



**Universidad
Europea** MADRID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

CURSO ACADÉMICO 2024 – 2025

ANÁLISIS DE CONSTRUCCIONES DE ADOBE Y TAPIALES ESPAÑOLAS ANTE LA ACCIÓN DEL SISMO

Autor: Paúl Anthony Barbarán Vilela

Dirigida por:

Raúl Rubén Rodríguez Escribano

Directora:

María José Rodríguez Largacha

Madrid, 2025

AGRADECIMIENTOS:

Expreso mi sincero agradecimiento a la guía, paciencia y conocimientos compartidos por los docentes, compañeros y amistades durante este proceso, por haberme impulsado a explorar este tema, descubriendo la resiliencia que poseen este tipo de construcciones, un tema que une tanto tradición como seguridad estructural. Finalmente, a las comunidades y profesionales que preservan estas técnicas constructivas tradicionales en España, quienes fueron de gran ayuda como fuente de inspiración y de consultoría para este trabajo de investigación.

RESUMEN

La presente investigación analiza el comportamiento sísmico de construcciones de tierra en España con el objetivo de evaluar su vulnerabilidad ante sismos, de clasificar sus daños y proponer técnicas de intervención para preservar este patrimonio arquitectónico vernáculo que tiene gran presencia e importancia en España. Se ha abordado el contexto sísmico peninsular donde, pese a una actividad sísmica moderada al sur peninsular, junto a la fragilidad intrínseca de las estructuras de tierra, requiere de estrategias específicas para la mitigación de riesgos. El estudio revisa las tipologías constructivas de tierra en España como el tapial, el adobe, entramados, BTC, etc. Además de sus propiedades mecánicas y patologías recurrentes, abordando desde los causados por degradación material (agentes atmosféricos, biológicos o antrópicos), hasta los estructurales (fisuras, concentración de tensiones o deformaciones); para mejorar la comprensión de este contexto se examinaron casos pertinentes y, a su vez, las diversas técnicas de refuerzo (geomallas, maderas de confinamiento, vigas de coronación) para mejorar la capacidad sísmica de estas tipologías. Ante esta situación, la metodología llevada a cabo integra la evaluación cualitativa de daños pre y post sísmicos, proponiendo una escala de clasificación de daños y criterios de intervención adaptados a cada escenario. Esta información, como resultado busca generar una guía práctica para entidades estatales, cuerpos de seguridad civil, y público en general, facilitando la identificación de riesgos y en base a esto priorizar las acciones bajo contextos de mantenimientos periódicos y/o post – terremoto. Por último, se pone de manifiesto, dentro del apartado de conclusiones y líneas de investigación futura, la necesidad de profundizar en normativas específicas y estrategias de refuerzo estructural adaptadas a la arquitectura de tierra, la indagación de modelaciones numéricas y ensayos experimentales para validar las técnicas propuestas.

Palabras clave: *Adobe, tapial, vulnerabilidad sísmica, patologías constructivas, refuerzo estructural, patrimonio arquitectónico.*

ABSTRACT

This research analyzes the seismic behavior of earthen constructions in Spain, aiming to evaluate their vulnerability to earthquakes, classify their damage, and propose intervention techniques to preserve this vernacular architectural heritage, which holds significant presence and importance in Spain. This study addresses the seismic context of the Iberian Peninsula, where, despite the moderate seismic activity in the southern region and the intrinsic fragility of earthen structures, specific risk mitigation strategies are required. The study reviews the earthen construction typologies in Spain, such as rammed earth (tapial), adobe, timber frames and compressed earth blocks (BTC). Along with their mechanical properties and recurring pathologies. These include issues caused by material degradation (atmospheric, biological, or anthropogenic agents) as well as structural ones (cracks, stress concentrations, or deformations). To enhance the understanding of this context, relevant case studies were examined, along with various reinforcement techniques (geogrids, confinement timber, crown beams) to improve the seismic capacity of these typologies. Given this situation, the methodology integrates a qualitative assessment of pre- and post-seismic damage, proposing a damage classification scale and intervention criteria tailored to each scenario. As a result, this information seeks to generate a practical guide for state entities, civil protection agencies, and the general public, facilitating risk identification and, based on this, prioritizing actions under the contexts of periodic maintenance and/or post-earthquake scenarios. Finally, within the conclusions and future research lines, the study highlights the need to delve into specific regulations and structural reinforcement strategies adapted to earthen architecture, as well as the exploration of numerical modeling and experimental testing to validate the proposed techniques.

Keywords: *Adobe, rammed earth (tapial), seismic vulnerability, construction pathologies, structural reinforcement, architectural heritage."*

INDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	OBJETIVO GENERAL	2
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.	ESTADO DEL ARTE	3
2.1	SISMICIDAD EN ESPAÑA	3
2.1.1	CONTEXTO GENERAL	3
2.1.2	PROPIEDADES SISMOTECTÓNICAS DE ESPAÑA	4
2.1.3	RIESGO SÍSMICO EN ESPAÑA	8
2.2	ARQUITECTURA DE TIERRA EN ZONAS DE RIESGO SÍSMICO EN ESPAÑA	10
2.2.1	CONTEXTO GENERAL Y PRESENCIA EN LA PENINSULA IBÉRICA	10
2.2.2	EDIFICACIONES DE TIERRA EN ZONAS SÍSMICAS DE ESPAÑA	15
2.2.3	TIPOLOGÍAS Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS	16
2.2.3.1	LA TAPIA	17
2.2.3.2	EL ADOBE	19
2.2.3.3	EL COB	20
2.2.3.4	BLOQUES DE TIERRA COMPRIMITA – BTC	21
2.2.3.5	SIREWALL	22
2.2.3.6	EL TAPIALBLOCK	23
2.2.3.7	PANELES DE TIERRA PREFABRICADOS	28
2.2.3.8	SUPERADOBE	28
2.2.4	EJEMPLOS TÍPICOS EN ESPAÑA	29
2.2.4.1	CASA TAPIAL EN AYERBE – HUESCA	29
2.2.4.2	PISCINA MUNICIPAL DE TORO – ZAMORA	31
2.2.4.3	ESCUELA SANTA EULALIA RONCANA – BARCELONA	32
2.2.4.4	VIVIENDAS DE USO RESIDENCIAL	32
2.3	PATOLOGÍAS CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE TIERRA EN ESPAÑA	34
2.3.1	FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN MATERIAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA	34
2.3.1.1	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ATMOSFÉRICOS	34
2.3.1.2	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES BIOLÓGICOS	36
2.3.1.3	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ANTRÓPICOS	37
2.3.2	FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN ESTRUCTURAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA	38
2.3.2.1	LESIONES ESTRUCTURALES POR MOTIVOS DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES	39
2.3.2.2	LESIONES ESTRUCTURALES POR DEFORMACIONES EXCESIVAS	40
2.3.2.3	LESIONES ESTRUCTURALES POR ACCIONES DEL ENTORNO DEL EDIFICIO	40
2.4	EFFECTO DE LOS SISMOS EN EDIFICACIONES DE TIERRA	41
2.5	PROPIEDADES DE LA TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	45
2.5.1	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	45
2.6	TÉCNICAS PARA MEJORAR EL COMPORTAMIENTO DE ESTE TIPO DE CONSTRUCCIONES ANTE LA ACCIÓN DE SISMOS	49
2.6.1	MORTERO CON MALLA ELECTROSOLDADA	51
2.6.2	ENMALLADOS DE SOGAS SINTÉTICAS O SISTEMA DE DRIZAS	55
2.6.3	REFUERZO CON GEOMALLA	60
2.6.4	REFUERZO CON MADERAS DE CONFINAMIENTO	62
2.6.5	REFUERZO CON INTRODUCCIÓN DE VIGAS DE CORONACIÓN	63
3.	GAP DE CONOCIMIENTO	65
3.1	SITUACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN ESPAÑA FRENTE AL SISMO	65
3.1.1	SISMICIDAD EN LA PENÍNSULA IBÉRICA	65
3.1.2	INTEGRIDAD ESTRUCTURAL Y VULNERABILIDAD SÍSMICA	66

3.1.3	RIESGO SÍSMICO	68
3.1.4	DESAFÍOS DE LAS EDIFICACIONES DE TIERRA ANTE LOS SISMOS EN ESPAÑA	71
3.2	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	74
4.	METODOLOGÍA	75
4.1	PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	75
4.2	METODOLOGÍA DEL TRABAJO	75
5.	EVALUACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES DE TIERRA ANTE LOS SISMOS	77
5.1	PATOLOGÍAS Y DAÑOS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	77
5.1.1	PATOLOGÍAS Y DAÑOS RECURRENTES PREVIOS A UN EVENTO SÍSMICO	81
5.1.1.1	DEGRADACIÓN MATERIAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA	82
5.1.1.2	DEGRADACIÓN ESTRUCTURAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA	92
5.1.2	PATOLOGÍAS Y DAÑOS RECURRENTES POSTERIOR A UN EVENTO SÍSMICO	101
5.2	CRITERIOS PARA VALORAR LOS RIESGOS EN FUNCIÓN AL DAÑO	112
5.3	POSIBLES EFECTOS TRAS UN TERREMOTO Y NECESIDADES DE INTERVENCIÓN	114
5.3.1	METODOLOGÍA DEL PLANTEAMIENTO	117
6.	GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO CAUSADO POR EL SISMO	118
7.	CONCLUSIONES	121
7.1	CONCLUSIONES	121
7.2	APORTE DE SOSTENIBILIDAD	122
8.	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO E INVESTIGACIÓN	125
9.	BIBLIOGRAFÍA	126
10.	ANEXOS	132
10.1	ANEXO 01	132
10.2	ANEXO 02	132
10.3	ANEXO 03	133
10.4	ANEXO 04	133
10.5	ANEXO 05	134
10.6	ANEXO 06	134
10.7	ANEXO 07	135
10.8	ANEXO 08	136
10.9	ANEXO 09	138
10.10	ANEXO 10	140
10.11	ANEXO 11	141
10.12	ANEXO 12	145
10.13	ANEXO 13	149
10.14	ANEXO 14	151

INDICE DE IMAGENES

FIGURA 1.	MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ESPAÑA E INTERACCIÓN CON LAS PLACAS TECTÓNICAS.	3
FIGURA 2.	REGISTRO DE LA SISMICIDAD EN LA PENÍNSULA IBÉRICA Y ZONAS PRÓXIMAS.	3
FIGURA 3.	MAPA GEOGRÁFICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y CORTE TOPOGRÁFICO NORTE – SUR.	4
FIGURA 4.	(A.) EJEMPLO DE REGISTROS Y LECTURA DE UN SISMOGRAMA IDENTIFICANDO DE LAS ONDAS “P” LOS PULSOS HACIA ARRIBA (COMPRESIÓN) Y LOS PULSOS HACIA ABAJO (DILATACIÓN). (B.) SEPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE COMPRESIÓN Y DILATACIÓN SEPARADOS POR PLANOS NODALES Y REPRESENTACIÓN FINAL DEL MECANISMO FOCAL.	5
FIGURA 5.	MECANISMOS FOCALES Y SUS TIPOS DE FALLAS (CONSIDERANDO UN PLANO DE LOS DOS POSIBLES).	6

