



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano”

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Civil

Autores:

Walter Santiago Pesántez Alvarado

C.I.:0106649163

walter0933@outlook.com

Juan Daniel Portugal Puma

C.I.:0106656283

juandpp777@gmail.com

Director:

Ing. Juan Carlos Jiménez Pacheco, PhD

C.I.: 0102260965

Cuenca - Ecuador

15/09/2020



RESUMEN

La ciudad de Cuenca fue declarada patrimonio cultural de la humanidad desde 1999 por la gran variedad de edificaciones coloniales que posee y la historia que cada una de ellas guarda; sin embargo, un considerable número de ellas fueron construidas principalmente con adobe, debido a la facilidad que presentaba a los ciudadanos para su construcción, sin dejar de lado la comodidad térmica que brindaba a sus habitantes; pero, existe un gran riesgo en este tipo de edificaciones ya que son vulnerables ante eventos sísmicos. Con este antecedente, se ha visto conveniente realizar el análisis de las edificaciones de adobe, para lo cual se validó los comportamientos de paredes de adobe en el plano mediante métodos que capten la deformación que se produce en la pared al someterse a una carga horizontal; para ello, se realizó una revisión bibliográfica en busca de ensayos realizados para la respectiva validación del método escogido, siendo el seleccionado, el de macro-elementos en pórtico equivalente, para el cual se debe contar con formulaciones que requiere el método tanto para fallas a corte y flexión. En la literatura solo existe una formulación aplicada para falla a corte, es por esto que en este trabajo se valida la formulación existente para mampostería de ladrillo aplicando está a paredes de adobe, usando para ello el programa Ruaumoko, donde se modeló las paredes encontradas y luego se comparó con los resultados obtenidos.

Palabras clave: Eventos sísmicos. Carga horizontal. Macro-elementos. Ruaumoko.



ABSTRACT

The Ecuadorian city Cuenca was declared Cultural heritage of Humanity since 1999. The main reason for this award is due the great variety of colonial buildings and the history inside each one of them. However, most of them buildings are build with adobe, this material have some features as low manufacturing costs and termal isolotation.

On the other hand, the main risk with this type of construction is given by its high vulnerability to seismic events. Under this premise, in this thesis an evaluation of adobe buildings is made. Firstly, the behavior of adobe walls in the plane is validated, through methods that capture the deformation that occurs in the wall when subjected to a horizontal load. Secondly, in an extensive bibliographic review several trials were found to validate the chosen method, highlighting the equivalent gantry macro-element method.

For the last one, there must be formulations required by the method for both shear and flex failures. In the literature there is only one formulation applied for shear failures, for this reason in this thesis the formulation verified in other works in brick masonry is validated in adobe. Finally, using the Ruaumoko program, the walls found are modeled and then compared with the results obtained.

Keywords: Seismic events. Horizontal load. Macro-element. Ruaumoko.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTO	18
DEDICATORIA	19
DEDICATORIA	20
1.1 INTRODUCCIÓN	21
1.2 Objetivos.....	22
1.2.1 Objetivo General.....	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 Metodología.....	23
2. MARCO TEÓRICO	26
2.1 Historia del adobe.....	26
2.2 Descripción General del Adobe.....	29
2.3 Características geométricas de ladrillos de adobe.....	30
2.4 Conformación de las paredes de adobe.....	30
2.5 Desempeño del adobe ante eventos sísmicos.....	34
2.6 Ensayos para obtener las características mecánicas del adobe.....	36
2.6.1 Resistencia a la compresión.....	37
2.6.2 Módulo de esfuerzo cortante del adobe.....	38
2.6.3 Peso unitario del adobe.....	39
2.6.4 Módulo de elasticidad del adobe.....	39
2.7 Modelización del adobe – modelo Fuerza-Desplazamiento.....	40
2.7.1 Modelo Fuerza-Desplazamiento.....	40
3. MODELOS PARA EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA	42
3.1 Modelo de Pórtico Equivalente.....	45
3.1.1 Rigidez Axial (kN,i).....	50
3.1.2 Rigidez de corte (transversal).....	51
3.1.3 Rigidez a flexión.....	51
3.2 Rigidez.....	51
4. MODOS DE FALLA EN PILARES	54



4.1 Condiciones de borde	54
4.2 Falla por flexión	56
4.3 Falla por corte.....	56
4.3.1 Falla por corte: Agrietamiento Diagonal.....	56
4.4 Formulaciones a usar para los diversos modos de falla	59
4.4.1 Falla por flexión o volteo:	59
4.4.2 Falla por corte – agrietamiento diagonal:	60
4.4.3 Falla por corte - agrietamiento diagonal directo:	62
4.4.4 Falla por corte - agrietamiento diagonal escalonado:.....	63
4.4.5 Falla por corte - agrietamiento diagonal mixto (corte con deslizamiento):	64
5. SELECCIÓN DE ARTÍCULOS SOBRE ENSAYOS DE PAREDES	66
5.1 Artículo 1: Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada.....	67
5.2 Artículo 2: 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.	70
5.3 Artículo 3: Experimental study of the Seismic Performance of Different Earth Walls and Their Seismic Retrofitting with Externally Bonded Fibers.	72
5.4 Artículo 4: Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe Wall.....	74
5.5 Artículo 5: Numerical Modeling Of In-Plane Behavior Of Adobe Walls.....	76
5.6 Artículo 6: Shear behavior of adobe and rammed earth walls of heritage structures	78
6. IMPLEMENTACIÓN EN RUAUMOKO	81
6.1 Parámetros de Control.....	82
6.2 Nodos.....	82
6.3 Elementos	82
6.4 Propiedades.....	84
6.5 Masas	88
6.6 Cargas	88
6.7 Patrón de Carga lateral.....	89
6.8 Sismo	89
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
7.1 Artículo 1	91
7.2 Artículo 2	94



7.3 Artículo 3	96
7.4 Artículo 4	99
7.5 Artículo 5	102
7.6 Artículo 6	104
7.6.1 Pared Llena	104
7.6.1 Pared Hueca (Con aberturas)	108
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
9. BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXO A.....	123
A.1	123
A.2.....	123
A.3.....	124
A.4.....	124
A.5.....	125
A.6.....	126
A.6.1	126
A.6.2	126



Índice de figuras

Fig. 1.- Esquema conceptual del proceso para el proyecto actual	25
Fig. 2.- Casa de las Posadas, fuente (Aguilar A., Cárdenas Á., Quezada Z., Cárdenas H., & Sarmiento A., 2018).....	27
Fig. 3.- Casas de adobe del CHC, fuente (Moran Proaño & Alvarez Rodriguez, 2012).....	28
Fig. 4.- Tipología de edificaciones en porcentaje en el CHC, fuente (Jimenez Pacheco, Cabrera Cajamarca, Sánchez Beltrán, & Aviles Tenorio, 2017).....	28
Fig. 5.- Configuración de las dimensiones del bloque de adobe	30
Fig. 6.- Muros a Tizón , fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980).....	31
Fig. 7.- Muros al hilo, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)	31
Fig. 8.- Muros a doble hilo, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)	32
Fig. 9.- Dimensiones de referencia para la Tabla 2, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980).....	32
Fig. 10.- Reforzamiento de muros de adobe con caña, fuente (Minke G. , 2001) .	34
Fig. 11.- Zonas sísmicas para propósitos de diseño, fuente (NEC-SE-DE-Peligro-Sismico-parte-1, 2015).....	35
Fig. 12.- Daños en las estructuras de adobe, fuente (Sayin, Yon, Calayir, & Karaton, 2012).....	36
Fig. 13.- Ensayo de compresión de un murete de mampostería de adobe de 17cm x 17cm x 10 cm, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)	38
Fig. 14.- Izquierda: Prueba de corte por compresión a 45° del moldeado del adobe - Derecha: Modo de falla del ensayo, fuente (Daudon, Sieffert, Albarracín, Garino Libardi, & Navarta, 2014)	38
Fig. 15.- Respuestas ante una carga cíclica sobre pilares de mampostería de ladrillo obtenidas por: a) modo de falla por flexión; b) modo de falla por corte, fuente (Anthoine & Magonette , 1995).....	41
Fig. 16.- Comparación entre las curvas fuerza-desplazamiento propuestos para pilares y las curvas multi-lineales: a) corte; b) flexión, fuente (Jiménez Pacheco, 2016).....	41
Fig. 17.- Pared modelizada a) meso-escala, mediante elementos finitos b) macro-escala, mediante macro elementos, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)	44
Fig. 18.- Modelos de pórtico equivalente: a) con macro-elementos 1D; b) con macro-elementos 2D, fuente (Jiménez Pacheco, 2016).....	46
Fig. 19.- Criterio para establecer las alturas efectivas de los pilares, fuente (Dolce, 1991).....	47
Fig. 20.- Elemento estructural horizontal (Viga dintel), fuente (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018).....	48
Fig. 21.- Modelo propuesto para paredes de MNR: a) Modelo global propuesto b) Modelo de pórtico equivalente con macro-elementos no lineales tipo resorte, fuente (Jiménez Pacheco, 2016).....	49



Fig. 22.- Elemento multi-resorte y coordenadas locales, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)..... 50

Fig. 23.- Rigidez inicial y secante, fuente (Sullivan, Calvi, & Priestley, 2004) 52

Fig. 24.- Modos de falla en pilares y vigas dintel, fuente (Jiménez Pacheco, 2016) 54

Fig. 25.- Modos de agrietamiento diagonal, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)..... 57

Fig. 26.- a) Modo de falla puro (deslizamiento en las juntas horizontales); b) Modo de falla mixto (corte con deslizamiento), fuente (Jiménez Pacheco, 2016)..... 59

Fig. 27.- Esquema de montaje para ensayos de muros carga con carga paralela al plano, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007) 68

Fig. 28.- Fisuraciones en ensayos por la carga paralela, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010) 69

Fig. 29.- Modelo de la pared de adobe a ser ensayada, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011) 71

Fig. 30.- Resultados de la pared ensayada, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)..... 71

Fig. 31.- Configuración del ensayo, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)..... 73

Fig. 32.-Configuración del ensayo e instrumentos usados: a) Sistema de aplicación de fuerza; b) Carga vertical adicional, sismógrafo, acero longitudinal y c) Transductor de desplazamiento, fuente (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018)..... 75

Fig. 33.- Modelo original a ser ensayado, fuente (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-Garcia, & Ginocchio, 2005) 77

Fig. 34.- Modelo en elementos finitos, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010) 78

Fig. 35.- Fotografía de la pared llena a ser ensayada, fuente (Reyes, y otros, 2018) 79

Fig. 36.- Esquema de la pared con aberturas, fuente (Reyes, y otros, 2018) 80

Fig. 37.- Elementos resorte de Ruaumoko, fuente (Carr, User Manual for the 2-Dimensional version-Ruaumoko. Ruaumoko manuals, 2007)..... 83

Fig. 38.- Reglas de histéresis adoptadas para resortes de pilares y vigas dintel, fuente (Carr, Ruamoko manual - Volume 5: Appendices, 2007) 85

Fig. 39.- Esquema de curva multi-lineal con degradación de resistencia, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)..... 87

Fig. 40.- Ley de degradación, fuente (Carr, Theory. Ruaumoko manuals, Vol. 1, 2007)..... 87

Fig. 41.- a) función rampa unitaria; b) patrón de carga lateral en tres instantes/pasos de análisis, fuente (Jiménez Pacheco, 2016) 90

Fig. 42.- Resultados del ensayo, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)... 92

Fig. 43.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)..... 93



Fig. 44.- Resultados del ensayo, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)..... 95

Fig. 45.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011) 95

Fig. 46.- Resultados del ensayo, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)..... 97

Fig. 47.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Wang, Wang, & Liu, 2019) 98

Fig. 48.- Resultados del ensayo, fuente (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018); (Sarchi, Varum, Monteiro, & Silveira, 2018) 100

Fig. 49.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018) 100

Fig. 50.- Resultados del ensayo, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010) 103

Fig. 51.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010) 103

Fig. 52.- Resultados del ensayo, fuente (Reyes, y otros, 2018)..... 105

Fig. 53.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes - Pared A01 para (Reyes, y otros, 2018) 106

Fig. 54.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes - Pared A02 para (Reyes, y otros, 2018) 106

Fig. 55.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes - Pared A03 para (Reyes, y otros, 2018) 107

Fig. 56.- Resultados del ensayo, fuente (Reyes, y otros, 2018)..... 109

Fig. 57.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para pared hueca (Reyes, y otros, 2018) 109

Fig. 58.- Artículo 1 - Propiedades geométricas del muro, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007) y consideraciones para modelo de macro-elementos. 123

Fig. 59.- Artículo 2 - Modelo de la pared de adobe a ser ensayada, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011) y consideraciones para modelo de macro-elementos..... 123

Fig. 60.- Artículo 3 - Características de la pared, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019) y consideraciones para modelo de macro-elementos. 124

Fig. 61.- Artículo 4 - dimensiones de pared ensayada, fuente (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018) y consideraciones para modelo de macro-elementos..... 124

Fig. 62.- Artículo 5 - Dimensiones de pared ensayada, fuente (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-Garcia, & Ginocchio, 2005) 125

Fig. 63.- Artículo 5 - Dimensiones de pared ensayada, fuente (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-Garcia, & Ginocchio, 2005) y consideraciones para modelo de macro-elementos..... 125



Fig. 64.- Artículo 6 - Esquema de la pared llena, fuente (Reyes, y otros, 2018) y consideraciones para modelo de macro-elementos. 126

Fig. 65.- Artículo 6 - Geometría de pared hueca, fuente (Reyes, y otros, 2018) . 126

Fig. 66.- Artículo 6 - Esquema de la pared hueca, fuente (Reyes, y otros, 2018) y consideraciones para modelo de macro-elementos. 127



Índice de Tablas

<i>Tabla 1.- Valores típicos de ladrillos de adobe, fuente especificada</i>	30
<i>Tabla 2.- Variabilidad de las dimensiones de los muros en la zona rural de la ciudad de Cuenca, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)</i>	33
<i>Tabla 3.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)</i>	68
<i>Tabla 4.- Valores adicionados considerados para establecer los valores de cohesión y Angulo de fricción, fuente especificada</i>	69
<i>Tabla 5.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (González Bernardo, 2016)</i>	69
<i>Tabla 6.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)</i>	70
<i>Tabla 7.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Varum, Costa , Fonseca, & Furtado, 2015)</i>	72
<i>Tabla 8.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)</i>	72
<i>Tabla 9.- Propiedades geométricas de las vigas de hormigón utilizadas para el ensayo, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)</i>	73
<i>Tabla 10.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Liu, Wang, & Wang,2014); (Liu, Wang, & Wang,2015; (Wang, Wang, & Liu, 2019))</i>	74
<i>Tabla 11.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018)</i>	75
<i>Tabla 12.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Silveira D. , Varum, Costa, & Carvalho, 2015); (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018); (Sarchi, Varum, Monteiro, & Silveira, 2018)</i>	76
<i>Tabla 13.- Propiedades geométricas del muro, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)</i>	77
<i>Tabla 14.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-Garcia, & Ginocchio, 2005)</i>	77
<i>Tabla 15.- Propiedades geométricas del muro, fuente (Reyes, y otros, 2018)</i>	79
<i>Tabla 16.- Valores requeridos para la modelización, fuente (Reyes, y otros, 2018); (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)</i>	80
<i>Tabla 17.- Información requerida para la elaboración del fichero de datos, fuente (Carr, User Manual for the 2-Dimensional version-Ruaumoko. Ruaumoko manuals, 2007)</i>	81
<i>Tabla 18.- Configuración de los nodos</i>	82
<i>Tabla 19.- Configuración de los elementos</i>	83
	11



Tabla 20.- Bloque de propiedades necesarios para el programa 84

Tabla 21.- Propiedades necesarias para el modelo bilineal 84

Tabla 22.- Propiedades necesarias para el modelo tri-lineal..... 84

Tabla 23.- Configuración de datos para la masa..... 88

Tabla 24.- Colocación de cargas en Ruaumoko..... 89

Tabla 25.- Patrón de carga Lateral solo en el eje X 89

Tabla 26.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Magenes & Calvi, 1997)..... 91

Tabla 27.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Turnšek & Čačovič, 1971)..... 92

Tabla 28.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Reyes, y otros, 2018)..... 92

Tabla 29.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 1, fuentes especificadas 93

Tabla 30.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Magenes & Calvi, 1997)..... 94

Tabla 31.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Turnšek & Čačovič, 1971)..... 94

Tabla 32.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Reyes, y otros, 2018)..... 94

Tabla 33.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 21, fuentes especificadas 96

Tabla 34.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Wang, Wang, & Liu, 2019); (Magenes & Calvi, 1997)..... 96

Tabla 35.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Wang, Wang, & Liu, 2019); (Turnšek & Čačovič, 1971) 97

Tabla 36.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Wang, Wang, & Liu, 2019); (Reyes, y otros, 2018) 97

Tabla 37.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 3, fuentes especificadas 98

Tabla 38.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)..... 99

Tabla 39.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)..... 99

Tabla 40.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018); (Reyes, y otros, 2018)..... 99

Tabla 41.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 41, fuentes especificadas 101

Tabla 42.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Magenes & Calvi, 1997)..... 102



Tabla 43.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Turnšek & Čačovič, 1971)..... 102

Tabla 44.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Reyes, y otros, 2018)..... 102

Tabla 45.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 51, fuentes especificadas..... 104

Tabla 46.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)..... 104

Tabla 47.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971) 105

Tabla 48.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Reyes, y otros, 2018)..... 105

Tabla 49.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 6 – Pared Llena1, fuentes especificadas..... 107

Tabla 50.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)..... 108

Tabla 51.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971) 108

Tabla 52.- Resultados de las formulaciones, fuente (Reyes, y otros, 2018) 108

Tabla 53.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 6 - Pared Hueca, fuentes especificadas..... 110

Tabla 54.- Tabla resumen de errores relativos (en porcentaje), obtenidos para la rigidez y carga máxima, fuentes especificadas. 111

Tabla 55.- Porcentaje de error de rigidez ordenada de menor a mayor 114

Tabla 56.- Porcentaje de error de carga máxima ordenada de menor a mayor. . 115



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Walter Santiago Pesántez Alvarado en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de septiembre del 2020

Walter Santiago Pesántez Alvarado

C.I: 0106649163



Cláusula de Propiedad Intelectual

Walter Santiago Pesántez Alvarado autor del trabajo de titulación "Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor

Cuenca, 15 de septiembre del 2020

Walter Santiago Pesántez Alvarado

C.I: 0106649163



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Juan Daniel Portugal Puma, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de septiembre del 2020

Juan Daniel Portugal Puma

C.I: 0106656283



Cláusula de Propiedad Intelectual

Juan Daniel Portugal Puma, autor del trabajo de titulación "Comportamiento sísmico de paredes de adobe en el plano", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de septiembre del 2020

Juan Daniel Portugal Puma

C.I: 0106656283



AGRADECIMIENTO

Al Dr. Juan Carlos Jiménez Pacheco, por su dedicación y apoyo con sus conocimientos para la culminación de este proyecto de investigación.

Al personal que trabaja en la Red Sísmica del Austro, por toda su ayuda y el espacio brindado que contribuyeron de alguna manera para la culminación de este trabajo.

Al Ing. Johnny Eduardo Cabrera Cajamarca, por su valioso aporte y sus recomendaciones que ayudaron al correcto uso del software Ruaumoko.

A nuestros amigos, por los buenos momentos compartidos y el apoyo mutuo en cada faceta de la carrera.

A todas las personas que estuvieron apoyándonos de alguna manera, económica y moralmente, para lograr finalizar no solo nuestro trabajo de tesis, sino nuestros estudios universitarios.



DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a Jehová el creador de todo lo que existe, a mis padres y hermanos que siempre me ayudaron y me apoyaron para alcanzar estas metas que hoy las he logrado.

Santiago



DEDICATORIA

A Dios, por permitirme cumplir otra meta más en mi vida.

A mis padres, Edgar Portugal y Gloria Puma, quienes, con su ejemplo y apoyo incondicional, me han motivado a seguir siempre adelante, en especial para culminar mi carrera profesional. A mi hermana, Jennifer Portugal, quien con sus palabras y consejos siempre me ha infundido ánimos en todos los ámbitos de mi vida.

A todos mis familiares y amigos, quienes estuvieron de una u otra manera pendientes de mis estudios; pero de manera muy especial, a Tatiana López, quien, con su amor y constante preocupación, me ayudo a no rendirme y a convertirme en una mejor persona y me ha apoyado enormemente en los últimos años de mis estudios.

Juan



1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se estima que aproximadamente un 30% de la población vive en casas construidas de adobe, y de estos, alrededor del 50% de la población de los países en desarrollo, incluyendo la mayoría de la población rural y al menos el 20% de la población urbana y urbano-marginal vive en casas construidas en base a este material (Silveira, y otros, 2012). En la ciudad de Cuenca, el Centro Histórico está constituido por aproximadamente un 43% de casas coloniales construidas de adobe (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018). Se ha demostrado en varias investigaciones en varios lugares, las viviendas con paredes de adobe presentan una alta vulnerabilidad sísmica debido a la fragilidad que presenta este material (Tarque N. , 2008), por el elevado peso de la estructura y a su baja resistencia (Blondet, Villa Garcia, & Loaiza, 2003). Debido a ello, ante un evento sísmico, las edificaciones se verían afectadas ya sea parcialmente o en su totalidad, repercutiendo en daños sociales (pérdida de vidas humanas), económicos y en la afectación del patrimonio.

Además, el adobe, al ser un material formado principalmente por suelo, paja y otros materiales de origen orgánico es más susceptible de sufrir daños con el paso del tiempo y ser afectados por las condiciones climáticas de la zona. El costo de fabricación de una vivienda de adobe es de bajo presupuesto y su metodología de construcción es simple; además, brinda protección térmica y acústica, lo que lo convierte en una opción mucho más accesible para las todas personas (Blondet, Villa Garcia, & Loaiza, 2003).

Sin embargo, el estudio del adobe como un material de construcción no se ha profundizado debido a que fue sustituido por otros materiales, como son: el acero y el hormigón armado; los mismos que tienen sus características mecánicas muy bien definidas, y cuentan con varios estudios, y normativas sismorresistentes (AISC 360), (AISC 358), (ACI 318). Cabe destacar que el adobe es un material con múltiples desventajas comparado con materiales de barro cocido o concreto; su capacidad, resistencia a esfuerzos a flexión, cortante y compresión axial es muy baja, debido a



que el material no se encuentra completamente estabilizado; esto es, que sus características pueden variar por el cambio de humedad y se pueden producir deformaciones de importancia en el tiempo bajo carga sostenida (acortamiento de paredes por peso propio).

En la ciudad de Cuenca no existen estudios de capacidad sísmica de casas de adobe; sin embargo, alrededor del mundo se han realizado varios ensayos en paredes de adobe (Hracov, Pospìsil, Garofano, & Urushadze, 2015) y simulaciones por medio de elementos finitos (Blondet, Brzev, Rubiños, & Villa, 2011), pero pese a todo esto, cabe señalar que casi no existen formulaciones para evaluar los modos de falla del adobe, por lo que en este proyecto se busca validar fórmulas aplicadas a MNR que han sido validadas en ladrillo como son las presentadas en los documentos: “In-plane seismic response of brick masonry walls” (Magenes & Calvi, 1997), “Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls” (Turnšek & Čačovič, 1971), y la formulación para adobe presentada por Juan C. Reyes en el artículo: “Shear behaviour of adobe and rammed earth walls of heritage structures” (Reyes, y otros, 2018).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar formulaciones de rigidez elástica y de capacidad de resistencia ante diferentes modos de falla de paredes de adobe sometidas a carga lateral sísmica.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar los modos de falla de las paredes de adobe sometidos a carga lateral creciente.
2. Establecer formulaciones de rigidez elástica y de capacidad de resistencia.



3. Recopilación de ensayos de paredes de adobe para la validación de la formulación propuesta.
4. Modelización de las paredes de adobe de los ensayos recopilados mediante el método de macro elementos.
5. Obtención de curvas pushover de los modelos de análisis.

1.3 Metodología

Para el presente proyecto, en primer lugar, se realizará la identificación de los modos de falla en el plano que afecten a las paredes de adobe, además de la recolección de formulaciones que nos ayuden a encontrar momentos y cortantes últimos; a continuación, se realiza una recopilación de diferentes artículos con el fin de obtener ensayos con curvas pushover y sus respectivos parámetros considerados para la obtención de las mismas, para posteriormente, realizar la modelación de cada una y llegar a la validación de las fórmulas, además de obtener también los modos de falla en las paredes. Como se mencionó anteriormente, algunas de estas formulaciones han sido validadas para mampostería de ladrillo, pero no así para adobe (salvo la formulación propuesta por (Reyes, y otros, 2018)); por lo que se busca también probar la validez o no, en este tipo de mampostería.

Con la documentación recopilada y sus respectivas propiedades geométricas y mecánicas para cada ensayo, se procede a observar cual es el modo de falla que rige a cada una de las paredes que se modelizaran, y se digitalizaran los resultados de las curvas que se presentan en los documentos seleccionados con el fin de realizar la respectiva comparación con los resultados de las formulaciones.

Para la modelización mediante macro-elementos, se debe en primer lugar dibujar la geometría de las paredes, lo cual define cada uno de los elementos y coordenadas de nodos necesarios requeridos por el software Ruaumoko, y, posteriormente, para cada modelo, se ingresa las respectivas propiedades y momentos últimos.



En primer lugar, el modelo de cada pared se somete a un análisis modal con el fin de obtener parámetros que nos ayuden a determinar curvas de capacidad. El análisis modal de estructuras, consiste en determinar los modos de vibrar y frecuencias naturales de la estructura, al ser sometido a una vibración libre.

El análisis con el método del empuje incremental (pushover) es un cálculo estático no lineal para el análisis sísmico de estructuras. El patrón de cargas se deduce del cálculo dinámico de cargas equivalentes. Estas cargas se incrementan de forma monótona hasta que se alcance el fallo global de la estructura.

Finalmente, con las curvas obtenidas para cada uno de los ensayos, se realiza una comparación con las ya establecidas en cada documento para verificar cual es la mejor o más adecuada formulación de las propuestas y si es apta o no, la modelización de macro-elementos adoptada. Estas comparaciones y resultados obtenidos, pueden ser utilizadas para realizar futuras investigaciones de capacidad sísmica de edificaciones de adobe, lo cual sería de interés para la ciudad de Cuenca debido a sus edificaciones de valor patrimonial.

A continuación, en la figura 1, se muestra el esquema conceptual del proceso para la realización del proyecto propuesto.

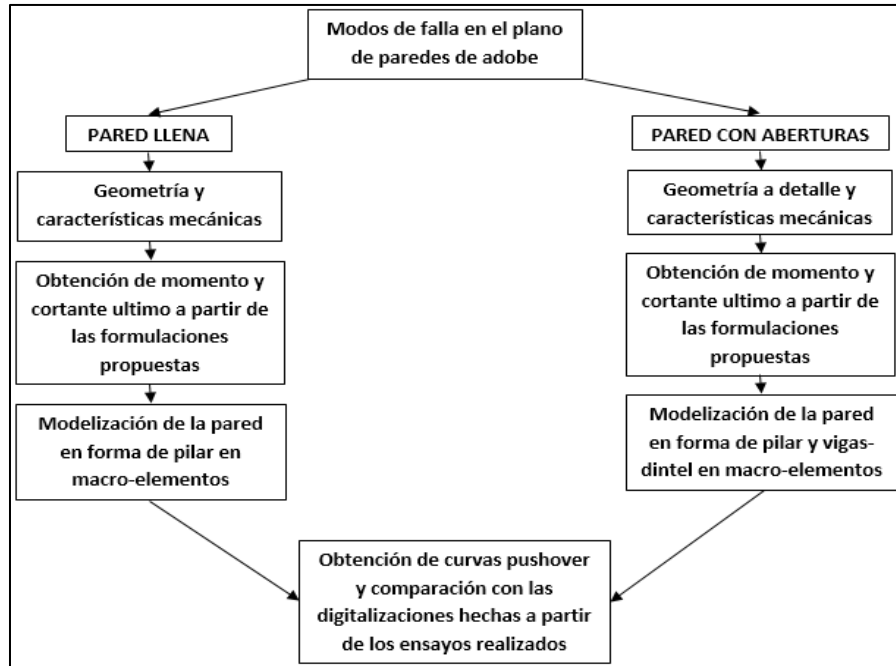


Fig. 1.- Esquema conceptual del proceso para el proyecto actual



2. MARCO TEÓRICO

El adobe como material de construcción, posee ventajas térmicas y acústicas, pero es considerado de baja capacidad sísmica. En la ciudad de Cuenca, se tiene una gran cantidad de edificaciones de adobe consideradas patrimoniales, las cuales son vulnerables ante eventos telúricos probables debido a su ubicación geográfica, y de ahí la importancia de realizar estudios que ayuden a prevenir desastres en la ciudad.

2.1 Historia del adobe

Los bloques de Adobe son uno de los materiales más antiguos y usados en construcción. El uso de este material se remonta desde el año 8000 a.C.; aunque en Turquestán, Rusia, existen edificaciones de adobe que datan del 9000 a. C., así como en Egipto existen estructuras monumentales que tienen una edad de 3200 años (Minke G. , 2001). El uso del adobe es muy común en regiones vulnerables tales como Latinoamérica, África, en la parte sur y centro de Europa y en algunas partes de Asia (Blondet, Brzev, Rubiños, & Villa, 2011).

Actualmente, a nivel mundial, se estima que aproximadamente un 30% de la población vive en casas construidas de adobe, y de éstos, alrededor del 50% de la población de los países en desarrollo, incluyendo la mayoría de la población rural y al menos el 20% de la población urbana y urbano-marginal vive en casas construidas en base a este material (Silveira, y otros, 2012). Particularmente en América, existen varios ejemplos de grandes construcciones en este material, como los sitios arqueológicos de Zethé y Sabina Grande, los cuales, pese a ser diferenciados tanto cronológicamente como espacialmente, muestran la tradición que existe en el continente por las edificaciones de este tipo.

En Sudamérica, la resistencia sísmica de las construcciones de adobe ha sido mayormente estudiada en Colombia, Chile, Argentina, pero sobre todo en Perú, en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Por ejemplo, en el último terremoto de Chile del 2010 fueron destruidas más de 140000 casas de adobe, de las cuales, en

su gran mayoría, no contaban con ningún refuerzo antisísmico (Fundación Terram, 2010). Los problemas mayormente encontrados son causados por el peso de la estructura, su baja resistencia y su comportamiento frágil (Blondet, Villa Garcia, & Loaiza, 2003).

En Ecuador, las construcciones de adobe han sido utilizadas mayormente en la región de la sierra del país, tanto en zonas urbanas como en rurales, las cuales aún se conservan a pesar del paso de los años, siendo así por su construcción relativamente sencilla y bajo costo. Según el último censo realizado en el país en el año 2010, el número de viviendas de adobe representan un 18,26% del número total de viviendas existentes. (INEC, 2010).

En la ciudad de Cuenca propiamente, aún existen evidencias del uso de la técnica del adobe desde antes del período incaico; fue muy utilizado en el periodo colonial con la llegada de los españoles, como es el ejemplo de la Casa de las Posadas ubicada en la Calle Gran Colombia, entre Miguel Heredia y Octavio Cordero, esta edificación se encuentra en el CHC (figura 2). En el periodo de república del Ecuador, el adobe se constituyó en una alternativa para la construcción de viviendas en Cuenca (Aguilar A., Cárdenas Á., Quezada Z., Cárdenas H., & Sarmiento A., 2018); pero en las últimas décadas el adobe fue sustituido casi en su totalidad por el ladrillo y otras tecnologías constructivas.



