{4000}{163380} = -0.0142 MPa$$
$$\tau_{xy} = 1.1 \cdot \frac{P}{A} = 1.1 \cdot \frac{4000}{163380} = 0.0269 MPa$$

Por otro lado, la norma ASTM predice una distribución uniforme de tensiones tangenciales de valor:

$$\tau_{xy} = 0.707 \cdot \frac{P}{A} = 0.707 \cdot \frac{4000}{163380} = 0.0173 \text{MPa}$$

Este caso, al suponer un estado de tensiones tangenciales puras, las tensiones horizontales y verticales tienen el mismo valor que las tangenciales en el centro del muro. Es decir:

$$\sigma_{x} = \sigma_{y} = \tau_{xy} = 0.0173 MPa$$

Los resultados del modelo lineal tipo laminar en el centro del murete sometido al ensayo de compresión diagonal son los siguientes:

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.018782$$
MPa $au_{xy} = 0.035871$ MPa

Puede apreciarse cómo los resultados numéricos se asemejan más a lo propuesto por la ASTM en referencia a las tensiones verticales y horizontales, mientras que el código RILEM predice mejor el valor de las tensiones tangenciales. Aun así, esta última aproximación proporciona unas buenas deducciones, con un error relativo del 33.35%.

Se tratan ahora los resultados proporcionados por el modelo tridimensional en el tramo lineal con una fuerza aplicada de 4000N. Las distribuciones de desplazamientos y tensiones se muestran en las figuras 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15.





La distribución cualitativa de desplazamientos verticales es similar a la observada anteriormente en el modelo tipo lámina. El máximo desplazamiento se produce en la zona en que se aplica la carga y va disminuyendo hasta que en el empotramiento inferior se hace nulo.



Figura 6.14: Desplazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tridimensional
Los desplazamientos horizontales también son congruentes con la realidad y con lo ya observado. Las esquinas opuestas del murete a las que se aplica la carga de compresión intentan abrirse originando tensiones de tracción en la diagonal de aplicación de carga.



Figura 6.15: Tensiones horizontales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tridimensional

Lo comentado en el párrafo anterior puede corroborarse a la vista de las tensiones horizontales de la figura 6.14. En el centro del muro es donde se produce el mayor valor de estas tensiones puesto que es el punto en que se aplica la mayor tensión de tracción como consecuencia de la carga vertical de compresión.

En este aspecto se basa principalmente el ensayo de compresión diagonal. En los puntos de aplicación y de encastramiento no existe apenas tensión de tracción, siendo en dicha zona más importantes las tensiones verticales.



Figura 6.16: Tensiones verticales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tridimensional

Las tensiones verticales, al igual que lo observado anteriormente, son importantes en la zona superior e inferior del murete. Lejos de estos puntos, la tensión disminuye su valor. Estas tensiones se van invirtiendo y convirtiéndose en tensiones horizontales de tracción en el centro del muro.



Figura 6.17: Tensiones tangenciales en el murete cuando se somete a 4000N, para un modelo tridimensional

Las tensiones tangenciales mostradas en la figura 6.17 se reparten del mismo modo que en el modelado tipo laminar. Su distribución es también antisimétrica respecto a la diagonal.

Los resultados cualitativos para el caso tridimensional se asimilan mucho a los del modelo laminar. Los resultados en el centro del muro se indican a continuación:

$\sigma_x = \sigma_y = -0.01865$ MPa

$\tau_{xv} = 0.037095MPa$

Estas tensiones se han mantenido más o menos estables respecto al modelo de lámina. El principal incremento se ha producido en las tensiones tangenciales, aunque este aumento no tiene especial importancia.

Volviendo a las correlaciones proporcionadas por las normas, se puede comparar si el resultado proporcionado por el modelo numérico corrobora los resultados de la experiencia. Los resultados a los que llegan las normas se ha indicado en el apartado de ensayo de compresión diagonal para modelos laminares. El código RILEM proporcionaba los siguientes resultados:

 $\sigma_x = \sigma_y = -0.0142 MPa$

$$\tau_{xv} = 0.0269MPa$$

La norma ASTM daba lugar a lo siguiente:

$$\sigma_{\rm x} = \sigma_{\rm v} = \tau_{\rm xv} = 0.0173 {\rm MPa}$$

De nuevo, el código RILEM, a pesar de ser más antiguo, es el que mejor aproxima a las tensiones en el centro del modelo. Sin embargo, el error ahora ha aumentado hasta un 37.89%.