FIGURA 6.	MAPA DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS CON TIERRA DENTRO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA.....	11
FIGURA 7.	MAPA DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS CON TIERRA Y SUS VARIANTES DENTRO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. TIERRA EN MUROS MONOLÍTICOS (LILA), MUROS DE PIEZAS (VERDE) Y ENTRAMADOS (ROJO).	12
FIGURA 8.	MAPA DE LAS TÉCNICAS VERNÁCULAS DE CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.	14
FIGURA 9.	MAPA DE LOCALIZACIONES DE EDIFICACIONES ELABORADAS CON BLOQUES DE TIERRA EN ESPAÑA.	15
FIGURA 10.	MAPA DE INTENSIDAD SÍSMICA Y TÉCNICAS VERNÁCULAS DE CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.	16
FIGURA 11.	(A.) MÉTODO TRADICIONAL DE CONSTRUCCIÓN DE UN TAPIAL DE FORMA MANUAL. (B.) CONSTRUCCIÓN DE UN MURO TAPIAL CON UNA HERRAMIENTA DE APISONADO MECÁNICO.	17
FIGURA 12.	SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN DE TAPIALES CON ESTEOS.....	18
FIGURA 13.	ESQUEMAS DE LAS VARIANTES DE LA TÉCNICA DEL TAPIAL AMPLIAMENTE UTILIZADOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.	18
FIGURA 14.	FABRICACIÓN TRADICIONAL DE LAS PIEZAS DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE.....	20
FIGURA 15.	EJEMPLO DE UNA CONSTRUCCIÓN DE TIERRA EMPLEANDO LA TÉCNICA COB. (B.) UNA CASA DE INGLATERRA CONSTRUIDA CON COB.....	20
FIGURA 16.	EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS CON BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC).	21
FIGURA 17.	EJEMPLO DE BTC MACHIHEMBROS CON ARMADURA DE ACERO COMO REFUERZO ANTISÍSMICO.....	22
FIGURA 18.	CORTE TRANSVERSAL DE UN MURO TÍPICO DE SIREWALL.	22
FIGURA 19.	PROYECTOS EJECUTADOS CON SISTEMA SIREWALL. (A.) CENTRO DE BIENVENIDA DEL SURESTE DE WYOMING, EE.UU. (B.) SEDE CENTRAL DE Telenor, Islamabad, 2018. (C.) MUSEO BRINTON, EE.UU. (D.) HOTEL BOUTIQUE DE NUEVA DELHI.	23
FIGURA 20.	ESQUEMA DE EJECUCIÓN Y COLOCACIÓN DE LOS MUROS TAPIALBLOCK.....	24
FIGURA 21.	(A.) MONTACARGAS PARA MANIPULACIÓN DE BLOQUES PREFABRICADOS DE GRAN FORMATO. (B.) GRÚA ESPECIALIZADA PARA MANIPULACIÓN DE BLOQUES PREFABRICADOS DE MEDIANO – PEQUEÑO FORMATO.	24
FIGURA 22.	CROQUIS DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIALBLOCK DEL TIPO 10/20/10 A BASE DE DOBLE MURO ESTRUCTURAL.....	25
FIGURA 23.	(A.) DETALLE DE LA UNIÓN ENTRE EL FORJADO Y EL MURO DE TIERRA ESTRUCTURAL. (B.) DIFERENCIA ENTRE UN ACABADO DE FABRICACIÓN DEL MURO Y LA SUPERFICIE DE CORTE MECANIZADO DEL MURO.	26
FIGURA 24.	DIFERENTES TIPOS DE DINTELES QUE SE PUEDEN CONSIDERAR PARA EL TAPIALBLOCK.	27
FIGURA 25.	PROCEDIMIENTO DE COLOCACIÓN DE LOS PANELES PREFABRICADOS DE TIERRA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO: CENTRO DE HIERBAS PARA RICOLA EN LAUFEN – SUIZA.).....	28
FIGURA 26.	(A.) CONSTRUCCIÓN BÁSICA DE UNA VIVIENDA EJECUTADA CON TÉCNICA DEL SUPERADOBE. (B.) EJEMPLO DE UNA VIVIENDA ELABORADA CON TÉCNICA DE SUPERADOBE CON RESULTADOS MÁS ESTÉTICOS.	29
FIGURA 27.	VIVIENDA ELABORADA CON TAPIAL EN AYERBE, HUESCA. GANADORA DEL PREMIO INTERNACIONAL DE ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA EN TIERRA CRUDA – TERRA AWARD 2016.	30
FIGURA 28.	(A.) ELEMENTOS ESTRUCTURALES HORIZONTALES DE MADERA QUE CONFORMAN LA CUBIERTA. (B.) ENCOFRADO DE MADERA DEL TAPIAL Y LA COLOCACIÓN DE REFUERZOS VERTICALES DE MADERA Y METÁLICOS EN LOS MUROS.	30
FIGURA 29.	PLANTA ARQUITECTÓNICA DEL EDIFICIO DE LA PISCINA MUNICIPAL DE TORO EN ZAMORA CON LOS MUROS PERIMETRALES DE TIERRA APISONADA O TAPIALES.	31
FIGURA 30.	PORTE EXTERIOR E INTERIOR DE LA PISCINA CLIMATIZADA DE TORO – ZAMORA.	31
FIGURA 31.	CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN DE TIERRA DE LA ESCUELA STA EULALIA RONCANA – BARCELONA.	32
FIGURA 32.	(A.) VIVIENDA HECHA CON TAPIA DE YESO, RINCÓN DE ADEMÚZ. (B.) CONSTRUCCIÓN DE TAPIA CON BRENCAS DE YESO, TERUEL. (C.) CONSTRUCCIÓN ELABORADA DE ENTRAMADOS, BURGOS. (D.) VIVIENDA CONSTRUIDA CON ENTRAMADOS DE MADERA, CÁCERES. (E.) EDIFICIO DE ADOBE CON CANTONERAS DE LADRILLO, SEGOVIA. (F.) FÁBRICA CON HILADAS ALTERNAS DE ADOBE Y LAJAS DE PIEDRA Y MACHONES DE PIEDRA EN LAS ESQUINAS, BURGOS.....	33
FIGURA 33.	MEDIA DE LOS FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN MATERIAL EXISTENTES.....	34
FIGURA 34.	FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN ESTRUCTURAL Y MECANISMOS DE FALLO ESTRUCTURAL.....	39
FIGURA 35.	ZONAS CON MAYOR PRESENCIA DE GRANDES TERREMOTOS A LO LARGO DE LA HISTORIA.	42
FIGURA 36.	COLAPSO DE UNA VIVIENDA DE ADOBE TRAS EL TERREMOTO DE PIZCO, PERÚ EN 2007.	43
FIGURA 37.	COLAPSO TOTAL DE MUROS DE ADOBE. TERREMOTO EN EL SALVADOR EN FEBRERO DEL 2001.	43
FIGURA 38.	UNA VIVIENDA DE ADOBE DAÑADA POR EL TERREMOTO DE MARRUECOS EN 2023.....	44
FIGURA 39.	ESCOMBROS DE CASAS DE MATERIALES TÉRREOS OCASIONADAS POR EL TERREMOTO SE SETIEMBRE 2023 EN LA PROVINCIA DE AL HAOUZ – MARRUECOS.	44
FIGURA 40.	DAÑOS MATERIALES EN EDIFICACIONES EN ZONAS AFECTADAS POR EL TERREMOTO DE LORCA – 2011.	45
FIGURA 41.	REFORZAMIENTO DE MUROS PORTANTES Y SUS CARACTERÍSTICAS EN UNA ADECUACIÓN SÍSMICA. (1A) SISTEMA CET SISTEMA NORMA PERÚ. (1B) CAÑAS INTERNAS, BAMBÚ VERTICAL. (1C) MORTERO ARMADO CON ALAMBRE DE PÚAS. (2A) CONFINAMIENTO DE MADERA CON CORREAS DE NYLON O FIBRA DE VIDRIO. (2B) MUROS TEXTILES CON CAÑAS. (2C) CORREAS DE	

NYLON. (3A) NYLON Y BARRAS DE ACERO. (3B) MALLAS ELECTROSOLDADAS Y/O GEOMALLAS. (3C) BANDAS DE MADERA O BANDAS DE HORMIGÓN.	50
FIGURA 42. PROCEDIMIENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL REFUERZO ESTRUCTURAL CON MALLAS DE ACERO DE LOS MUROS DE ADOBE DE LAS VIVIENDAS.	52
FIGURA 43. INSTALACIÓN DE ACELERÓGRAFOS CON SISTEMA ANDROID EN LAS VIVIENDAS.	52
FIGURA 44. MODELO TRIDIMENSIONAL DE LA VIVIENDA PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS DE ADOBE PREVIO Y POSTERIOR A LA INCORPORACIÓN DEL REFUERZO.	53
FIGURA 45. (A.) ENSAYO DINÁMICO DE MUROS EN FORMA DE “U”. (B.) COLOCACIÓN DE MALLA ELECTROSOLDADA EN UN MURO DE ADOBE TRADICIONAL.	54
FIGURA 46. VIVIENDAS ELABORADAS DE ADOBE COLAPSADAS POR EL TERREMOTO EN AREQUIPA EN JUNIO DE 2001.	54
FIGURA 47. (A) VISTA FRONTAL DE LA IGLESIA DE ATACAMA. (B) DAÑOS EN SUS MUROS DE ADOBE. (C) VISITA GUIADA Y TALLER PRÁCTICO PARA LOS TRABAJADORES.	55
FIGURA 48. ENMALLADO DE SOGAS SINTÉTICAS DE LOS MUROS DE ADOBE, INTERSECCIÓN Y ANCLAJES DE LAS SOGAS.	56
FIGURA 49. MODELO DE VIVIENDA CONSTRUIDA CON MAMPOSTERÍA DE ADOBE PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO PARA SOMETERLA ANTE CARGAS SÍSMICAS.	57
FIGURA 50. ESQUEMAS DE REFUERZO DEL ENMALLADO Y LA DISPOSICIÓN DE LAS SOGAS EN LOS MUROS DE ADOBE, Y SU COLOCACIÓN Y TENSADO DE LAS SOGAS DE REFUERZO.	57
FIGURA 51. DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN LDVT UBICADOS EN LA ESTRUCTURA COLOCADA SOBRE LA MESA VIBRATORIA.	58
FIGURA 52. PUNTOS DE MEDICIÓN QUE ARROJARON LOS VALORES MÁXIMOS DE EN CUANTO A FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS REGISTRADOS, Y RESULTADO DE LOS DAÑOS EN LA VIVIENDA TRAS LA SIMULACIÓN.	58
FIGURA 53. (A) ELABORACIÓN DE MODELO COMPUTACIONAL DE LA VIVIENDA EN EL SOFTWARE ABACUS. (B) INSERCIÓN EN EL MODELO DE LOS ELEMENTOS DE REFUERZO. (A) DEFORMACIÓN UNITARIAS PLÁSTICAS CON TIEMPO 2.2 s. (D) DEFORMACIÓN UNITARIAS PLÁSTICAS CON TIEMPO 4.17 s.	59
FIGURA 54. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MUROS A ENSAYARSE EN LABORATORIO Y LA GEOMALLA DE ALTA DENSIDAD UTILIZADA, CON ABERTURA MÁXIMA DE 5 CM.	61
FIGURA 55. DISPOSICIÓN DE LA GEOMALLA SOBRE EL MURO DE ADOBE A ENSAYAR Y ENFOCADO FINAL DEL MURO.	61
FIGURA 56. CONSTRUCCIÓN DE UNA VIGA DE CORONACIÓN O COLLAR DE HORMIGÓN ARMADO SOBRE UN MURO DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE DE UNA VIVIENDA EN EL SALVADOR (2002).	63
FIGURA 57. (A) VIGA DE CORONACIÓN SENCILLA DE MADERA CON VIGAS DE CARGA. (B) VIGA DE CORONACIÓN DOBLE DE MADERA CON VIGAS DE CARGA.	63
FIGURA 58. ENSAYO DE LABORATORIO DE UNA VIVIENDA DE ADOBE EVALUANDO SU COMPORTAMIENTO SÍSMICO SIN REFORZAR (IZQUIERDA). ENSAYO DE LABORATORIO DE UNA VIVIENDA DE ADOBE EVALUANDO SU COMPORTAMIENTO SÍSMICO CON REFUERZO INTERIOR DE CAÑAS Y VIGA COLLAR (DERECHA).	64
FIGURA 59. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE ESPAÑA 2002 (EN VALORES DE INTENSIDAD, ESCALA EMS – 98.	65
FIGURA 60. MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ESPAÑA 2015 (EN VALORES DE ACELERACIÓN).	66
FIGURA 61. DEFICIENCIAS ESTRUCTURALES TÍPICAS EN EDIFICIOS DE TIERRA DE DOS NIVELES	67
FIGURA 62. PRESENCIA DE ARQUITECTURA DE TIERRA EN EL MUNDO.	68
FIGURA 63. MAPA DE PELIGRO SÍSMICO EN EL MUNDO.	68
FIGURA 64. PELIGRO SÍSMICO EN EUROPA (IZQUIERDA). RIESGO SÍSMICO EN EUROPA (DERECHA).	69
FIGURA 65. NÚMERO DE NORMATIVAS VIGENTES PARA CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN DIFERENTES PAÍSES.	71
FIGURA 66. GRÁFICA DEL PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURACIÓN DEL INFORME DE TRABAJO DE FIN DE MÁSTER.	75
FIGURA 67. CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA CON MAMPOSTERÍA DE TIERRA EN VIVIENDAS DE TIERRA EN ESPAÑA CONSIDERADAS PARA EL SISTEMA DE EVALUACIÓN.	78
FIGURA 68. CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA CON MUROS DE TAPIAL EN VIVIENDAS DE TIERRA EN ESPAÑA CONSIDERADAS PARA EL SISTEMA DE EVALUACIÓN.	79
FIGURA 69. CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DE MUROS MIXTOS DE TIERRA Y MADERA EN VIVIENDAS DE TIERRA EN ESPAÑA CONSIDERADAS PARA EL SISTEMA DE EVALUACIÓN.	79
FIGURA 70. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA DESCRIPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE VIVIENDAS DE TIERRA	80
FIGURA 71. ESQUEMA DE PATOLOGÍAS EN VIVIENDAS DE TIERRA RECURRENTES PREVIO A EFECTOS DE UN SISMO.	81
FIGURA 72. REPORTE FOTOGRÁFICO DEL ENSAYO DE UNA VIVIENDA DE ADOBE EXPUESTA A SIMULACIONES DE CARGAS SÍSMICAS EN LABORATORIO.	103
FIGURA 73. SEGUNDO PROTOTIPO DE VIVIENDA ENSAYADA EN EL LABORATORIO SOMETIDA A CARGAS SÍSMICAS.	106