Fig. 2.- Casa de las Posadas, fuente (Aguilar A., Cárdenas Á., Quezada Z., Cárdenas H., & Sarmiento A., 2018)

En el CHC, se pueden encontrar varias edificaciones realizadas de muros de mampostería de tierra (adobe), mamposterías mixtas de adobe y ladrillo, y de adobe y bahareque, entre otras (figura 3). Estas edificaciones son consideradas patrimoniales y de alta vulnerabilidad ante eventos sísmicos (Moran Proaño & Alvarez Rodriguez, 2012). El porcentaje de viviendas construidas de adobe es del 43%, como se muestra en la figura 4. Se han realizado varios estudios de capacidades últimas en estructuras de mampostería no reforzada en el CHC, pero, no se cuentan con estudios de la capacidad sismorresistente del adobe, al menos en la ciudad. Sin embargo, si se cuenta con tesis que evalúan la capacidad portante del adobe.



Fig. 3.- Casas de adobe del CHC, fuente (Moran Proaño & Alvarez Rodriguez, 2012)

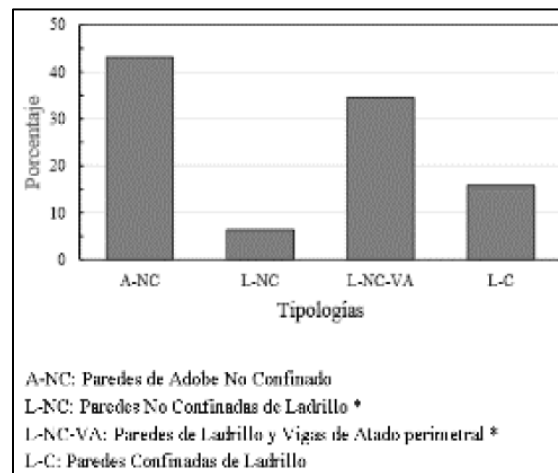


Fig. 4.- Tipología de edificaciones en porcentaje en el CHC, fuente (Jimenez Pacheco, Cabrera Cajamarca, Sánchez Beltrán, & Aviles Tenorio, 2017)



2.2 Descripción General del Adobe

El adobe es un material de construcción hecho de una masa de barro (arcilla y arena) mezclada con paja, moldeado en forma de ladrillo a mano y secado al sol. Según Minke: “La tierra es una mezcla de arcilla, limo y arena que algunas veces contiene agregados mayores como grava y piedras (...) La arcilla actúa como aglomerante para pegar las partículas mayores en la tierra. Limo, arena y otros agregados constituyen rellenos en la tierra” (Minke, 2005). La arcilla, proviene del desgaste de las rocas formándose partículas muy finas de un tamaño de 0.002 mm, y tiene la capacidad de ser aglutinante por los cationes positivos que contiene obteniendo así una resistencia a la compresión (Minke G. , 2001). Los limos, están presentes en la tierra por la sedimentación, y sus propiedades son diferentes a las de las arcillas, pero dotan a la tierra de una capacidad impermeabilizante. El agua, es la encargada de activar la capacidad de las arcillas presentes en el barro. Finalmente, la paja, es utilizada para proveer de rigidez, reducir el agrietamiento y fuerza a la mezcla, posee una baja densidad y un bajo costo, además de tener la ventaja de ser renovable y de fácil manejo.

Para la elaboración del barro, se recomienda retirar piedras mayores a 5 mm u otros elementos extraños practica que no es común en las adoberas, se deja reposar la tierra por un lapso de 24 horas sin embargo la norma peruana E080 recomienda un reposo de 2 o más días con el fin de que la mayor cantidad de partículas de arcilla se activen antes de ser amasadas. Posteriormente se agrega al barro la cantidad necesaria de agua, la norma E080 recomienda que esta no debe sobrepasar el 20% en volumen porque así se logra evitar o disminuir las fisuras de secado y conseguir una máxima resistencia de los muros. Para agregar la paja la norma indica que esta debe ser el 20% total del material en volumen debido a que ayuda a controlar el agrietamiento durante la etapa de secado.

2.3 Características geométricas de ladrillos de adobe

Debido a la gran variabilidad en cuanto a las dimensiones de los bloques de adobe, se procedió a la recopilación de diversos trabajos realizados en la ciudad y la región. En la figura 5 se muestran las respectivas nomenclaturas para los lados del bloque y en la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos:

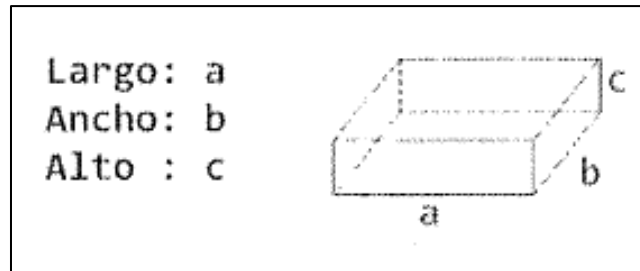


Fig. 5.- Configuración de las dimensiones del bloque de adobe

AUTOR	a (cm)	b (cm)	c (cm)
(Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)	40 – 45	20 – 25	15 – 20
(Alvarez Gomez & Salgado Carpio, 1980)	50 – 52	25 – 30	18 – 20
(Minke G. , 2001)*	38 – 40	20 – 38	8 – 10
(Aguilar A., Cárdenas Á., Quezada Z., Cárdenas H., & Sarmiento A., 2018)	39 – 50	19 – 25	13 – 19

*El autor hace referencia a dimensiones típicas en Latinoamérica

Tabla 1.- Valores típicos de ladrillos de adobe, fuente especificada

2.4 Conformación de las paredes de adobe

La pared de adobe es el elemento estructural que recibe la mayor parte de cargas actuantes en la construcción y durante un sismo. Para que la vivienda resista los impactos sísmicos, se opta por usar formas simétricas al momento de la construcción (Jurado Mogrovejo & Vergara Peñaherrera, 2019). En la composición de la pared, todos los ladrillos de adobe deben quedar trabados con un traslape de medio adobe usando un mortero para lograr una perfecta ligadura entre ellos. El mortero tiene un espesor máximo de 2 cm. y es del mismo material que se usa para

la elaboración de los bloques de adobe, aunque en ocasiones de les suele añadir una cantidad de cemento (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980) (Jurado Mogrovejo & Vergara Peñaherrera, 2019).

En las Figuras 6, 7 y 8, se muestran las clasificaciones de las paredes de adobe:

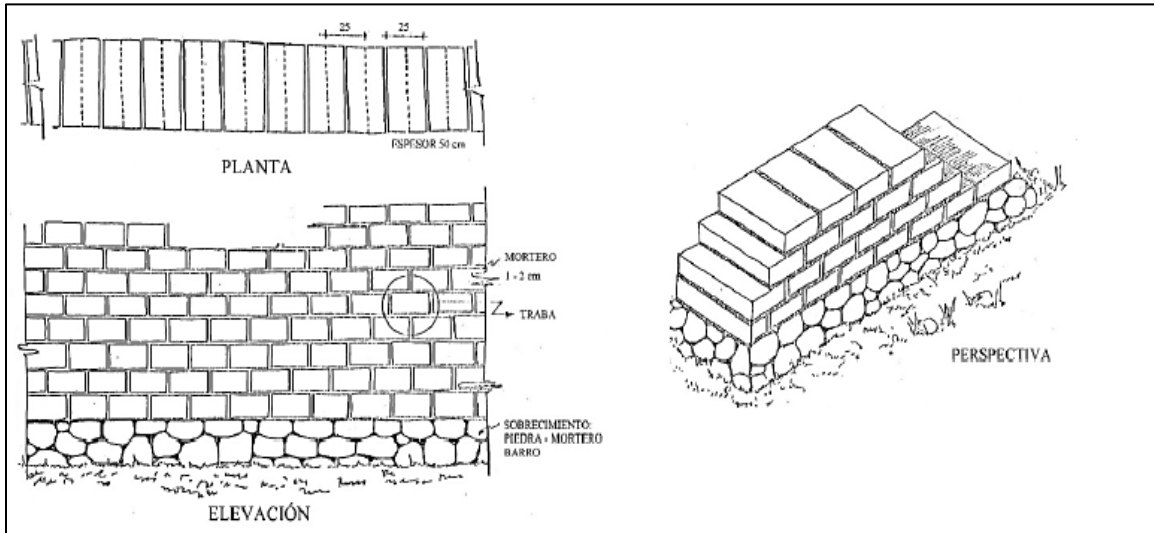


Fig. 6.- Muros a Tizón , fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)

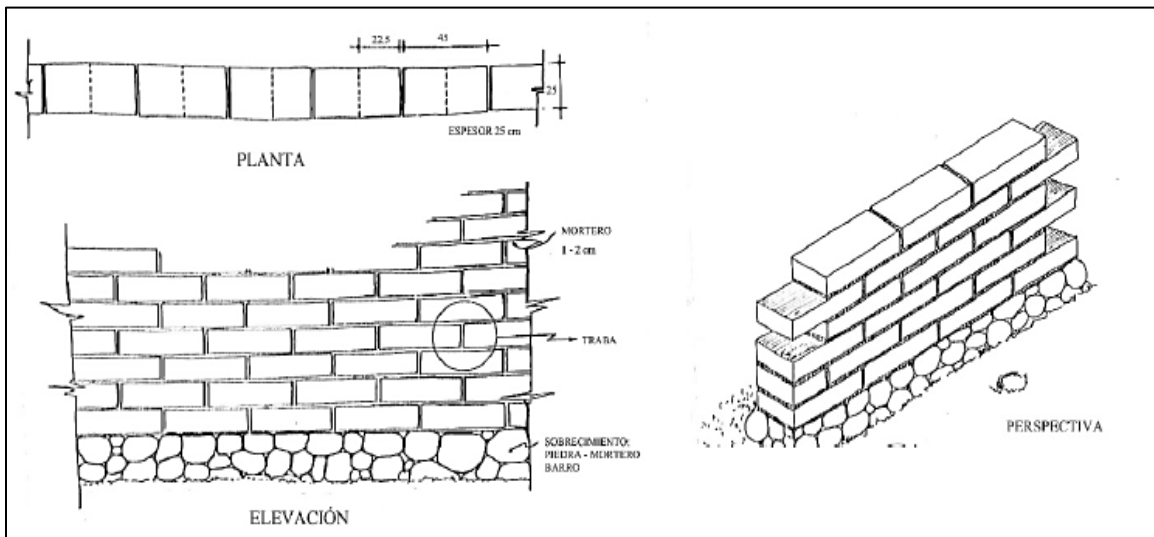


Fig. 7.- Muros al hilo, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)

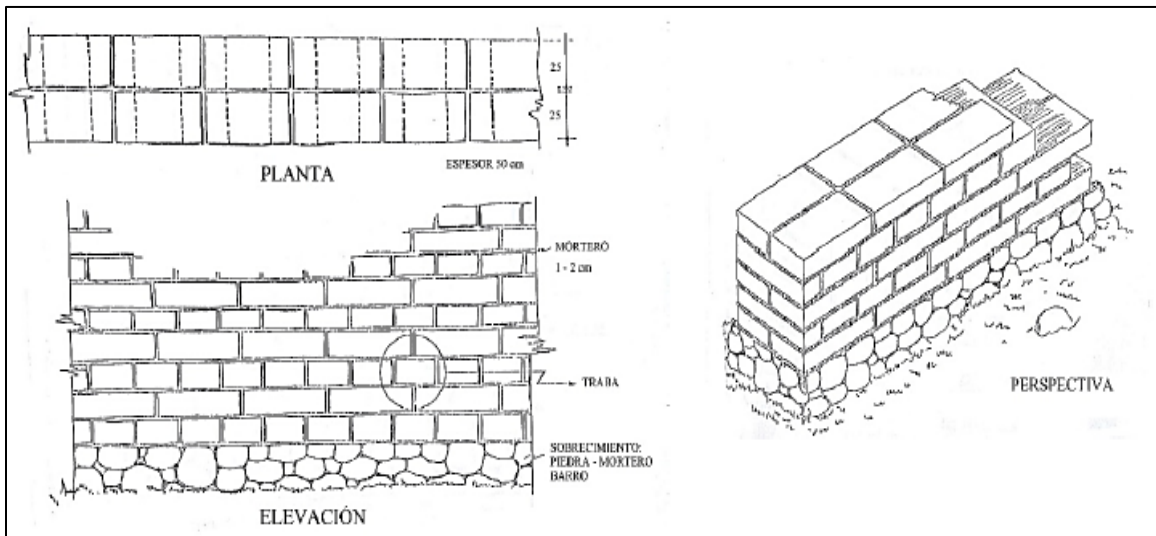


Fig. 8.- Muros a doble hilo, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)

Además, los espesores de las paredes en las casas antiguas hechas de adobe varían entre 60 a 150 cm, cuya cimentación consistía de una o dos hiladas de piedra gruesa unidas con mortero de barro a una profundidad de entre 20 y 50 cm. Además, presentan sobrecimientos y vigas corridas para garantizar la transmisión de las cargas al suelo de manera correcta y evitar que la humedad ascienda hacia los muros de tierra (Jurado Mogrovejo & Vergara Peñaherrera, 2019). En la tabla 2, se muestra la configuración de las paredes que tenían las siguientes formas típicas basadas en las casas patrimoniales y de la zona rural de la ciudad:

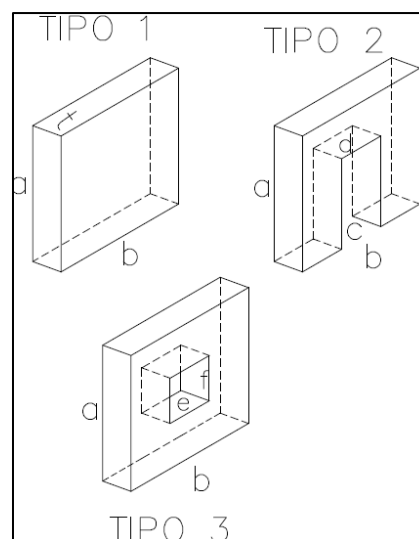


Fig. 9.- Dimensiones de referencia para la Tabla 2, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)



Dimensiones	Tipo 1 (m)	Tipo 2 (m)	Tipo 3 (m)
a	3,0	3,0	3,0
b	3,0 – 5,0	3,0 – 5,0	3,0 – 5,2
c		2,0 – 2,2	
d		0,8 – 1,2	
e			0,70 – 1,20
f			0,70 – 1,00
t	0,40 – 1,00	0,40 – 1,00	0,40 – 1,00

Tabla 2.- Variabilidad de las dimensiones de los muros en la zona rural de la ciudad de Cuenca, fuente (Malo Vega & Muñoz Larrea, 1980)

Vale recalcar que, como se observó, se tiene una alta variabilidad en las dimensiones de bloques de adobe lo que genera a su vez una variabilidad de la geometría de las paredes. Esto se debe a que este sistema de construcción carecía de estudios y normativas en la época, por lo que su principal prioridad era la funcionalidad de la edificación.

Generalmente, en la época de la colonia las casas de adobe eran de un piso, con paredes de 3 metros de alto y un espesor de 250 mm a 850 mm (Blondet, Brzev, Rubiños, & Villa, 2011). Con el paso del tiempo, las casas aumentaron en tamaño y en espesores; como, por ejemplo, en la ciudad de Cuenca se pueden encontrar casas de dos a tres pisos, en muchas de ellas utilizándose bahareque para aliviar el peso de pisos superiores.

Es común que, en algunas edificaciones por la baja resistencia a compresión y a flexión, se establezca con mortero de cemento (Minke G. , 2001). Algunos métodos de construcción constituyen en un sistema de refuerzo interno de dos tipos que pueden ser ranuras interiores o exteriores en las que se coloca varillas de caña (figura 10), reforzando así con contrafuerte integrados, intermedios y en las esquinas de las paredes, las cañas colocadas horizontales generalmente debilitan la resistencia del muro cuando se produce un sismo (Minke G. , 2001).

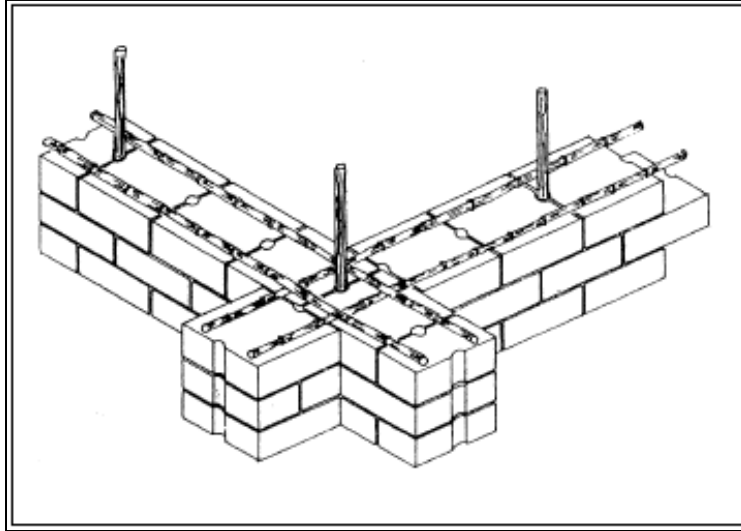


Fig. 10.- Reforzamiento de muros de adobe con caña, fuente (Minke G. , 2001)

2.5 Desempeño del adobe ante eventos sísmicos

Además de su bajo costo y su sencilla construcción, la construcción en adobe tiene otras ventajas, como excelentes propiedades térmicas y acústicas. Sin embargo, estas estructuras son vulnerables a los efectos de fenómenos naturales como terremotos, lluvias e inundaciones. Una construcción tradicional de adobe responde muy mal al terremoto. Las deficiencias sísmicas de los edificios de adobe son causadas por su gran peso, baja resistencia y fragilidad (Blondet, Brzev, Rubiños, & Villa, 2011).

Los factores más comunes que aumentan la vulnerabilidad sísmica de las construcciones de adobe son: irregularidades en planta y en altura, distribución inadecuada de los muros en planta, pérdida de verticalidad en los muros, problemas de humedad, filtraciones, conexión inadecuada entre muros, pérdida de recubrimiento de muros, uso de materiales no compatibles, entrepisos pesados y ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuados de elementos de entrepiso y cubiertas sobre muros, entrepisos muy flexibles, luces muy largas y estructura de cubierta deficiente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007). Además, muchas edificaciones de adobe aumentan la vulnerabilidad por adiciones (ampliaciones adosadas o en pisos superiores). Cabe agregar, intervenciones mal realizadas

desde el punto de vista estructural, en donde se retiran total o parcialmente algunas paredes portantes.

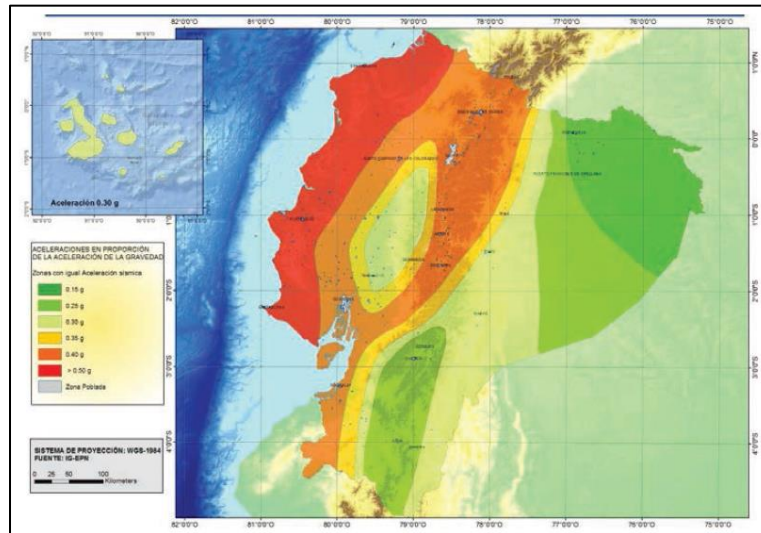


Fig. 11.- Zonas sísmicas para propósitos de diseño, fuente (NEC-SE-DE-Peligro-Sismico-parte-1, 2015)

En la Figura 11 se puede observar, que la provincia del Azuay se encuentra en una zona de alta vulnerabilidad sísmica, siendo el factor Z de diseño de 0,25g a 0,35g (NEC-SE-DE-Peligro-Sismico-parte-1, 2015).

En el terremoto ocurrido en Turquía en 2011, (Sayin, Yon, Calayir, & Karaton, 2012) observaron diferentes fallas que ocurrieron en las casas de adobe, tal como se muestra a continuación:

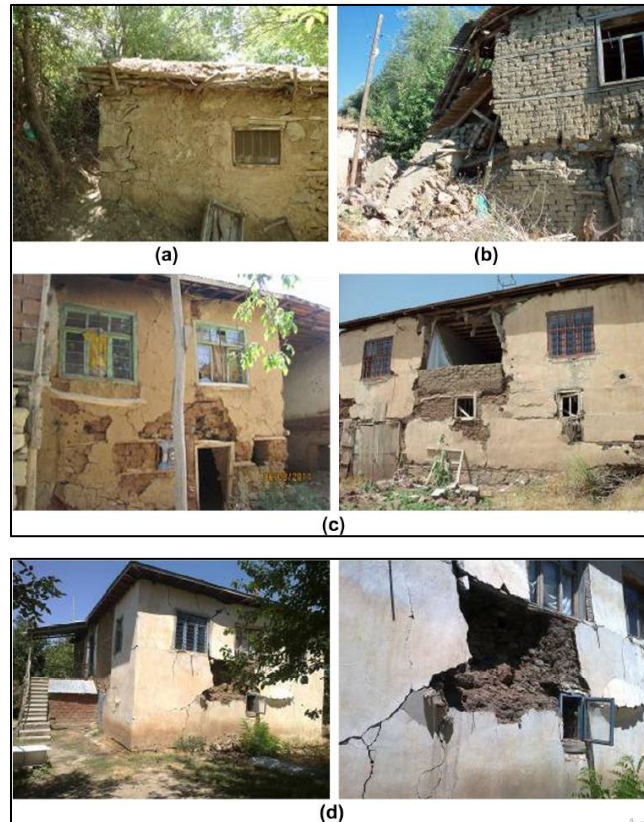


Fig. 12.- Daños en las estructuras de adobe, fuente (Sayin, Yon, Calayir, & Karaton, 2012)

En la Figura anterior se pueden observar los siguientes tipos de daños: (a) Daño en la estructura de adobe debido una inapropiada construcción de paredes y cubierta; (b) daños en la esquina de una vieja construcción de adobe; (c) mecanismo de falla en una construcción de adobe de dos plantas; y (d) material inapropiado sin vigas de amarre horizontales (Sayin, Yon, Calayir, & Karaton, 2012)

2.6 Ensayos para obtener las características mecánicas del adobe

No existe ninguna normativa que determine los procedimientos exactos para la ruptura de las muestras de tierra, y, por ende, para ninguno de sus ensayos mecánicos como lo son la compresión de unidades, la tracción indirecta o compresión diagonal, ni la flexión. Las normativas existentes alcanzan sólo a determinar los tamaños para las muestras, pero no las velocidades de la prensa, distancia entre apoyos, puntos de aplicación de carga, tiempos de carga, etc. Por



esta razón, se suelen tomar las normativas referentes al hormigón, con ajustes en la velocidad de la prensa para obtener resultados fiables, tomando en cuenta que las muestras de adobe son sumamente sensibles a cualquier variación brusca (Aguilar A., Cárdenas Á., Quezada Z., Cárdenas H., & Sarmiento A., 2018).

Sin embargo, la resistencia a la compresión se la puede determinar mediante ensayos indirectos, de los cuales, entre los ensayos no destructivos más utilizados se encuentran el ensayo de ultrasonido (ASTM E114) y el ensayo con esclerómetro (ASTM D5873). De estos dos, el último es el mayormente usado, debido a su bajo costo tanto del ensayo como del equipo, su versatilidad y menor tiempo de ejecución (Ávila Guamán, 2019).

2.6.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros más importantes para materiales de construcción constituidos de tierra, puesto que corresponde a la máxima carga que puede soportar el material sujeto a este tipo de esfuerzo. Este parámetro permite realizar un control de calidad del material, pero especialmente representa un medio para evaluar y comparar el desempeño del material (Kouakou & Morel, 2009).

La resistencia a compresión del adobe se obtiene mediante un ensayo de compresión de muretes de mampostería de adobe que son sometidos a cargas, como se muestra en la Fig. 13. Generalmente se hacen varios ensayos, y de los resultados obtenidos, se saca una media, la cual es utilizada como la compresión última del material.



Fig. 13.- Ensayo de compresión de un murete de mampostería de adobe de 17cm x 17cm x 10 cm, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)

2.6.2 Módulo de esfuerzo cortante del adobe

El módulo de corte mide la resistencia al movimiento de los planos dentro de unos sólidos paralelos unos con otros. Cuando a un cuerpo de un mismo material, se le aplica una fuerza paralela a una de sus caras mientras la otra se mantiene fija y no se produce un cambio en su volumen, en el cuerpo se produce una fuerza opuesta a la deformación, conociéndose a esta como módulo de corte o modulo cortante.



Fig. 14.- Izquierda: Prueba de corte por compresión a 45° del moldeado del adobe - Derecha: Modo de falla del ensayo, fuente (Daudon, Sieffert, Albarracín, Garino Libardi, & Navarta, 2014)



En la Fig. 14 se muestra ensayo simple de resistencia al cortante realizado por (Daudon, Sieffert, Albarracín, Garino Libardi, & Navarta, 2014), donde se determinó el esfuerzo cortante por medio de un ensayo a compresión realizado a un murete de adobe con una inclinación de 45° .

2.6.3 Peso unitario del adobe

Es el peso que ocupa un material en un volumen de un 1 m^3 . Al ser el adobe un resultado de la unión de diversos materiales, sin una granulometría específica o control de calidad estricto, existe una incertidumbre acerca de un valor específico a ser considerado, debido a que existen varias formas de fabricación; por lo que se han obtenido diversos valores experimentalmente, según el país de origen del adobe, como se podrá observar más adelante.

2.6.4 Módulo de elasticidad del adobe

Por su parte, el módulo de elasticidad también conocido como módulo Axial, caracteriza el comportamiento de un material elástico, el material puede cambiar la forma o el tamaño cuando se le aplican fuerzas externas por lo que los objetos son deformables hasta cierto punto. Debido a que no existen fórmulas para determinar el módulo de elasticidad del adobe, se opta por utilizar otros métodos. Una manera sencilla de estimarlo es a través de un enfoque empírico, el cual relaciona al módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión, tal como sucede con el hormigón.



2.7 Modelización del adobe – modelo Fuerza-Desplazamiento

La modelización de la MNR de adobe se la puede realizar a diferentes escalas, las cuales son detalladas más adelante; estas requieren diferentes parámetros para que el modelo sea eficaz, como es el caso de la modelización en elementos finitos (meso-escala), donde requiere encontrar una ecuación constitutiva del material, la cual es muy compleja, debido a que la mampostería se comporta como material ortótropo en estado elástico y anisótropo en estado inelástico, razón por la cual no existe hasta ahora una ecuación que se aproxime apropiadamente. Este trabajo se modeliza a macro-escala, mediante el método de pórtico equivalente, el cual requiere un modelo fuerza-desplazamiento que constituye una idealización en forma de curva, a partir de envolventes de cargas cíclicas. Además, se tomó como referencia el modelo propuesto en el trabajo “Evaluación sísmica de edificios de mampostería no reforzada típicos de Barcelona: modelización y revisión de la aplicación del Método del Espectro de Capacidad.” (Jiménez Pacheco, 2016), debido a que no se encontró un modelo de respuesta para paredes de adobe. Este modelo asumido fue usado en mampostería no reforzada de ladrillo al igual que las formulaciones que se verán más adelante.

2.7.1 Modelo Fuerza-Desplazamiento

Las curvas cíclicas base que se utilizaron para obtener el modelo, son obtenidas de estudio llamado: “Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls” (Anthoine & Magonette , 1995).

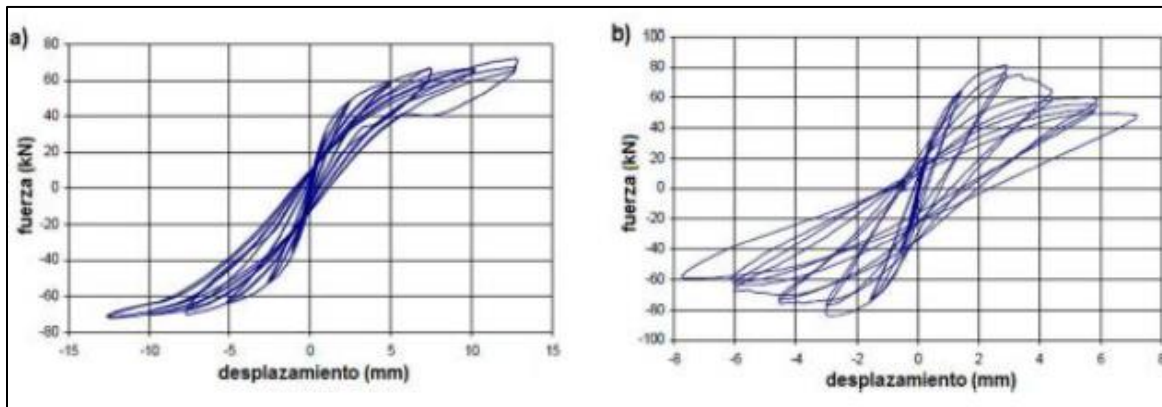


Fig. 15.- Respuestas ante una carga cíclica sobre pilares de mampostería de ladrillo obtenidas por: a) modo de falla por flexión; b) modo de falla por corte, fuente (Anthoine & Magonette , 1995)

Estas curvas histeréticas que ayudaron a definir los modelos fueron establecidas en el proyecto PERPETUATE (performance-based approach to earthquake protection of cultural heritage in european and mediterranean countries), a partir del cual, varios autores han definido modelos fuerza-desplazamiento de tipo multi-lineales tanto para corte como para flexión; el modelo propuesto por (Jiménez Pacheco, 2016) tiene una degradación más lineal frente a los modelos escalonados del proyecto PERPETUATE. En este, realizaron dicha degradación lineal puesto que el área bajo la figura es igual al área del modelo escalonado, con lo cual se consigue obtener una misma cantidad de energía disipada en ambos modelos, como se muestra en la figura 16 (Jiménez Pacheco, 2016).