El resultado de la simulación del ensayo de compresión diagonal en el tramo lineal ha ofrecido unos buenos resultados. Los errores que se han cometido no son descabellados aunque se ha demostrado que el murete no se encuentra sometido totalmente a un estado de tensiones tangenciales puro. El estado de tensiones en el muro se parece más al propuesto por el código RILEM que a la norma ASTM, dichos estados se encuentran caracterizados en la imagen 6.7.

Por consiguiente, el estado de tensiones al que se encuentra sometido el muro está más próximo a un estado de compresiones que a un estado de tensiones tangenciales puras.

6.3.2. Modelos numéricos no lineales

Los modelos no lineales en el ensayo de compresión diagonal se tratarán con una fuerza que produzca un esfuerzo superior al límite elástico. Como ya se ha visto anteriormente, para que el murete comience a plastificar se debe aplicar una fuerza de compresión de, al menos, 4573N.

La fuerza que se adoptará para alcanzar dicho estado no lineal será de 5000N; con ello, se logra que el murete plastifique pero no rompa. En esta situación de carga, el murete plastifica un poco, pero no tanto como para provocar la ruptura del material y el colapso.

El modelo laminar, proporciona los resultados recogidos en las figuras 6.16, 6.17, 6.18 y 6.19.



Figura 6.18: Desplazamientos verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tipo lámina

La distribución de desplazamientos verticales prosigue el comportamiento observado hasta ahora; es decir, los desplazamientos máximos se producen en las estribaciones del punto de aplicación de la carga. Cerca del punto de empotramiento los desplazamientos se hacen cada vez más pequeños. En la zona intermedia y centro del murete no se deja sentir el efecto de la fuerza, alcanzando un desplazamiento relativamente uniforme en la zona.



Figura 6.19: Desplazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tipo lámina

El reparto cualitativo de desplazamientos horizontales se distribuye del mismo modo que se ha observado hasta ahora. Las esquinas opuestas a las de aplicación de carga se separan de manera asimétrica, el desplazamiento hacia la izquierda es mayor que hacia la derecha.



Figura 6.20: Tensiones horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tipo lámina

Las tensiones tangenciales tienen un mayor valor en el centro del murete. Conforme se acerca a las esquinas, la tensión va descendiendo. En los elementos superior e inferior, próximos al empotramiento y la carga, se produce un reparto de tensiones algo raro debido a efectos de carga.

La carga se sitúa aplicada puntualmente en las cercanías de dicho elemento y ello conduce a errores en los resultados proporcionados por el programa. Los resultados se consideran más veraces cuanto más lejos de dichos puntos se evalúe el modelo.



Figura 6.21: Tensiones verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tipo lámina

Los efectos comentados en el párrafo anterior se repiten en este caso. La distribución cualitativa es prácticamente uniforme en la zona central del muro.



Figura 6.22: Tensiones verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tipo lámina

También este caso de las tensiones tangenciales presentan la misma distribución cualitativa.

Comparando las fórmulas suministradas por las normas con los resultados de los modelos, se obtienen los resultados mostrados inmediatamente. Las fórmulas del código RILEM, predicen el comportamiento en el centro del muro como:

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.58 \cdot \frac{P}{A} = -0.58 \cdot \frac{5000}{163380} = -0.01775 MPa$$

$$\tau_{xy} = 1.1 \cdot \frac{P}{A} = 1.1 \cdot \frac{5000}{163380} = 0.03366 MPa$$

La norma ASTM, proporciona los siguientes resultados:

$$\tau_{xy} = \sigma_x = \sigma_y = 0.707 \cdot \frac{P}{A} = 0.707 \cdot \frac{5000}{163380} = 0.02164 \text{MPa}$$

Según la simulación llevada a cabo del modelo tipo lámina no lineal, las tensiones en el centro del murete sometido a compresión diagonal son las siguientes:

 $\sigma_x = -0.023459MPa$ $\sigma_y = -0.023528MPa$ $\tau_{xy} = 0.044851MPa$

Los resultados son muy semejantes a los del modelo lineal laminar. Una vez más, es peor la aproximación de la norma ASTM, al suponer estado de carga como un estado de tensiones tangenciales puras. La aproximación proporcionada por el código RILEM introduce un error del 33.25%.