FIGURA 74.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA SIN REFORZAMIENTO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA V (EPGA = 0.32).	107
FIGURA 75.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA SIN REFORZAMIENTO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA VI (EPGA = 0.40).	107
FIGURA 76.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA III (EPGA = 0.23).	108
FIGURA 77.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA IV (EPGA = 0.28).	108
FIGURA 78.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA V (EPGA = 0.32).	109
FIGURA 79.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA VI (EPGA = 0.40).	109
FIGURA 80.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA VII (EPGA = 0.44).	110
FIGURA 81.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EXPUESTA ANTE EL NIVEL DE PRUEBA VIII (EPGA = 0.48).	110
FIGURA 82.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA EXPUESTA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO ANTE EL NIVEL DE PRUEBA IX (EPGA = 0.54).	111
FIGURA 83.	RESULTADO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA EXPUESTA CON REFORZAMIENTO DE CORREAS Y VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO ANTE EL NIVEL DE PRUEBA X (EPGA = 0.58).	111
FIGURA 84.	TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN PROPUESTAS EN FUNCIÓN A LOS CRITERIOS DE VALORACIÓN DE DAÑOS PROPUESTA EN EL APARTADO 5.2 DEL PRESENTE DOCUMENTO.	115
FIGURA 85.	EJEMPLIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS QUE PUEDEN SER CONSIDERADAS DENTRO DE LAS INTERVENCIONES PLANTEADAS EN LA FIGURA 84 DEL PRESENTE DOCUMENTO.	116
FIGURA 86.	ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO GLOBAL DE APLICACIONES PARA LA EVALUACIÓN DE UNA VIVIENDA DE TIERRA DESPUÉS DE UN EVENTO SÍSMICO.	117
FIGURA 87.	VINCULACIONES DE LOS RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).	122

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.	DESCRIPCIÓN SISMOTECTÓNICA DE ESPAÑA POR ZONAS GEOGRÁFICAS.	6
TABLA 2.	NÚMERO DE TERREMOTOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA PARA 2010 – 2019 LOCALIZADOS POR LA RED SÍSMICA NACIONAL.	9
TABLA 3.	ESTIMACIÓN DE LA OCURRENCIA MEDIA DE TERREMOTOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.	9
TABLA 4.	RELACIÓN ENTRE UBICACIÓN DE TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE TIERRA Y LOS FACTORES DE INTENSIDAD SÍSMICA PRESENTES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.	16
TABLA 5.	RESULTADO DEL ANÁLISIS DEL ESTUDIO “ARQUITECTURA TRADICIONAL DE TIERRA EN ESPAÑA: CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA, FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN Y DINÁMICA DE INTERVENCIÓN”.	38
TABLA 6.	COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE DIFERENTES MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN.	47
TABLA 7.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (N/MM ²), Y DENSIDAD (KG/M ³) DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES CONSTRUIDOS A BASE DE TIERRA.	48
TABLA 8.	DIFERENCIA ENTRE LAS RESISTENCIAS AL FUEGO DE ELEMENTOS CONSTRUIDOS DE DIFERENTES MATERIALES.	48
TABLA 9.	DIFERENCIAS DE CONDUCTIVIDAD ENTRE DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES VERNÁCULAS.	48
TABLA 10.	VALORES PROMEDIO DE DENSIDAD DE LOS MATERIALES EMPLEADOS PARA LOS ESPECÍMENES DISPUESTOS A LOS ENSAYOS DE LABORATORIO A COMPRESIÓN, TRACCIÓN Y COMPRESIÓN DIAGONAL.	49
TABLA 11.	VALORES PROMEDIO DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS.	49
TABLA 12.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y COMPARACIÓN ENTRE MODELO COMPUTACIONAL Y EL ENSAYO DE LABORATORIO EN CUANTO A SUS MÁXIMOS DESPLAZAMIENTOS ENTRE SUS PUNTOS DE CONTROL.	60
TABLA 13.	DEFINICIÓN DE UN PELIGRO SÍSMICO Y UN RIESGO SÍSMICO, APLICADO A LAS ZONAS MÁS EXPUESTAS DENTRO DE LA REGIÓN EUROPEA Y A LA PENÍNSULA IBÉRICA.	69

TABLA 14.	LAS NORMATIVAS Y REGLAMENTOS INTERNACIONALES Y EL CONTENIDO QUE ABARCA CADA UNO.....	72
TABLA 15.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ATMOSFÉRICOS – MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN LA BASE DE LOS MUROS DE TIERRA EN VIVIENDAS.....	82
TABLA 16.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ATMOSFÉRICOS – MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN LA CORONACIÓN DE LOS MUROS DE TIERRA EN VIVIENDAS.....	84
TABLA 17.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ATMOSFÉRICOS – MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN LA CORONACIÓN DE LOS MUROS DE TIERRA EN VIVIENDAS.....	85
TABLA 18.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES BIOLÓGICOS – LESIONES DERIVADAS DE LA ACCIÓN DE ANIMALES.....	86
TABLA 19.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES BIOLÓGICOS – LESIONES DERIVADAS DE LA ACCIÓN DE LA VEGETACIÓN.	87
TABLA 20.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ANTRÓPICOS – LESIONES PRODUCIDAS POR ACTOS VANDÁLICOS.	88
TABLA 21.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ANTRÓPICOS – LESIONES PRODUCIDAS POR UN INADECUADO MANTENIMIENTO DE LAS VIVIENDAS.	89
TABLA 22.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ANTRÓPICOS – LESIONES PRODUCIDAS POR UN INADECUADO MANTENIMIENTO DE LAS VIVIENDAS.	90
TABLA 23.	LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ANTRÓPICOS – LESIONES PRODUCIDAS POR LA ACCIÓN DEL FUEGO.....	92
TABLA 24.	LESIONES PRODUCIDAS POR ERRORES EN LA CONCEPCIÓN DEL EDIFICIO – LESIONES PRODUCIDAS POR SOLICITACIONES EXCESIVAS.	93
TABLA 25.	LESIONES PRODUCIDAS POR ERRORES EN LA CONCEPCIÓN DEL EDIFICIO – LESIONES EN EL ENTORNO DE LOS HUECOS. .	94
TABLA 26.	LESIONES PRODUCIDAS POR ERRORES EN LA CONCEPCIÓN DEL EDIFICIO – LESIONES PRODUCIDAS POR GIROS DE ELEMENTOS.	95
TABLA 27.	LESIONES PRODUCIDAS POR ALTERACIONES EN EL ESQUEMA PORTANTE DEL EDIFICIO – LESIONES PRODUCIDAS POR SOLICITACIONES EXCESIVAS.	96
TABLA 28.	LESIONES PRODUCIDAS POR ALTERACIONES EN EL ESQUEMA PORTANTE DEL EDIFICIO – LESIONES EN EL ENTORNO DE LOS HUECOS.	97
TABLA 29.	LESIONES PRODUCIDAS POR ALTERACIONES EN EL ESQUEMA PORTANTE DEL EDIFICIO – LESIONES PRODUCIDAS POR EL GIRO DE ELEMENTOS.....	98
TABLA 30.	LESIONES PRODUCIDAS POR ALTERACIONES EN EL ESQUEMA PORTANTE DEL EDIFICIO – LESIONES PRODUCIDAS POR LA INCOMPATIBILIDAD DE MATERIALES.	99
TABLA 31.	LESIONES PRODUCIDAS POR ACCIONES DEL ENTORNO DE LA EDIFICACIÓN.....	100
TABLA 32.	TIPOS DE FALLAS Y AGRIETAMIENTOS EN EDIFICACIONES DE TIERRA ASOCIADOS A FUERZAS SÍSMICAS.	101
TABLA 33.	SERIES DE MOVIMIENTOS APLICADOS EN LOS ENSAYOS DE CARGAS SÍSMICAS EN VIVIENDAS DE ADOBE.	103
TABLA 34.	CRITERIOS PARA VALORAR LOS DAÑOS Y PARA IDENTIFICAR LOS RIESGOS QUE POSEE UNA EDIFICACIÓN DE TIERRA TRAS HABER SUFRIDO UN EVENTO SÍSMICO.	112
TABLA 35.	PROPUESTA DE CORRELACIÓN ENTRE EL DAÑO DE LA VIVIENDA Y SU TIPO DE INTERVENCIÓN NECESARIA.....	120

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DE LA ZONA NOROESTE DE ESPAÑA.	132
ANEXO 2.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DE LA ZONA DE LOS PIRINEOS EN ESPAÑA.	132
ANEXO 3.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DE LA ZONA DE LA CORDILLERA COSTERO CATALANA.	133
ANEXO 4.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DEL SISTEMA IBÉRICO DE ESPAÑA.	133
ANEXO 5.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DE LA ZONA BÉTICO – BALEAR.....	134
ANEXO 6.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DE LA ZONA DEL MAR DE ALBORÁN.	134
ANEXO 7.	MAPA TEMÁTICO SISMOTECTÓNICO DE LA ZONA DEL GOLFO DE CÁDIZ – GORRINGE.	135
ANEXO 8.	MAPEADO Y LOCALIZACIÓN DE EDIFICACIONES ELABORADAS CON LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS EN TIERRA DE LOS 3 PRINCIPALES GRUPOS SELECCIONADOS POR LA INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO SOSTIERRA:	

(A.) TIERRA EN MUROS MONOLÍTICOS. (B.) TIERRA EN MUROS DE PIEZAS DE TIERRA. (C.) TIERRA EN ENTRAMADOS DE MADERA.	136
ANEXO 9. DETALLES DE LA COMPOSICIÓN Y TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE LAS VARIANTES DE TAPIA HALLADAS DENTRO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA.	138
ANEXO 10. DETALLE CONSTRUCTIVO DEL MURO ESTRUCTURAL O TAPIAL EN LA PISCINA DE TORO EN ZAMORA.	140
ANEXO 11. CATÁLOGO – CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DE VIVIENDAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA DE TIERRA.	141
ANEXO 12. CATÁLOGO – CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DE VIVIENDAS CON MUROS DE TAPIALES.	145
ANEXO 13. CATÁLOGO – CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DE VIVIENDAS CON MUROS DE ENTRAMADO O MIXTOS.	149
ANEXO 14. FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN EN EDIFICACIONES DE TIERRA RECURRENTES – PRE SISMO.....	151
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	151

“ANÁLISIS DE CONSTRUCCIONES DE ADOBE Y TAPIALES ESPAÑOLAS ANTE A LA ACCIÓN DEL SISMO”

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Las construcciones de tierra como el adobe y la tapia, son material compuesto obtenidos a base de arcilla y agua, han sido utilizadas desde el 8000 a.C. (Houben & Guillard, 1994) debido a su disponibilidad y facilidad de elaboración, permitiendo su obtención in situ del lugar donde se pretende edificar (Blondet, Villa, Vargas, Soto, & Sosa, 2017). A pesar de que hoy en día, la tierra como material de construcción ha sido desplazada por materiales industrializados (hormigón, acero, etc.), actualmente las investigaciones buscan optimizar su uso mediante nuevas técnicas y productos, tanto para construcciones modernas como para la restauración y conservación de edificaciones tradicionales existentes considerados como patrimonios (Catalán, 2018).