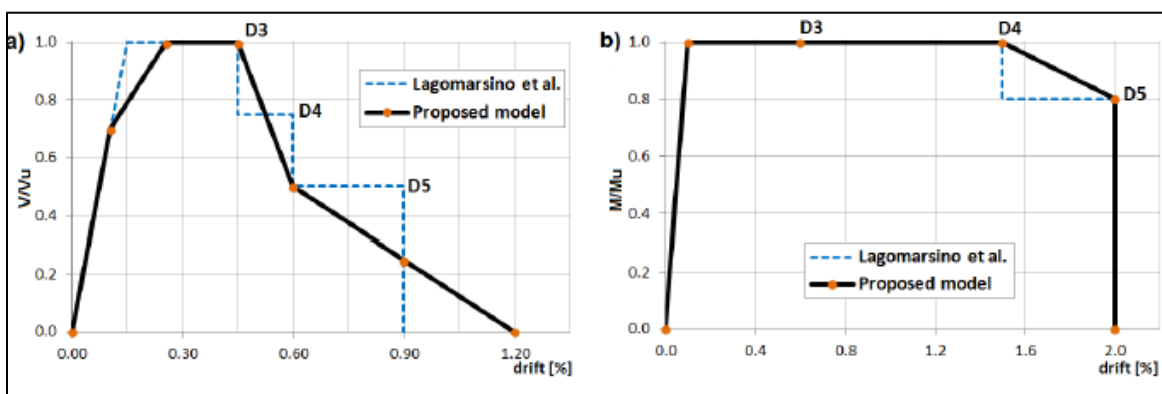


Fig. 16.- Comparación entre las curvas fuerza-desplazamiento propuestos para pilares y las curvas multi-lineales: a) corte; b) flexión, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)



3. MODELOS PARA EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA

Para evaluar el desempeño de una edificación de mampostería no reforzada, o en el presente proyecto, una edificación de mampostería de adobe, en los últimos años se ha llevado a cabo la utilización de procedimientos estáticos no lineales como es el método de coeficientes o método de espectro capacidad los mismos que se basan en la comparación de la capacidad de desplazamiento de la estructura y de la ubicación del terremoto predecible. Esta evaluación se lo realiza por medio de la obtención de la curva fuerza-desplazamiento (curva pushover). El método de espectro de capacidad requiere tres elementos principales que son: capacidad, demanda y desempeño; la curva se obtiene cuando se somete la edificación mediante un modelo adecuado a un patrón de carga lateral de magnitud creciente. (Cattari & Lagomarsino, 2008).

- **Capacidad**

La capacidad total de la edificación depende de los esfuerzos y deformaciones de cada componente de la estructura. Esta es representada por la curva pushover la misma que grafica la cortante basal que se somete a la estructura y el desplazamiento de la misma, esta curva se obtiene por medio de varios análisis secuenciales elásticos.

- **Demanda**

Es el movimiento que se provoca durante un evento sísmico, estas demandas son un estimado de la respuesta máxima esperada de una edificación durante el movimiento que provoca el sismo en el suelo.

- **Desempeño**

Una vez definido la capacidad y la demanda de la edificación se debe chequear el desempeño que verifica que los elementos estructurales y no estructurales de la



edificación no sean dañados más allá de lo que sea admisible o que se produzca un derrumbe total o parcial de la misma.

El punto de desempeño de la edificación es la deformación máxima probable que se da en un sismo de diseño.

El proyecto PERPETUATE establece, para los modelos de estructuras de mampostería, una clasificación en función de dos criterios: 1) la escala del análisis y 2) el tipo de descripción del continuo de mampostería (Chiara Calderini et al., 2008; Serena Cattari, Lagomarsino, Bazzurro, et al., 2015; Lagomarsino et al., 2013). El primer criterio nos indica si el modelo se establece a escala de material o a escala del elemento estructural, y el segundo, si el modelo es continuo o discreto. (Jiménez Pacheco, 2016), siendo el más utilizado el primero. (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018).

El modelo de elementos finitos es definido como meso-escala, ya que la mampostería se considera un material continuo y las leyes que se rigen se pueden obtener por medio de técnicas de homogenización. (Lourenzo, Milani, Trallini, & Zucchini, 2007). En cambio, el modelo de pórtico equivalente se define como macro-escala, debido a que es modelizado mediante elementos estructurales, los mismos que se definen de un punto de vista geométrico y cinemático, obteniéndose un número menor elementos de modelización que la micro-escala y meso-escala (Jiménez Pacheco, 2016), como se muestra en la figura siguiente:

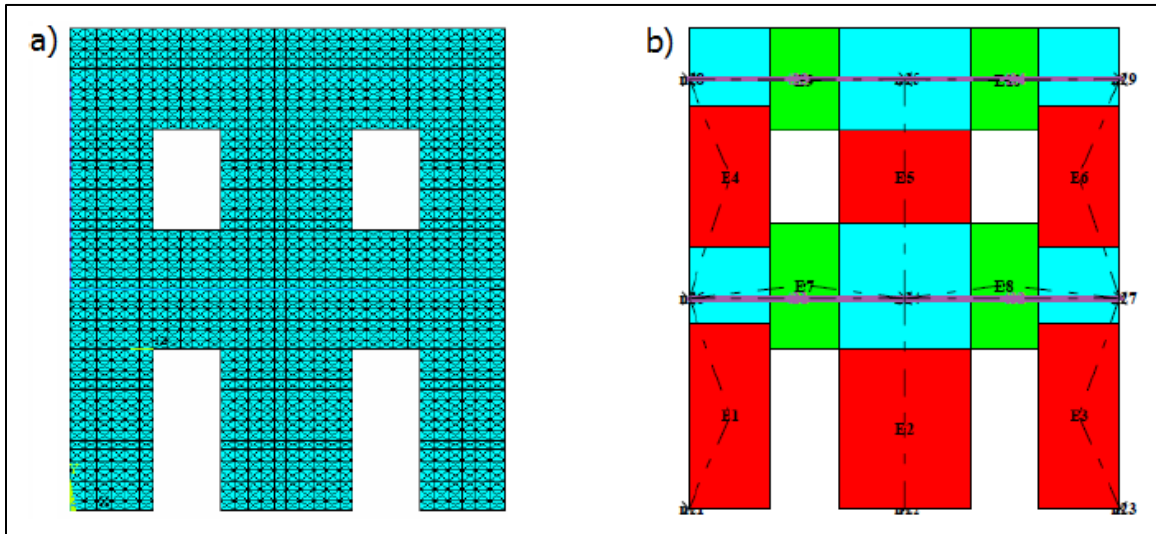


Fig. 17.- Pared modelizada a) meso-escala, mediante elementos finitos b) macro-escala, mediante macro elementos, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

El criterio de los elementos finitos consiste en discretizar a la estructura en elementos finitos, para adoptar una ley constitutiva no lineal adecuada y luego realizar un análisis incremental no lineal. Esta idealización da una descripción bastante detallada de la estructura y de los materiales que se componen sin embargo se requiere un alto esfuerzo computacional, lo que puede hacer a este método poco práctico; además, la identificación de los elementos sobre los que se monitorea los parámetros puede ser ambigua y esto puede implicar a repetidas operaciones promedio realizadas, por lo que el segundo enfoque es adoptado para estructuras de mampostería (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018).

La idealización de un pórtico equivalente o marco equivalente, en el que la pared se discretiza por paneles de mampostería, estos elementos deformables se unen a nodos o zonas rígidas que son partes de la estructura que por lo general no están sujetas a daño. Los paneles o elementos pueden ser pilares o vigas dintel los que se obtienen mediante criterios geométricos, cabe destacar que los pilares son las estructuras que resiste más la carga lateral del sismo mientras que las vigas son un sistema secundario (Jiménez Pacheco, 2016). El modelo está idealizado como un elemento viga-columna con deformación por corte y acoplado con pisos, además en paredes de la edificación se pueden presentar vigas dintel, de modo que se



puede representar la configuración de las paredes de los edificios de mampostería por lo que se conoce por el método de pórtico equivalente (Morandi, 2006).

La modelización mediante elementos finitos no es muy recomendada en mampostería no reforzada porque el comportamiento no lineal que presenta no es muy aproximado a la realidad (Morandi, 2006).

El método que se aplica en el presente trabajo es basado en el pórtico equivalente, esta modelización está gobernada por la respuesta en el plano de cada uno de los muros de la edificación, por lo que la falla se produce en las paredes alineadas en la dirección que se produce el sismo, razón por el cual los modos de falla fuera del plano no son considerados. La suposición que hace este método es que la distribución de fuerzas internas en el estado último o colapso de la estructura está gobernada por la resistencia de los miembros y el equilibrio (Morandi, 2006).

3.1 Modelo de Pórtico Equivalente

El modelo es aplicable solo cuando la geometría de la edificación y diferentes aberturas que contenga son regulares. (Jiménez Pacheco, 2016) El modelado se efectúa con la identificación de elementos basados en la geometría de la edificación, estos elementos macroscópicos tratan de idealizar las paredes con las aberturas que se tengan en la edificación como son ventanas y puertas en forma de pórticos equivalentes. Estos pórticos se conforman mediante un ensamble de elementos bidimensionales o unidimensionales que en ambos casos presentan vínculos rígidos en sus intersecciones (Jiménez Pacheco, 2016). En los pórticos que se obtiene se puede observar los dos principales componentes estructurales que son: pilares y vigas dintel, como se muestra en la figura 18.

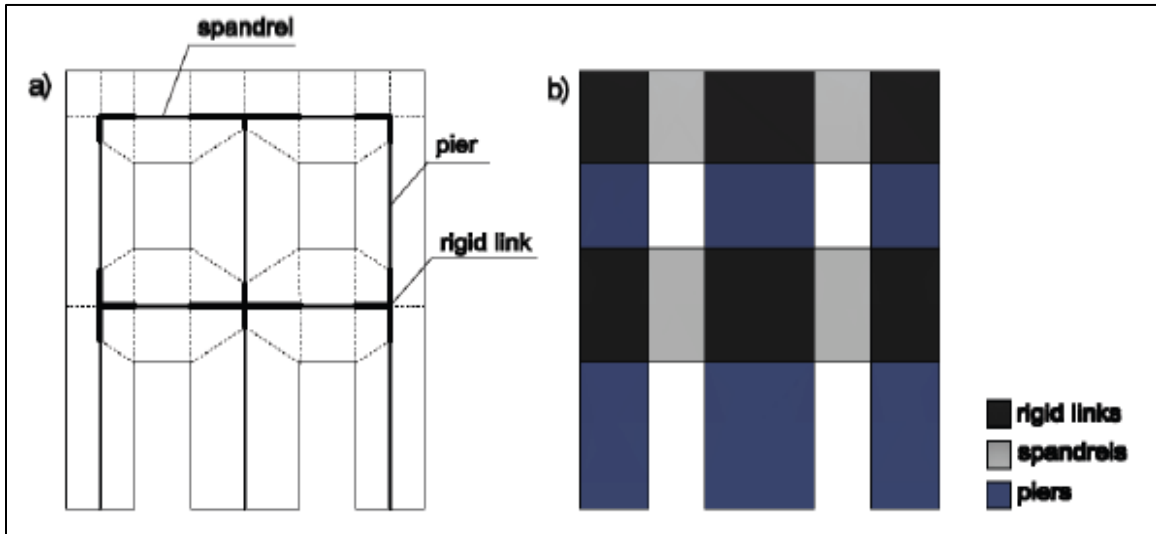


Fig. 18.- Modelos de pórtico equivalente: a) con macro-elementos 1D; b) con macro-elementos 2D, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

En el modelo de pórtico equivalente los daños que se producen son afectados en los elementos que se conforman (vigas dintel y pilares), estos daños son evidenciados por medio de las grietas y modos de falla que se pueden presentar. En las paredes que se encuentran con vigas de dintel estas afectan las condiciones de borde de los pilares que sostienen a las vigas influenciando en la capacidad lateral de la pared (Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S., 2013).

Los pilares que conforman las paredes del pórtico son modelados con una parte deformable y dos partes rígidas en los bordes, estos son modelados como un elemento viga desde los pisos superiores al inferior. La parte deformable es calculada mediante la siguiente ecuación, la cual nos indica la altura efectiva deformable del pilar y de las aberturas que pueda contener.

$$H_{eff} = h' + H_d \quad (3.1)$$

Donde:

- H_{eff} = Altura deformable.
- h' = Es un parámetro que se calcula utilizando los criterios de la figura 19.
- H_d = Es un valor extra que se suma a h' para obtener la altura deformable y se calcula mediante la expresión que sigue:

$$H_d = \frac{1}{3}D \frac{\bar{H}-h'}{h'} \quad (3.2)$$

Donde,

- D = Largo pilar de mampostería
- \bar{H} = Altura de entrepiso

La figura 19 nos muestra cómo obtener las alturas efectivas de los pilares en cada caso de abertura ya sea puerta o ventana.

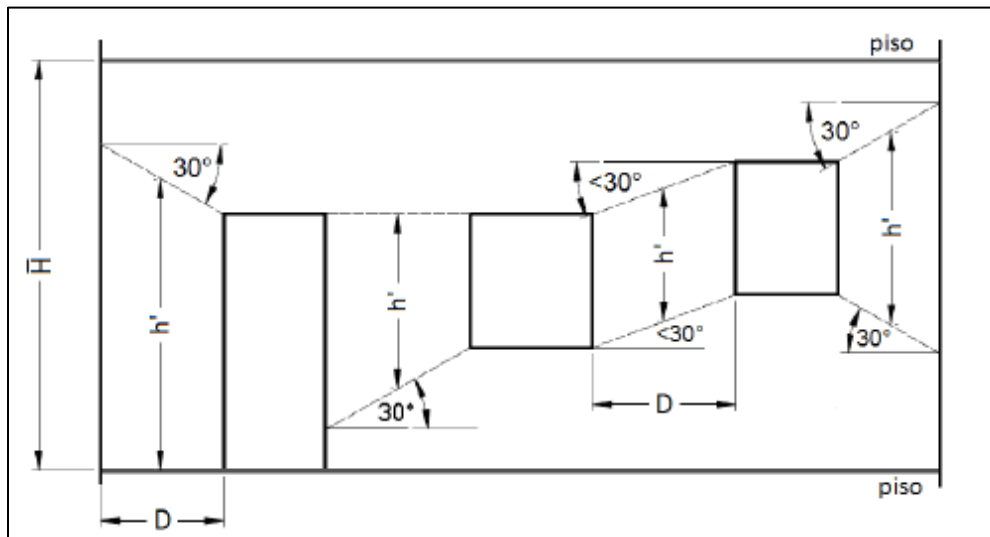


Fig. 19.- Criterio para establecer las alturas efectivas de los pilares, fuente (Dolce, 1991)

Para la modelación de las vigas-dintel, se usan elementos tipo viga ubicadas en el centroide del elemento estructural por cada piso; y, al igual que los pilares, están conformados por dos extremos rígidos y una parte deformable que tiene como longitud la abertura de la pared como se muestra en la figura 20.

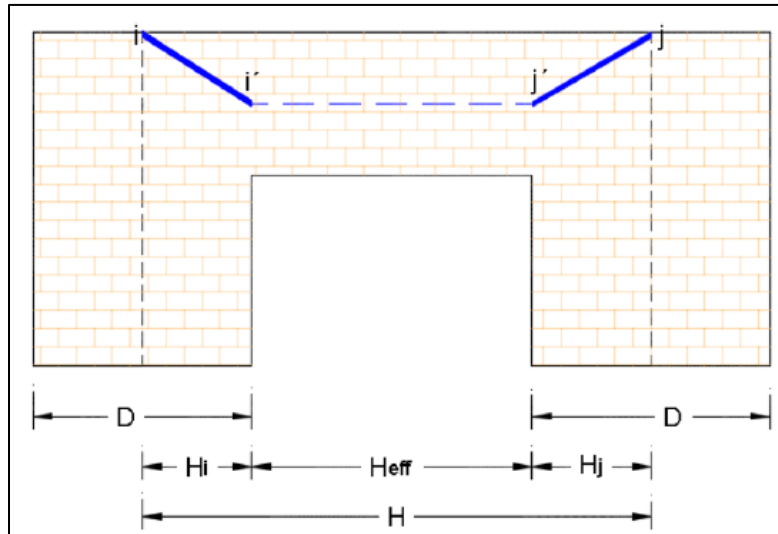


Fig. 20.- Elemento estructural horizontal (Viga dintel), fuente (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018)

El programa Ruaumoko, permite adoptar un modelo de pórtico equivalente con macro-elementos constituidos por resortes. (Carr, Theory. Ruaumoko manuals, Vol. 1, 2007). Este modelo tiene una mayor libertad que aquellos con macro elementos tipo viga por la libertad no lineal de los elementos resorte (Jiménez Pacheco, 2016). Además, se obtiene un amplio catálogo de histéresis, permitiendo una mejor descripción de la respuesta inelástica a sollicitaciones de corte. (Jiménez Pacheco, 2016).

El presente proyecto se llevó a cabo bajo la modelización de pórtico equivalente con macro-equivalentes no lineales tipo resorte desarrollado por (Amadio, Rinaldin, & Macorini, 2011) como se muestra en la Figura 21.

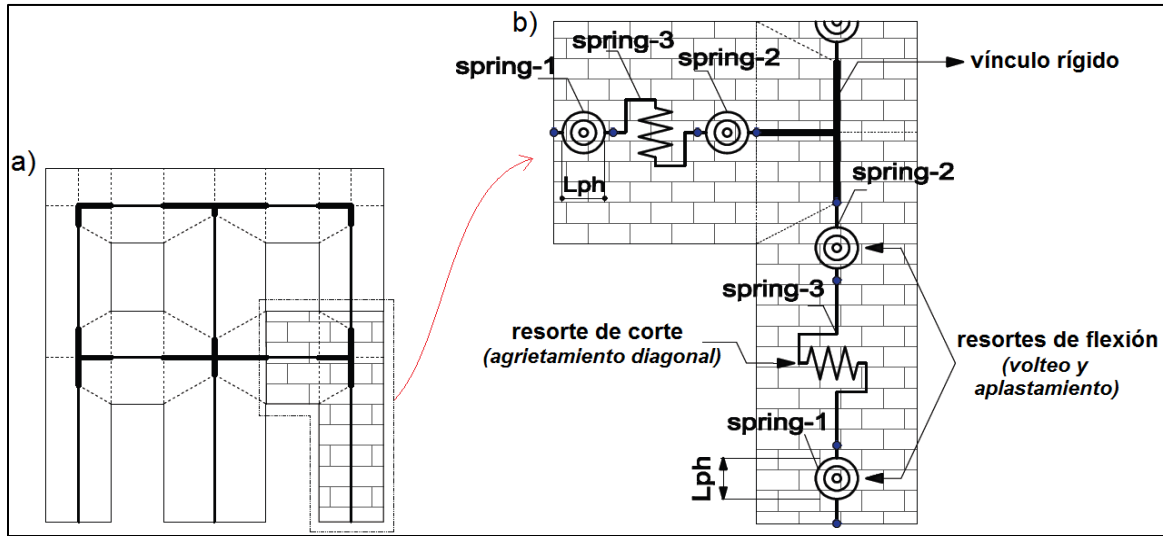


Fig. 21.- Modelo propuesto para paredes de MNR: a) Modelo global propuesto b) Modelo de pórtico equivalente con macro-elementos no lineales tipo resorte, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

Cada elemento del pórtico (pilar y viga dintel) están formados por tres resortes dos de ellos a flexión y uno a corte. La longitud del resorte a corte no es relevante (Jiménez Pacheco, 2016), sin embargo la longitud del resorte de flexión se asumió las que sugieren Pualay y Priestley que es igual a un 10% de cada una de sus longitudes efectivas (Paulay & Priestley, 1992).

Los elementos multi-resorte son similares a los que presenta el programa Ruaumoko (Jiménez Pacheco, 2016), el modelo presentado en el programa se define un sistema de coordenadas con tres grados de libertad u_1 , u_2 y φ , para el monitoreo de desplazamientos axial, transversal y de rotación en el plano, respectivamente (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018) como se presenta en la figura 22.

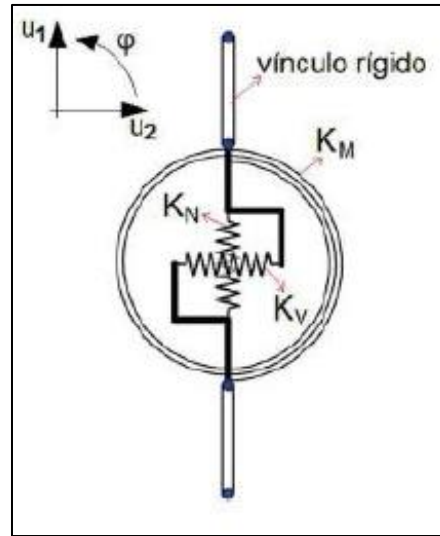


Fig. 22.- Elemento multi-resorte y coordenadas locales, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

Cada resorte de elemento tiene tres componentes de fuerza $F_{e,i} = (N_e, V_e, M_e)$ que se encuentran desacopladas, esto es, una matriz de rigidez elástica local es diagonal de dimensión tres ($i = 1, 2$ y 3 , corresponden a los resortes de la Figura 22).

$$F_{e,i} = K_i u_i \quad (3.3)$$

$$K_i = \begin{pmatrix} K_{N,i} & 0 & 0 \\ 0 & K_{V,i} & 0 \\ 0 & 0 & K_{M,i} \end{pmatrix}$$

donde, la rigidez axial $k_{N,i}$ de corte $k_{V,i}$, y flexión $k_{M,i}$, vienen dadas por las ecuaciones que se presentan a continuación.

3.1.1 Rigidez Axial ($k_{N,i}$)

La rigidez axial es:

$$k_{N,i} = 3 \frac{EA}{H_{eff}} \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

Donde, E el módulo de elasticidad de la mampostería, A el área de la sección transversal del elemento de mampostería (pilar o viga dintel) y H_{eff} la longitud deformable del elemento dada en la ecuación.



3.1.2 Rigidez de corte (transversal)

La rigidez de corte es:

$$a) k_{v,i} = k_{\infty} \text{ para } i = 1,2 \quad b) k_{v,3} = \frac{1}{\frac{H_{eff}^3}{12EI} + \frac{XH_{eff}}{GA}} \quad c) k_{v,3} = \frac{1}{\frac{H_{eff}^3}{3EI} + \frac{XH_{eff}}{GA}} \quad (3.5)$$

Donde, $X=1.2$ el factor de forma, I el momento de inercia de la sección transversal del elemento de mampostería (pilar o viga dintel) y G el módulo de corte de la mampostería. La expresión del literal a) indica una rigidez de corte lo suficientemente alta como para inhibir la deformación de corte en los resortes 1 y 2 (Figura 21). Las expresiones de los literales b) y c) corresponden a la rigidez de corte para una condición de borde totalmente restringido y en cantiléver (voladizo), respectivamente.

3.1.3 Rigidez a flexión

La rigidez a flexión es:

$$a) k_{M,i} = \frac{8EI}{H_{eff}} \text{ para } i = 1,2 \quad y \quad b) k_{M,3} = K_{\infty} \quad (3.6)$$

La expresión del literal b) indica una rigidez muy alta como para impedir la rotación a flexión del resorte 3 como se ve en la figura 21.

3.2 Rigidez

La rigidez es la resistencia a deformaciones elásticas que presenta un material cuando se le aplica una carga; y, para el caso del adobe, en la curva fuerza-desplazamiento se da hasta que el mortero alcanza su máxima tensión o compresión; ya que a partir de aquí, se produce un desplazamiento entre los bloques de la pared y la curva tiende a comportarse de una forma no lineal (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010).

Así, para el adobe se pueden obtener una rigidez inicial y una secante; la inicial a partir de la pendiente de la curva que se genera en el inicio antes del primer

agrietamiento; pero, debido a la heterogeneidad presente en el adobe, se observa un comportamiento no lineal en la misma, haciendo más difícil notar cuando se genera este agrietamiento en la pared. Por su parte, la rigidez secante para comportamientos no lineales es más fácil de hallarse, ya que se obtiene por la pendiente de los dos extremos de la carga máxima y el desplazamiento correspondiente, como se puede observar en la siguiente figura.

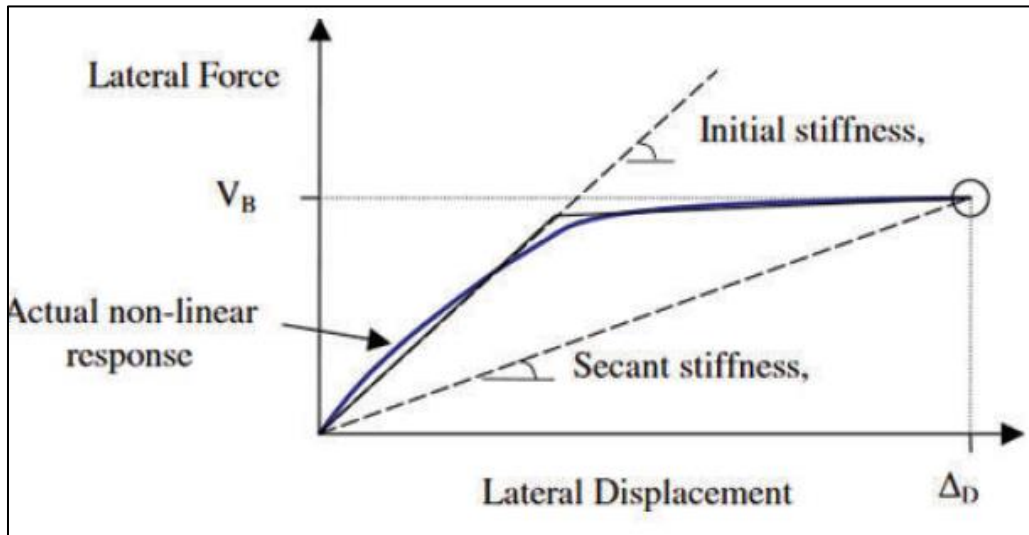


Fig. 23.- Rigidez inicial y secante, fuente (Sullivan, Calvi, & Priestley, 2004)

$$K_i = \frac{V_B}{\Delta_D} \quad (2.1)$$

Donde:

K_i = Rigidez del material

V_B = Fuerza aplicada

Δ_D = Deformación

En el artículo: "Initial stiffness versus secant stiffness in displacement based design". (Sullivan, Calvi, & Priestley, 2004), se presenta la comparación de procedimientos basados en rigidez inicial y secante para el diseño de elementos en hormigón; los cuales, en algunas investigaciones realizadas en paredes de adobe, son adoptados para el cálculo y están representados gráficamente en la figura anterior.



En el presente trabajo, nos interesa definir la rigidez inicial que, como se mencionó anteriormente, está asociada al primer agrietamiento. Para estudios en MNR, se ha visto que el valor aproximado en el que se presenta el primer agrietamiento se presenta en un rango de 0,6 a 0,8 del cortante máximo ((Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018); (Tomažević, 1999)). El valor que se usó aquí es de 0,6 de la resistencia última, debido al propio comportamiento observado del material.

4. MODOS DE FALLA EN PILARES

Para el presente proyecto se tomó en consideración 4 modos de falla principales en pilares (figura 24):

- Falla por flexión (volteo o aplastamiento)
- Falla por corte diagonal directo
- Falla por corte diagonal escalonado
- Falla mixta (corte con deslizamiento)

Las formulaciones para todas estas fallas se detallarán más adelante.

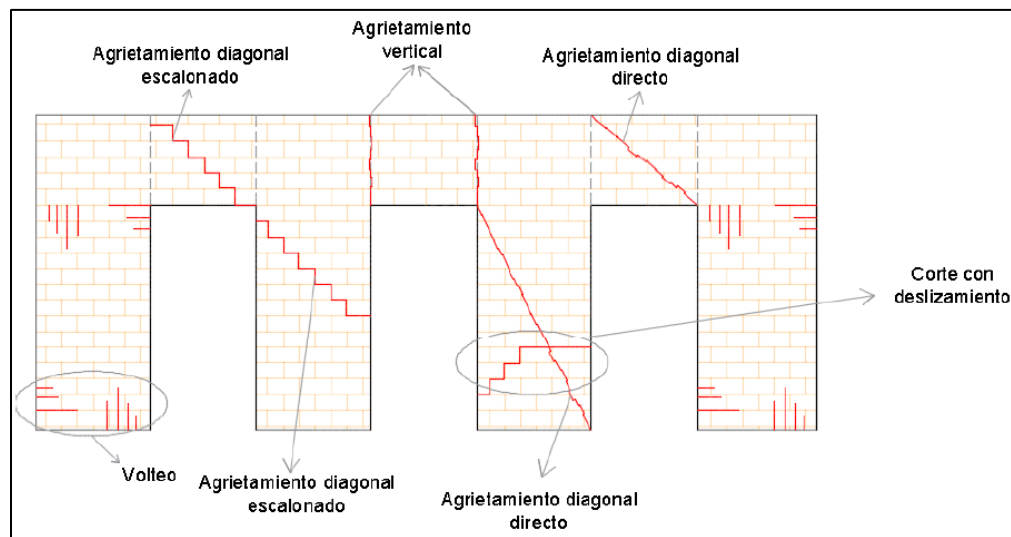


Fig. 24.- Modos de falla en pilares y vigas dintel, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

4.1 Condiciones de borde

Los muros de mampostería se pueden clasificar en tres categorías diferentes, en función de la rigidez y la resistencia de los elementos de acoplamiento (Tomažević, 1999):

- Paredes llenas en cantiléver
- Paredes con aberturas y acoplamiento pilar débil – viga-dintel fuerte
- Paredes con aberturas y acoplamiento pilar fuerte – viga-dintel débil



Cada una de las paredes ha sido modelada con un vínculo rígido (empotramiento) al piso y en la parte superior con una carga correspondiente al del ensayo considerado. Si lo que se modela es una pared llena, el modelo resultante es únicamente un pilar; mientras que si la pared considerada contiene aberturas (puertas, ventanas), el modelo resultante contiene pilares y vigas-dintel.

Dependiendo de la geometría y calidad de la mampostería de adobe, los pilares fallaran por corte debido a la compresión diagonal hasta que se produzca aplastamiento de la mampostería en las zonas más comprimidas. La falla por cortante, en cualquiera de sus formas, es el mecanismo de falla más común en los pilares, lo cual no es conveniente en cuanto a ductilidad y disipación de energía (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018).

En el caso de las formulaciones para los diversos modos de falla, las propuestas por (Magenes & Calvi, 1997), (Turnšek & Čačovič, 1971) y (Reyes, y otros, 2018) toman en cuenta las condiciones de borde para calcular la resistencia de los pilares. Los primeros lo hacen a través del parámetro de relación de corte denotado por α_v , estableciendo una altura efectiva H_o que es la altura al punto de momento nulo o punto de inflexión en a deformada del pilar, además, se aplica un factor que varía entre 0,5 a 1 dependiendo de las condiciones de borde. Para (Turnšek & Čačovič, 1971), las condiciones de borde vienen representadas en el parámetro H , que es la altura en la zona deformable; y finalmente para (Reyes, y otros, 2018), vienen representadas en el parámetro ALR que es la relación de carga axial definida por el esfuerzo axial en la pared a media altura dividida para la resistencia a compresión media de los ensayos realizados.

Actualmente, no existe ninguna formulación probada y aplicada para mampostería de adobe, sino que solo se cuenta con las formulaciones propuestas por los autores antes mencionados que han sido probadas en MNR en ladrillo dando buenos resultados. La condición de borde para pilares que se aplicara en el presente trabajo es la de semi-restringida a rotación, basándonos en el estudio “Evaluación sísmica de edificios de mampostería no reforzada típicos de Barcelona: modelización y revisión de la aplicación del Método del Espectro de Capacidad” (Jiménez Pacheco,



2016), la cual, proporciona la mejor aproximación en función de los resultados obtenidos.

4.2 Falla por flexión

Los modos de falla asociados a flexión son: volteo (Rocking) y aplastamiento (Toe-Crushing); donde, la ocurrencia de uno u otro depende solamente de la carga axial en el pilar (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018).

El volteo, ocurre cuando la pared se comienza a comportar como un cuerpo rígido en uno de sus extremos (Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S., 2013), y por consecuencia, se generan grietas horizontales en las esquinas traccionadas (Jiménez Pacheco, 2016). El aplastamiento, por su parte, tiene un patrón de daño generalizado con grietas sub-verticales orientadas hacia las esquinas comprimidas (Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S., 2013); (Tomažević, 1999); (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018).