Concentrándose ahora en el modelo tridimensional ensayado en la zona no lineal. Para ello, se ha aplicado un esfuerzo 5000N. Al aplicar dicha carga sobre el modelo numérico no lineal tridimensional se obtienen los resultados mostrados en las imágenes 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23.



Figura 6.23: Desplazamientos verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tridimensional

Los resultados cualitativos no varían respecto a lo ya observado en modelos tanto lineales como no lineales.



Figura 6.24: Desplazamientos horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tridimensional

Los desplazamientos horizontales se distribuyen cualitativamente bien a tenor de lo observado en los ensayos. Las esquinas adyacentes a las de aplicación de la carga se alejan provocando la aparición de la grieta en el centro del murete.



Figura 6.25: Tensiones horizontales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tridimensional

Las tensiones horizontales más importantes de nuevo se concentran en el centro del murete provocando las ya conocidas tracciones que agotarán el murete a lo largo de la diagonal.



Figura 6.26: Tensiones verticales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tridimensional



Figura 6.27: Tensiones tangenciales en el murete cuando se somete a 5000N, para un modelo tridimensional

Las tensiones verticales y tangenciales, representadas en las figuras 6.25 y 6.26, se reparten cualitativamente conforme a lo ya visto. Atendiendo a las tensiones en el centro del muro, se obtienen los siguientes resultados:

> $\sigma_x = -0.023312 MPa$ $\sigma_y = -0.023505 MPa$ $\tau_{xy} = 0.046369 MPa$

Las tensiones horizontales y verticales son algo distintas debido a los efectos no lineales que se ha introducido al someter al murete a una carga que origina un esfuerzo superior al límite elástico.

Como ya se ha visto, las tensiones originadas por la carga que se ha aplicado según las correlaciones de las normas son las siguientes:

Norma ASTM:

$$\mathbf{\tau}_{\mathrm{xv}} = \mathbf{\sigma}_{\mathrm{x}} = \mathbf{\sigma}_{\mathrm{v}} = \mathbf{0}.\,\mathbf{02164MPa}$$

Código RILEM:

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.01775 MPa$$
 $\tau_{xy} = 0.03366 MPa$

Nuevamente, tal y como pasó con el modelo tridimensional en la zona lineal, el error ha aumentado respecto al modelo laminar. En este caso el error relativo es del 37.75%.

Recogidos todos los datos en el ensayo de compresión diagonal, se llega a la conclusión de que los modelos laminares se ajustan mejor a las relaciones carga- tensión propuestas por la norma. En su defecto, los modelos lineales aproximan mejor; es decir, los modelos que actúan en la zona lineal son más fácilmente predecibles que los que se sometan a una fuerza que superen el límite elástico.

Por último, cabe también decir que la propuesta de la norma ASTM, que supone el ensayo como un estado de tensiones tangenciales puras, no es muy preciso. El estado tensional que sufre el murete durante un ensayo de compresión diagonal, es más semejante al propuesto por el código RILEM que supone un estado similar al de la ASTM. El estado de tensiones que supone el código RILEM es un estado de tensiones tangenciales pero donde la menor tensión principal (σ_3) se encuentra desplazada hacia la izquierda; es un estado de tensiones tangenciales comprimido como se indica en la figura 6.7.

Los resultados de la simulación del ensayo de compresión diagonal son satisfactorios desde el punto de vista cualitativo. Las leyes de comportamiento obtenidas funcionan bien en la descripción del comportamiento del murete. Los modelos deben de ser pulidos antes de tener en cuenta los resultados hallados con el fin de lograr la convergencia del modelo tridimensional cuando se aplica una fuerza que conlleve un comportamiento no lineal.