Actualmente, las edificaciones a base de tierra tienen mayor predominio en zonas de escasos recursos y donde, aproximadamente el 30% de la población global habita o labora en estructuras de tierra (Leceta y Huerta, 2020), porcentaje que alcanza el 50% en países en desarrollo, concentrándose principalmente en áreas rurales (menos del 20% en zonas urbanas). Por ejemplo, en Perú, el censo nacional que se realizó en el año 2017 reportó que el 27.9% de las viviendas emplean tierra como material principal de su construcción (INEI, 2017).

En el estudio de Catalán R. (2018) menciona que, en España la escasez de especialistas en construcción con tierra contrasta con el amplio patrimonio de arquitectura rural e histórica presente en diversas ciudades dentro de todo el territorio nacional, es por esta razón que la restauración y recuperación de estas estructuras progresa lentamente; es decir, existe un limitado conocimiento respecto a las técnicas adecuadas y óptimas para el manejo de este material, lo que se vea reflejado como consecuencia de la pérdida de una tradición ancestral.

En adición a esta problemática [por sí bastante abordable], Leceta y Huerta (2020) hace alusión a que las estructuras de tierra como el adobe, tapiales, entre otros, poseen característicamente una elevada vulnerabilidad ante movimientos sísmicos, ya que este material no resiste esfuerzos significativos de tracción o corte y presenta una fragilidad estructural evidente. Se pueden observar diferentes ejemplos de lo peligroso que puede llegar a ser esto analizando los resultados de los terremotos en zonas donde abundan estas construcciones, tal como el ocurrido en Pisco (Perú) en el 2007, donde el terremoto ocasionó el colapso parcial o total de numerosas viviendas, y donde más de 100,000 construcciones de adobe resultaron destruidas o gravemente afectadas (Leceta & Huerta, 2020).

Después de evaluar las consecuencias de un terremoto, surgen interrogantes recurrentes: ¿Era posible predecirlo?, ¿Se podrían haber mitigado las pérdidas que hubieron?, la respuesta a la primera pregunta es negativa, puesto que en la actualidad no existe tecnología alguna con la que podamos predecir con exactitud la magnitud, ubicación y momento de un sismo en un margen de días; no obstante, la respuesta a la segunda es afirmativa, ya que las pérdidas pueden reducirse ya sea, evitando la aparición y el incremento de los asentamientos en zonas de alto riesgo sísmico, y

la más importante, disminuyendo la vulnerabilidad de las estructuras y comunidades ya existentes (Universidad Politécnica de Madrid, 2016).

En todo este papel, la planificación ante el riesgo sísmico y el diseño de estructuras sismorresistentes constituyen las principales medidas preventivas contra este fenómeno, y en países como España, estas acciones están reguladas por la Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico y la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE – 02), en cuyos documentos se incluyen mapas de peligrosidad sísmica como base para su implementación de estas (Universidad Politécnica de Madrid, 2016).

1.2 OBJETIVOS

1.3 OBJETIVO GENERAL

- ✚ Analizar el comportamiento sísmico de las edificaciones de tierra en España, evaluando las patologías características de esta tipología, clasificando los edificios mediante una escala de daños en casos de sismo y, posteriormente, exponer técnicas de intervención en función al grado asignado, con objeto de preservar este patrimonio arquitectónico.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ Caracterizar el riesgo sísmico presente en España junto al potencial impacto que ocasiona las edificaciones de tierra, considerando factores de su vulnerabilidad estructural propias de estas construcciones.
- ✚ Clasificar las tipologías constructivas de tierra presentes en el territorio nacional, documentando las características mecánicas y sus respuestas ante esfuerzos propios de un evento sísmico.
- ✚ Identificar y categorizar las patologías y lesiones recurrentes en las edificaciones de tierra, tanto previas como posteriores a un evento sísmico.
- ✚ Establecer una propuesta de criterios base para poder evaluar los daños en una edificación de tierra después de un terremoto.
- ✚ Elaborar una guía/catálogo de patologías y daños pre – sismo y post – sismo, dirigido a entidades estatales tales como los equipos de protección civil, para facilitar la toma de decisiones en escenarios tanto preventivos como posteriores a un terremoto.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 SISMICIDAD EN ESPAÑA

2.1.1 CONTEXTO GENERAL

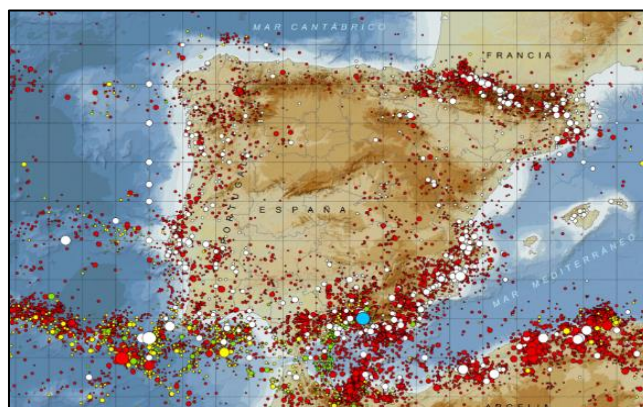
La sismicidad en España se considera de carácter moderado si la comparamos con otras regiones del mundo. No obstante, posee las características destacables para ser foco de estudios tanto científico, como de prevención de riesgos, ya que la Península Ibérica es también una zona sísmicamente activa.

Su sismicidad está vinculada estrechamente a su contexto geológico de la zona, es decir, aunque la Península Ibérica sea considerada parte de la Placa Euroasiática, aún puede analizarse como una microplaca independiente, que colinda con la Placa Euroasiática por el norte con la formación de los Pirineos, y con la Placa Africana por el sur; entonces, por movimiento tectónico está sometida a la compresión entre estas placas produciendo así tensiones internas que se liberan a través de movimientos sísmicos (Hernández, 2016), tal como podemos ver en la Figura 1. Esto respalda la concentración de terremotos en el norte y sur de la “microplaca Ibérica” en los Pirineos y Granada, respectivamente; tal y como se puede ver en el mapa general de la sismicidad de la Península Ibérica elaborado con la base de datos del Instituto Geográfico Nacional actualizado al año 2021, en la Figura 2. (IGN, 2025)

Figura 1. Mapa de peligrosidad sísmica en España e interacción con las placas tectónicas.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

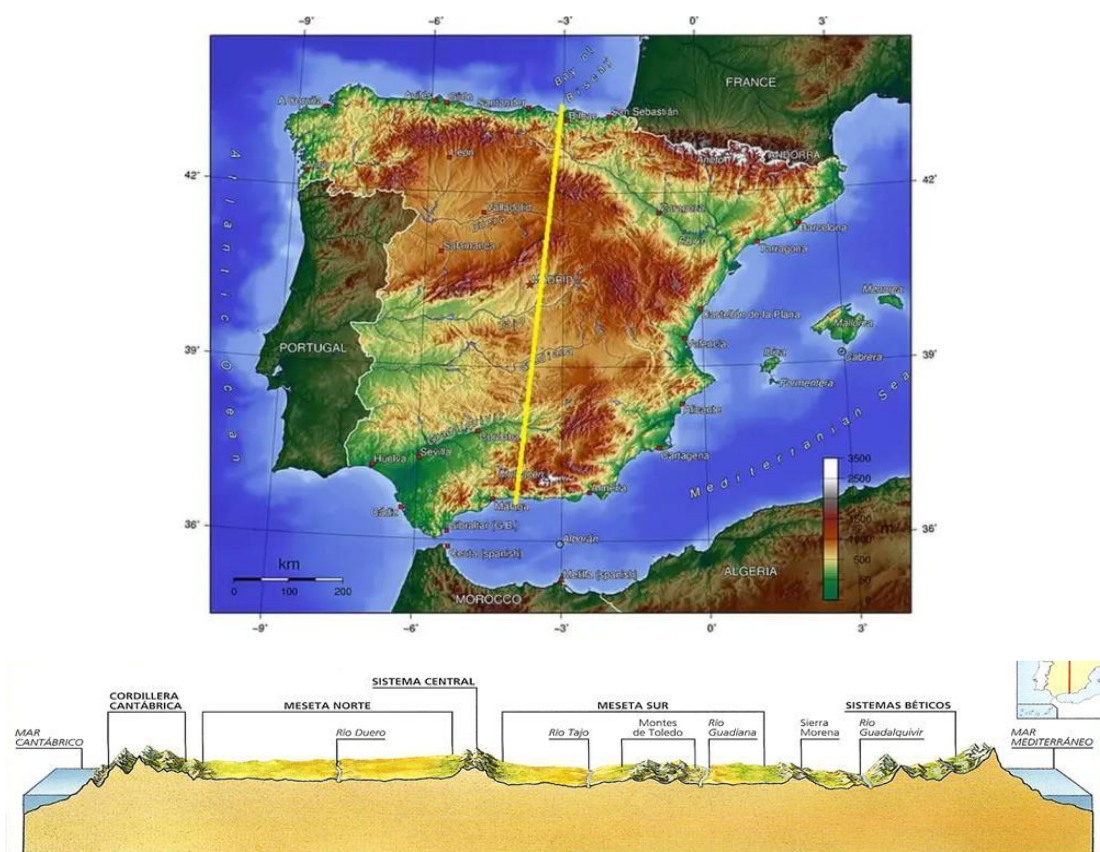


Figura 2. Registro de la sismicidad en la Península Ibérica y zonas próximas.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



Este mecanismo de la tectónica peninsular es el principal motivo de la deformación y la acumulación de grandes láminas de rocas superpuestas que ha dado lugar a la compleja geografía española, caracterizada por poseer sistemas montañosos y cuencas fluviales orientados en dirección este a oeste, en disposición de “acordeón” tales como: Sierra de Cantabria por el norte, Sierra de Guadarrama en la zona central, Sierra de los Filabres y Sierra Espuña en la zona sur, tal como se muestra en la Figura 3, producto de la compresión de la Microplaca Ibérica y, a su vez, el origen de la distribución y frecuencia de la actividad sísmica de España (Hernández, 2016); (Cabañas et al., 2011).

Figura 3. Mapa geográfico de la Península Ibérica y corte topográfico Norte – Sur.
Fuente: Unidades morfoestructurales de la Península Ibérica (González, 2022).



2.1.2 PROPIEDADES SISMOTECTÓNICAS DE ESPAÑA

A partir de la época de los años 80, a nivel mundial se impulsó el desarrollo del conocimiento científico a cerca de la generación de los terremotos de grandes magnitudes y de las fallas activas. A partir de este conocimiento se comenzó a aplicar en España, donde se identificaron muchas fallas activas en la Península Ibérica potencialmente generadoras de terremotos de magnitudes superiores a 6,0 (M_w). La elevada cantidad de fallas existentes en el sur de España y en el norte de África acumulan constantemente energía por la convergencia entre las placas de Eurasia y África (a razón de entre 4 mm – 5 mm al año); toda esta información geológica y los datos procedentes de las estaciones GPS que monitorean las zonas con mayor sismicidad, el Instituto Geológico Minero de España (IGME) y el Instituto Geológico Nacional (IGN), para disposición de la sociedad, los colocan en bases de datos e informes de fácil consulta. (Cabañas et al., 2011)

A partir de la información de alcance por el IGN, podemos analizar y conocer las características sismotectónicas de España, así como los mecanismos focales de las fallas activas presentes, centrándonos únicamente en la zona peninsular. En sismología los mecanismos focales son características importantes al momento de tener conocimiento de la orientación de las fuerzas de un terremoto, ya que estos permiten conocer el origen del modo de ruptura de las rocas y de los desplazamientos de sus bloques, y a su vez, identificar la orientación de la fractura en la fuente sísmica. (Instituto Geográfico del Perú – IGP, 2023)

Para entenderlo de una manera sencilla, los mecanismos focales, gráficamente hablando, tiene una similitud a las “pelotas de playa”, y se elaboran en función de la dirección recibida de la primera onda “P” registrado en los sismógrafos que hayan captado el sismo (Figura 4 - a), luego evalúan los patrones en las lecturas del sismograma para establecer cuáles son las zonas de compresión y dilatación del suelo generando así en la pelota de playa 4 cuadrantes delimitados por dos planos perpendiculares entre sí, como se puede observar en la Figura 4 - b, la parte negra del mecanismo focal describe esfuerzos a compresión, mientras que la parte blanca representa esfuerzos de dilatación; partiendo de esta distribución de fuerzas se puede conocer el tipo de falla que se puede generar como se muestra en la Figura 5.