4.3 Falla por corte

Si se piensa en términos generales, las fallas que pueden ocurrir por corte son: el agrietamiento diagonal y el corte con deslizamiento, y de estos, ambos pueden ocurrir a la vez, solo que siempre prevalecerá uno sobre otro dependiendo del nivel de tensión del pilar. Sin embargo, solo en algunas de las investigaciones se cuentan a ambos modos de falla en simultaneo y más bien solo se los plantea como una alternativa (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018). En el presente proyecto, se considerarán ambos modos de falla para ser evaluados.

4.3.1 Falla por corte: Agrietamiento Diagonal

Comúnmente ocurre en paredes de mampostería que son sometidas a cargas verticales y laterales, o que tienen una baja relación de aspecto (alto/ancho) con cargas axiales elevadas (Jiménez Pacheco, 2016). En la pared, se manifiesta desarrollando grietas en el centro que se van propagando hacia las esquinas.

Este modo de falla por corte puede ser enfocado de dos maneras simplificadas como se puede observar en la figura 25: agrietamiento diagonal directo (straight cracking) y agrietamiento diagonal escalonado (stepped cracking) (Mann & Müller, 1982). Estos autores consideran a la mampostería como un material compuesto, cuyas grietas se desarrollan a lo largo de las juntas, tanto verticales como horizontales; mientras que otros, como (Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S., 2013), consideran a la mampostería como material isótropo equivalente, con el desarrollo de grietas a lo largo de las principales direcciones de tensión. Para (Turnšek & Čačovič, 1971) las deformaciones debido al cortante se ubican entre la parte superior e inferior del plano de la pared. Sin embargo, el desplazamiento total es debido a los esfuerzos de flexión, momento y cortante tomados como un todo; por lo que, para calcular el cortante únicamente, se debe calcular el desplazamiento debido a la flexión y estimar el desplazamiento debido a la rotación para proceder a restarlos de ese todo. Debido a que el cortante es concebido de esta manera indirecta, la estimación exacta de este valor puede no ser muy alto.

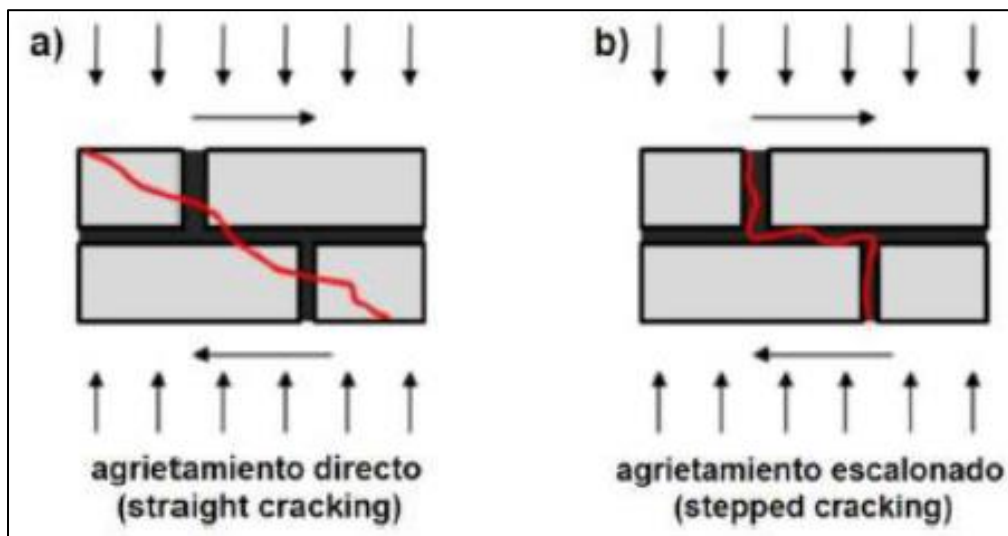


Fig. 25.- Modos de agrietamiento diagonal, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

4.3.2 Agrietamiento diagonal directo

Es formulado bajo la hipótesis de que la unidad de ladrillo es mucho más rígida que las juntas de mortero (Barrera Zúñiga & Peñaloza Morán, 2018). Este criterio de resistencia fue considerado primero por (Mann & Müller, 1982) y posteriormente



analizado por (Magenes & Calvi, 1997), quienes incluyeron un factor de corrección $(1 + \alpha v)$ como se verá más adelante.

Para el caso de (Turnšek & Čačovič, 1971), no se hace distinción entre un agrietamiento diagonal directo y un escalonado, sino más bien es tratado como un todo como se indicara posteriormente en su fórmula. Finalmente, para el caso de (Reyes, y otros, 2018), únicamente se consideraron los parámetros que más influyen en el esfuerzo cortante del adobe, como lo son: la relación de aspecto (α), el esfuerzo compresivo que resisten los bloques y la relación de carga axial (ALR); e igual que el caso de la anterior formulación no se distinguen tipos de agrietamientos diagonales.

4.3.3 Agrietamiento diagonal escalonado

Ocurre por la presencia de juntas de mortero verticales u horizontales débiles. De las formulaciones recopiladas, únicamente el caso de (Magenes & Calvi, 1997) toma en cuenta este tipo de agrietamiento, pero para ello se apoya también en la teoría de Mohr-Coulomb.

4.3.4 Agrietamiento diagonal mixto (Corte con deslizamiento)

Hasta la actualidad no se ha reportado ningún ensayo experimental en el que ocurra un modo de falla puro o con deslizamiento en las juntas horizontales únicamente, debido a que se requeriría de condiciones poco probables en la práctica, como lo son paredes con muy baja relación de aspecto y sometidas a cargas axiales bajas; sin embargo, si se ha documentado que este ocurre como un modo de falla mixto, como se muestra en la figura 26 (Jiménez Pacheco, 2016).

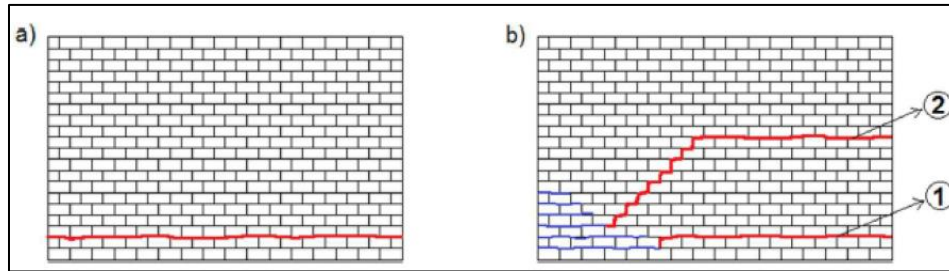


Fig. 26.- a) Modo de falla puro (deslizamiento en las juntas horizontales); b) Modo de falla mixto (corte con deslizamiento), fuente (Jiménez Pacheco, 2016).

4.4 Formulaciones a usar para los diversos modos de falla

Para el presente proyecto se usaran las formulaciones halladas en (Magenes & Calvi, 1997); (Turnšek & Čačovič, 1971) y en (Reyes, y otros, 2018) tanto para flexión como para los diversos modos de corte. Obviamente, cada una de las formulaciones propuestas tiene diversos parámetros que son considerados y se irán describiendo a la par. Cabe recalcar, que se conservaran las nomenclaturas originales de las mismas.

4.4.1 Falla por flexión o volteo:

$$M_{up} = \frac{D^2 * t * p}{2} \left(1 - \frac{p}{k * f_u} \right) \quad (\text{Magenes \& Calvi, 1997}) \quad (4.1)$$

Donde:

- M_{up} = Capacidad de resistencia a flexión
- D = Longitud del pilar
- t = Espesor del pilar
- p = P/A = Esfuerzo normal sobre el pilar
- f_u = Resistencia compresiva de la mampostería
- k = Coeficiente de transformación en distribución rectangular de tensiones = 0,85 (valor de referencia)

Como se puede observar en la anterior ecuación, los factores que intervienen son tanto las características físicas como mecánicas de la mampostería de adobe.



$$M_y = \frac{N*B}{2} \left(1 - \frac{N}{N_u} \right) \text{ (Turnšek \& \u010c\u00e1\u010dovi\u010d, 1971)} \quad (4.2)$$

Donde:

- M_y = Capacidad a flexi\u00f3n en el pilar
- N = Fuerza axial en compresi\u00f3n en la secci\u00f3n
- B = Longitud de la pared
- N_u = Esfuerzo axial en compresi\u00f3n de la pared, que se determina mediante la siguiente ecuaci\u00f3n:

- $N_u = 0,85 * t * B * f_m$

Donde:

- t = Espesor de la pared
- f_m = Esfuerzo medio de compresi\u00f3n

Al igual que en la ecuaci\u00f3n de (Magenes & Calvi, 1997), esta ecuaci\u00f3n toma en cuenta ambas caracter\u00edsticas.

Un punto importante a destacar es que, en ambas ecuaciones, se debe guardar consistencia en las unidades, es decir se debe trabajar en el mismo sistema de medidas para obtener valores correctos. En nuestro caso, se usar\u00e1n los valores de acuerdo a lo requerido por las gr\u00e1ficas a comparar, aunque generalmente se trabajara en el sistema internacional.

4.4.2 Falla por corte – agrietamiento diagonal:

$$V_d = \frac{f_{tu} * D * t}{b} * \sqrt{1 + \frac{p}{f_{tu}}} \text{ (Magenes \& Calvi, 1997)} \quad (4.5)$$

Donde:

- V_d = Resistencia a corte
- D = Longitud del pilar
- t = Espesor del pilar
- $p = P/A$ = Tensi\u00f3n normal sobre el pilar
- f_{tu} = Resistencia a la tracci\u00f3n de la mamposter\u00eda



- b = Parámetro que depende de la relación de aspecto H/D . (Benedetti & Tomažević , 1984) proponen los siguientes valores:
 - $b = 1$ si $H/D \leq 1$;
 - $b = H/D$ si $1 < H/D < 1.5$
 - $b = 1.5$ si $H/D \geq 1.5$

La ecuación anterior propuesta, enfoca a la falla a corte de un modo general. Más adelante se podrá observar que (Magenes & Calvi, 1997) disciernen el modo de falla a corte en dos modos más que son directo y escalonado.

$$V_d = t * B * \frac{1,5 * \tau_0}{b} * \sqrt{1 + \frac{N}{1,5 * \tau_0 * t * B}} \quad (\text{Turnšek \& \v{C}a\v{c}ovi\v{c}, 1971)} \quad (4.6)$$

Donde:

- V_d = Resistencia a corte
- t = Espesor del pilar
- B = Longitud de la sección
- τ_0 = Esfuerzo medio de corte
- N = Fuerza axial en compresión de la sección
- b = Parámetro que depende de la relación de aspecto H/B , tomando los siguientes valores
 - $b = 1$ si $H/D \leq 1$;
 - $b = H/D$ si $1 < H/D < 1.5$; y,
 - $b = 1.5$ si $H/D \geq 1.5$

Como se puede observar, esta ecuación es muy similar a la propuesta anteriormente por (Magenes & Calvi, 1997) e intervienen prácticamente los mismos factores en ambas.

$$V_n = A_w * \sqrt{f_m} * (0,65 * ALR - 0,012) * \alpha^{-0,25} \quad (\text{Reyes, y otros, 2018}) \quad (4.7)$$

Donde:

- A_w = Área transversal de la sección
- f_m = Esfuerzo de compresión



- ALR = (Axial Load Ratio) es el esfuerzo axial de la pared a media altura dividido para el esfuerzo de compresión obtenido de los ensayos
- α = Relación de aspecto del pilar H/B

Como se puede observar, en el caso de esta ecuación se requieren menos parámetros que en sus homologas anteriores; sin embargo, se requieren unidades específicas para cada parámetro, como se muestra a continuación: V_n en N, A_w en mm^2 , ALR en % y f_m en MPa.

4.4.3 Falla por corte - agrietamiento diagonal directo:

$$V_d = \frac{f_{bt} * D * t}{2.3 (1 + \alpha_v)} * \sqrt{1 + \frac{p}{f_{bt}}} \quad (\text{Magenes \& Calvi, 1997}) \quad (4.8)$$

Dónde:

- V_{db} = Resistencia a corte directo
- D = Longitud del pilar
- t = Espesor del pilar
- $p = P/A$ = Tensión normal sobre el pilar
- f_{bt} = Resistencia a la tracción de la unidad
- $\alpha_v = \frac{H_0}{D} = \frac{\psi' * H_d}{D}$
 - Dónde:
 - H_0 = Altura del punto de momento nulo
 - H_d = Altura deformable del pilar
 - D = Longitud del pilar
 - Ψ' = Factor que considera las condiciones de borde del pilar: 0,5 con la rotación restringida en ambos lados, 1 en cantiléver y 0,75 para semirrígido)

En esta ecuación, influyen más parámetros y se hacen consideraciones adicionales como se puede observar. De igual manera que en las anteriores ecuaciones, se debe guardar una consistencia en las unidades.



4.4.4 Falla por corte - agrietamiento diagonal escalonado:

$$V_d = D * t * \left(\frac{c + \mu p}{1 + \alpha_v} \right) \quad (\text{Magenes \& Calvi, 1997}) \quad (4.9)$$

Donde:

- D = Longitud del pilar
- t = Espesor del pilar
- $\alpha_v = \frac{H_0}{D} = \frac{\psi' * H_d}{D}$
 - Dónde:
 - H_0 = Altura del punto de momento nulo
 - H_d = Altura deformable del pilar
 - D = Longitud del pilar
 - Ψ' = Factor que considera las condiciones de borde del pilar: 0,5 con la rotación restringida en ambos lados, 1 en cantiléver y 0,75 para semirrígido)
- c = Cohesión de la junta de mortero
- μ = Coeficiente de fricción de la junta de mortero

(Mann & Müller, 1982) toman en cuenta el desempeño de las juntas verticales del mortero en la resistencia de los pilares, corrigiendo la cohesión y el coeficiente de fricción de la siguiente manera: $\hat{c} = kc$ y $\bar{\mu} = k\mu$ donde:

$$k = \frac{1}{1 + \mu \left(\frac{2\Delta_y}{\Delta_x} \right)} \quad (4.10)$$

Dónde:

- Δ_x = Longitud de la unidad de ladrillo
- Δ_y = Altura de la unidad de ladrillo

**4.4.5 Falla por corte - agrietamiento diagonal mixto (corte con deslizamiento):**

$$V_d = D * t * \frac{1.5*c + \mu*p}{1 + \left(3 * \frac{c * \alpha_v}{p}\right)} \quad (\text{Magenes \& Calvi, 1997}) \quad (4.11)$$

Donde:

- D = Longitud del pilar
- t = Espesor del pilar
- c = Cohesión de la junta de mortero
- μ = Coeficiente de fricción de la junta de mortero
- p = P/A = Tensión normal sobre el pilar
- $\alpha_v = \frac{H_0}{D} = \frac{\psi * H_d}{D}$
 - Dónde:
 - H_0 = Altura del punto de momento nulo
 - H_d = Altura deformable del pilar
 - D = Longitud del pilar
 - Ψ' = Factor que considera las condiciones de borde del pilar: 0,5 con la rotación restringida en ambos lados, 1 en cantiléver y 0,75 para semirrígido)

$$V_d = \frac{1}{2} * N * \frac{3 * \tau_0 * t * B + 0,8 * N}{3 * \alpha * \tau_0 * t * H + N} \quad (\text{Turnšek \& Čačovič, 1971}) \quad (4.12)$$

Donde:

- t = Espesor del pilar
- B = Longitud de la sección
- τ_0 = Esfuerzo medio de corte
- N = Fuerza axial en compresión de la sección
- H = Longitud de la zona deformable
- $\alpha = \frac{M_{MAX}}{M_{MAX} + M_{MIN}}$
 - Donde:



- M_{MAX} y M_{MIN} = Son los momentos de flexión en los dos extremos de la zona deformable en el modelo equivalente

Este modo de falla, toma en cuenta el efecto del corte y deslizamiento combinados debido a que ocurre con muchísima más frecuencia que solo el fallo por deslizamiento del muro.



5. SELECCIÓN DE ARTÍCULOS SOBRE ENSAYOS DE PAREDES

Por todo el mundo se han realizado una variedad de ensayos para la caracterización del adobe como material de construcción, sin embargo las pruebas realizadas son muy limitadas en comparación con otros materiales, como son, la mampostería de ladrillo o el hormigón armado cabe destacar que muchas de las pruebas realizadas a los materiales solo se refieren a características elásticas (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010).

El país con más estudios realizados se encuentra en Europa es Portugal, específicamente en la ciudad de Aveiro, en la Universidad que lleva su nombre; en Sudamérica son: Perú, en la Pontificia Universidad Católica del Perú; y en Colombia, en la Universidad de los Andes. Además, se puede observar, que en estos tres países se parece mucho la forma de construcción en adobe, ya que se utiliza casi la misma composición para su elaboración. Por su parte en Ecuador, en la ciudad de Cuenca, existen algunos estudios realizados por la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca, donde se obtienen las características mecánicas del adobe, pero no hay estudios que ensayen paredes completas ya sea en tamaño real o en escala.

En el presente trabajo, se ha seleccionado la mayoría de artículos de los tres países anteriores, considerando para ello, que estos posean la mayor cantidad de información de sus ensayos, como son: las características mecánicas y geométricas de las paredes de adobe; además, se debe tomar en cuenta que el comportamiento del material depende en gran medida del tipo de suelo que se utilice en la fabricación de unidades y el mortero; por lo que, propiedades como el módulo de elasticidad pueden tener una significativa variación de un suelo con respecto a otro (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010). Vale aclarar también, que algunos de los artículos seleccionados no contenían todas las características necesarias para ser evaluados con las formulaciones propuestas, por lo que estos valores se



obtuvieron a partir de otra documentación, buscando que esta haya sido realizada ya sea por el mismo autor o por autores que sean de la misma región.

Se eligieron artículos que contengan ensayos en paredes llenas y con aberturas de ventana o puerta, los cuales son descritos a continuación.

5.1 Artículo 1: Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada

Es un estudio realizado por la Universidad los Andes en Colombia, el cual busca alternativas de rehabilitación para edificaciones de adobe con materiales como la madera y malla de acero. Para ello, caracterizaron el material a utilizar con ensayos de compresión, flexión y compresión diagonal, para posteriormente realizar ensayos en paredes llenas y estudiar el comportamiento del muro al ser sometidas a cargas cíclicas horizontales, obteniendo para ello curvas histeréticas como resultado. En total, se ensayaron tres paredes sin reforzamiento de las mismas características geométricas cada una. La configuración de los ensayos para todos los muros consistió en la colocación de una celda de carga en la parte superior, además de un deformímetro para el control de los desplazamientos horizontales; y, para las cargas verticales aplicadas, se seleccionaron de acuerdo a las cargas usuales encontradas en las ciudades de Colombia, consistentes en casas de dos pisos, con cargas verticales aproximadas de 20, 50 y 70 kN, como se muestra a continuación:

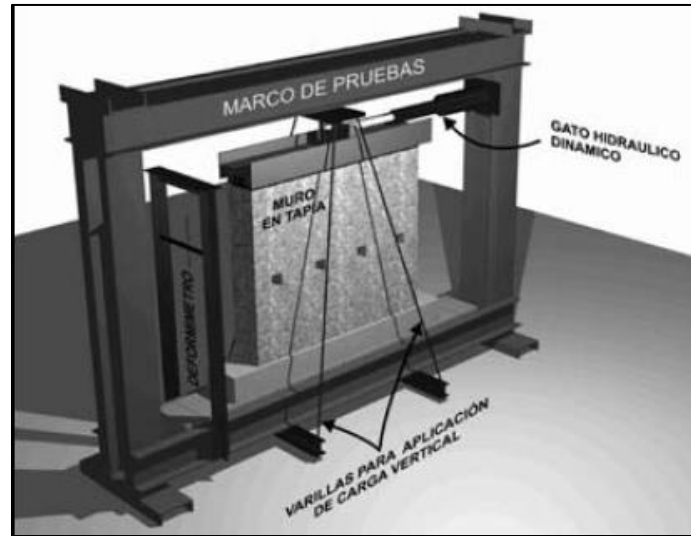


Fig. 27.- Esquema de montaje para ensayos de muros carga con carga paralela al plano, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)

A continuación, se muestra las características geométricas de las paredes y unidades ensayadas:

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Dimensiones del bloque	400	200	100
Dimensiones de la pared	2500	400	2000

Tabla 3.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)

En este artículo no se encontraron las características referentes a la juntas de mortero, por lo cual se buscó alternativas cumpliendo lo especificado anteriormente, encontrándose 2 artículos llamados: “Numerical modeling of in plane behavior of adobe walls” (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010), cuyo esquema esta mostrado en la figura 27; y, Determinación experimental de las propiedades y ángulo de fricción de la mampostería de adobe, piedra y ladrillo en edificaciones históricas peruanas (González Bernardo, 2016); a partir de los cuales, dichos parámetros fueron promediados para obtener la cohesión y el coeficiente de fricción a ser usados como datos complementarios, tal como se indica en la tabla 4.

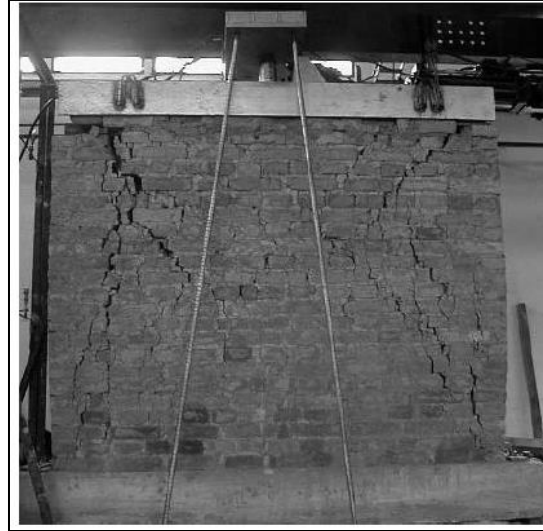


Fig. 28.- Fisuraciones en ensayos por la carga paralela, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)

Características	(Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)	(González Bernardo, 2016)		Resultados
		1	2	
Cohesión (Mpa)	0.02	0.037	0.044	0,0303
Angulo de fricción (grados)	30	34.2	28.5	30,675

Tabla 4.- Valores adicionados considerados para establecer los valores de cohesión y Angulo de fricción, fuente especificada

Finalmente, en la tabla 5, están las características mecánicas del adobe utilizado:

MAMPOSTERIA	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad (E)	MPa	98.1
Módulo de corte (G)	MPa	27.4
Resistencia compresiva (f_u)	MPa	1.1
Resistencia de corte (f_y)	MPa	0.03
Peso Específico (γ)	kN/m ³	17.84
UNIDADES DE ADOBE		
Resistencia a tensión (f_b)	MPa	0.028
JUNTAS DE MORTERO		
Cohesión (C)	MPa	0.034
Coefficiente de fricción (u)	-	0.5135

Tabla 5.- Valores necesarios para la modelización, fuentes ((Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (González Bernardo, 2016))



5.2 Artículo 2: 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.

Este proyecto, realizado en la ciudad de Aveiro (Portugal), tiene especial importancia debido a que en la actualidad, dicha ciudad consta de alrededor del 30% de construcciones de adobe que tienen un valor histórico y arquitectónico (tal como pasa en la ciudad de Cuenca), por ende, resulta importante desarrollar soluciones y técnicas de rehabilitación para prolongar la vida útil de estas estructuras. (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011).

Su objetivo principal es crear una base de resultados experimentales que apoyen a las intervenciones, de rehabilitación y reforzamiento, del patrimonio de la ciudad, para lo cual, se realizó la caracterización del suelo que comúnmente se utiliza en la elaboración de adobe para las edificaciones además, se realizaron ensayos a bloques extraídos de edificaciones hechas en este material, con el fin de obtener sus características mecánicas. Estos bloques también sirvieron para construir muretes de adobe, unidos con un mortero de 1 cm de espesor hecho de suelo recogido del mismo sector aledaño a la edificación. Estos muretes fueron usados en ensayos de laboratorio para obtener algunas características como la compresión simple y la compresión perpendicular.

Para la prueba, se construyó una pared llena en forma de I, como se muestra en la figura 29 y 30, la cual fue sometida a una carga horizontal de diferentes ciclos de 30kN, 50kN y 60kN; y para las cargas verticales fueron consideradas el peso propio de la estructura y una carga de cubierta en la parte superior. Las características geométricas de la pared y los bloques son:

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Dimensiones del bloque	450	290	120
Dimensiones de la pared	3500	290	3070

Tabla 6.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)



Fig. 29.- Modelo de la pared de adobe a ser ensayada, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)

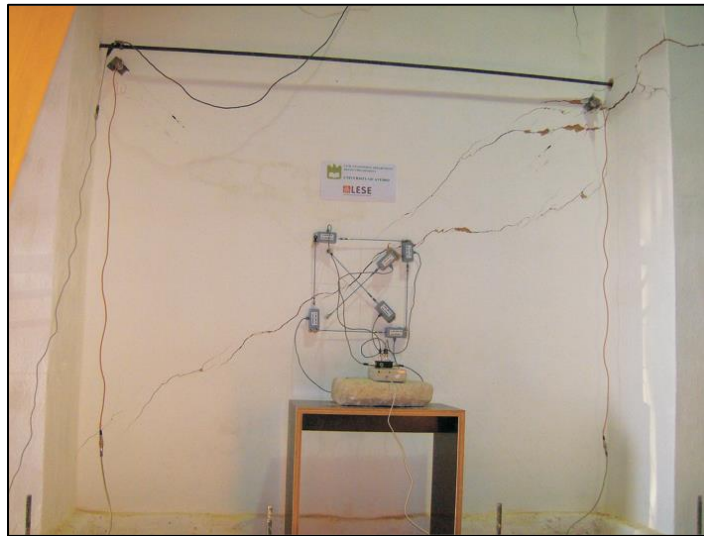


Fig. 30.- Resultados de la pared ensayada, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)

Los resultados que se obtuvieron en la prueba cíclica permitieron caracterizar la capacidad resistente a corte de la pared, máxima capacidad de deformación lateral y el modo de rotura (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011), como se muestra a continuación en la siguiente tabla. Sin embargo, el valor de la cohesión y el coeficiente de fricción se completaron por medio de un segundo artículo llamado: “Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction” (Varum, Costa , Fonseca, & Furtado, 2015) en el cual se busca alternativas de rehabilitación en edificaciones de adobe con ensayos previos de caracterizaciones



del material. Se optó por este artículo debido a que uno de los autores trabajó en los dos documentos.:

MAMPOSTERIA	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad (E)	MPa	147.3
Módulo de corte (G)	MPa	15
Resistencia compresiva (f_u)	MPa	0.77-1.72
Resistencia de corte (f_y)	MPa	0.055-0.19
Peso Específico (γ)	kN/m ³	16
UNIDADES DE ADOBE		
Resistencia a tensión (f_b)	MPa	0.54
JUNTAS DE MORTERO		
Cohesión (C)	MPa	0.025
Coefficiente de fricción (μ)	-	0.56 – 0.88

Tabla 7.- Valores necesarios para la modelización, fuentes ((Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Varum, Costa , Fonseca, & Furtado, 2015))

5.3 Artículo 3: Experimental study of the Seismic Performance of Different Earth Walls and Their Seismic Retrofitting with Externally Bonded Fibers.

El estudio fue realizado en la provincia Yunnan ubicada en al sur de China, donde se pueden encontrar varias casas de tierra pisada y de adobe, las mismas que están en alto peligro sísmico ya que están en el cinturón sísmico del Himalaya. En el estudio se recogieron muestras de 4 partes de la misma provincia realizando estudios de cada una de ellas y para después elaborar muros de tierra pisada y adobe reforzados con fibras de lona.

El muro de adobe construido que se examinara en este trabajo, tiene las características que se muestran en la siguiente tabla:

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Dimensiones del bloque	300	150	100
Dimensiones de la pared	2100	600	2400

Tabla 8.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)

Para realizar los ensayos de carga lateral, se construyó vigas de hormigón tanto para la parte inferior de la pared como para la parte superior; con las dimensiones

mostradas en la tabla 9 además se colocó, con una prensa hidráulica, una presión uniforme sobre la pared tratando así de simular el techo y un posible segundo piso de una casa típica de adobe, cuyo valor considerado fue de 0.06 Mpa.

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Viga de hormigón arriba	2400	600	200
Viga de hormigón abajo	2400	600	300

Tabla 9.- Propiedades geométricas de las vigas de hormigón utilizadas para el ensayo, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)

También se colocó una prensa hidráulica que simule una carga lateral en la pared con una frecuencia de 50 Hz cada 2 mm de deformación generando así un ensayo cíclico. Los desplazamientos de cada pared se controlaron por medio de sensores.



Fig. 31.- Configuración del ensayo, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)

Las propiedades del material ensayado se obtuvieron de diversas fuentes. Algunas propiedades fueron obtenidas directamente por los autores del documento, sin embargo otras características fueron asumidas a partir de otros documentos del mismo país, como lo son: “ (Liu, Wang, & Wang, Seismic retrofitting of rural rammed earth buildings using externally bonded fibers, 2015)” y “ (Liu, Wang, & Wang., Experimental and numerical study of enhancing the seismic behavior of rammed earth buildings, 2014)”, obteniéndose finalmente las siguientes propiedades :



MAMPOSTERIA	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad (E)	MPa	57
Módulo de corte (G)	MPa	25
Resistencia compresiva (f_u)	MPa	1.357
Resistencia de corte (f_v)	MPa	0.094
Peso Específico (γ)	kN/m ³	16.83
UNIDADES DE ADOBE		
Resistencia a tensión (f_b)	MPa	0.09
JUNTAS DE MORTERO		
Cohesión (C)	MPa	0.397
Coefficiente de fricción (u)	-	0.75

Tabla 10.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Liu, Wang, & Wang,2014); (Liu, Wang, & Wang,2015; (Wang, Wang, & Liu, 2019))

5.4 Artículo 4: Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe Wall

Este trabajo fue realizado en la ciudad de Aveiro en Portugal, tomando como ejemplos a las estructuras típicas de adobe que allí se encuentran. Este trabajo tiene una parte complementaria llamada: "Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: part II - numerical modeling and fragility assessment" realizada por (Sarchi, Varum, Monteiro, & Silveira, 2018) y ésta, a diferencia de la primera, aplica modelos numéricos para la obtención de resultados. El estudio se realiza porque debido a que la ciudad de Aveiro tiene un nivel moderado de sismicidad y una gran cantidad de estructuras de adobe en un estado muy pobre, que no han sido ni rehabilitadas o reforzadas para un evento sísmico, debido a que no existen normativas nacionales o europeas que den recomendaciones para ello, lo que podría ocasionar una gran cantidad de pérdidas humanas de suscitarse algún evento así. Además, la mayoría del terreno en la ciudad es suave para la cimentación, por lo que aumenta los requerimientos sísmicos en las estructuras.