Capítulo 7 Conclusiones generales

El adobe es un material frágil cuyo comportamiento es difícil de predecir debido a su carácter no lineal. Se ha demostrado su torpe actuación cuando se somete a cargas horizontales que generan tensiones a cortante. Sin embargo, al recubrir la albañilería de adobe con geomalla, la situación mejora notablemente.

Los ensayos de muros ante cargas cíclicas laterales ofrecen una visión real del comportamiento de una estructura reforzada cuando es sometida a carga cíclica lateral. Tal y como se ha observado, en casas y otras obras colapsadas tras el paso de un terremoto, las grietas aparecen en vanos y en esquinas donde la concentración de tensiones se hace notar. Desde el comienzo de la aplicación de carga el muro presenta un marcado carácter no lineal apreciable en los ciclos de carga de tensión- deformación.

Del ensayo de muros a cortante se obtienen leyes de comportamiento de tensión frente a deformación tangencial. Del test se desprende que no es posible desligar el comportamiento a cortante del comportamiento a flexión. Aparecen efectos de flexión, sobre todo en las esquinas de los muros, cuando lo que se pretende es aplicar una carga netamente cortante.

Además, las leyes obtenidas no son simétricas respecto al origen como se esperaba. Ello es debido a la gran cantidad de factores que se intervienen en el comportamiento del muro. Además, se han llevado a cabo una serie de simplificaciones que hacen que los resultados obtenidos no puedan ser refutados al cien por cien. Dichas aproximaciones se han tomado con el objetivo de llegar a un resultado válido cualitativamente hablando. Para alcanzar un resultado más preciso será necesario un estudio más serio y pormenorizado.

Durante el proceso de carga en el ensayo de los muros a carga lateral cíclica, se origina un deterioro del muro que provoca una destrucción permanente de la capacidad portante y la rigidez. En este caso, entra en juego la fricción entre partículas que distorsionan los resultados aportando una rigidez adicional. En este hecho tienen especial importancia las condiciones de contorno del problema. También puede observarse este efecto en la carga remanente que queda en el espécimen cuando se varía el sentido de la carga.

A partir de los ensayos es posible obtener una ley de compresión tratando el material como homogéneo. La ley de compresión depende de la cantidad de geomalla y de adobe que posee la mezcla, no pudiéndose disponer de una ley universal. La ley de compresión puede obtenerse como la envolvente de los ensayos, puesto que dicha envolvente agota la máxima rigidez que tienen los muros.

La ley obtenida, puede evaluarse a través de la simulación del ensayo mediante modelos numéricos no lineales. En general, los resultados cualitativos reproducen de manera adecuada los ensayos experimentales. El esfuerzo principal que provoca el agotamiento del muro es la tracción. El campo de tensiones también muestra cómo la carga no puede seguir un estado de tensiones tangenciales puras; dando lugar a un campo de tensiones no uniforme. El modelo confirma lo observado por la experiencia, desde las distribuciones de los desplazamientos hasta las de tensiones. Predice el colapso del muro a partir de grietas originadas en las esquinas, mientras que la tensión principal de tracción aparece en el centro del conjunto.

Los resultados cuantitativos se alejan mucho de la realidad. Como se ha visto anteriormente, los modelos tipo lámina difieren de los resultados experimentales. Los modelos tipo laminar no ofrecen resultados optimistas, siendo sobretodo en la zona no lineal donde divergen con la experiencia. Los modelos laminares no pueden reproducir bien la evolución del ensayo porque no tienen en cuenta factores que se dan en el espesor. Estos modelos no son buenos para describir el comportamiento del adobe.

Peor aún es el resultado obtenido para los modelos tridimensionales; al aplicar una carga que haga entrar al muro en la zona no lineal de comportamiento, según los ensayos, se agota la capacidad portante produciéndose el colapso del muro. Los desplazamientos generados en el modelo son excesivos llegando a distorsionar tanto los elementos que pierden su capacidad portante alterando definitivamente la simulación.