Figura 4. (a.) Ejemplo de registros y lectura de un sismograma identificando de las ondas “P” los pulsos hacia arriba (compresión) y los pulsos hacia abajo (dilatación). (b.) Separación de las áreas de compresión y dilatación separados por planos nodales y representación final del mecanismo focal.
Fuente: Mecanismos focales. (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, s.f.)

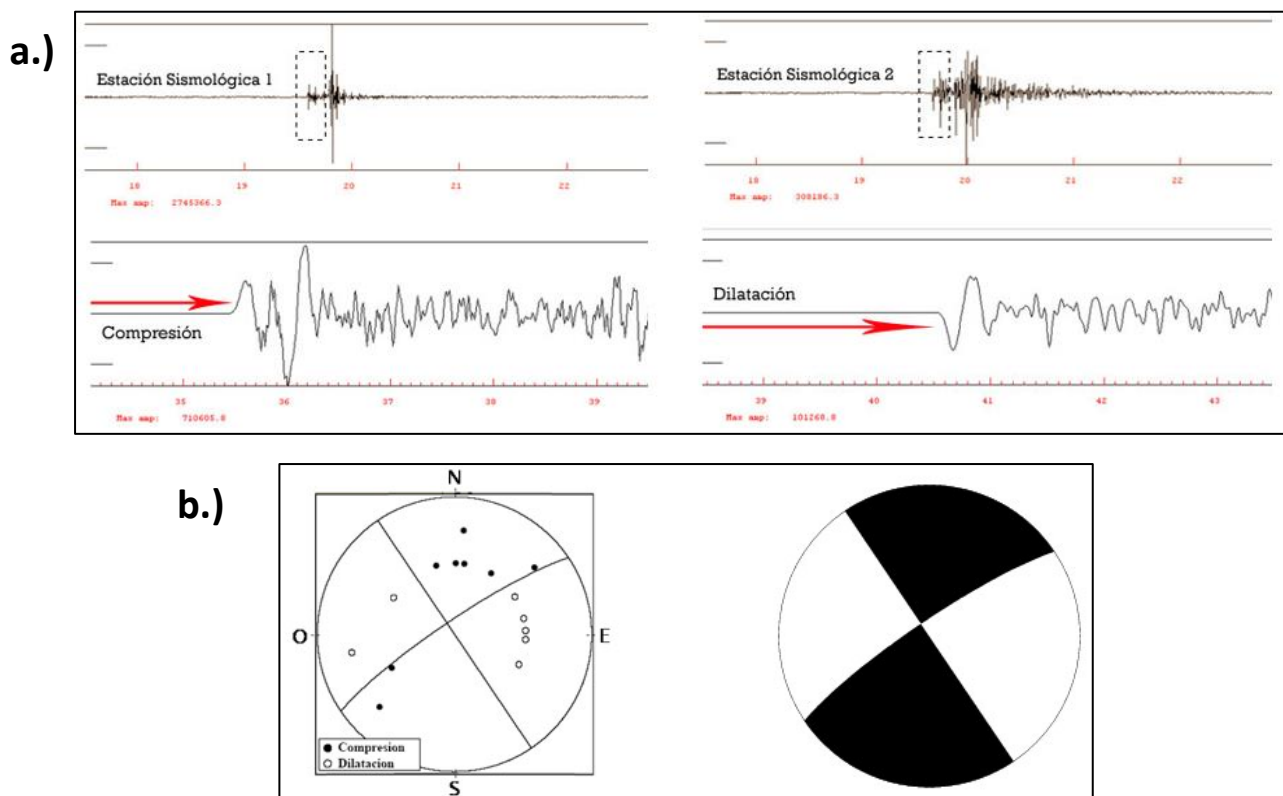
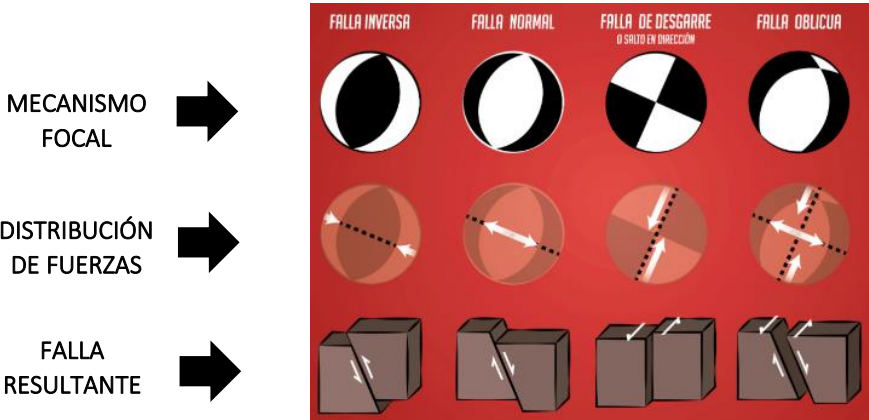







Figura 5. Mecanismos focales y sus tipos de fallas (considerando un plano de los dos posibles).
Fuente: <https://x.com/RSpitfire/status/1144179109360222208>



Estas características son descritas según sus zonas de registro de actividad sísmica; a continuación, se muestra a manera de resumen la descripción de estas zonas en la **Tabla 1**:

Tabla 1. Descripción sismotectónica de España por zonas geográficas.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

ZONA	DESCRIPCIÓN SISMOTECTÓNICA
<p>ZONA NOROESTE</p> 	<p>Esta zona es considerada una zona estable sísmicamente hoy en día, con presencia de sismos de magnitud baja o moderada bajo el contexto medio de España. En esta región la sismicidad es superficial, con profundidades inferiores a 30 km, donde prevalecen mecanismos focales de tipo desgarre y normal. Donde más se concentra la actividad sísmica son al sur y este de Galicia, además de algunos sismos registrados con epicentro marino, tanto en el atlántico como en el cantábrico. (Ver ANEXO 01).</p> <p>Según su registro de los últimos 20 años, hubo terremotos con magnitudes de <4,0 (M_w), con intensidades entre V – VI en las provincias de Zamora, León y en el mar.</p>
<p>LOS PIRINEOS</p> 	<p>Esta zona posee una sismicidad moderada, también definida por carácter superficial con profundidades inferiores a 30 km, teniendo en cuenta que en esta región existe un engrosamiento de las capas en algunas zonas. Aquí predominan los mecanismos focales de tipo normal, manteniendo un sentido del eje de tensiones en sentido perpendicular a la cordillera, información correlativa a los desplazamientos registrados por el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).</p> <p>El sector oriental posee una sismicidad moderada y algo dispersa, en el sector central se percibe mayor actividad sísmica, en el sector noroccidental es el que posee la mayor actividad de la cordillera, mientras que en la región suroccidental los sismos son de poca intensidad y magnitud. (Ver ANEXO 02)</p>

<p>CORDILLERA COSTERO CATALANA</p> 	<p>Esta región posee baja y moderada actividad sísmica, con sismos predominantemente superficiales, con profundidades menores a 20 km. Estos están repartidos en los extremos norte y centro de la cordillera, algunos presentes en el mar mediterráneo frente a las costas de Barcelona y Tarragona. (Ver ANEXO 03)</p> <p>Dentro de la base de datos, no existen sismos que hayan superado los 5,0 (M_w), a excepción de un terremoto ocurrido en el año 1927 en San Celoni (Barcelona), de intensidad máxima de VII y con 5,4 (M_w).</p>
<p>SISTEMA IBÉRICO</p> 	<p>Esta zona, también puede considerarse como tener una actividad sísmica de baja a moderada, y cuyos hipocentros se localizan entre unos 5 – 15 km de profundidad. La mayor cantidad de actividad se concentran en gran parte en la región suroriental y noroccidental de la cordillera, siendo la sismicidad característica cortical superficial, con profundidades inferiores a 25 km. Respecto a sus mecanismos focales, los que predominan corresponden al régimen extensivo actual de tipo normal. (Ver ANEXO 04)</p> <p>En los últimos 100 años no se han registrado terremotos relevantes en la zona sureste de la cordillera, pero existe cierta sismicidad en el Golfo de Valencia; sin embargo, en 2007 y 2015 se registraron en Pedro Muñoz (Ciudad Real) y Ossa de Montiel (Albacete), respectivamente, un sismo de 4,7 (M_w) con intensidad máxima de V.</p>
<p>ZONA BÉTICO – BALEAR</p> 	<p>Esta región es característica dentro de la Península Ibérica por su mayor actividad sísmica de baja a moderada magnitud, cuyas propiedades son sismos corticales con profundidades inferiores a 40 km. La sismicidad ocurre en profundidades intermedias, es decir, entre 40 – 120 km, teniendo mayor concentración de ocurrencias en la parte occidental desde Málaga hasta las costas de Marruecos (Ver ANEXO 05); algunas teorías mencionan que el origen de la alta sismicidad de la zona es debido a que yace una subducción de la litosfera oceánica del atlántico bajo el Arco de Gibraltar con un buzamiento hacia el este, otras mencionan la ocurrencia de procesos diferentes de delaminación en el mar de Alborán.</p> <p>En la zona occidental (baja sismicidad) prevalecen los mecanismos de tipo inverso y desgarre, mientras que en la zona central predominan los de tipo normal, y en la zona oriental, los mecanismos focales son de tipo desgarre.</p>
<p>MAR DE ALBORÁN</p> 	<p>Esta zona posee la mayor tasa de actividad sísmica del mediterráneo occidental, principalmente predominan sismos superficiales, con profundidades inferiores a 40 km de baja a moderada magnitud, y cuyos mecanismos focales en gran parte son de tipo desgarre, y los restantes son de tipo inverso y normal. La sismicidad en esta región es controlada por los sistemas de fallas activas que cruzan la cuenca.</p> <p>La mayor parte de la actividad se centra en el sur de la cuenca y al norte de la costa de Marruecos; no obstante, si se han</p>

	<p>registrado una gran cantidad de sismos superficiales en el norte. Mientras que, en la parte occidental, existe un conjunto importante de terremotos a profundidades intermedias entre 40 – 120 km descritos en la zona Bético – Balear. (Ver ANEXO 06)</p> <p>Cabe señalar que, a partir del 2021, se han registrado miles de terremotos de baja magnitud superficiales, estando entre ellos los mayores sismos registrados entre 2021 – 2023 con una magnitud algo superior a 5,0 M_w; y en el año 2016 ocurrió un terremoto precursor y una principal de 5,1 y 6,3 M_w en la falla de Al – Idrissi, a 100 km al noroeste de Melilla.</p>
<p>GOLFO DE CÁDIZ – GORRINGE</p> 	<p>Esta región corresponde a una actividad sísmica moderada, pero es donde están presentes los terremotos de mayor magnitud registrados, y debido a su ubicación geográfica, es la zona más propensa a tsunamis provenientes del Atlántico. La actividad registrada demuestra la complejidad de la convergencia de la Placa Africana y la euroasiática, es decir, no existe una alineación clara de los epicentros, que se distribuyen en gran parte en grupos o “clusters” a lo largo de la zona central – norte del Golfo de Cádiz. Respecto a los hipocentros, se localizan principalmente a profundidades de 30 – 40 km, y en algunas cosas terremotos entre 50 – 60 km, y entre todo esto no señalizan una zona de subducción y esto podría definirse debido a un comportamiento endeble de la litosfera oceánica y el manto superior. (Ver ANEXO 07)</p> <p>Los mecanismos focales predominantes son los del tipo inverso y de desgarre, cuya compresión horizontal característica va en la dirección de noreste – sureste.</p> <p>El terremoto de mayor relevancia fue el registrado en 1969 con una magnitud de 7,8, al suroeste del cabo de San Vicente, con una intensidad entre VIII – IX registrada en zonas del sur de Portugal y ocasionó un pequeño tsunami en las costas de Portugal, España y Marruecos; y recientemente, en 2007 y 2009 fueron registrados terremotos de 6,1 y 5,7 M_w con intensidades máximas de IV.</p>

2.1.3 RIESGO SÍSMICO EN ESPAÑA

Si bien es cierto que dentro de las zonas sísmicas en España destacan el Mar de Alborán, situado en el extremo occidental del Mar Mediterráneo, donde yacen una gran cantidad de fallas geológicas activas, y es la zona que presenta mayor probabilidad de sufrir terremotos significativos pudiendo afectar zonas costeras como Almería y Málaga con gran impacto; por otro lado, otras de las zonas con gran influencia sísmica es la zona costera de Cataluña, Alicante, Valencia y Murcia, siendo esta última, a lo largo de su historia, la zona que ha experimentado terremotos devastadores. (EGC Consulting, 2024)

El Instituto Geográfico Nacional (IGN), que es la entidad cuya función es monitorear los movimientos sísmicos en España mediante su red de estaciones sismológicas que registran y analizan la actividad sísmica, posee toda información que coloca a libre disposición para cualquier persona dentro de su página web, por ejemplo, como para tener una mejor percepción de los sismos en España se puede observar la Tabla 2

stituto Geográfico Nacional (IGN) donde se muestra el número de sismos ocurridos en la Península Ibérica centrándonos únicamente en la última década, mientras que en la Tabla 3jError! No se encuentra el origen de la referencia., muestra una estimación de ocurrencia de sismos según su magnitud dentro de la Península Ibérica.