Las propiedades geométricas, tanto para los muros de adobe como para los bloques se muestran a continuación:

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Dimensiones del bloque	440	240	120
Dimensiones de la pared	3500	290	3070

Tabla 11.- Propiedades geométricas del muro y de los bloques, fuente (Silveira D. , y otros, *Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall*, 2018)

La pared fue ensayada aproximadamente 50 días después de que fue elaborada. Fue aplicada una fuerza horizontal cíclica de amplitud creciente a una altura de 2,60 m desde la base del muro, hasta la falla. Esta fuerza fue aplicada con una prensa hidráulica (a través de una viga transversal de acero) con una capacidad máxima de 100 kN. En la parte superior, a través de un sismógrafo, se midieron los valores de interés; además se colocó una carga vertical que simula el peso muerto y el casi permanente peso vivo típico de una construcción de adobe equivalente a 20 kN. Todos estos aspectos descritos se muestran a continuación:

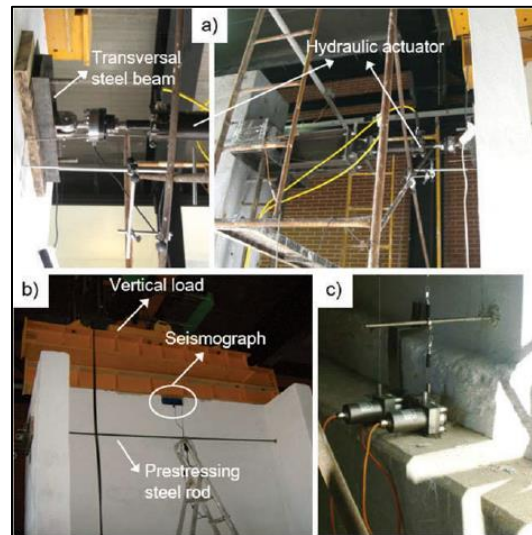


Fig. 32.- Configuración del ensayo e instrumentos usados: a) Sistema de aplicación de fuerza; b) Carga vertical adicional, sismógrafo, acero longitudinal y c) Transductor de desplazamiento, fuente (Silveira D. , y otros, *Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall*, 2018)

En cuando a las propiedades mecánicas del material, estas fueron obtenidas del propio documento y de su complementario anteriormente citado; además también fueron obtenidas a partir del trabajo llamado: “Mechanical Properties and Behavior of Traditional Adobe Wall Panels of the Aveiro District” de (Silveira D. , Varum, Costa, & Carvalho, 2015). Los resultados finales que se obtuvieron fueron:

MAMPOSTERIA	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad (E)	MPa	1150
Módulo de corte (G)	MPa	413
Resistencia compresiva (f_u)	MPa	0.46
Resistencia de corte (f_v)	MPa	0.057
Peso Específico (γ)	kN/m ³	15
UNIDADES DE ADOBE		
Resistencia a tensión (f_b)	MPa	0.14
JUNTAS DE MORTERO		
Cohesión (C)	MPa	0.025
Coeficiente de fricción (u)	-	0.56 – 0.88

Tabla 12.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Silveira D. , Varum, Costa, & Carvalho, 2015); (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018); (Sarchi, Varum, Monteiro, & Silveira, 2018)

5.5 Artículo 5: Numerical Modeling Of In-Plane Behavior Of Adobe Walls.

El artículo trabaja en la obtención de curvas pushover a partir de ensayos realizados en la Universidad Católica del Perú, recopilados en el trabajo denominado “Using industrial materials for the construction of safe adobe houses in seismic areas” (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-Garcia, & Ginocchio, 2005), donde se lleva a cabo una prueba cíclica a una pared de adobe típica del Perú, como se muestra en la figura 33, la cual tiene una abertura en el centro simulando una ventana; además, se la construyó en forma de I, para garantizar la obtención de resultados o modos de falla en el plano, evitando el colapso de otra manera diferente. Simula ser la pared interior de una casa, y fue construida sobre una viga reforzada de cimentación de hormigón y en la parte superior se colocó una viga de corona para simular una carga de gravedad de cubierta. (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010).

Las características geométricas de la pared y de los bloques utilizados en el ensayo son los siguientes:

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Dimensiones del bloque	300	130	100
Dimensiones de la pared (hueca)	2460	300	1930
Dimensiones de la ventana	400	300	500

Tabla 13.- Propiedades geométricas del muro, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)

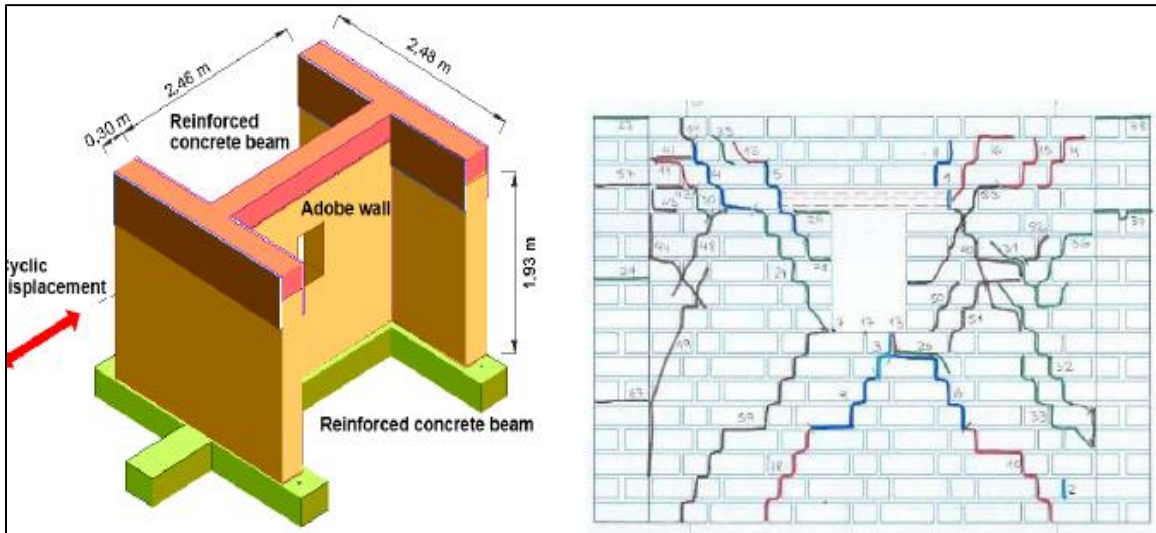


Fig. 33.- Modelo original a ser ensayado, fuente (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-García, & Ginocchio, 2005)

Luego de realizados los ensayos, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

MAMPOSTERIA	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad (E)	MPa	200
Módulo de corte (G)	MPa	70
Resistencia compresiva (f_u)	MPa	0.3
Resistencia de corte (f_y)	MPa	0.175
Peso Específico (γ)	kN/m ³	21.17
UNIDADES DE ADOBE		
Resistencia a tensión (f_b)	MPa	0.04
JUNTAS DE MORTERO		
Cohesión (C)	MPa	0.02
Coeficiente de fricción (u)	-	0.5

Tabla 14.- Valores necesarios para la modelización, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-García, & Ginocchio, 2005))

En el artículo desarrollado por (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010), se modela por medio de elementos finitos con una completa base de datos de adobes típicamente utilizados en Perú, como se puede observar en la figura 34, configurando los modelos de manera lo más aproximada posible a un ensayo real.

Para los ladrillos de adobe, vigas de hormigón y el dintel, se utilizaron elementos hexaedro de 8 nodos con una consideración de materiales elásticos e isótropos.

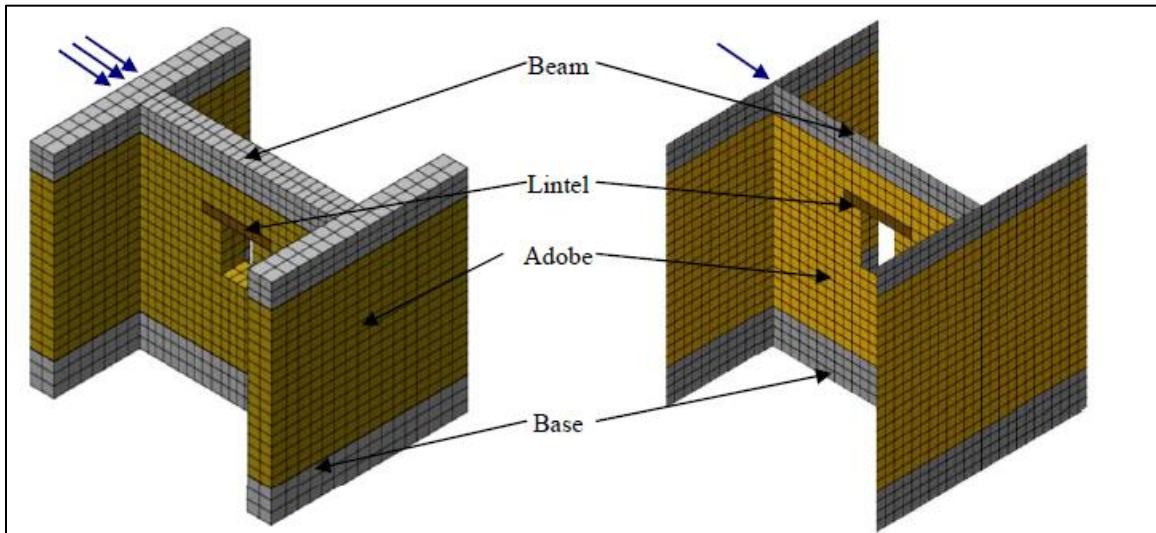


Fig. 34.- Modelo en elementos finitos, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)

5.6 Artículo 6: Shear behavior of adobe and rammed earth walls of heritage structures

En esta investigación realizada en Colombia, se aborda la capacidad de corte en el plano de paredes de adobe (llena y con abertura), aproximándolas a las formas halladas en las construcciones patrimoniales del siglo XIX de la zona las paredes ensayadas fueron sometidas a cargas verticales y horizontales, para evaluar el efecto que tiene las aberturas en la pared, con el propósito de obtener los mecanismos de falla, capacidad de corte y proponer una expresión simplificada para estimar esta última considerando la carga axial aplicada y su relación de aspecto (Reyes, y otros, 2018).

Previamente se realizó un estudio arquitectónico, en el cual se definen las dimensiones típicas de las paredes presentes en el patrimonio de Colombia. Como se especificó anteriormente, se tienen dos tipos de paredes: llena y con abertura (con puerta y/o ventana), con las siguientes dimensiones respectivas:

PROPIEDADES GEOMETRICAS	largo (mm)	ancho (mm)	alto (mm)
Dimensiones de la pared solida	2500	400	1800
Pared con puerta y ventana	7000	600	3450
ventana	1250	600	1500
puerta	1250	600	2500

Tabla 15.- Propiedades geométricas del muro, fuente (Reyes, y otros, 2018)

En los ensayos para la pared llena, fueron aplicadas cargas verticales en cada muestra por medio de un gato hidráulico en la parte superior con la ayuda de una viga de acero, la cual representaría la conexión entre la pared y el techo (figura 35). Se dio una carga horizontal a la pared de una manera cíclica, controlando el desplazamiento sobre toda la pared en todo momento.



Fig. 35.- Fotografía de la pared llena a ser ensayada, fuente (Reyes, y otros, 2018)

Las paredes con aberturas a igual que las anteriores se sometieron a cargas verticales y horizontales, además se incluyeron contrafuertes para simular paredes adyacentes (Reyes, y otros, 2018).

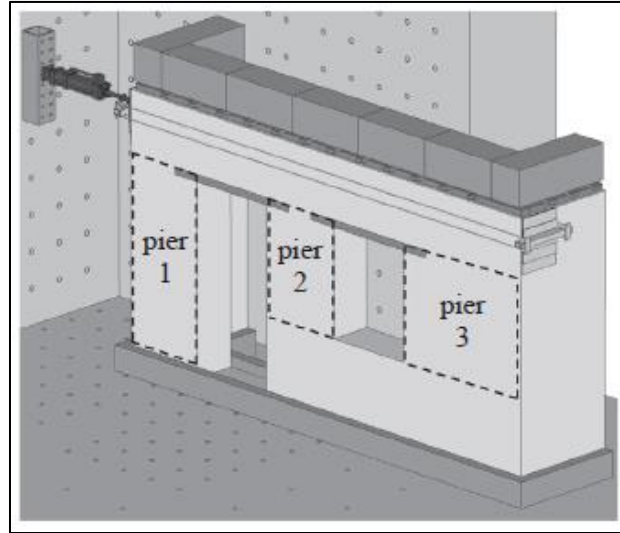


Fig. 36.- Esquema de la pared con aberturas, fuente (Reyes, y otros, 2018)

El material a analizar se obtuvo de construcciones patrimoniales del centro de Bogotá, y se realizó una caracterización física y mecánica del mismo, tanto en los ladrillos de adobe como en el mortero de pegar; algunas pruebas realizadas fueron: resistencia a la compresión, cizallamiento entre bloques, además de carga axial y diagonal en muretes, con lo cual se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 16. Para la obtención de la cohesión y del coeficiente de fricción se utilizó el documento: “Numerical modelling of in plane behaviour of adobe walls” (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010) el cual participa uno de los autores del artículo.

MAMPOSTERIA	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad (E)	MPa	98.1
Módulo de corte (G)	MPa	27.4
Resistencia compresiva (f_u)	MPa	1.1
Resistencia de corte (f_y)	MPa	0.03
Peso Específico (γ)	kN/m ³	17.84
UNIDADES DE ADOBE		
Resistencia a tensión (f_b)	MPa	0.028
JUNTAS DE MORTERO		
Cohesión (C)	MPa	0.034
Coeficiente de fricción (u)	-	0.5135

Tabla 16.- Valores requeridos para la modelización, fuente (Reyes, y otros, 2018); (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)



6. IMPLEMENTACIÓN EN RUAUMOKO

Este trabajo se realizó con la ayuda del software Ruaumoko-2D, el cual nos permite realizar un análisis basado en pórtico equivalente por medio de macro-elementos divididos en dos resortes a flexión y uno a corte, además de contar con una gran variedad de histéresis que ayudan a una descripción de la respuesta inelástica de las paredes de mampostería (Jiménez Pacheco, 2016).

El programa está enfocado en un análisis sísmico de estructuras de hormigón armado y acero con la ayuda de elementos tipo pórtico y tipo resorte; sin embargo, este software ha sido ya investigado en mampostería no reforzada gracias a los elementos que posee, pudiendo orientarse así a cualquier tipo de material (Jiménez Pacheco, 2016).

Para poder efectuar los análisis de cada una de las paredes, primero se debe realizar un fichero de datos con el fin de que el programa los pueda leer, debido a que no posee una interfaz gráfica en el que se pueda dibujar o introducir las coordenadas de los elementos; por lo cual, el programa posee un manual de ayuda, el mismo que resulta muy útil al momento de la elaboración del fichero (Carr, User Manual for the 2-Dimensional version-Ruaumoko. Ruaumoko manuals, 2007).

Para la elaboración del fichero de datos se debe seguir un orden previamente establecido, como se muestra en la siguiente Tabla:

Sección	Información Requerida
1	Parámetros de control
2	Nodos
3	Elementos
4	Propiedades
5	Masas
6	Cargas
7	Patrón de Carga lateral
8	Sismo

Tabla 17.- Información requerida para la elaboración del fichero de datos, fuente (Carr, User Manual for the 2-Dimensional version-Ruaumoko. Ruaumoko manuals, 2007)



6.1 Parámetros de Control

En esta sección se debe indicar que tipo de análisis se desea hacer para nuestro proyecto el cual, para nuestro caso es un análisis pushover. Aquí se debe indicar también, la cantidad de nodos, elementos y resortes que se van a analizar; se configura el tiempo deseado que se busca que dure el análisis; es decir, el tiempo que va a ser aplicado la carga horizontal. Se puede también hacer un control de desplazamiento, es decir, indicar hasta que desplazamiento se requiere; y, por último, se puede calibrar los parámetros de la salida de la gráfica. Cabe señalar, que esta sección viene dada por defecto.

6.2 Nodos

Para la caracterización de cada una de las paredes, Ruaumoko solicita un fichero de datos de nodos, donde debe constar la numeración de cada uno de ellos junto con sus coordenadas previamente obtenidas por medio de criterios de pórtico equivalente citados en la sección 3.1 con la ayuda del programa AutoCAD; aquí, se dibujó las geometrías de cada pared con sus respectivos elementos tipo resorte y se obtuvieron cada una de las coordenadas de los nodos como se muestra en la Tabla 18, junto a la cual se debe declarar las condiciones de cada nodo al que se encuentra como se indica a continuación:

NODOS #	Coordenadas		Desplazamientos		Rotaciones R	Acoplamientos			Control de salida
	X	Y	DX	DY		KUP1	KUP2	KUP3	
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.22	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 18.- Configuración de los nodos.

6.3 Elementos

Con las coordenadas y la numeración ya establecidas de cada uno de los nodos, se debe establecer los elementos multi-resorte; es decir, cada resorte que compone

cada pilar y viga dintel tanto a corte como a flexión, se rige por medio de un orden con la numeración; primeramente, los pilares y luego las vigas dintel; la información requerida por el programa se muestra en la Tabla19.

ELEMENTOS #	NUMERO DE PROPIEDAD	Nodos Externos		Nodos Internos	
		I	J	K	L
1	2	2	3	2	3
2	1	4	5	4	5
3	2	6	7	6	7

Tabla 19.- Configuración de los elementos

El número de propiedad está conformado por varias líneas de información que son requeridas, y cada una de ellas deben ser llenadas en la siguiente sección.

Los elementos se deben definir por medio de una matriz de conectividad formada por cuatro columnas I, J, K y L que contiene un resorte (Figura 37). El programa nos ayuda a facilitar el trabajo en la generación de los elementos, al poder igualar los nodos externos con los internos ($I = K$; $J = L$). Con esta simplificación de la parte rígida de cada resorte; queda establecida la única restricción de nodos para aquellos que están unidos al suelo.

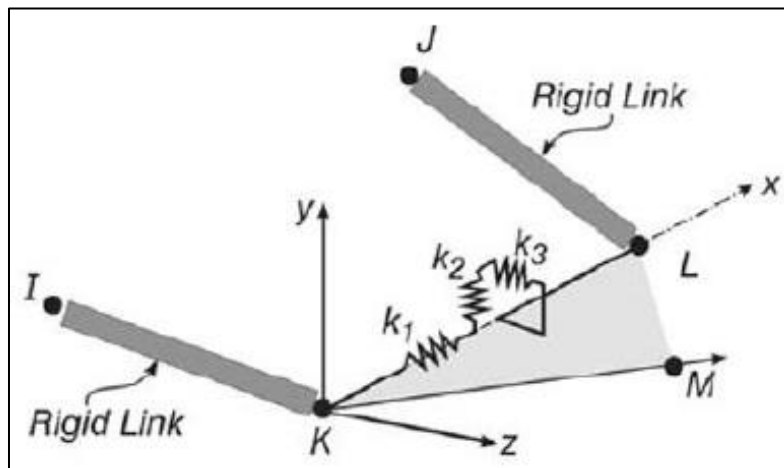


Fig. 37.- Elementos resorte de Ruaumoko, fuente (Carr, User Manual for the 2-Dimensional version-Ruaumoko. Ruaumoko manuals, 2007)



6.4 Propiedades

En esta sección se define las características de cada uno de los resortes de acuerdo al modelo fuerza-desplazamiento que se escoja, este puede ser bi-lineal o tri-lineal con su degradación respectiva; de esto depende, el número de líneas que se debe llenar de cada resorte. En el manual se explica, que para un modelo bi-lineal se debe llenar 3 líneas de comandos y 4 líneas para el modelo tri-lineal.

1	Numero de Resorte
2	Parámetros de control, definición de modelos fuerza desplazamiento.
3	Fuerzas y momentos de cedencia
4	Parámetros de degradación de resistencia
5	Parámetros post-agrietamiento.

Tabla 20.- Bloque de propiedades necesarios para el programa

○ Modelo Bi-lineal

1	2	SPRING								
2	ITYPE	IHYST	ILOS	IDAMG	K1	K2	K3	WGT	RF	RT
3	FX+	FX-	FY+	FY-	MZ+	MZ-				
4	DUCT1	DUCT2	RDUCT	DUCT3						

Tabla 21.- Propiedades necesarias para el modelo bilineal

○ Modelo Tri-lineal

1	1	SPRING								
2	ITYPE	IHYST	ILOS	IDAMG	K1	K2	K3	WGT	RF	
3	FX+	FX-	FY+	FY-	MZ+	MZ-				
4	DUCT1	DUCT2	RDUCT	DUCT3						
5	ALFA	BETA	FCR(X)+	FCR(X)-	FCR(Y)+	FCR(Y)-				

Tabla 22.- Propiedades necesarias para el modelo tri-lineal

✓ Línea 1

En la primera celda se debe colocar el número de elemento al cual se le va a asignar las propiedades; y en la segunda celda se debe colocar el tipo de elemento que se

requiere modelar, para nuestro caso es de tipo resorte (spring) ya sea para flexión o corte.

✓ Línea 2

La primera celda define el tipo de resorte que se desea modelar, para nuestro caso se debe colocar el número 1 que indica que es un resorte simple que no actúan fuerzas internas en el mismo.

La segunda celda corresponde al tipo de regla de histéresis adoptada; y para este proyecto, se utilizaron modelos fuerza-desplazamiento bi-lineal y tri-lineal para los pilares de adobe descritos en la sección 5; cada uno de los modelos que se elija son generados en el interior del programa en términos de envolventes a partir de las histéresis; la bi-lineal corresponde a la trayectoria de carga y descarga dirigida al origen, y para utilizar esta regla se debe indicar el número 7 en el programa (Figura 38); por su parte, para el modelo tri-lineal, se utilizó la regla de Fukada para el cual se debe indicar con el número 14 (Figura 38).

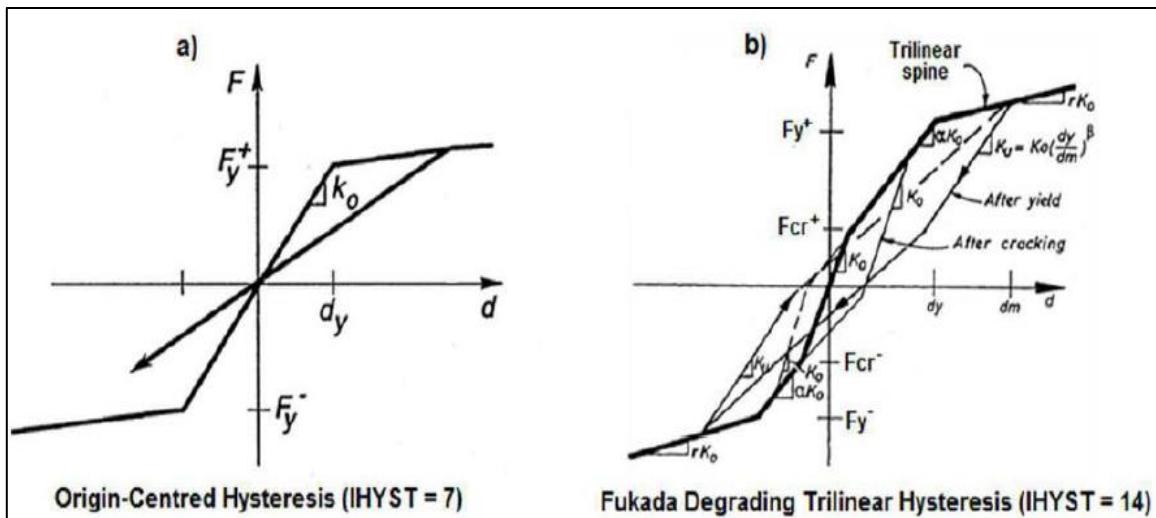


Fig. 38.- Reglas de histéresis adoptadas para resortes de pilares y vigas dintel, fuente (Carr, Ruamoko manual - Volume 5: Appendices, 2007)

En la tercera celda (ILOS), se debe indicar si en el modelo se requiere degradación; para el análisis realizado se utilizó la opción con el número 3, la cual indica la reducción de la resistencia basada en la ductilidad máxima.



En cuarta celda (IDAMG), se indica si el modelo que se va a ensayar tiene índice de daños calculados; y en nuestro caso, todas las paredes que se ensayaron en los diferentes artículos eran de construcciones recién elaboradas, por lo que se colocó el número 0 que indica que no existe índice de daños calculados.

K1, K2 y K3 se refieren a las rigideces axial, flexión y corte respectivamente de cada uno de los resortes, los cuales fueron calculados por medio de las formulas de la sección 4.4.

La octava celda (WGT), corresponde al peso por unidad de longitud del miembro. Para todos los bloques de propiedades se consideró un valor igual a 0.

La novena y décima celda (RF y RT), son las rigideces rotacionales de los tramos bilineal o tri-lineal. Estos valores se deben expresar como porcentajes de la rigidez elástica. En este trabajo, se asumieron los tramos bi-lineal (histéresis 7) y tri-lineal (histéresis 14) con pendiente cero. Para el modelo tri-lineal no se debe llenar la celda número 10.

✓ **Línea 3**

Estas celdas se refieren a las fuerzas ultimas que se adoptan por medio de las fórmulas establecida en la sección 4.4 y los momentos últimos.

✓ **Línea 4**

Son los parámetros de degradación de resistencia del tramo post-agrietamiento para el cual, el programa tiene una ley de degradación expresada en la siguiente figura:

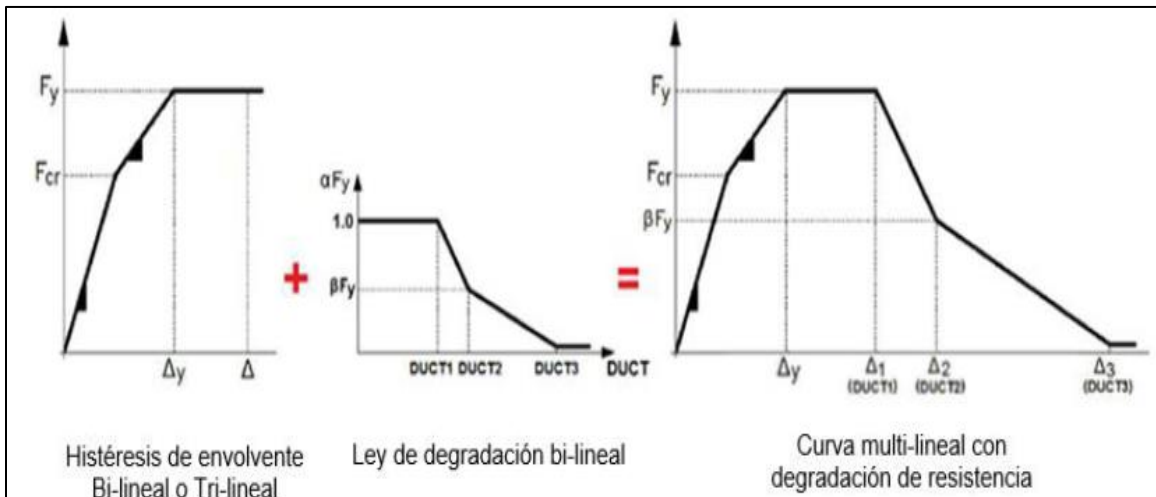


Fig. 39.- Esquema de curva multi-lineal con degradación de resistencia, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

La estrategia en la que se basa, es la de agregar a la histéresis la ley de degradación bi-lineal de Ruaumoko como se puede apreciar en la figura.

Los parámetros que se deben colocar son los siguientes:

- DUCT 1: ductilidad asociada al inicio de la degradación.
- DUCT 2: ductilidad asociada con el cambio en la intensidad de degradación.
- DUCT 3: ductilidad última, asociada a una capacidad de resistencia prácticamente nula (1% V_{max}) del elemento.

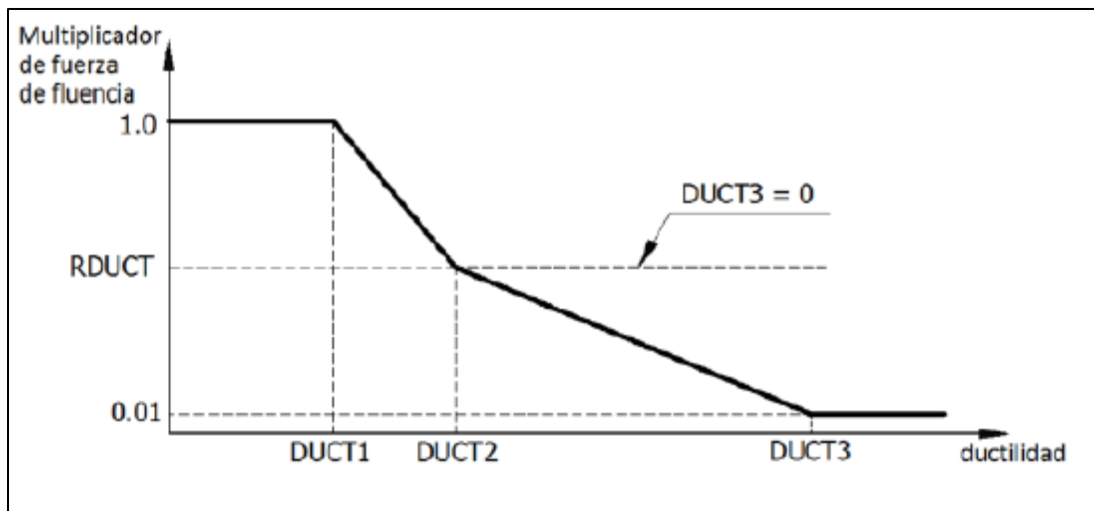


Fig. 40.- Ley de degradación, fuente (Carr, Theory. Ruaumoko manuals, Vol. 1, 2007)



✓ **Línea 5**

Esta línea solo posee valores cuando se modela con un ensayo tri-lineal, y los parámetros de esta línea son los siguientes:

- ALFA: factor bi-lineal; agrietamiento de cedencia.
- BETA: factor de rigidez o descarga.
- FCR(i)+: momento de agrietamiento positivo.
- FCR(i)-: momento de agrietamiento negativo.

6.5 Masas

En esta sección, se añade las masas de cada uno de los pilares; y si son paredes con aberturas, la masa que corresponde a la viga dintel, se encuentra concentrada en el nodo de la cabeza del pilar. La masa se debe indicar en forma de peso ya que el mismo programa hace la transformación a masa. Como son ensayos realizados en 2D, el peso solo actuaría en el eje Y. Además, se debe colocar los nodos en forma descendente.

Nº nodo	Peso
WEIGHTS	
10	12.46
20	12.46
30	12.46
40	12.46
50	12.46
60	12.46

Tabla 23.- Configuración de datos para la masa

6.6 Cargas

En esta sección se debe colocar las cargas a la que los ensayos fueron sometidos en la realidad; representando estas ya sea las cargas de paredes del segundo piso o de cubierta. Las cargas son colocadas, al igual que las masas, en los nodos



superiores de los pilares y son ordenados de manera descendente. Para paredes ensayadas en 2D, solo deben ir cargas en el eje Y como indica en la tabla 24.

	Cx	Cy	Cz
LOADS			
10	0	10.00	0
20	0	20.00	0
30	0	30.00	0
40	0	40.00	0
50	0	50.00	0
60	0	60.00	0

Tabla 24.- Colocación de cargas en Ruaumoko

En la primera columna se deben ingresar el ID de cada nodo que se encuentre en la cabeza del pilar; los valores Cx, Cy y Cz son las cargas en cada eje respectivo. Para el proyecto, solo se colocaron cargas en el eje Y por lo que el resto se llenó con ceros.