Los errores que introducen estos hechos hacen que el modelo prevea el colapso del muro antes del punto de carga en que se produce a tenor de los resultados de los ensayos. Estos modelos son inaceptables y deberán ejecutarse a partir de modelos que tengan en cuenta el comportamiento anisótropo del muro obteniéndose el comportamiento de cada material separadamente e integrándolos para conformar una ley de comportamiento veraz.

En la corroboración de estas resultas, se llevó a cabo una aplicación dónde pudiera verificarse la ley de compresión adoptada. Se aplicó esta ley a un murete ensayado en un test de compresión diagonal. Desde el punto de vista cualitativo, el comportamiento numérico asemejaba bastante bien a la experiencia.

Evaluando cuantitativamente las tensiones máximas en el centro del murete y comparando los resultados con las correlaciones proporcionadas por las normas ASTM y RILEM, se concluye que los resultados numéricos y experimentales se aproximan bien. Las correlaciones que mejor se adaptan al modelo numérico son las propuestas por el código RILEM que supone un estado de tensiones tangenciales al que se da una especial importancia a la compresión.

El modelo no lineal tipo lámina en los ensayos de muros a carga lateral cíclica, ofrece unos buenos resultados en relación a las distribuciones. Cuando se somete a una fuerza que agota al murete, el camino por el que evoluciona el muro es el que se observa en el ensayo de compresión diagonal.

Por consiguiente, el análisis numérico de elementos finitos ofrece una buena aproximación a los ensayos experimentales en lo referente a ensayos de compresión diagonal. Las leyes funcionan bien en la descripción del ensayo de compresión diagonal, no siendo buenas en la descripción del ensayo del que se obtuvieron. En este campo la descripción que debe hacerse tiene que ser algo más compleja de la realizada en este proyecto. Que las leyes de compresión aproximen bien los ensayos de compresión diagonal puede indicar que la ley aproxime bien los muretes sin reforzar como el que se usó en estos ensayos y no los reforzados con geomalla como se usó cuando se aplicaba carga lateral cíclica. Ello indica que la geomalla no opone apenas resistencia en primer término al comportamiento a cortante de los muros y que su función resistente adopta mayor importancia conforme va colapsando el muro.

El proceso de obtención de las leyes es arduo y conlleva una serie de aproximaciones que alejan al modelo de la realidad; como por ejemplo, el tramo lineal que se supone y que realmente no existe en el adobe. Para obtener unas buenas simulaciones del comportamiento de los muros, se debe tener en cuenta que el muro se forma con varios tipos de materiales con sus propias características cada uno de ellos, y que no pueden ser integradas para conformar un solo material que reproduzca los resultados de los ensayos.

Los resultados del proyecto no han sido nada esperanzadores y se deberá seguir investigando al respecto para conseguir resultados concluyentes que logren dar lugar a parámetros del comportamiento del adobe ante cargas cíclicas laterales. No puede predecirse la evolución hacia el colapso de las estructuras de adobe con este tipo de análisis realizado. No resulta fácil describir el comportamiento del adobe ante cargas cíclicas laterales y para simplificar dicho comportamiento deberá de continuarse investigando.

- A. Tena- Colunga, A. Juárez- Ángeles, V. H. Salinas- Vallejo: Cyclic behavior of combined and confined masonry walls. Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Méjico. 2008.
- [2] M. Corradi, A. Borri, A. Vignoli: Experimental study on the determination of strength of masonry walls. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Perugia, Italy. Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Florence, Italy. 2002.
- [3] A. Brignola, S. Frumento, S. Lagomarsino, S. Podestà: Identification of shear parameters of masonry panels through the in- situ diagonal compression test. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Genoa, Italy. 2009.
- [4] N. Tarque, G. Camata, E. Spacone, H. Varum, M. Blondet: Numerical modelling of in- plane behavior of adobe walls. 2010.
- [5] C. Jayasinghe, R. S. Mallawaarachchi: Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials, Department of Civil Engineering, University of Moratuwa, Sri Lanka. 2009.
- [6] A. Figueiredo, H. Varum, A. Costa, M.Santos: Reforço de paredes de adobe: caracterização experimental de uma solução de reforço sísmico. Departemento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal. 2009.
- [7] C. Calderini, S. Cattari, S. Lagomarsino: The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Genoa, Italy. 2010.
- [8] H. Varum, A. Figueiredo, D. Silveira, T. Martins, A. Costa: Investigaciones realizadas en la Universidad de Aveiro sobre caracterización mecánica de las construcciones existentes en adobe en Portugal y propuestas de rehabilitación y refuerzo. Resultados alcanzados, Universidade de Aveiro, Portugal. 2011.
- [9] M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, C. Iwaki: Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2011.
- [10] M. Blondet, G. Vila García, S. Brzev : Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos: Tutor. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2003.
- [11] Reglamento nacional de edificaciones. SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Lima- Perú. 2006.