Tabla 2. Número de terremotos en la Península Ibérica para 2010 – 2019 localizados por la Red Sísmica Nacional.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Magnitud	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$\geq 7,0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,0 – 6,9	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5,0 – 5,9	2	1	1	2	0	0	7	0	0	0
4,0 – 4,9	18	14	10	20	22	17	20	12	17	8
3,0 – 3,9	91	92	121	127	93	87	308	151	189	118
2,0 – 2,9	694	697	754	1.081	763	828	2.712	1.289	1.572	1.133
1,0 – 1,9	2.451	2.655	3.028	3.987	2.724	2.493	3.484	2.393	2.429	2.579
0,0 – 0,9	549	767	499	719	480	455	251	183	140	258
Total	3.806	4.226	4.413	5.936	4.082	3.880	6.7783	4.028	4.347	4.403

Tabla 3. Estimación de la ocurrencia media de terremotos en la Península Ibérica.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Magnitud	Estimación de ocurrencia
$\geq 7,0$	1 cada 150 – 175 años
6,0 – 6,9	1 cada 25 – 30 años
5,0 – 5,9	1 cada 1 meses
4,0 – 4,9	1 cada 20 días
3,0 – 3,9	1 cada 50 horas
2,0 – 2,9	1 cada 10 horas

Como se puede deducir de la Tabla 2 y la Tabla 3, los movimientos sísmicos que más se frecuenta en España son sismos de magnitud entre 1,0 y 2,0, en donde, según protección civil, anualmente se registran en la Península Ibérica una media entre 1.200 y 1.400 terremotos si se analizan estas magnitudes de mayor frecuencia, por otro lado, destaca que esta actividad sísmica es importante a pesar de dentro de la Península no predomina la ocurrencia de grandes seísmos. (Agencia EFE, 2023)

El motivo más significativo de esta baja probabilidad es que, a pesar de que España está situada en una zona de colisión entre placas tectónicas, la tensión acumulada no es tanta como la energía que se acumula al otro extremo del mediterráneo (donde convergen tres placas), comenta Luis Cabañas, mencionado sismólogo de la Red Sísmica del Instituto Geográfico Nacional, en nuestro caso las tensiones tardan muchos años en acumularse, en términos numéricos, entre la placa euroasiática y la Africana se genera un desplazamiento a razón de un milímetro al año aproximadamente. (Alcutén J., 2023), (Agencia EFE, 2023). A razón de situar un contexto más específico de la presencia de terremotos de magnitudes devastadoras, tales como el ocurrido en Marruecos en septiembre de 2023 (M_w 6,8), Luis cabañas determina que España existe la oportunidad de experimentar un sismo similar, pero debido a la configuración geológica la probabilidad es baja; además, Salvador Ivorra, catedrático de estructuras de la Universidad de Alicante, también señala que las probabilidades que España experimenten actividad sísmica como las registradas del terremoto de Turquía y Siria en 2023 (M_w 7,8

y 7,5) son bajas, ya que las placas próximas a la Península Ibérica no son tan grandes y no se mueven a la misma velocidad como para generar magnitudes de terremotos similares. (Agencia EFE, 2023)

Por otro lado, José Delgado, el director de la Unidad de Riesgos Sísmicos, recalca que España se encuentra muy cerca de una zona de colisión de dos Placas sumándole a eso las demás fallas que se están desplazando, y que los sismos que se perciben casi a diario (de baja magnitud) en la zona sur de la península no significa que permitan la disipación de suficiente energía y evite la formación de sismos de grandes magnitudes (Agencia EFE, 2023).

2.2 ARQUITECTURA DE TIERRA EN ZONAS DE RIESGO SÍSMICO EN ESPAÑA

2.2.1 CONTEXTO GENERAL Y PRESENCIA EN LA PENINSULA IBÉRICA

El material más abundante y disponible en el mundo es la tierra. Es por ello que, a través del tiempo, las personas aprendieron a usarla para sus edificaciones, siendo un tercio de la población mundial quienes viven en construcciones de tierra, y por lo general son sus propios usuarios los autores de su construcción y los encargados de darle mantenimiento; esto puede explicarse debido a la versatilidad que tiene este material y, por supuesto, al bajo costo que implica emplearlo, incluso se puede extraer del sitio en donde se va a edificar (Catalán, 2018).

En muchas zonas geográficas del mundo las construcciones de tierra siguen mostrando presencia, empleando la tierra como material principal de construcción, y debido a la antigüedad de su empleo, la humanidad ha dejado un inmenso patrimonio de edificación como grandes fortalezas, iglesias, palacios, castillos, entre otros, habiendo en España un volumen de edificaciones de tierra bastante significativo, el cual comprende diversos edificios de patrimonio histórico, arqueológico, monumental y residencial, sobre todo este último, ya que estas tipologías constituyen casi la totalidad de los edificios del patrimonio tradicional rural reconocible en toda su geografía (Sáinz & Jové, 2010).

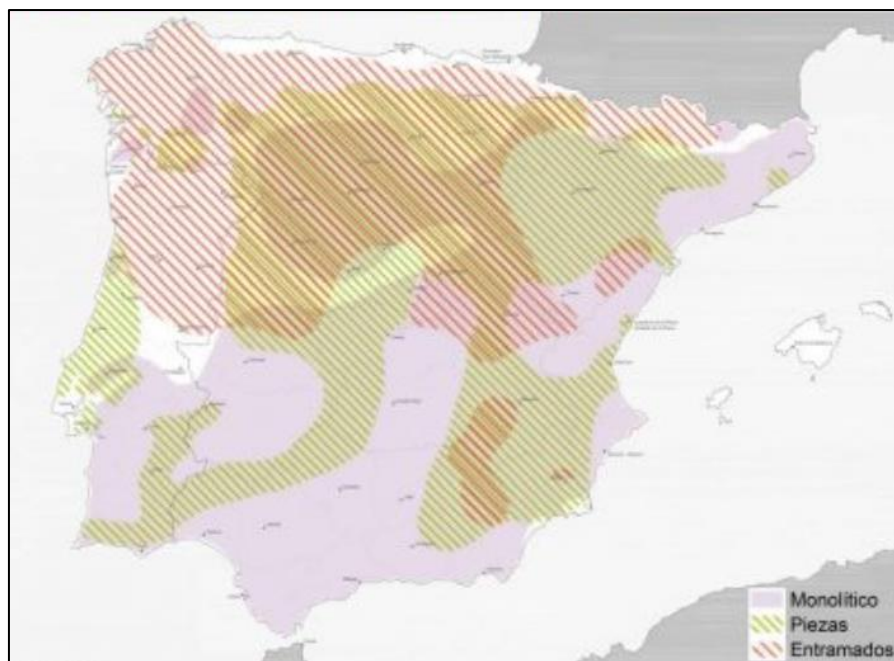
La arquitectura construida a base de tierra se puede encontrar en toda la Península Ibérica en numerosas técnicas y variantes constructivas, entre las cuales sobresalen el tapial, el adobe y el entramado de madera; esta diversidad es producto de las diferentes culturas que a lo largo de la historia han contribuido en la configuración de la arquitectura propia de tierra, puesto que hasta las técnicas constructivas fueron evolucionando y ajustándose a los materiales disponibles de la zona y a los condicionantes de cada zona, a partir de esto es posible conocer una diversa cantidad de técnicas, soluciones y variantes constructivas (Mileto C., Vegas F., Villacampa L. & García L., 2019).

Las construcciones de tierra han conseguido propagarse por gran parte en toda la Península Ibérica, pero para mejor la noción de la presencia de estas construcciones de tierra dentro del territorio de España podemos consultar la información de las siguientes investigaciones sobre la Arquitectura Tradicional de Tierra en España:

En primer lugar, es interesante mencionar la información obtenida del proyecto SOSTIERRA (2017), este proyecto es financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y es desarrollado en conjunto con la Universidad Politécnica de Valencia y el Instituto de Restauración del Patrimonio; el proyecto tiene como principal objetivo investigar procedimientos de rehabilitación sostenibles y compatibles con edificaciones con tierra de carácter no monumentales dentro de la Península Ibérica. Para poner en práctica su investigación, partieron de componer una base de datos a partir de análisis bibliográficos y un amplio trabajo de campo por parte de la organización, y en base a ello pudieron clasificar las técnicas constructivas en tierra y sus variantes en tres grupos principales como se observa

en la Figura 6: En construcciones de tierra en muros monolíticos, en muros de piezas y en entramados, como se observa a continuación:

Figura 6. Mapa de las principales técnicas constructivas con tierra dentro de la Península Ibérica.
Fuente: Proyecto SOSTIERRA, 2017.