6.7 Patrón de Carga lateral

En esta sección de debe colocar la carga lateral adoptada que va a deformar la pared; como el ensayo es en el plano de una sola pared, no es necesario tener fuerzas en otros ejes distintos a X, por lo que solo hay una carga aplicada en este sentido tal como lo muestra la siguiente Tabla:

SHAPE	Fx
10	45
20	60
30	45

Tabla 25.- Patrón de carga Lateral solo en el eje X

6.8 Sismo

En el proyecto se utilizó el análisis pushover normal. Este análisis se realiza por medio de un patrón de carga lateral en función de una rampa longitudinal

incremental con un tiempo igual a 10 segundos. Se establece una longitud de intervalo definido por Δt , y a esta función rampa, se le discretiza en $N = 10/\Delta t$ sub-intervalos y en pasos p de análisis. A cada paso i le corresponde su ordenada $r(i)$, que actúa en el análisis como multiplicador de los valores (F) de la carga lateral. Así, con cada paso de análisis, el patrón de carga lateral va incrementando sus valores F , desde $F \times r(1)$ hasta $F \times r(N)$. Por simplicidad, se asumió aquí una rampa unitaria (ordenada máxima igual a la unidad) de modo que, al final del análisis se reproduce el patrón de carga lateral adoptado al inicio, tal como se muestra en la Figura 41 (Jiménez Pacheco, 2016).

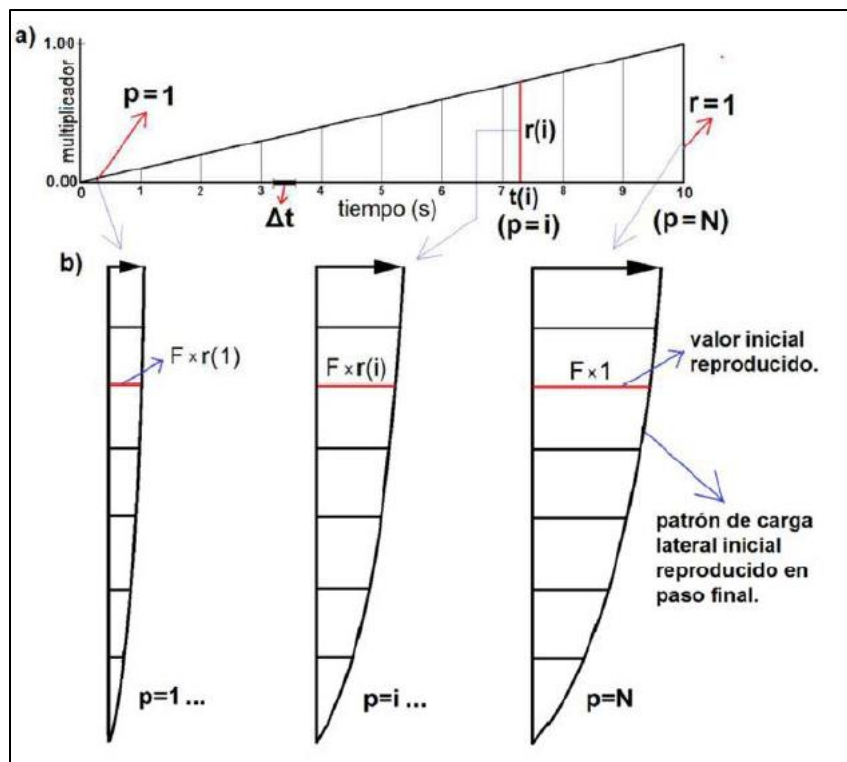


Fig. 41.- a) función rampa unitaria; b) patrón de carga lateral en tres instantes/pasos de análisis, fuente (Jiménez Pacheco, 2016)

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede observar en la sección 4.4, (Reyes, y otros, 2018) presenta formulación únicamente para corte, pero no así para flexión; por lo tanto, como el software requiere valores de este tipo para el cálculo de las curvas fuerza-desplazamiento, se usaron los resultados que dan las formulaciones de (Magenes & Calvi, 1997) y (Turnšek & Čačovič, 1971), resultando así cuatro curvas finales a obtener, siendo estas:

- (Magenes & Calvi, 1997)
- (Turnšek & Čačovič, 1971)
- (Reyes, y otros, 2018) y (Magenes & Calvi, 1997)
- (Reyes, y otros, 2018) y (Turnšek & Čačovič, 1971)

Con la ayuda de un software en línea, se digitalizaron los resultados presentes en cada uno de los artículos, con el fin de comparar de mejor manera los resultados obtenidos de la formulación con los presentados en los documentos de origen.

En cuanto a la rigidez inicial (rigidez secante), esta fue calculada por la formulación presente en la sección 2.8. De igual manera que en la sección 5, se presentaran los resultados en el mismo orden y de manera sintetizada. Para más detalles de los mismos, ir al Anexo A.

7.1 Artículo 1

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	56.95	kN	15.77
		Directo	15.77	kN	
		Escalonado	45.8	kN	
		Mixto	56.06	kN	
	FLEXIÓN	-	99.49	kN.m	99.49

Tabla 26.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Magenes & Calvi, 1997)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	77.94	kN	49.04
		Mixto	49.04	kN	
	FLEXIÓN	-	80.95	kN.m	80.95

Tabla 27.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Turnšek & Čačovič, 1971)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	44.83	kN	44.83

Tabla 28.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007); (Reyes, y otros, 2018)

En las 3 tablas anteriores se pueden observar los resultados obtenidos de las formulaciones para cada modo de falla. Los valores que se usan en el software para realizar los análisis, son los mínimos obtenidos en estas tablas. En el caso de la Tabla 26, se muestra que el modo de falla a corte predominante es el corte directo; mientras que en la Tabla 27 el modo de falla que gobierna es el corte mixto (corte con deslizamiento).

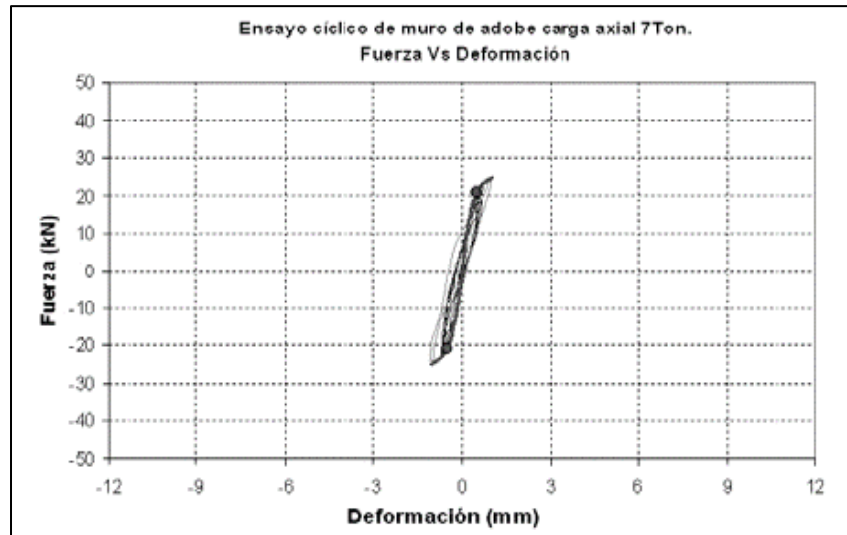


Fig. 42.- Resultados del ensayo, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)

En la anterior figura se muestran los resultados presentados en el mismo artículo, los cuales, como se observa, son curvas histeréticas. A partir de estas curvas se obtiene la envolvente de las misma, y, luego de la digitalización correspondiente, e introduciendo esta curva en los resultados obtenidos a través del software, se obtuvo el siguiente gráfico:

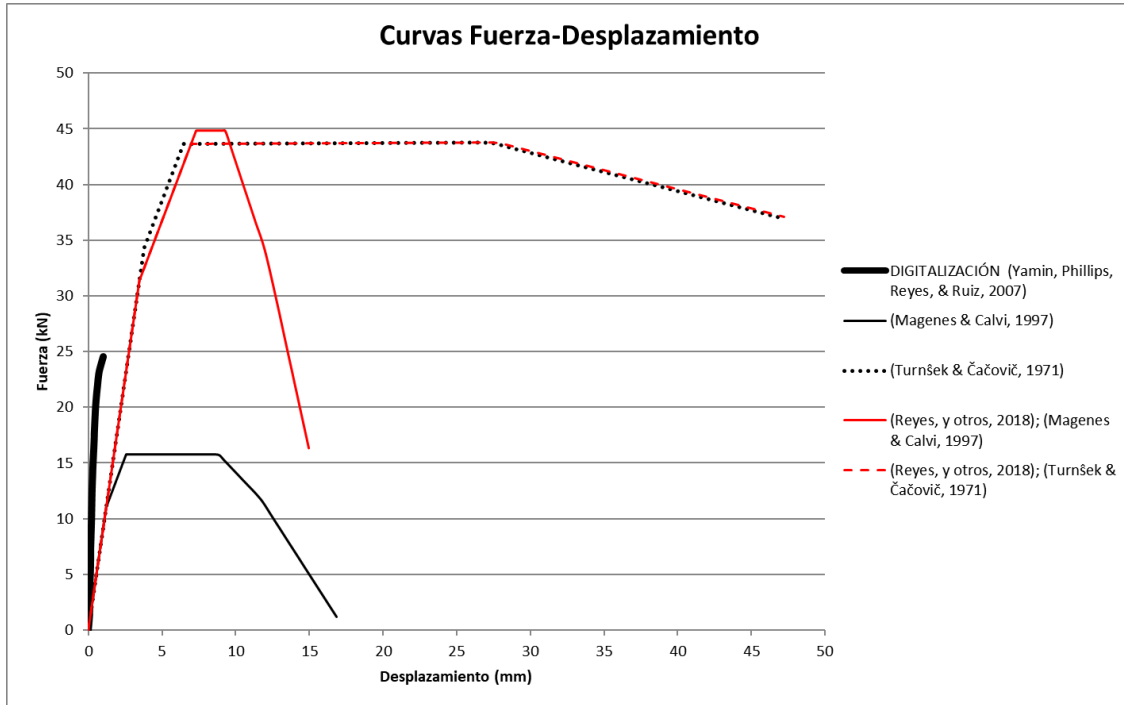


Fig. 43.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)

CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN; (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)	122.8	24.57	1.02
(Magenes & Calvi, 1997)	9.03	15.72	16.87
(Turnšek & Čačovič, 1971)	9.03	43.77	47.24
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	9.03	44.83	14.97
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	9.03	43.77	47.24

Tabla 29.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 1, fuentes especificadas

De la figura y tablas anteriores, se puede concluir que ninguna de las simulaciones dio un resultado parecido al del ensayo experimental ni en resistencia o desplazamientos máximos. Estos resultados obtenidos pueden deberse a que la carga colocada sobre la pared en el ensayo original es muy grande, haciéndola fallar



muy rápido; además de que la curva parece no tener una parte de degradación, dificultando así establecer similitud con algún resultado de las simulaciones.

La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.1 de este mismo trabajo.

7.2 Artículo 2

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	593.67	kN	53.4
		Directo	157.73	kN	
		Escalonado	53.4	kN	
		Mixto	70.07	kN	
	FLEXIÓN	-	151.44	kN.m	151.44

Tabla 30.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Magenes & Calvi, 1997)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	218.72	kN	65.78
		Mixto	65.78	kN	
	FLEXIÓN	-	114.52	kN.m	114.52

Tabla 31.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Turnšek & Čačovič, 1971)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	44.32	kN	44.32

Tabla 32.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); (Reyes, y otros, 2018)

De igual forma que en el anterior artículo, en las 3 tablas anteriores se muestran los resultados obtenidos de las formulaciones y se usan análogamente los valores mínimos obtenidos. En este artículo, se puede observar en la Tabla 30 que el modo de falla predominante es el corte escalonado; y en la Tabla 31 se muestra que lo es el corte mixto (corte con deslizamiento).

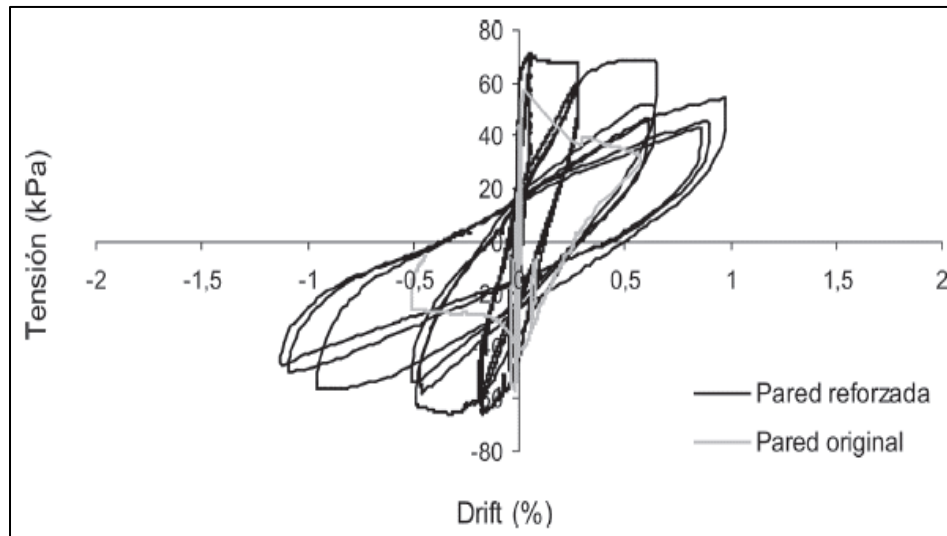


Fig. 44.- Resultados del ensayo, fuente (Varum H., Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)

De igual manera que en el artículo anterior, los resultados en este documento se presentan en forma de curvas histeréticas y la curva digitalizada se obtiene a partir de la envolvente de estas. Uniendo esta curva con las curvas fuerza-desplazamiento resultantes del software, nos da como resultado el siguiente gráfico:

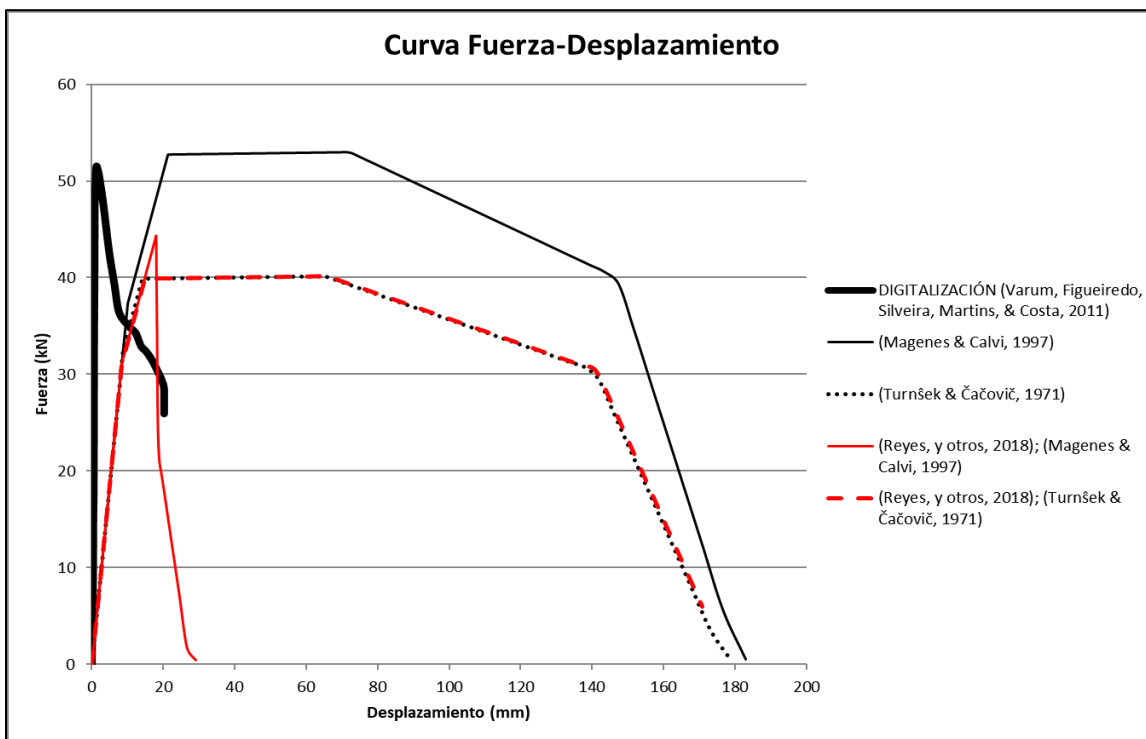


Fig. 45.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Varum H., Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)

CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN; (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)	50.15	51.47	20.26
(Magenes & Calvi, 1997)	3.71	53.02	183.03
(Turnšek & Čačovič, 1971)	3.71	40.15	178.87
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	3.71	44.31	29.23
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	3.71	40.15	170.8

Tabla 33.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 21, fuentes especificadas

Observando la figura y tabla anteriores, se puede concluir que la curva de (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997) se parece más a la obtenida en el ensayo original; además, difiere muy poco en cuanto a desplazamiento máximo, capacidad máxima de carga, rigidez inicial y forma de la curva. Sin embargo, no sucede lo mismo con las demás curvas, ya que estas difieren mucho, particularmente en el desplazamiento máximo. Esto puede deberse a las capacidades de corte obtenidas con las formulaciones de (Magenes & Calvi, 1997) y (Turnšek & Čačovič, 1971) son mayores a la obtenida con (Reyes, y otros, 2018).

La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.2 de este mismo trabajo.

7.3 Artículo 3

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	138.94	kN	37.81
		Directo	37.81	kN	
		Escalonado	44.94	kN	
		Mixto	66.96	kN	
	FLEXION	-	113.21	kN.m	113.21

Tabla 34.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Wang, Wang, & Liu, 2019); (Magenes & Calvi, 1997)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	188.74	kN	62.68
		Mixto	62.68	kN	
	FLEXION	-	81.60	kN.m	81.60

Tabla 35.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Wang, Wang, & Liu, 2019); (Turnšek & Čačovič, 1971)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	56.89	kN	56.89

Tabla 36.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Wang, Wang, & Liu, 2019); (Reyes, y otros, 2018)

En este caso, en la Tabla 34 se observa que el modo de falla dominante es el corte directo y en la tabla 35, el corte mixto es el menor el cual es el que gobierna.

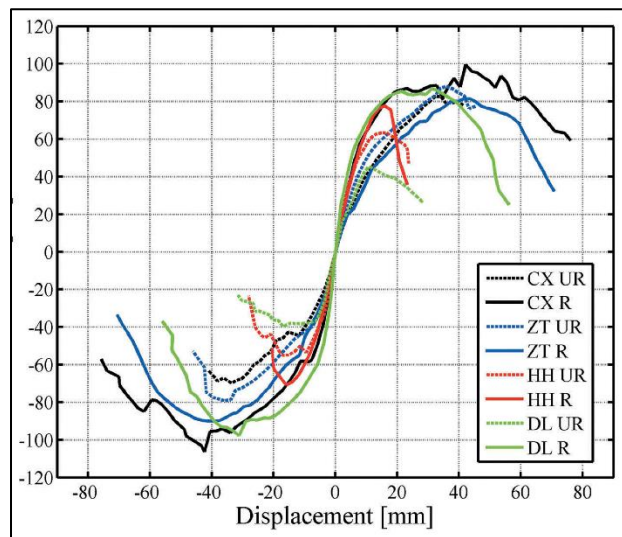


Fig. 46.- Resultados del ensayo, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019)

Como se puede observar en la imagen, en este documento se hicieron diversos análisis, tanto para muros de adobe sin refuerzo como para muros de adobe reforzados. En nuestro caso, la línea correspondiente a nuestro muro de interés es la “DL UR”. Luego de su digitalización y posterior inclusión en las curvas fuerza-desplazamiento resultantes de las formulaciones, se obtiene:

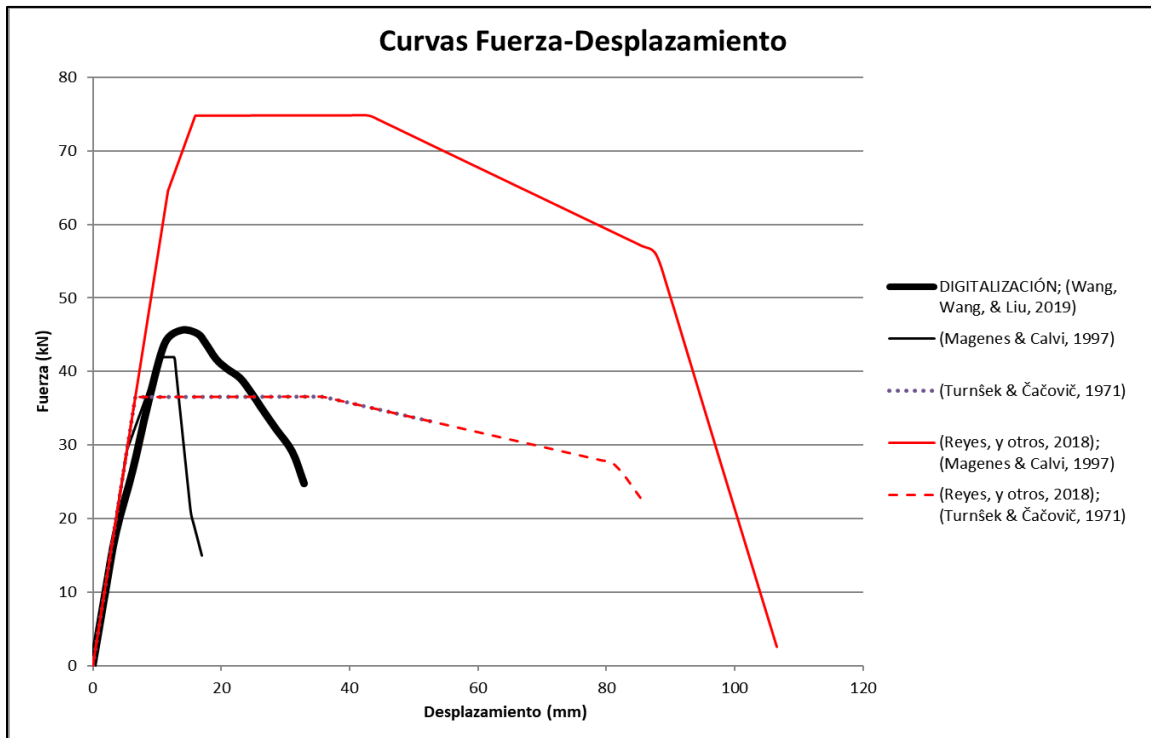


Fig. 47.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Wang, Wang, & Liu, 2019)

CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN; (Wang, Wang, & Liu, 2019)	4.14	45.65	32.9
(Magenes & Calvi, 1997)	5.52	41.98	16.96
(Turnšek & Čačovič, 1971)	5.52	36.56	52.76
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	5.52	74.91	106.51
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	5.52	36.56	85.93

Tabla 37.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 3, fuentes especificadas

En la figura y tabla anteriores se puede observar que la curva que más se parece a la obtenida en el ensayo es la dada por la formulación de (Magenes & Calvi, 1997), tanto en resistencia máxima como en rigidez inicial, pero no así para el desplazamiento máximo, el cual si varía significativamente. Las demás curvas presentan variaciones significativas en cuanto al desplazamiento máximo y solo la

dada por (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997) varia en gran medida también en su capacidad de resistencia máxima. Además, también se puede apreciar que la curva de (Turnšek & Čačovič, 1971) se encuentra por detrás de la obtenida con (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)

La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.3 de este mismo trabajo.

7.4 Artículo 4

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	56.96	kN	14.13
		Directo	16.34	kN	
		Escalonado	14.13	kN	
		Mixto	17.34	kN	
	FLEXIÓN	-	26.09	kN.m	26.09

Tabla 38.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Silveira D. , y otros, *Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018*); (Magenes & Calvi, 1997)

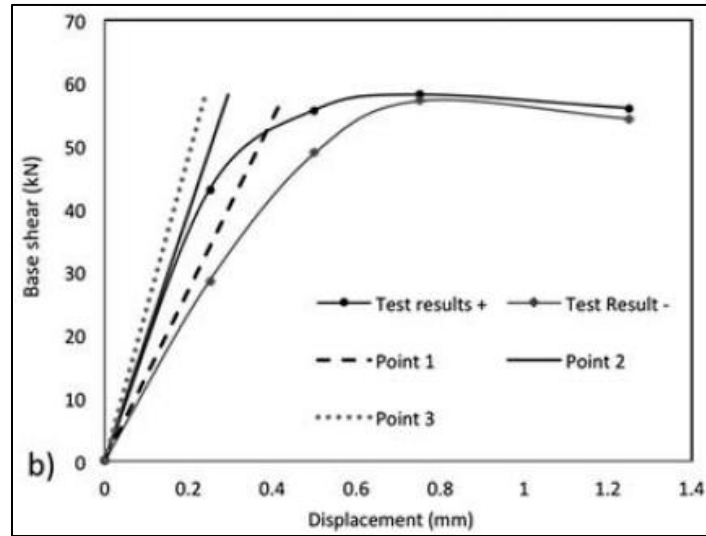
Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	34.96	kN	10.98
		Mixto	10.98	kN	
	FLEXIÓN	-	15.74	kN.m	15.74

Tabla 39.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Silveira D. , y otros, *Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018*); (Turnšek & Čačovič, 1971)

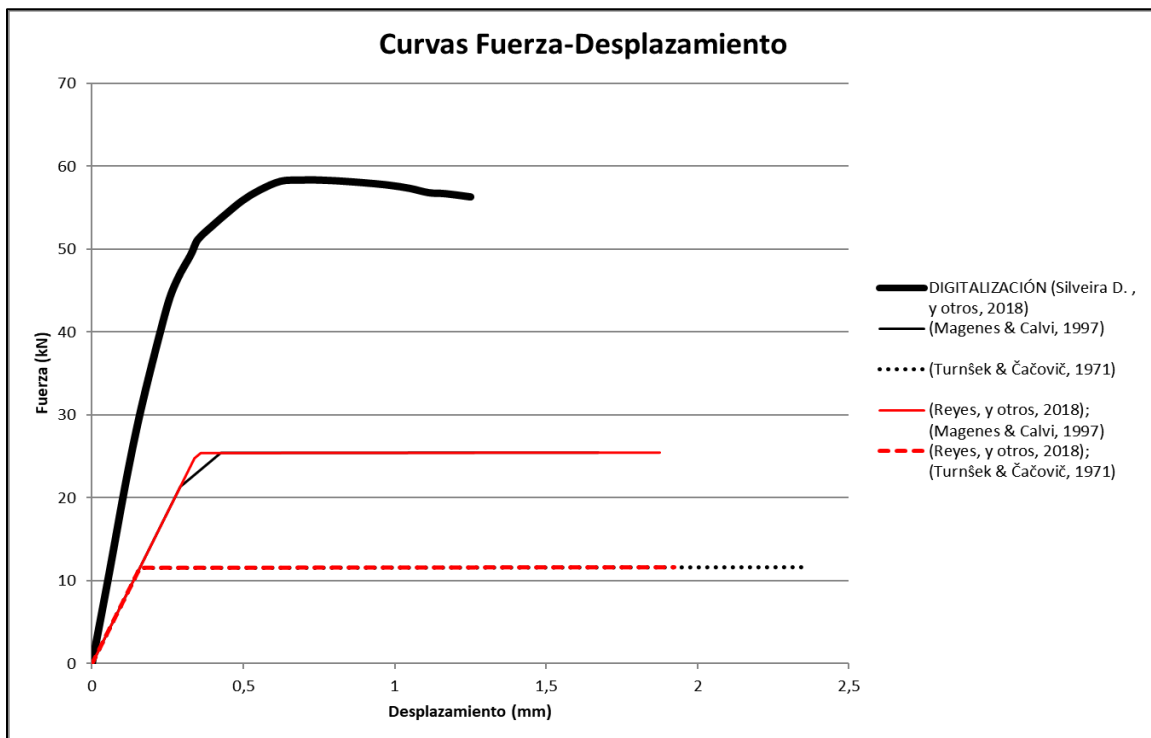
Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	9.88	kN	9.88

Tabla 40.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Silveira D. , y otros, *Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018*); (Reyes, y otros, 2018)

Al igual que para los casos anteriores, de las 3 tablas mostradas, se usarán los valores de cortante y flexión mínimos de cada formulación para los posteriores análisis. El modo de falla predominante en la Tabla 38 resulto ser el corte escalonado; mientras que en la Tabla 39, para la otra formulación, se observa que lo es el corte mixto (corte con deslizamiento).



En la figura anterior se puede observar la curva obtenida del documento original. En este caso, la curva original ya está en términos de fuerza-desplazamiento por lo que, luego de digitalizarla y unirla a los resultados obtenidos del software, se tiene:





CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN; (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018)	183.24	58.38	1.25
(Magenes & Calvi, 1997)	73.16	25.44	1.67
(Turnšek & Čačovič, 1971)	73.16	11.67	2.35
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	73.16	25.44	1.88
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	73.16	11.65	1.92

Tabla 41.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 41, fuentes especificadas

En la Figura 49 y Tabla 41 se observa que para (Magenes & Calvi, 1997) y (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997) la forma de las curvas se parecen a la original e inclusive sus desplazamientos máximos, pero distan mucho en su capacidad última y rigidez inicial. Las otras dos curvas distan mucho en todos estos aspectos a la original obtenida en el ensayo. Adicionalmente, la curva obtenida por (Magenes & Calvi, 1997) se encuentra oculta por la curva obtenida a partir de (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997).

La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.4 de este mismo trabajo.



7.5 Artículo 5

Autores	Modo de Falla	Tipo	Pilar 1			Pilar 2		
			Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	39.18	kN	14.79	39.18	kN	12.84
		Directo	14.79	kN		12.84	kN	
		Escalonado	80.15	kN		69.59	kN	
		Mixto	135.50	kN		133.63	kN	
	FLEXIÓN	-	328.80	kN.m	328.80	328.80	kN.m	328.80

Tabla 42.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Magenes & Calvi, 1997)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Pilar 1			Pilar 2		
			Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	82.48	kN	2.79	62.47	kN	2.07
		Mixto	2.79	kN		2.07	kN	
	FLEXIÓN	-	308.30	kN.m	107.30	308.30	kN.m	107.30

Tabla 43.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Turnšek & Čačovič, 1971)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Pilar 1			Pilar 2		
			Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	64.6	kN	64.6	59.82	kN	59.82

Tabla 44.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010); (Reyes, y otros, 2018)

Como se puede observar, las 3 tablas anteriores contienen valores tanto para pilar 1 como para pilar 2; esto se debe a que las paredes con aberturas se dividen en varios pilares, en función de las oquedades que contenga (ver Anexo A.5). Sin embargo, de manera análoga a los anteriores, se usan los valores mínimos obtenidos de cada formulación para cada tipo de falla; siendo para la Tabla 42 el corte directo, tanto para el pilar 1 como para el pilar 2, mientras que, para la Tabla 43 correspondiente a la otra formulación, el resultado que gobierna para ambos pilares es el corte mixto (corte con deslizamiento).