- [12] Norma Técnica E.080 ADOBE, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2006.
- [13] Norma Técnica E.070 ALBAÑILERÍA, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2006.
- [14] Norma Técnica E.030 DISEÑO SISMO RESISTENTE, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2006.
- [15] A. San Bartolomé: Propuesta de diseño en adobe confinado: Capítulo X de la norma E.080 Adobe, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2007.
- [16] Z. Cao, H. Watanabe: Earthquake response predication and retrofitting techniques of adobe structures. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Saitama, Japan. 2004.
- [17] J. L. Bustos: Estudio del comportamiento sismo-resistente de muros de mampostería encadenada mediante un ensayo en mesa vibratoria, Instituto de investigaciones antisísmicas, Universidad Nacional de San Juan, Argentina. 1999.
- [18] A. San Bartolomé, E. Delgado: Comportamiento sísmico de un módulo de adobe de dos pisos con refuerzo horizontal y confinamiento mínimo, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2007.
- [19] J. C. Rivera Torres, E. E. Muñoz Díaz: Caracterización estructural de materiales de sistemas constructivos en tierra: El adobe, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. 2005.
- [20] C. López Pérez, D. Ruiz Valencia, S. Jérez Barbosa, P. Quiroga Saavedra, J. Uribe Escamilla, E. Muñoz Díaz: Rehabilitación sísmica de muros de adobe de edificaciones monumentales mediante tensores de acero, Escuela colombiana de ingeniería, Colombia. 2007.
- [21] L. Gutiérrez, T. Manco, C. Loaiza, M. Blondet: Características de las construcciones de tierra en el Perú: Contribución a la enciclopedia mundial de las construcciones de vivienda, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2003.
- [22] D. Torrealva Dávila: Serie cuadernos de adobe, Departamento de Ingeniería Sección Ingeniería Civil, Pontifica Universidad Católica de Perú. 2003.
- [23] D. Quiun, K. Alferez, D. Quinto: № A16- 03 Reforzamiento estructural de muros de albañilería de bloques artesanales de concreto, Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Concepción. 2005.
- [24] D. Torrealva: Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomalla, Departamento de Ingeniería Civil, Pontifica Universidad Católica de Perú. 2009.
- [25] A. San Bartolomé, R. Pehovaz: Comportamiento a carga lateral de muros de adobe confinados, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2007.

- [26] E. Gallego Vázquez: Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with non- elastic materials models, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Polytechnic University of Madrid. 2006.
- [27] J. Vargas Neumann, D. Torrealva, M.Blondet: Construcción de casas saludables y de adobe sismorresistentes de adobe reforzado con geomallas, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2008.
- [28] B. Saroza, M. A. Rodríguez, J. M. Menéndez, I. J. Barroso: Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Crescendio Valdés, Villa Clara, Cuba. Julio 2008.

ANEJOS

Anejo I: Modelo lineal tipo lámina

Código de texto para formar el modelo lineal tipo lámina. Unidades en N y mm.