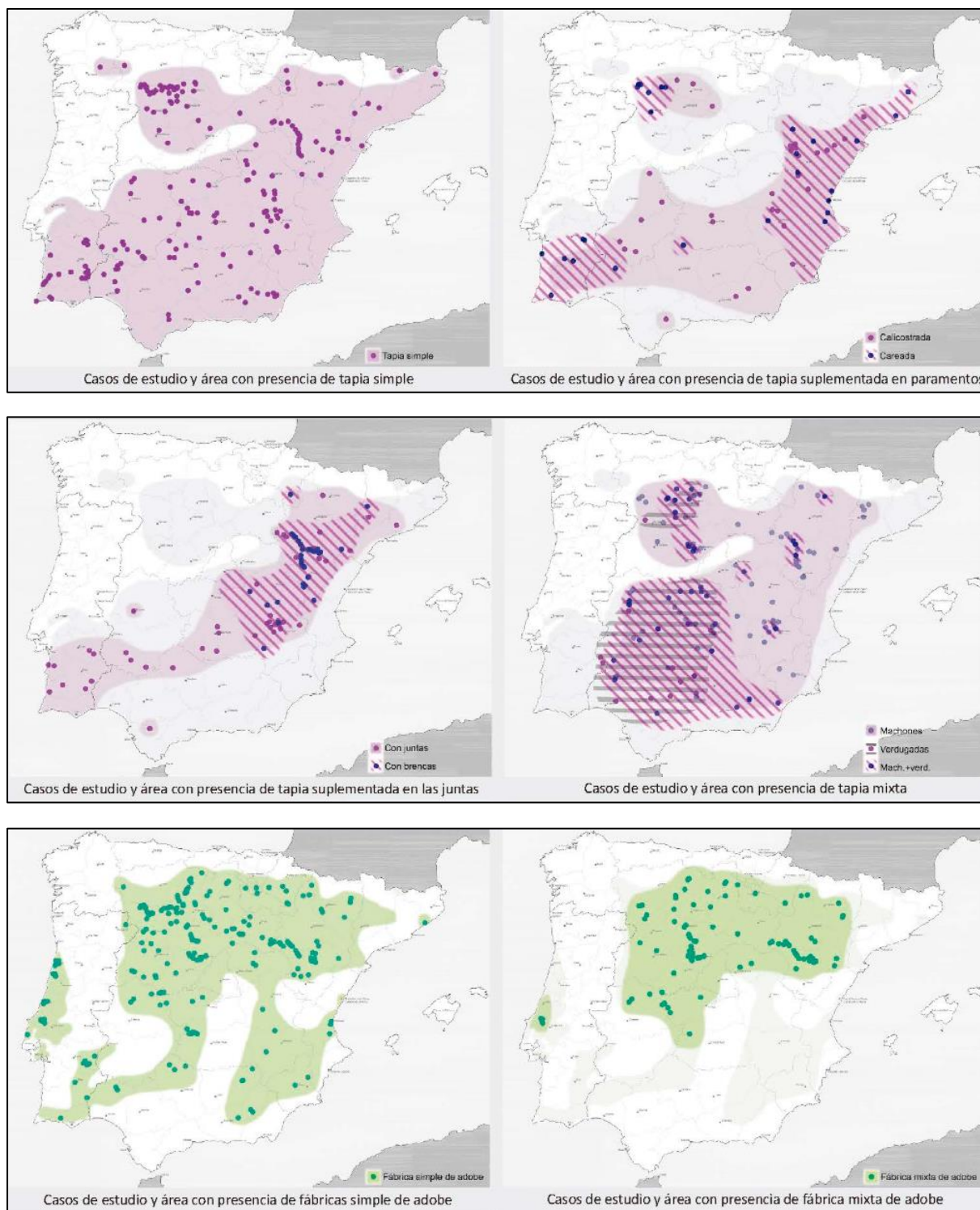
El grupo que corresponde a los muros monolíticos abarca las técnicas en la que los muros de viviendas presentan cierta homogeneidad puesto que son hechos de forma masiva, es decir, que en algunos casos no presentan juntas o contiene las mínimas en proporción a las dimensiones del muro; por otro lado, en el grupo que cubre el sistema de muros con piezas de tierra, como su propio nombre de la técnica menciona, para la composición del muro emplea piezas de tierra de dimensiones variables (tamaños que sean capaces de ser manipulados por operarios); mientras que el tercer grupo está compuesto de dos elementos diferentes, correspondiente a los entramados de madera y al relleno entre estos para completar la estructura del muro, habiéndose encontrado como materiales de relleno el adobe, listones de madera y tierra, o urdimbre, entre otros (SOSTIERRA, 2017).

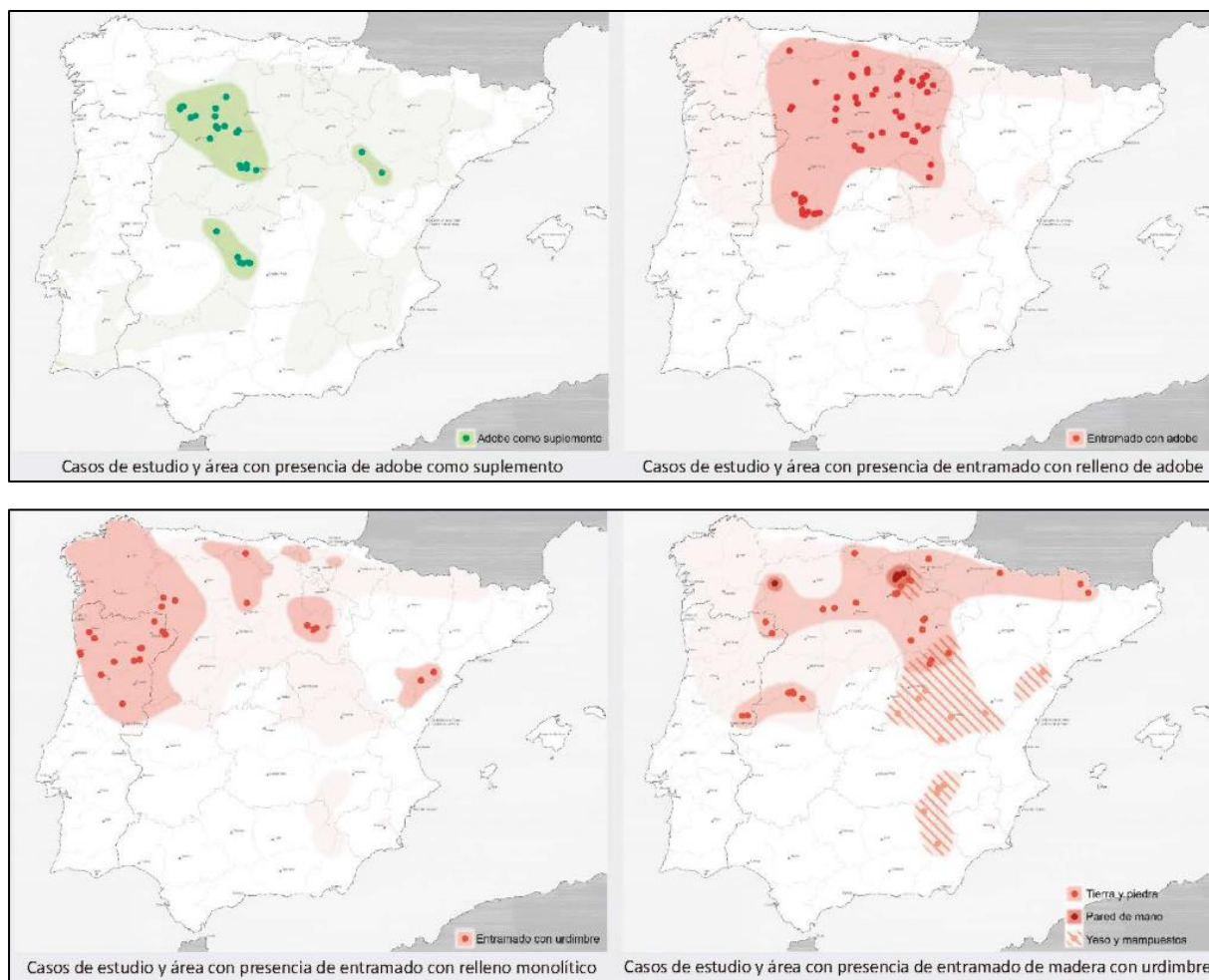
Adicionalmente, dentro de la información de alcance del proyecto SOSTIERRA (2017) se menciona que, para cada uno de los 3 grupos principales de técnicas, se hallaron diversas variantes partir de estas en todo el territorio de la Península Ibérica; para conocer un poco más a cerca de la presencia de estas variantes se puede consultar el ANEXO 08 del presente documento de investigación.

Dentro de la información de alcance que nos muestra el Proyecto SOSTIERRA (2017) en su página web, podemos observar los siguientes mapas donde establece la localización de las variantes halladas de los tres principales grupos de técnicas en todo su tamaño de muestra del territorio de la Península Ibérica. De esta manera podemos tener una perspectiva más clara de las construcciones de tierra presentes en las zonas de España:

Figura 7. Mapa de las principales técnicas constructivas con tierra y sus variantes dentro de la Península Ibérica. Tierra en muros monolíticos (Lila), Muros de piezas (Verde) y Entramados (Rojo).

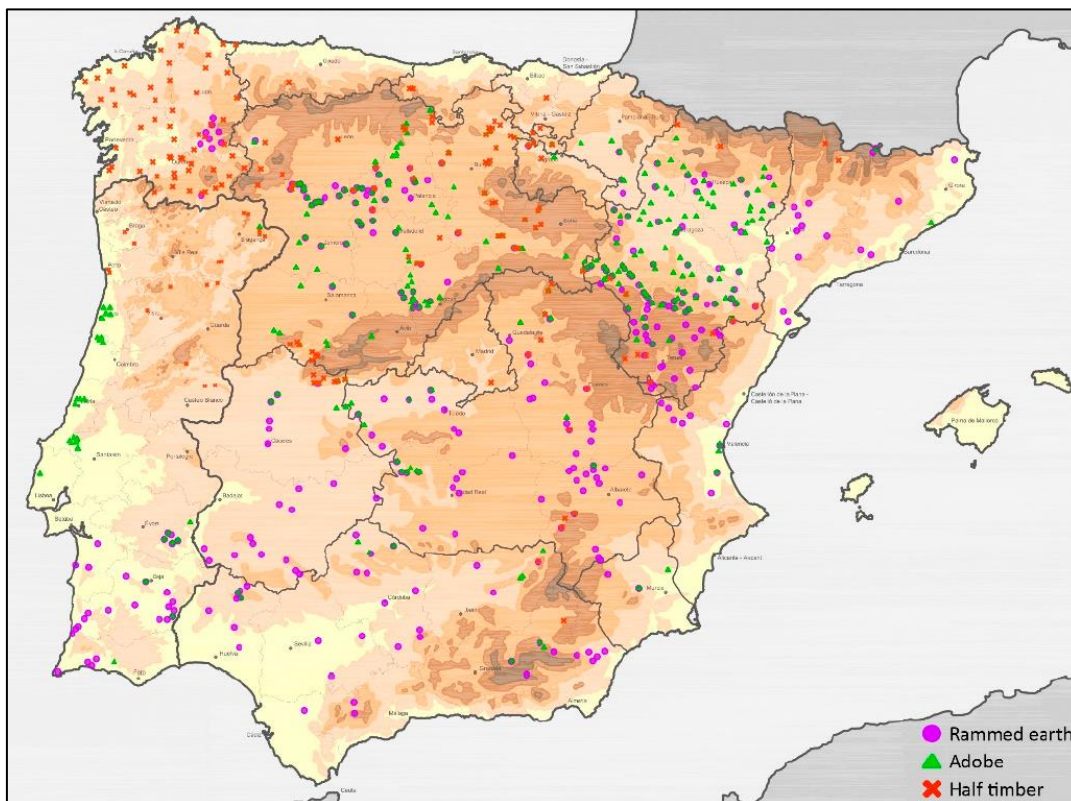
Fuente: Proyecto SOSTIERRA, 2017.





En segundo lugar, tenemos la investigación llevada a cabo por Mileto C., Vegas F. & García-Soriano L. (2019) que consistió en analizar la influencia de factores geográficos en la arquitectura tradicional de tierra; esta radica en analizar construcciones de tierra en 618 localizaciones y sus respectivos materiales y técnicas de construcción empleadas, apoyándose en bases de datos recogidos en varias campañas en la Península Ibérica. En lo que respecta a esta investigación, se muestra en la Figura 8 el mapa de la presencia de construcciones de tierra como tapias, adobe y entramados de madera de su base de datos:

Figura 8. Mapa de las técnicas vernáculas de construcciones de tierra en la Península Ibérica.
Fuente: *The influence of geographical factors in traditional earthen architecture.* (Mileto et al, 2019).



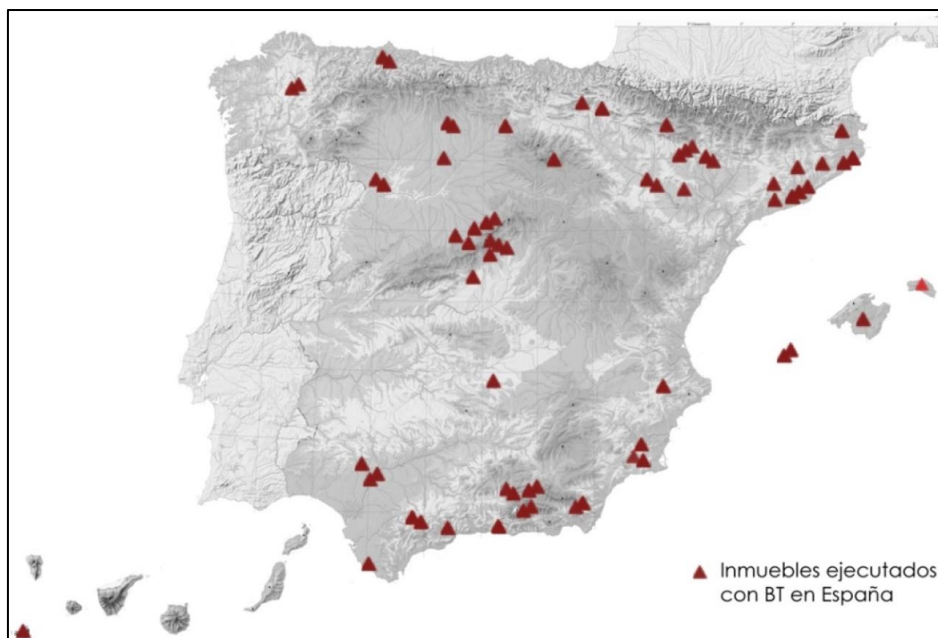
En el mapa de la Figura 8 se observan las tres técnicas constructivas en tierra consideradas en dicha investigación, estableciendo su metodología en estos grupos:

- Construcción a base de tapiales (en 323 casos):
Representando en el mapa con un círculo morado. Prácticamente es tierra en muros macizos, compactos, sin juntas (sin mortero) y homogéneos, siendo esta técnica la más presente en toda la península.
- Construcción a base de adobe (en 293 casos):
Representados en el mapa con una triángulo verde. Son muros de mampostería constituido por trozos de tamaño y composición un poco heterogénea de bloques de tierra cortada, adobe y tepe, estando presente en casi toda la península, pero con mayor presencia en la mitad norte de España.
- Construcción a base de entramados de madera (en 178 casos):
Representados en el mapa con una "X" roja. Estas construcciones consisten en una técnica mixta conformada por un entramado de madera junto a un relleno de tierra, teniendo mayor aparición en la parte norte de la Península Ibérica, pero poco habitual respecto al adobe o tapial según la base de datos consultada.