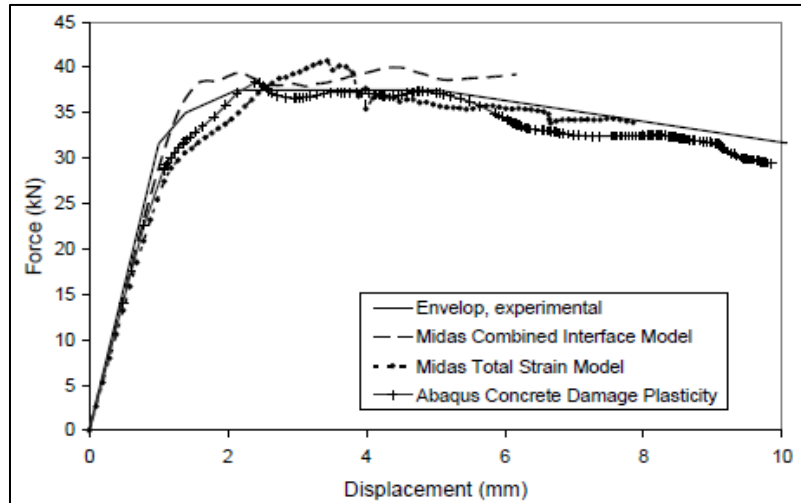


Fig. 50.- Resultados del ensayo, fuente (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)

En la figura anterior, se puede observar que en el documento se tiene una curva fuerza-desplazamiento como resultado de haberla extraído previamente de una curva histerética (envolvente). Una vez digitalizada la curva, se la incluyo en el gráfico de curvas fuerza-desplazamiento resultantes, obteniéndose lo que sigue:

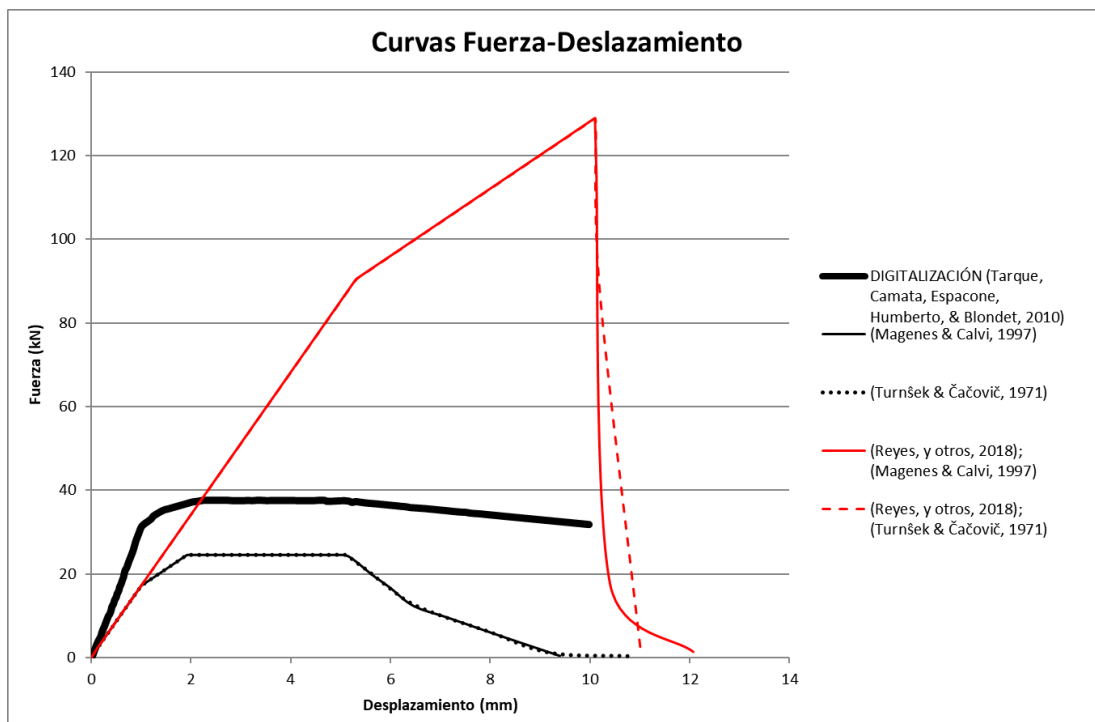


Fig. 51.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)

CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN; (Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)	30.57	37.54	9.97
(Magenes & Calvi, 1997)	17.21	24.56	9.4
(Turnšek & Čačovič, 1971)	17.26	24.56	10.84
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	17.05	128.89	12.07
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	17.05	128.95	11.01

Tabla 45.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 51, fuentes especificadas

En este caso, se puede observar que los resultados que arrojan tanto (Magenes & Calvi, 1997) y (Turnšek & Čačovič, 1971), se parecen al original en resistencia y desplazamiento máximos. Pero para el caso de (Reyes, y otros, 2018), en cualquiera de sus combinaciones, no arroja buenos resultados, lo que puede deberse al parámetro *ALR* que influye en la formulación de este, haciendo que el corte tome un valor muy alto. Sin embargo, en cuanto a la rigidez inicial, la formulación que más se asemeja a la obtenida a partir del ensayo original, es la obtenida con (Magenes & Calvi, 1997).

La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.5 de este mismo trabajo.

7.6 Artículo 6

7.6.1 Pared Llena

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	51.82	kN	14.92
		Directo	14.92	kN	
		Escalonado	40.84	kN	
		Mixto	46.81	kN	
	FLEXIÓN	-	78.73	kN.m	78.73

Tabla 46.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	66.02	kN	41.35
		Mixto	41.35	kN	
	FLEXIÓN	-	61.23	kN.m	61.23

Tabla 47.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	32.49	kN	32.49

Tabla 48.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Reyes, y otros, 2018)

En este artículo, para el caso de pared llena, se puede observar que en la Tabla 46, que el modo de falla mínimo dominante es el corte directo, y el corte mixto (corte con deslizamiento) lo es en la Tabla 47.

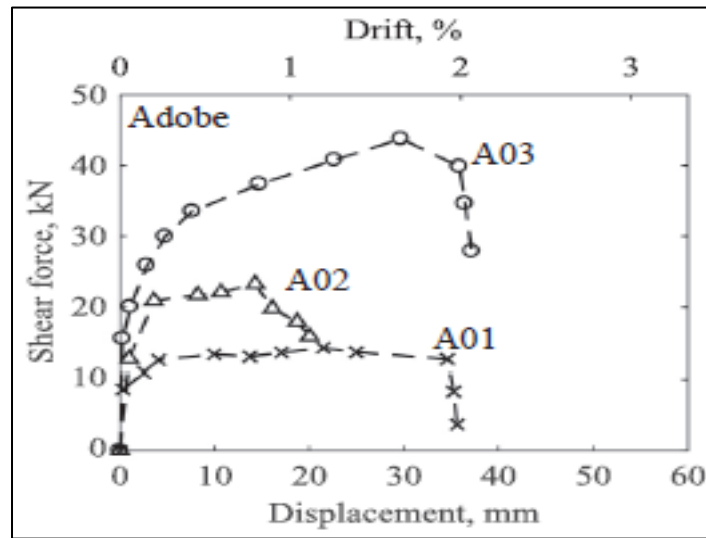


Fig. 52.- Resultados del ensayo, fuente (Reyes, y otros, 2018)

En este documento, (Reyes, y otros, 2018) decidieron hacer 3 muros con similares características geométricas y el mismo material como se puede observar en la Figura 52. Sin embargo, se puede ver que se obtuvieron resultados diferentes para cada ensayo, tanto en capacidad máxima como para desplazamiento máximo. En las posteriores figuras, se hace una comparación de estos resultados con los de las formulaciones; los cuales, como son obtenidos con las mismas características tanto geométricas como del material, estas últimas no presentaran ninguna variación.

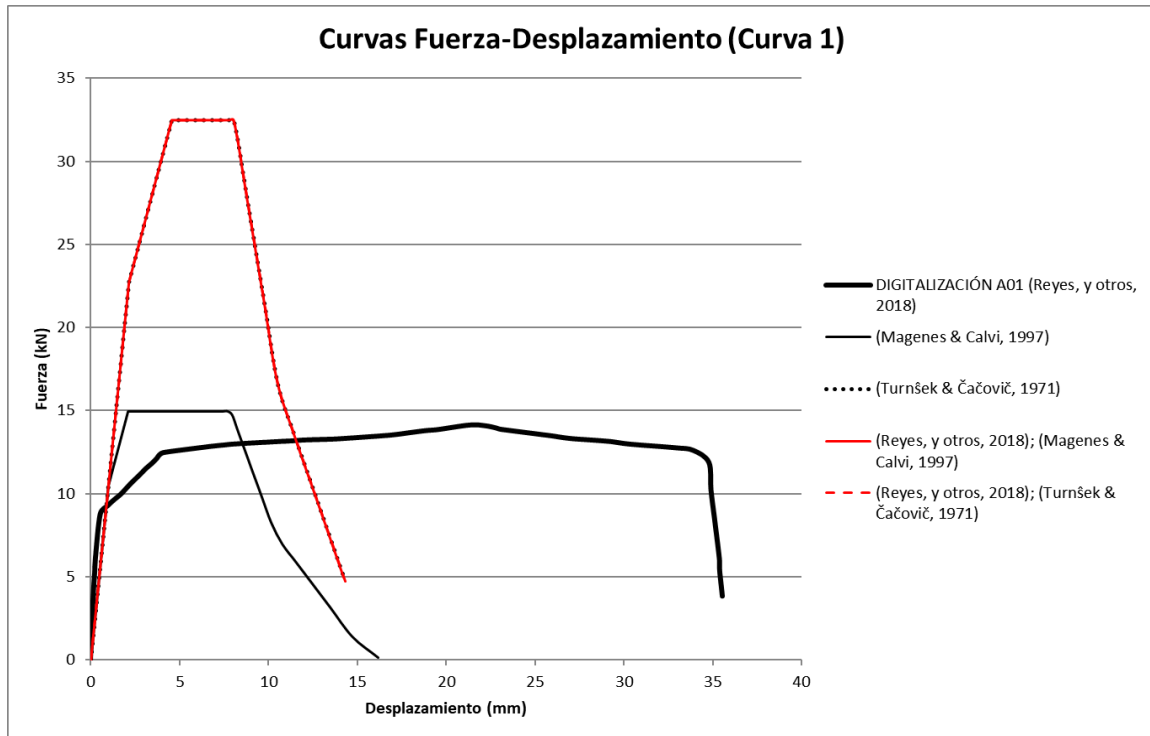


Fig. 53.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes - Pared A01 para (Reyes, y otros, 2018)

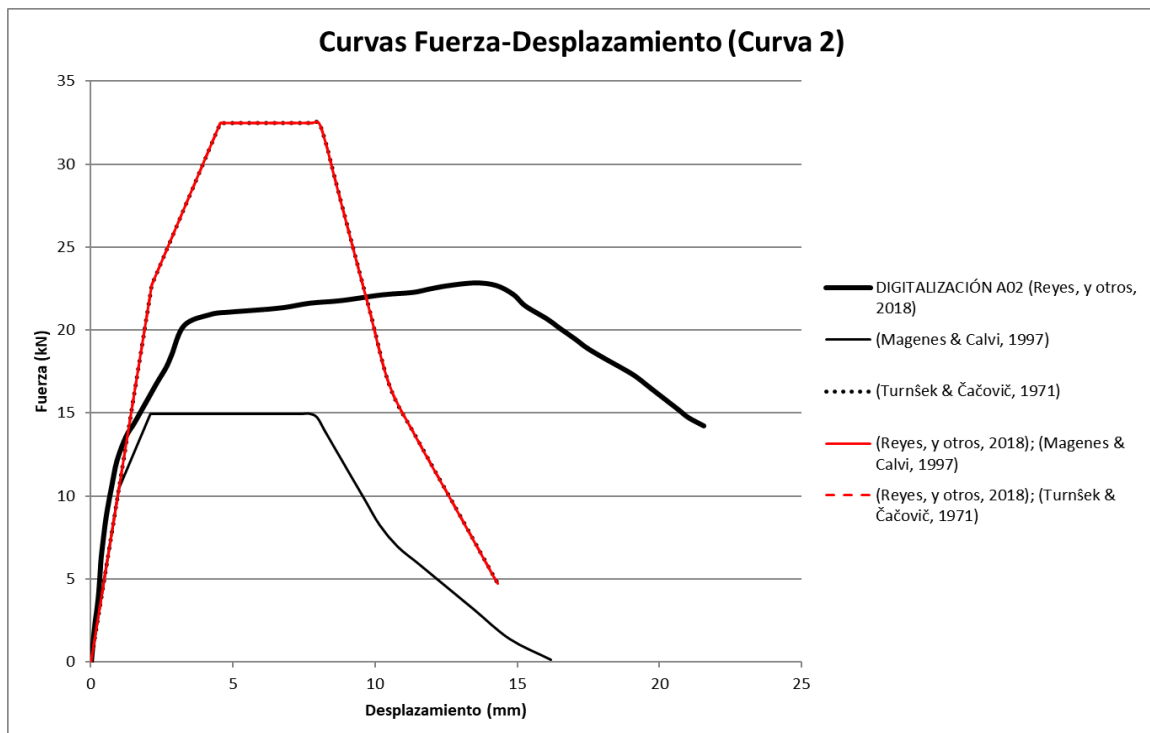


Fig. 54.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes - Pared A02 para (Reyes, y otros, 2018)

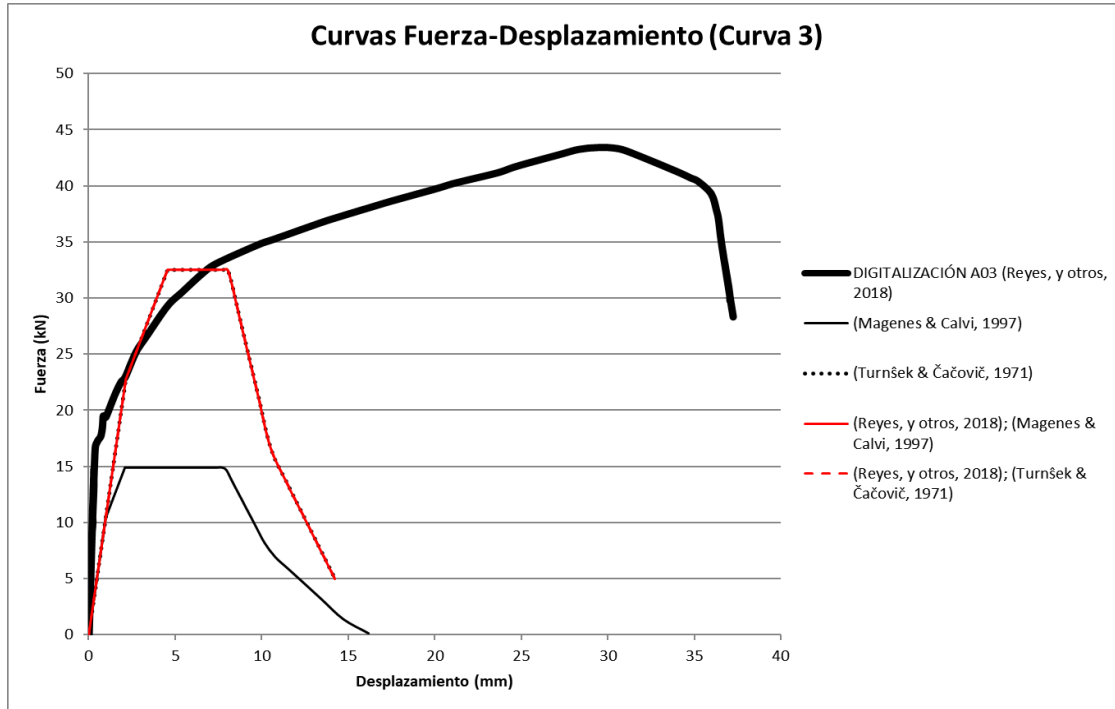


Fig. 55.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes - Pared A03 para (Reyes, y otros, 2018)

CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN A01; (Reyes, y otros, 2018)	16.39	14.15	35.54
DIGITALIZACIÓN A02 (Reyes, y otros, 2018)	10.7	22.83	21.55
DIGITALIZACIÓN A03; (Reyes, y otros, 2018)	8.41	43.38	37.06
(Magenes & Calvi, 1997)	10.61	14.92	16.17
(Turnšek & Čačovič, 1971)	10.61	32.49	14.31
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	10.61	32.5	14.23
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	10.61	32.5	14.32

Tabla 49.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 6 – Pared Llena1, fuentes especificadas

De las figuras anteriores y la tabla anterior se puede concluir que los resultados obtenidos para las formulaciones de (Turnšek & Čačovič, 1971), (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997) y (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)

son muy parecidos y por ende, gráficamente se sobreponen entre ellos. En cuanto a la rigidez inicial, esta no varía mucho para ninguno de los casos ensayados, si los comparamos con los resultados de la formulación de (Magenes & Calvi, 1997). Además, de todos los ensayos, las formulaciones guardan un mayor parecido a la curva A02 de la figura 54, en cuanto a capacidad máxima y desplazamiento máximo. La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.6.1 de este mismo trabajo.

7.6.1 Pared Hueca (Con aberturas)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Pilar 1			Pilar 2			Pilar 3		
			Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo
(Magenes & Calvi, 1997)	CORTE	Diagonal	39.72	kN	12.73	25.56	kN	7.02	23.6	kN	5.42
		Directo	12.73	kN		7.02	kN		5.42	kN	
		Escalonado	33.07	kN		19.52	kN		14.4	kN	
		Mixto	32.07	kN		22.32	kN		14.3	kN	
	FLEXIÓN	-	64.82	kN.m	64.82	29.16	kN.m	29.16	23.62	kN.m	23.62

Tabla 50.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Pilar 1			Pilar 2			Pilar 3		
			Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo
(Turnšek & Čačovič, 1971)	CORTE	Diagonal	47.81	kN	13.28	26.98	kN	9.28	25.72	kN	5.50
		Mixto	13.28	kN		9.28	kN		5.50	kN	
	FLEXION	-	20.83	kN.m	20.83	10.6	kN.m	10.6	7.94	kN.m	7.94

Tabla 51.- Resultados de las formulaciones, fuentes (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)

Autores	Modo de Falla	Tipo	Pilar 1			Pilar 2			Pilar 3		
			Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo	Valor	Unidad	Mínimo
(Reyes, y otros, 2018)	CORTE	Diagonal	32.45	kN	32.45	12.43	kN	12.43	7.73	kN	2.89

Tabla 52.- Resultados de las formulaciones, fuente (Reyes, y otros, 2018)

Esta pared consta de dos aberturas (una ventana y una puerta) como se puede observar en el Anexo A.6.2; por lo que se tienen 3 pilares resultantes. De las tablas anteriores, en la Tabla 50 se puede ver que para los 3 pilares el modo de falla que gobierna es el corte directo por ser el menor; mientras que, por su parte, los

resultados de la formulación de la tabla 51 indican que lo es el corte mixto (corte con deslizamiento).

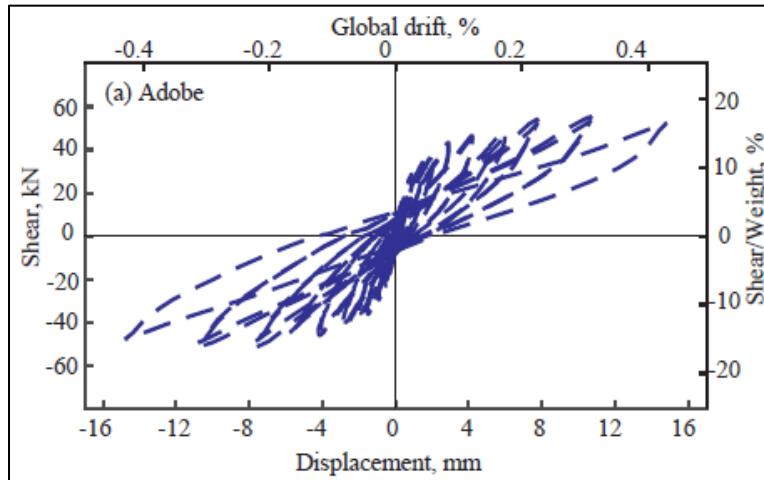


Fig. 56.- Resultados del ensayo, fuente (Reyes, y otros, 2018)

En este artículo se obtuvieron como resultado curvas histeréticas como se observa en la anterior figura, a partir de las cuales se obtuvo la curva fuerza-desplazamiento. Al digitalizarla y juntarla con las curvas obtenidas como resultado de las formulaciones, se obtuvo la siguiente figura:

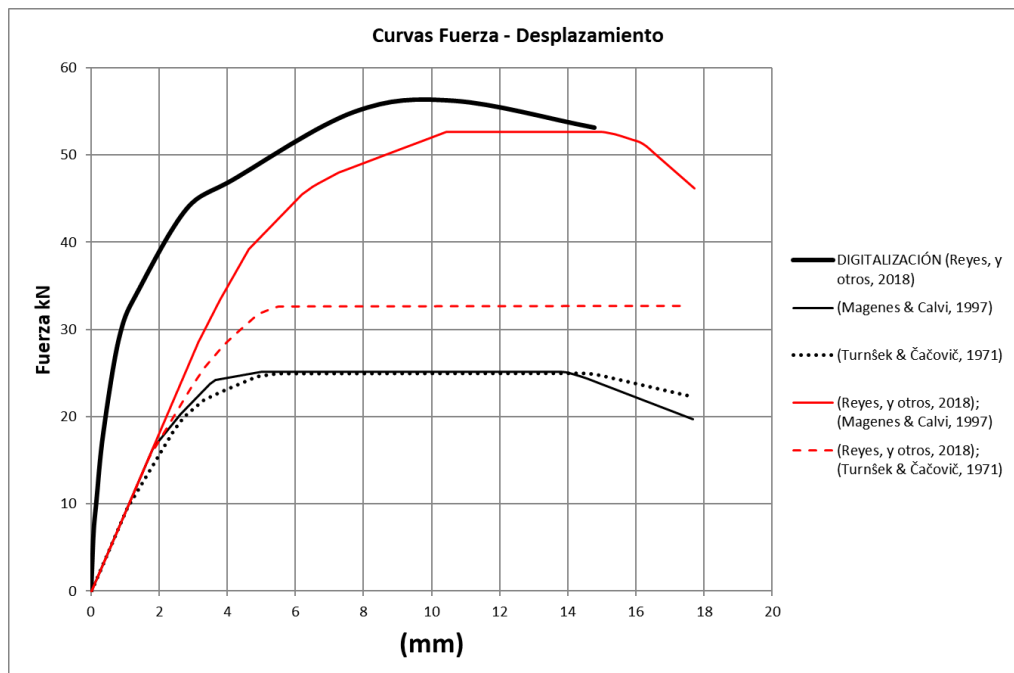


Fig. 57.- Curvas fuerza-desplazamiento resultantes para pared hueca (Reyes, y otros, 2018)



CURVA	Rigidez Inicial	Resistencia máxima	Desplazamiento máximo
	kN/mm	kN	mm
DIGITALIZACIÓN; (Reyes, y otros, 2018)	25.67	56.19	14.77
(Magenes & Calvi, 1997)	8.99	25.17	17.68
(Turnšek & Čačovič, 1971)	7.85	25	17.58
(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	8.87	52.61	17.73
(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	8.28	32.74	17.53

Tabla 53.- Rigidez inicial, resistencia máxima y desplazamiento máximo obtenidos para el Artículo 6 - Pared Hueca, fuentes especificadas

En este caso, se puede observar que todas las curvas guardan parecido en cuanto a la forma de la curva digitalizada, y la dada por (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997) guarda mucho parecido en todos los parámetros considerados (rigidez inicial, resistencia y desplazamiento máximos). Adicionalmente, todas las simulaciones tienen similar desplazamiento máximo comparándola con la original obtenida en el ensayo.

La información complementaria de este artículo se la puede encontrar en el Anexo A.6.2 de este mismo trabajo.

Adicionalmente, en la tabla siguiente se observa que todas las curvas simuladas con las formulaciones, presentan cierto porcentaje de variación con respecto a las obtenidas originalmente de los ensayos. Por ello, se decidió considerar una valoración impuesta para cada artículo, como se puede observar en la última columna, definiendo a cada uno como “buena, regular o mala”; dependiendo de los datos obtenidos originalmente del ensayo, de la fiabilidad del mismo, de los resultados finales obtenidos (considerando si tienen buenas gráficas, claras y bien discretizadas), entre otros. Estas consideraciones adicionales, nos ayudaran al momento de dar más peso a un artículo o a otro; para así poder definir alguna formulación que se adapte mejor al comportamiento sísmico esperado en una pared de adobe en el plano. Por ejemplo, el artículo de (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz,



2007) fue considerado con una valoración “mala”, debido a que su grafica no presenta una carga máxima notoria, ni un descenso de la curva fuerza-desplazamiento (envolvente de la curva histerética); además de que, algunos de sus datos complementarios tuvieron que ser extraídos de otros documentos adicionales provenientes de otro país (ver sección 5.1).

Artículo	Parámetros considerados	FORMULACIÓN				Valoración del Artículo
		(Magenes & Calvi, 1997)	(Turnšek & Čačovič, 1971)	(Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997)	(Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971)	
(Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)	Rigidez	92,64%	92,64%	92,64%	92,64%	Mala
	Carga máx.	36,02%	78,14%	82,46%	78,14%	
(Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)	Rigidez	92,60%	92,60%	92,60%	92,60%	Regular
	Carga máx.	3,01%	21,99%	13,91%	21,99%	
(Wang, Wang, & Liu, 2019)	Rigidez	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	Buena
	Carga máx.	8,04%	19,91%	64,10%	19,91%	
(Silveira D. , y otros, 2018)	Rigidez	60,07%	60,07%	60,07%	60,07%	Buena
	Carga máx.	56,42%	80,01%	56,42%	80,04%	
(Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)	Rigidez	43,70%	43,53%	44,22%	44,22%	Buena
	Carga máx.	34,58%	34,58%	243,34%	243,50%	
DIGITALIZACIÓN A01; (Reyes, y otros, 2018)	Rigidez	35,26%	35,26%	35,26%	35,26%	Buena
	Carga máx.	5,48%	129,61%	129,68%	129,68%	
DIGITALIZACIÓN A02; (Reyes, y otros, 2018)	Rigidez	0,84%	0,84%	0,84%	0,84%	Buena
	Carga máx.	34,62%	42,31%	42,36%	42,36%	
DIGITALIZACIÓN A03; (Reyes, y otros, 2018)	Rigidez	26,15%	26,15%	26,15%	26,15%	Buena
	Carga máx.	65,59%	25,10%	25,08%	25,08%	
(Reyes, y otros, 2018) - Pared Hueca	Rigidez	8,99%	7,85%	8,87%	8,28%	Buena
	Carga máx.	55,21%	55,51%	6,37%	41,73%	

Tabla 54.- Tabla resumen de errores relativos (en porcentaje), obtenidos para la rigidez y carga máxima, fuentes especificadas.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este proyecto se realizó la evaluación de varias paredes de adobe, para la validación del método de macro elementos mediante elementos tipo resortes, con el fin de tener un modelo para la evaluación sísmica de estructuras de adobe y así poder enfocarlas desde un punto de vista más local, como es el caso de las casas patrimoniales del Centro Histórico de Cuenca (CHC), ya que no se tienen estudios de capacidad sísmica de éstas, aún cuando dichas casas patrimoniales representan alrededor de 43% del CHC (Morán Proaño & Alvarez Rodriguez, 2012).

El objetivo principal fue la validación de formulaciones de rigidez elástica y de capacidad ante una fuerza lateral a la que es sometida una pared en el plano; para lo cual, en primer lugar, se determinó los modos de falla que se pueden presentar en cada pared, para luego recolectar varios artículos que contengan estas características y que además posean sus respectivas curvas resultantes. De estos documentos, se recolectaron las características físicas y mecánicas de cada uno para así tratar de modelar lo mejor posible la pared ensayada.

También se definieron las fórmulas que se aplicarían para la modelización pertinente; de las cuales, una formula corresponde a corte directo específicamente para adobe perteneciente al artículo: “Shear behavior of adobe and rammed earth walls of heritage structures” (Reyes, y otros, 2018); y las demás formulaciones corresponden a mampostería no reforzada de ladrillo, buscando así su validación para mampostería de adobe. Sin embargo, para estas formulaciones, algunos artículos no contenían todos los datos necesarios por lo que se requirió completarlos utilizando ensayos realizados cerca de la región o país de origen del documento original, o con proyectos anteriores de los mismos autores.

El modelo por el que se optó para la validación en paredes de adobe fue el de macro-elementos por medio de resortes, el cual ya ha sido validado en mampostería no reforzada de ladrillo por (Jiménez Pacheco, 2016) y simulado en el programa Ruaumoko, con el que se obtuvieron las curvas pushover en pilares y vigas dintel.



Finalmente, definido el modelo a efectuar, se procedió a armar los requerimientos del software a usar, obteniéndose las curvas pushover de cada uno de los ensayos de las que se concluye lo siguiente:

- Debido a la heterogeneidad propiamente del adobe, se obtuvieron diferentes resultados para una misma pared, ya que como se pudo observar en el documento de (Reyes, y otros, 2018), donde se hicieron ensayos en tres paredes del mismo material y mismas características geométricas, se obtuvieron para cada una ellas resultados diferentes, (expresados de mejor manera en el porcentaje de error relativo presente en la Tabla 54); por ende, es de esperar que al variar también las condiciones mecánicas, cambie aún más el comportamiento de la pared.
- Luego de revisar varios artículos y fuentes bibliográficas, se pudo determinar que existen diferentes formas de elaborar el adobe dependiendo de la disponibilidad del material que se tenga; por ejemplo, en algunos países usan paja o materia orgánica mientras que en otros no lo hacen. Esto hace que sea difícil determinar de una manera acertada un comportamiento sísmico típico para el adobe, ya que estos componentes pueden estar influyendo positiva o negativamente en el mismo.
- Debido a la gran variedad en las características tanto físicas como geométricas de las paredes que se modelaron, se puede observar una variación de valores, tanto en la rigidez inicial como en la resistencia máxima, siendo estas en ocasiones muy pequeñas o muy grandes (ver Tabla 54).
- Las curvas resultantes obtenidas con la formulación dada por (Magenes & Calvi, 1997), casi siempre se encuentran por debajo de las correspondientes curvas originales, a excepción de dos, las mismas que son ligeramente más grandes (ver sección 7).
- Se pudo determinar que el comportamiento de la formulación de (Reyes, y otros, 2018) dada para corte, funciona mejor con la formulación de (Magenes & Calvi, 1997) en flexión, cuando estos últimos tienen valores altos en sus ensayos correspondientes.



Para la siguiente tabla se colocó abreviaturas de la formulación:

M = (Magenes & Calvi, 1997); T = (Turnšek & Čačovič, 1971);

RM = (Reyes, y otros, 2018) & (Magenes & Calvi, 1997)

RT = (Reyes, y otros, 2018) & (Turnšek & Čačovič, 1971)

Artículo	PORCENTAJE DE ERROR DE RIGIDEZ			
	M	T	RM	RT
(Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)	M	T	RM	RT
	92.64%	92.64%	92.64%	92.64%
(Varum H., Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)	M	T	RM	RT
	92.60%	92.60%	92.60%	92.60%
(Wang, Wang, & Liu, 2019)	M	T	RM	RT
	33.33%	33.33%	33.33%	33.33%
(Silveira D., y otros, 2018)	M	T	RM	RT
	56.66%	56.66%	56.66%	56.66%
(Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)	T	M	RM	RT
	43.53%	43.70%	44.22%	44.22%
DIGITALIZACIÓN A01; (Reyes, y otros, 2018)	M	T	RM	RT
	35.26%	35.26%	35.26%	35.26%
DIGITALIZACIÓN A02; (Reyes, y otros, 2018)	M	T	RM	RT
	0.84%	0.84%	0.84%	0.84%
DIGITALIZACIÓN A03; (Reyes, y otros, 2018)	M	T	RM	RT
	26.15%	26.15%	26.15%	26.15%
(Reyes, y otros, 2018) - Pared Hueca	T	RT	RM	M
	7.85%	8.28%	8.87%	8.99%

Tabla 55.- Porcentaje de error de rigidez ordenada de menor a mayor

- Se pudo observar, que el porcentaje de error en la rigidez inicial (el mismo que está expresado en la tabla 55), es menor en todas las formulaciones mientras más ancha es la pared; es decir, depende directamente del espesor. En la ciudad de Cuenca, las paredes por lo general son más anchas si las comparamos con los ensayos realizados, por lo que se tuviera resultados bastante precisos en cuanto a rigidez, si se realizaran ensayos similares a los obtenidos, modelando paredes parecidas a las que se encuentran en las viviendas de la ciudad.