/TITLE, Analisis lineal 2D

/PREP7 ! Espesor del muro E=espesor D=1500 ! Longitud del muro N=nodos ! Nodos sobre los que se distribuirá la carga cortante F=fuerza ! Fuerza neta aplicada sobre el muro K,1,0,0,0, ! Definición de la geometría del muro K,2,D,0,0, K,3,D,D,0, K,4,0,D,0, L,1,2 L,2,3 L,3,4 L,4,1 AL,1,2,3,4 ! Define el tipo de elemento finito que usará el programa ET,1,SHELL63 ! Da espesor al muro R,1,E

MP,EX,1,módulo de elasticidad ! Aplica el módulo de elasticidad obtenido en los ensayos

MP,PRXY,1,0.35	! Coeficiente de Poisson obtenido de otros artículos
ALLSEL	
AATT,1,1,1	! Asigna propiedades al muro
LESIZE,ALL,E/2,,,1	! Define el tamaño de cada elemento finito
AMESH,ALL	! Malla el conjunto según el tamaño de elemento tomado
DL,1, ,ALL,	! Impide los desplazamientos en la base
FLST,2,N,1,ORDE,3	! Aplica una fuerza cortante distribuida entre N nodos
FITEM,2,14	
FITEM,2,26	
FITEM,2,-37	
F,P51X,FX,F/N	
FINISH	
/SOLU	! Resuelve el problema estáticamente
SOLVE	
FINISH	
/POST1	
PLNSOL,U,SUM,0,1,0	!Dibuja el desplazamiento

*Los campos a completar se encuentran en minúscula.

Anejo II: Modelo no lineal tipo lámina

Código de texto para formar el modelo no lineal tipo lámina. Unidades en N y mm.

/TITLE, Analisis no lineal 2D

/PREP7

E=espesor	! Espesor del muro
D=1500	! Longitud del muro
N=nodos	! Nodos sobre los que se distribuirá la carga cortante
F=fuerza	! Fuerza neta aplicada sobre el muro
n=número	! Número de puntos que definen la ley a compresión
К,1,0,0,0,	! Definición de la geometría del muro
K,2,D,0,0,	
K,3,D,D,0,	
K,4,0,D,0,	
L,1,2	
L,2,3	
L,3,4	
L,4,1	
AL,1,2,3,4	

TB,MELA,,n,,	! introducción de la ley de comportamiento a compresión
TBTEMP,25	! Temperatura a la que se realiza el ensayo
TBPT, DEFI, deformación, tensión ! Punto de la ley a compresión (Se introducen n filas)	

ET,1,SHELL63	! Define el tipo de elemento finito que usará el programa
R,1,E	! Da espesor al muro
MP,EX,1,módulo de elasticidad	! Aplica el módulo de elasticidad obtenido en los ensayos
MP,PRXY,1,0.35	! Coeficiente de Poisson obtenido de otros artículos
ALLSEL	
AATT,1,1,1	! Asigna propiedades al muro
LESIZE,ALL,E/2,,,1	! Define el tamaño de cada elemento finito
AMESH,ALL	! Malla el conjunto según el tamaño de elemento tomado
DL,1, ,ALL,	! Impide los desplazamientos en la base
FLST,2,N,1,ORDE,3	! Aplica una fuerza cortante distribuida entre N nodos
FITEM,2,14	
FITEM,2,26	
FITEM,2,-37	
F,P51X,FX,F/N	
FINISH	
/SOLU	! Resuelve el problema estáticamente
ANTYPE,0	! Solución estática
NLGEOM,1	! Grandes desplazamientos permitidos
AUTOTS,1	!Tamaño de paso adecuado a la iteración que se vaya a realizar
NSUBST,100,1000,100	! Define el número de pasos de carga a realizar
OUTRES,ERASE	! Guarda en un archivo los parámetros de cada paso
OUTRES,ALL,ALL	

LNSRCH,1

NEQIT,10000

! Máximo número de itearciones

SOLVE

FINISH

/POST1

PLNSOL,U,SUM,0,1,0

!Dibuja el desplazamiento

*Los campos a completar se encuentran en minúscula.

Anejo III: Modelo lineal tridimensional

Código de texto para formar el modelo lineal tridimensional. Unidades en N y mm.

/TITLE, Analisis lineal 3D

/PREP7

/PREP7	
E=espesor	! Espesor del muro
D=1500	! Longitud del muro
N=nodos	! Nodos sobre los que se distribuirá la carga cortante
F=fuerza	! Fuerza neta aplicada sobre el muro
BLC4,0,0,D,D,E	! Definición de la geometría del muro
ET,1,SOLID45	! Define el tipo de elemento finito que usará el programa
R,1,E,	! Da espesor al muro
MP,EX,1, módulo de elasticidad	l ! Aplica el módulo de elasticidad obtenido en los ensayos
MP,PRXY,1,0.35	! Coeficiente de Poisson obtenido de otros artículos
AATT,1,1,1	! Asigna propiedades al muro
ALLSEL	
MSHAPE,0,3D	
MSHKEY,1	
LESIZE,ALL,E/2, , ,1	! Define el tamaño de cada elemento finito

VMESH,ALL	! Malla el conjunto según el tamaño de elemento tomado
FLST,2,1,5,ORDE,1	! Impide los desplazamientos en la base
FITEM,2,3	
DA,P51X,ALL,0	
FLST,2,N,1,ORDE,8	! Aplica una fuerza cortante distribuida entre N nodos
FITEM,2,1	
FITEM,2,14	
FITEM,2,-25	
FITEM,2,183	
FITEM,2,195	
FITEM,2,-206	
FITEM,2,352	
FITEM,2,-364	
F,P51X,FX,F/N	
FINISH	
/SOLU	! Resuelve el problema estáticamente
SOLVE	
FINISH	
/POST1	
PLNSOL,U,SUM,0,1,0	!Dibuja el desplazamiento

*Los campos a completar se encuentran en minúscula.

Anejo IV: Modelo no lineal tridimensional

Código de texto para formar el modelo no lineal tridimensional. Unidades en N y mm.

/TITLE, Analisis no lineal 3D

/PREP7

E=espesor	! Espesor del muro
D=1500	! Longitud del muro
N=nodos	! Nodos sobre los que se distribuirá la carga cortante
F=fuerza	! Fuerza neta aplicada sobre el muro
n=número	! Número de puntos que definen la ley a compresión
BLC4,0,0,D,D,E	! Definición de la geometría del muro
TB,MELA,,n,,	! introducción de la ley de comportamiento a compresión
TBTEMP,25	! Temperatura a la que se realiza el ensayo
TBPT, DEFI, deformación, tensiór	Punto de la ley a compresión (Se introducen n filas)
ET,1,SOLID45	! Define el tipo de elemento finito que usará el programa
R,1,E	! Da espesor al muro
MP,EX,1,módulo de elasticidad	! Aplica el módulo de elasticidad obtenido en los ensayos
MP,PRXY,1,0.35	! Coeficiente de Poisson obtenido de otros artículos
AATT,1,1,1	! Asigna propiedades al muro
ALLSEL	
MSHAPE,0,3D	

MSHKEY,1

LESIZE,all,E/2,,,1	! Define el tamaño de cada elemento finito
VMESH,ALL	! Malla el conjunto según el tamaño de elemento tomado
FLST,2,1,5,ORDE,1	! Impide los desplazamientos en la base
FITEM,2,3	
DA,P51X,ALL,0	
FLST,2,N,1,ORDE,8	! Aplica una fuerza cortante distribuida entre N nodos
FITEM,2,1	
FITEM,2,14	
FITEM,2,-25	
FITEM,2,183	
FITEM,2,195	
FITEM,2,-206	
FITEM,2,352	
FITEM,2,-364	
F,P51X,FX,F/N	
FINISH	
/SOLU	! Resuelve el problema estáticamente
ANTYPE,0	! Solución estática
NLGEOM,1	! Grandes desplazamientos permitidos
AUTOTS,1	!Tamaño de paso adecuado a la iteración que se vaya a realizar
NSUBST,100,1000,100	! Define el número de pasos de carga a realizar
OUTRES,ERASE	! Guarda en un archivo los parámetros de cada paso
OUTRES,ALL,ALL	

LNSRCH,1	
NEQIT,10000	! Máximo número de itearciones
SOLVE	
FINISH	
/POST1	
PLNSOL,U,SUM,0,1,0	!Dibuja el desplazamiento

*Los campos a completar se encuentran en minúscula.