Artículo	ERROR EN CARGA MAXIMA			
	M	T	RT	RN
(Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007)	M	T	RT	RN
	36,02%	78,14%	78,14%	82,46%
(Varum H., Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011)	M	RM	T	RT
	3,01%	13,91%	21,99%	21,99%
(Wang, Wang, & Liu, 2019)	M	T	RT	RM
	8,04%	19,91%	19,91%	64,10%
(Silveira D., y otros, 2018)	M	RM	T	RT
	56,42%	56,42%	80,01%	80,04%
(Tarque, Camata, Espacone, Humberto, & Blondet, 2010)	M	T	RM	RT
	34,58%	34,58%	243,34%	243,50%
DIGITALIZACIÓN A01; (Reyes, y otros, 2018)	M	T	RM	RT
	5,48%	129,61%	129,68%	129,68%
DIGITALIZACIÓN A02; (Reyes, y otros, 2018)	M	T	RM	RT
	34,62%	42,31%	42,36%	42,36%
DIGITALIZACIÓN A03; (Reyes, y otros, 2018)	RM	RT	T	M
	25,08%	25,08%	25,10%	65,59%
(Reyes, y otros, 2018) - Pared Hueca	RM	M	T	RT
	6,37%	41,73%	55,21%	55,51%

Tabla 56.- Porcentaje de error de carga máxima ordenada de menor a mayor.

- En términos generales, se puede decir que las formulaciones tienen un mejor comportamiento en cuanto al porcentaje de error para carga máxima, mostrado en la Tabla 56, cuando es menor su módulo de Elasticidad.
- De las tablas anteriores, se concluye que la formulación que mejor se adapta para la mayoría de artículos, es la de (Magenes & Calvi, 1997); sin embargo, vale recalcar también, que excepcionalmente hay casos en los que la formulación de (Reyes, y otros, 2018); (Magenes & Calvi, 1997) se adapta de mejor manera a los parámetros considerados en la Tabla 54, como es el caso de (Reyes, y otros, 2018) para pared hueca; y el de (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011); el cual, tiene una mejor aproximación para rigidez y un muy buen comportamiento también en cuanto a carga máxima. Esto, nos refuerza nuestra determinación de considerar la mejor formulación adaptada es la propuesta por (Magenes & Calvi, 1997), ya que esta se encuentra presente en ambos casos considerados idóneos. Por otra parte,



se observa también, que la formulación que ofrece los resultados menos acertados es la dada por (Reyes, y otros, 2018); (Turnšek & Čačovič, 1971).

- Sin embargo, pese a todo lo anteriormente establecido, se debe decir que ninguna formulación se adapta perfectamente a las originales y que todas presentan cierto margen de variación (porcentaje de error) con respecto a la curva original (ver Tablas 55 y 56).

Recomendaciones

- Debido a la gran cantidad de edificaciones de adobe presentes, no solo a nivel local sino también nacional, resulta muy conveniente estudiar con más detalle el comportamiento sísmico de este material, en especial en el país ya que, como se explicó en la sección 2.5, el Ecuador en toda su extensión es un país con alto riesgo sísmico, y estas estructuras poseen un gran valor, tanto en calidad de viviendas como en el de edificaciones patrimoniales, históricas y turísticas.
- Se debería realizar más ensayos de paredes a escala 1:1, de diferentes tipologías, poniendo especial atención en todo el proceso, para obtener un resultado más claro del comportamiento de cada pared y su verdadera resistencia; esto es fundamental para el ajuste futuro de los diferentes modelos.
- También se podría intentar usar alguna otra formulación, si la hubiera, que sea aplicada a algún otro material como el tapial o el bahareque, tanto en corte como en flexión, para probar si estas se ajustan de mejor manera al comportamiento dado en el adobe. Además, se podría también recopilar una mayor cantidad de ensayos y artículos, tanto para paredes llenas como para paredes con aberturas, y seguir realizando simulaciones con las formulaciones antes desarrolladas en la sección 4.4, para ver si así se refuerza lo establecido en este documento o aparecen nuevos resultados.
- Al tener esta gran variación en las características del adobe, se hace muy difícil modelar en macro elementos, debido a que la formulación cambia de acuerdo a la variación de las características de material, por lo que se podría



utilizar otro método de modelación que capte mejor la reacción de la pared, como, por ejemplo, el método de elementos finitos.

- Sin embargo, si se necesitara un estudio en este método para casas de adobe más grandes, se podría usar la formulación de (Magenes & Calvi, 1997); la cual, como se pudo apreciar, se acerca más a un ensayo experimental.



9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar A., E., Cárdenas Á., A., Quezada Z., R., Cárdenas H., X., & Sarmiento A., J. (2018). COMPARACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MECÁNICOS ENTRE EL ADOBE Y EL TAPIAL EN EL AUSTRO DEL ECUADOR. *ASRI, Arte y Sociedad revista de Investigación*, 268-279.
- Alvarez Gomez, N., & Salgado Carpio, M. (1980). *El campesino y la vivienda rural*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Amadio, C., Rinaldin, G., & Macorini, L. (2011). An equivalent frame model for nonlinear analysis of unreinforced masonry buildings under in-plane cyclic loading. *In XIV Convegno Anidid*.
- Anthoine , A., & Magonette , G. (1995). Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls. *Journal of Communication.*, <https://doi.org/10.1111/jcom.12085>.
- Ávila Guamán, L. (2019). Identificación y análisis de patrones y tendencias de intervención en las edificaciones del Centro Histórico de Cuenca. *Universidad de Cuenca*.
- Barrera Zúñiga, J., & Peñaloza Morán, J. (2018). *Análisis paramétrico de la respuesta sísmica global de una edificación de mampostería no reforzada típica del Centro Histórico de Cuenca*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Benedetti, D., & Tomažević , M. (1984). Sulla verifica sismica di costruzioni in muratura (on the seismic assessment of masonry structures). *Ingegneria Sismica*, 1, 9 - 16.
- Blondet, M., Brzev, S., Rubiños, Á., & Villa, G. (2011). *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*. Oakland, California: EERI.
- Blondet, M., Madueño, I., Torrealva, D., Villa-Garcia, G., & Ginocchio, F. (2005). Using industrial materials for the construction of safe adobe houses in seismic areas. *Proceedings of the Earth Build 2005 Conference, Sydney, Australia*.
- Blondet, M., Villa Garcia, G., & Loaiza, C. (2003). Viviendas Sismoresistentes De Tierra: Una Vision a Futuro. *Capitulo de Ingenieria Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingenieros del Peru XIV Congreso Nacional De Ingenieria Civil - Iquitos*.
- Bonilla Sánchez, D. J., & Merino Cabezas, J. G. (2017). *Estudio de las propiedades físicas de la caña guadua y su aplicación como refuerzo en la construcción de estructuras de adobe*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.



- Carr, A. (2007). *Ruamoko manual - Volume 5: Appendices*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
- Carr, A. (2007). *Theory. Ruaumoko manuals, Vol. 1*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
- Carr, A. (2007). *User Manual for the 2-Dimensional version-Ruaumoko. Ruaumoko manuals*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
- Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2008). *A STRENGTH CRITERION FOR THE FLEXURAL BEHAVIOUR OF SPANDRELS IN UN-REINFORCED MASONRY WALLS*. Beijing: The 14 World Conference on Earthquake Engineering.
- Daudon, D., Sieffert, Y., Albarracín, O., Garino Libardi, L., & Navarta, G. (2014). Adobe construction modeling by discrete element method: first methodological steps. *ELSEVIER : ScienceDirect*, 247 - 254.
- Dolce, M. (1991). Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azione. *L' Industria delle Costruzioni*, 242, 44-57.
- Fundación Terram. (2010). Sismo deja desastre ecológico en Chile. *Fundación Terram*.
- González Bernardo, E. J. (2016). *Determinación experimental de las propiedades y ángulo de fricción de la mampostería de adobe, piedra y ladrillo en edificaciones históricas peruanas*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Jiménez, J. C. (2002). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones de Cuenca mediante técnicas de*. Escuela Politécnica Nacional.
- Jiménez Pacheco, J. (2016). *Evaluación sísmica de edificios de mampostería no reforzada típicos de Barcelona: modelización y revisión de la aplicación del Método del Espectro de Capacidad*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Jimenez Pacheco, J. C., Cabrera Cajamarca, J., Sánchez Beltrán, J., & Aviles Tenorio, F. (2017). *Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto*. Cuenca: V CONGRESO REDU.
- Jurado Mogrovejo, S. C., & Vergara Peñaherrera, E. M. (2019). *Estudio de la configuración geométrica y material de viviendas de construcción vernácula en un sector de Cuenca*. Cuenca: Universidad de Cuenca.



- Kouakou, C., & Morel, J. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *ELSEVIER*, 27-34.
- Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 1787-1799.
- Liu, K., Wang, M., & Wang, Y. (2015). Seismic retrofitting of rural rammed earth buildings using externally bonded fibers. *Journal of Earthquake Engineering*.
- Liu, K., Wang, Y., & Wang, M. (2014). Experimental and numerical study of enhancing the seismic behavior of rammed earth buildings. *Journal of Earthquake Engineering*.
- Lourenzo, P., Milani, G., Trallini, A., & Zucchini, A. (2007). Analysis of masonry structures: review of and. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34:1443-1457.
- Magenes, G., & Calvi, G. (1997). In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1091-1112.
- Malo Vega, S., & Muñoz Larrea, M. (1980). *El Adobe En La Construcción De Viviendas*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Mann, W., & Müller, H. (1982). Failure of shear-stressed masonry. An enlarged theory, tests and application to shear walls. *Proc. Br. Ceram. Soc.*, 223.
- Minke. (2005). *Manual de construcción de tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Recuperado el 01 de Diciembre de 2016, de Manual de construcción de tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual: <https://casaeco.files.wordpress.com/2011/09/manual-de-construccion-en-tierragernt-minke.pdf>
- Minke, G. (2001). *Manual de Construcción en tierra* (Segunda ed.). Kassel: Fin de Siglo.
- Minke, G. (2001). *Manual de Construcción Para Viviendas Antisísmicas de Tierra*. Kassel: Forschungslabor für Experimentelles Bauen Universidad de Kassel.
- Moran Proaño, M., & Alvarez Rodriguez, O. (17 de 07 de 2012). Investigación de las vibraciones por tráfico en las construcciones patrimoniales de adobe. *Revista de la Construcción*, 39-53.
- Morán Proaño, M., & Alvarez Rodriguez, O. (2012). Investigación de las vibraciones por tráfico en las construcciones patrimoniales de adobe. *Revista de la Construcción*, 39-53.



- Morandi, P. (2006). Inconsistencies in Codified Procedures for Seismic Design of Masonry Buildings. 141.
- NEC-SE-DE-Peligro-Sismico-parte-1. (2015). *Ministerio De Desarrollo Urbano Y Vivienda*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Paulay, T., & Priestley, M. (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings.
- Reyes, J., Yamin, L., Hassan, W., Sandoval, J., Gonzales, C., & Galvis, F. (2018). Shear behavior of adobe and rammed earth walls of heritage structures. *Engineering Structures*, 526-537.
- Sarchi, L., Varum, H., Monteiro, R., & Silveira, D. (2018). Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: part II - numerical modeling and fragility assessment. *International Journal of Architectural Heritage*.
- Sayin, E., Yon, B., Calayir, Y., & Karaton, M. (2012). Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden-(Elazig) earthquake in Turkey. *ELSEVIER: Engineering Failure Analysis*, 779-791.
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., & Carvalho, J. (2015). Mechanical Properties and Behavior of Traditional Adobe Wall Panels of the Aveiro District. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, E., & Almeida, J. (2012). Mechanical Properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 36-44.
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Sarchi, L., & Monteiro, R. (2018). Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall. *International Journal of Architectural Heritage*.
- Sullivan, T., Calvi, M. G., & Priestley, M. J. (2004). Initial stiffness versus secant stiffness in displacement based design. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-6.
- Tarque, N. (2008). *SEISMIC RISK ASSESSMENT OF ADOBE DWELLINGS*. Pavia: Istituto Universitario di Studi Superiori Pavia, IUSS.
- Tarque, N., Camata, G., Espacone, E., Humberto, V., & Blondet, M. (2010). NUMERICAL MODELLING OF IN-PLANE BEHAVIOUR OF ADOBE WALLS. *8º CONGRESSO DE SISMOLOGIA E ENGENHARIA SÍSMICA*.
- Tomažević, M. (1999). Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings. *Imperial College Press*.



- Torres Ramirez, A. G. (2012). *Comportamiento sísmico del adobe confinado variable: refuerzo horizontal*. Lima : Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Turnšek, V., & Čačovič, F. (1971). Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls. *Zavod sa Raziskavo Materiala in Konstrukcij*.
- Varum , H., Figueiredo, A., Silveira, D., Martins, T., & Costa, A. (2011). Investigaciones realizadas en la Universidad de Aveiro sobre caracterización mecánica de las construcciones existentes en adobe en Portugal y propuestas de rehabilitación y refuerzo. *Informes de la Construcción*, 63, 127-142.
- Varum, H., Costa , A., Fonseca, J., & Furtado, A. (2015). Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction. *Procedia Engineering*, 714-721.
- Varum, H., Figueiredo, A., Silveira, D., Martins, T., & Costa, A. (2011). 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. *Informes de la construcción*, 63, 127-142.
- Wang, Y., Wang, M., & Liu, K. (2019). Experimental study of the Seismic Performance of Different Earth Walls and Their Seismic Retrofitting with Externally Bonded Fibers. *Journal of Earthquake Engineering*.
- Yamin, L., Phillips, C., Reyes, J., & Ruiz, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *APUNTES*, 286-303.

ANEXO A

En esta sección se encuentran las medidas de las paredes que fueron ensayadas y las consideraciones que se realizaron para el método de macro-elementos definiendo los resortes a flexión y a corte, tal como se muestra a continuación.

A.1

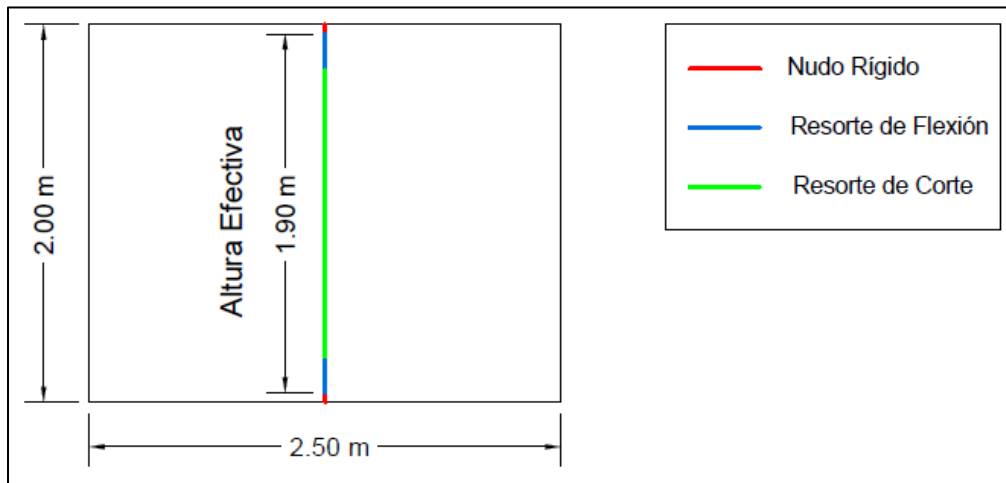


Fig. 58.- Artículo 1 - Propiedades geométricas del muro, fuente (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2007) y consideraciones para modelo de macro-elementos.

A.2

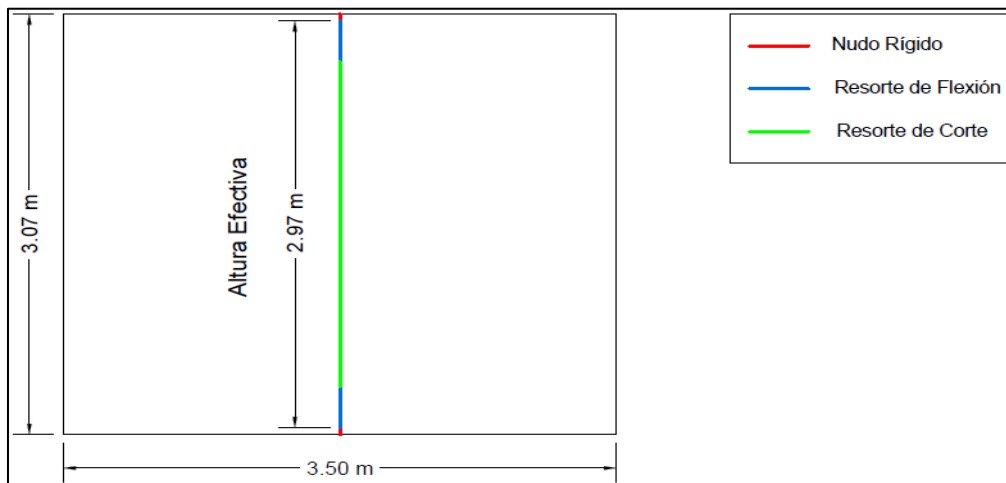


Fig. 59.- Artículo 2 - Modelo de la pared de adobe a ser ensayada, fuente (Varum H. , Figueiredo, Silveira, Martins, & Costa, 2011) y consideraciones para modelo de macro-elementos.

A.3

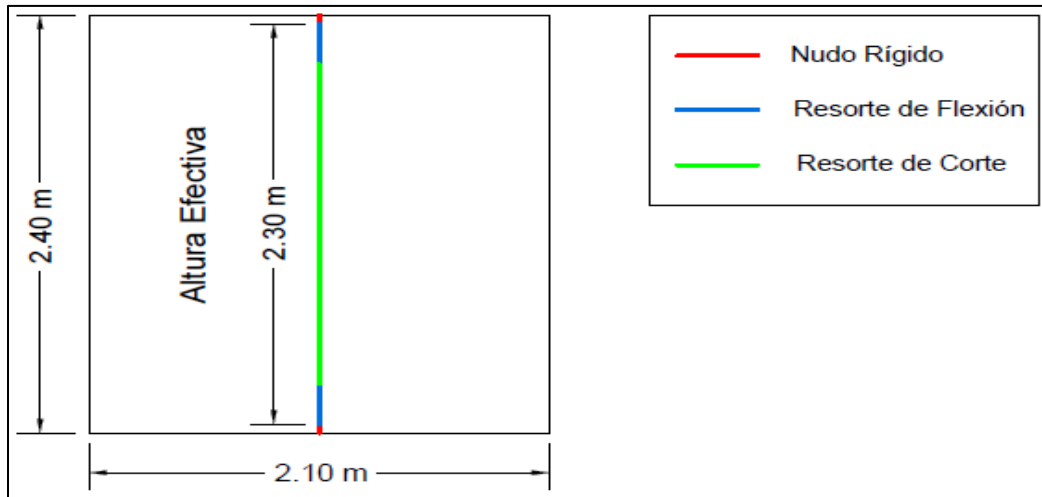


Fig. 60.- Artículo 3 - Características de la pared, fuente (Wang, Wang, & Liu, 2019) y consideraciones para modelo de macro-elementos.

A.4

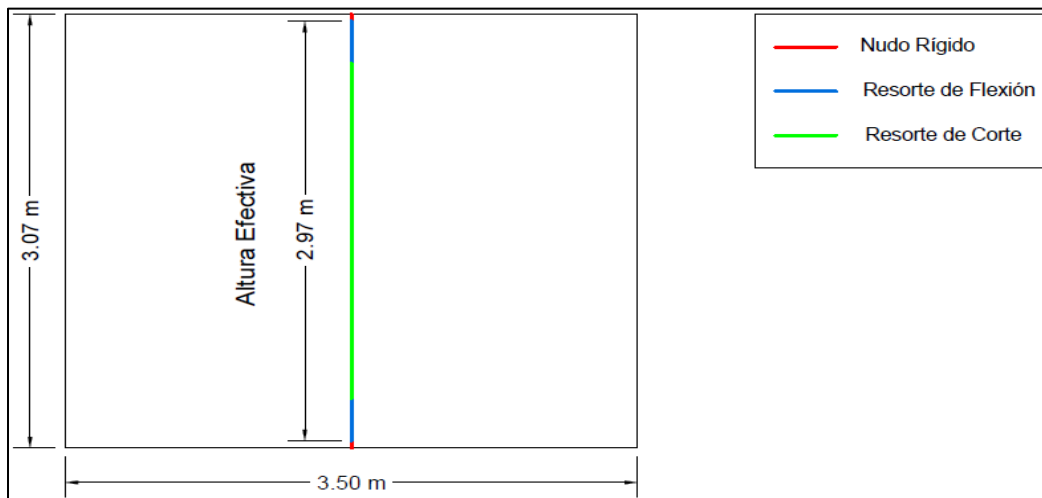


Fig. 61.- Artículo 4 - dimensiones de pared ensayada, fuente (Silveira D. , y otros, Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall, 2018) y consideraciones para modelo de macro-elementos.

A.5

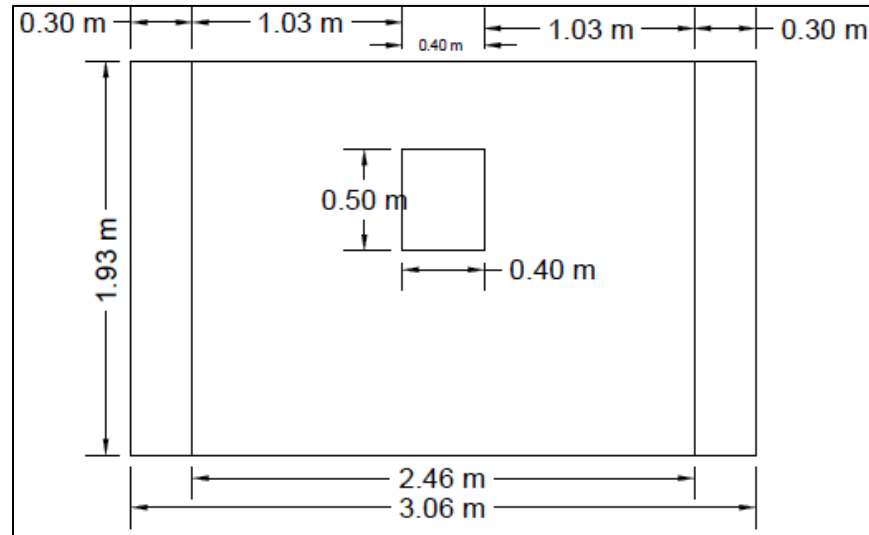


Fig. 62.- Articulo 5 - Dimensiones de pared ensayada, fuente (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-García, & Ginocchio, 2005)

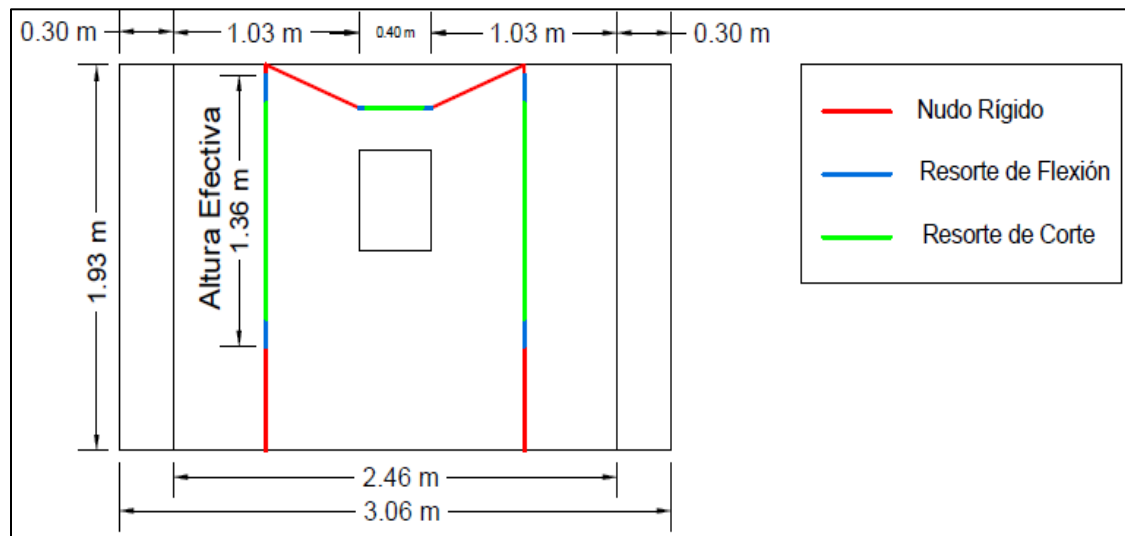


Fig. 63.- Articulo 5 - Dimensiones de pared ensayada, fuente (Blondet, Madueño, Torrealva, Villa-García, & Ginocchio, 2005) y consideraciones para modelo de macro-elementos.

A.6

A.6.1

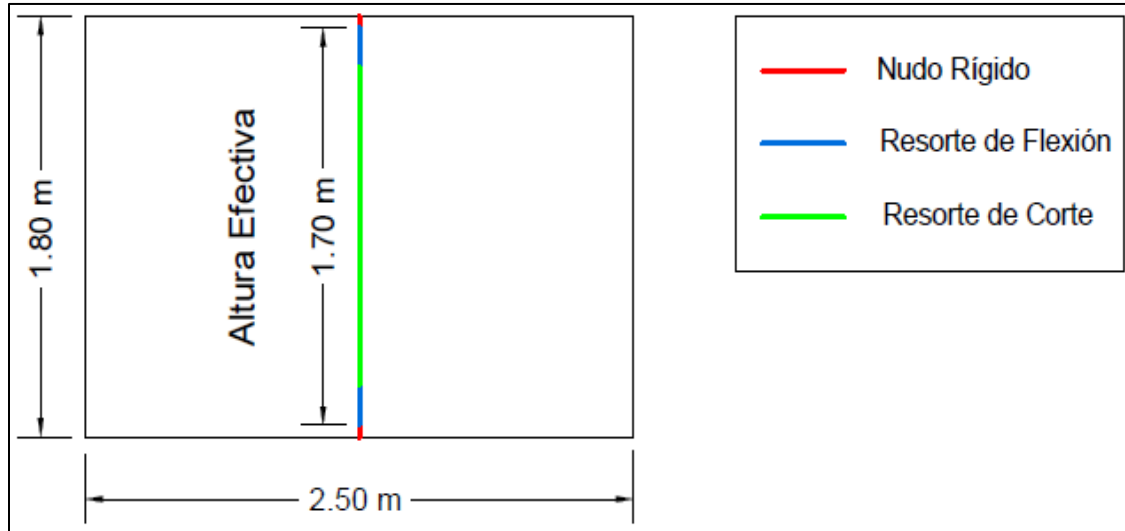


Fig. 64.- Artículo 6 - Esquema de la pared llena, fuente (Reyes, y otros, 2018) y consideraciones para modelo de macro-elementos.

A.6.2

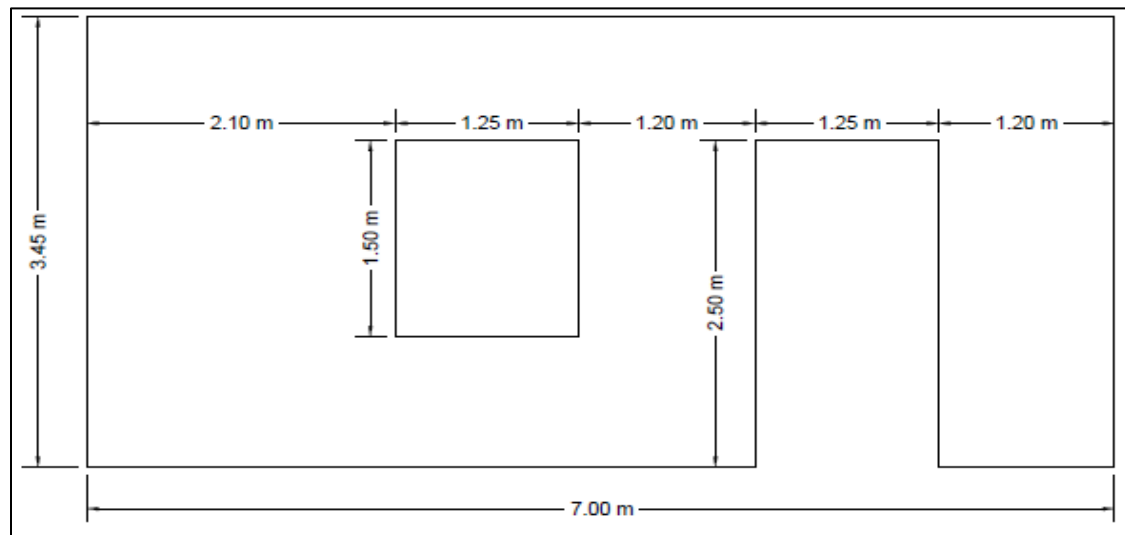


Fig. 65.- Artículo 6 - Geometría de pared hueca, fuente (Reyes, y otros, 2018)

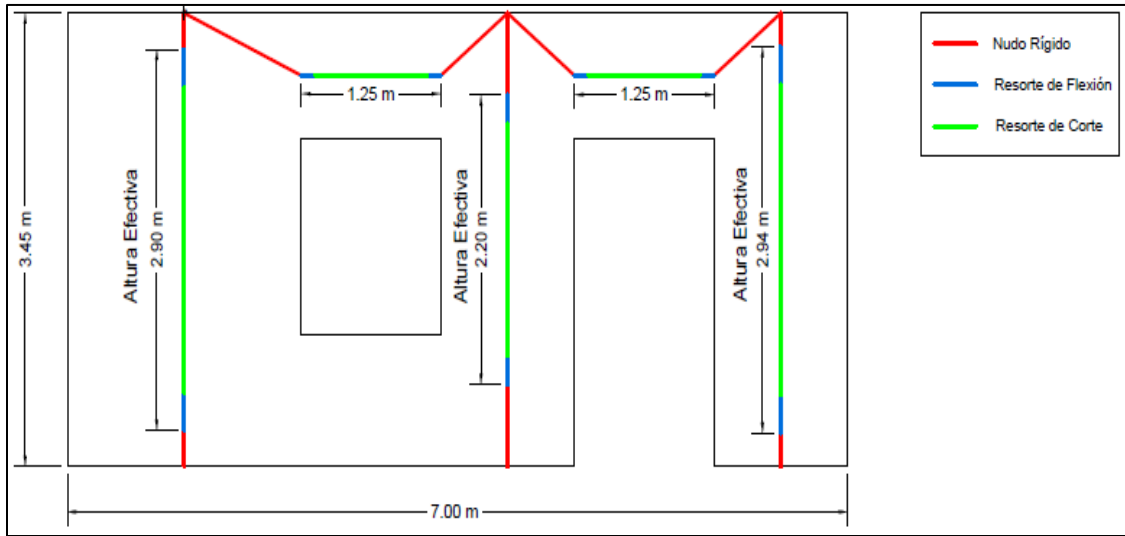


Fig. 66.- Artículo 6 - Esquema de la pared hueca, fuente (Reyes, y otros, 2018) y consideraciones para modelo de macro-elementos.