En tercer lugar, tenemos la investigación de Romero A. (2017) and Correia et al. (2011) que muestra que las construcciones de tierra a base de BT y BTC (Bloques de Tierra Comprimida), son abundantes en la franja mediterránea, sobre todo en zonas como Cataluña, Aragón, y algunos emplazamientos de la comunidad autónoma de Madrid, Andalucía (Sevilla, Córdoba) y de Castilla y León como se muestra en la Figura 9. De los 70 inmuebles analizados, la mayoría de los registros son de viviendas unifamiliares, pero algunos de estos ubicados en Madrid o Cataluña se encontraron que

los edificios están dispuestos para actividades empresariales, o como naves industriales, y una de ellas dispuesta como escuela infantil en Barcelona, construida con BTC.

Figura 9. Mapa de localizaciones de edificaciones elaboradas con Bloques de Tierra en España.
Fuente: Viabilidad constructiva del bloque de tierra en España (Romero, 2017).



2.2.2 EDIFICACIONES DE TIERRA EN ZONAS SÍSMICAS DE ESPAÑA

Si observamos estos yacimientos de arquitectura de tierra en contraste con un mapa de intensidades sísmicas particulares de la Península Ibérica, en la Figura 10, podemos observar que la actividad sísmica no es tan prominente debido a que para un periodo de ocurrencia de 500 años, gran parte de la península se sitúa en regiones con intensidades $< VI$, salvo al sureste y noreste que puede alcanzar intensidades de VIII; es decir, la mayoría de construcciones de tierra se localiza en zonas con intensidad sísmica $< VI$, tal como podemos observar en la Tabla 4, las construcciones con tapial son las técnicas que se encuentran con mayor frecuencia al sureste de la península con intensidades VII (12.4%), y es importante mencionar la presencia del 19.9% de entramados de madera en zonas con intensidad sísmica de VI. (Mileto C., Vegas F., Villacampa L. & García L., 2019).

Figura 10. Mapa de intensidad sísmica y técnicas vernáculas de construcciones de tierra en la Península Ibérica.

Fuente: *The influence of geographical factors in traditional earthen architecture.* (Mileto et al, 2019).

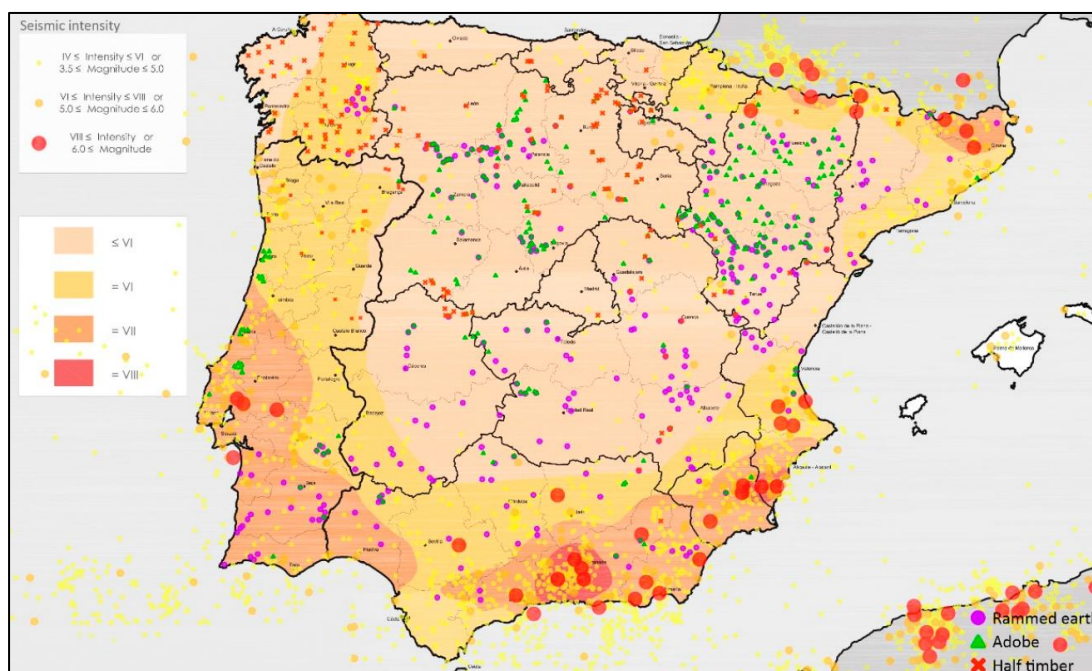


Tabla 4. Relación entre ubicación de tipología constructiva de tierra y los factores de intensidad sísmica presentes en la Península Ibérica.

Fuente: *The influence of geographical factors in traditional earthen architecture.* (Mileto et al, 2019).

Factores geológicos	Tierra apisonada		Adobe		Entramado de madera		Total	
	323	%	293	%	178	%	618	%
Sismicidad								
< VI	230	71.2%	248	84.6%	125	70.2%	439	71.0%
VI	53	16.4%	25	8.5%	52	29.2%	123	19.9%
VII	40	12.4%	20	6.8%	1	0.6%	56	9.1%
VIII	0	0.0%	1	0.3%	0	0.0%	1	0.2%

2.2.3 TIPOLOGÍAS Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

“La tradición de la construcción con tierra ha dejado soluciones técnicas o modos de construcción, que son la base de cualquier posible desarrollo tecnológico en este ámbito. Todo desarrollo parte estas bases, tiene como objetivo la mejora de las cualidades naturales del propio material [...]. Las distintas técnicas se diferencian principalmente por la distinta aplicación y manejo del material” (Catalán, 2018). Además, es importante mencionar que tras el periodo de vida útil que tiene las estructuras de tierra, es posible la reintegración a la naturaleza sin alteraciones debido a que, si se humedecen las piezas con la suficiente agua, los elementos de tierra empezarán a perder su compacidad lo que conlleva a

que el material se vuelva nuevamente maleable y plástico, en otras palabras, es un material totalmente reciclable desde el punto de vista de la sostenibilidad (Casares, 2017).

A continuación, se presentará la descripción de las principales técnicas de edificación en tierra que han sido conocidas y registradas a nivel global y, por supuesto, contempladas en el ámbito nacional:

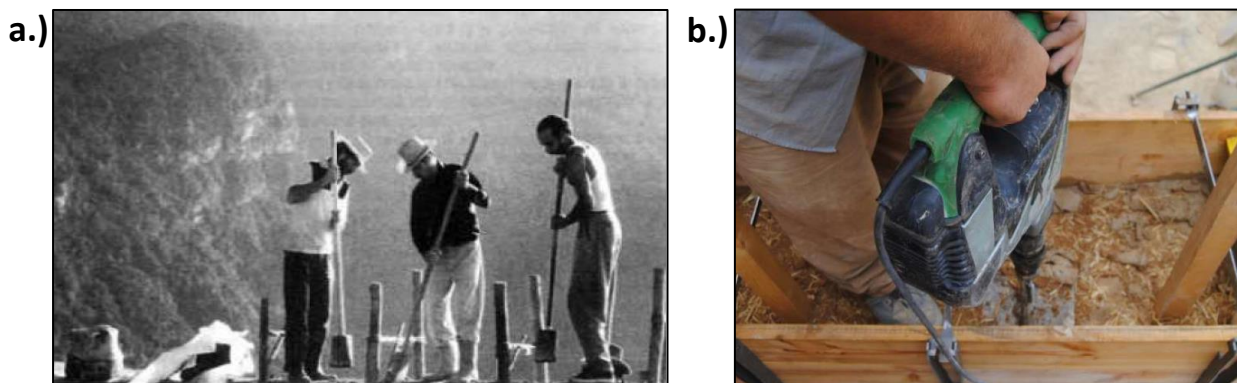
2.2.3.1 LA TAPIA

El concepto de tapial hace alusión no a un tipo de material, sino a un procedimiento constructivo, al modelo de encofrado de madera particular de esta técnica, el cual es reutilizado durante la ejecución del muro. Esta tipología constructiva consiste apisonar tierra por tongadas de 10 a 15 cm de espesor en un molde o tapial, cuyo material es usualmente de madera (pudiendo ser de metal u hormigón), que podía adquirir un espesor de muro entre 50 y 80 cm, en función del proyecto o propiedades de la tierra empleada (Galtier, 2015), (Catalán, 2018). La forma tradicional de la construcción de un tapial, era ejecutarlo manualmente como en la Figura 11 – a, pero con la llegada de la nueva tecnología, y herramientas mecanizadas para optimizar los trabajos, las cuales facilitan los procedimientos constructivos ya que se ejerce mayor presión con mayor rapidez y facilidad, como se observa en la Figura 11 – b.

El resultado de un muro portante con mayor resistencia portante lo ofrece la tierra prensada; no obstante, su procedimiento constructivo es lento, y por tanto un poco más caro, respecto a otros tipos de construcciones de tierra, porque entre capa y capa de tierra compactada requiere un intervalo de tiempo para el secado de la tierra, debido a que esta técnica debe ejecutarse en estado húmedo cuando las arcillas hidratadas son más trabajables y permiten un mejor amasado (Catalán, 2018).

Figura 11. (a.) Método tradicional de construcción de un tapial de forma manual. (b.) construcción de un muro tapial con una herramienta de apisonado mecánico.

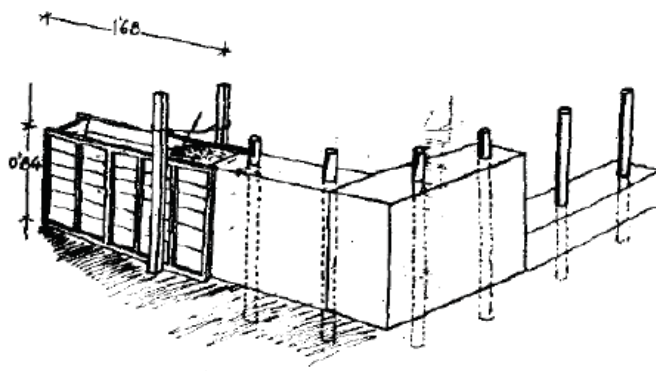
Fuente: Construcción con tierra: Reinterpretación de una tradición (Catalán, 2018).



En algunos casos, el sistema de tapial se reforzaba a través del empleo de piezas de madera verticales, llamados esteos, que eran hincados sobre la tierra cada cierta distancia, y estos eran colocados posterior a la instalación de los encofrados laterales, de esta manera también servía para proyectar la posición del muro; no obstante, los esteos dificultaban los procesos de compactación de la tierra, haciendo que el muro no logre alcanzar su óptima resistencia (Galtier, 2015).

Figura 12. Sistema de construcción de tapiales con esteos.

Fuente: La evolución de los sistemas constructivos y estructurales en las Palmas de Gran Canaria (Galtier, 2015).



Las técnicas y características que posee la tapia contienen un factor de espontaneidad, y ello conlleva a tener un gran panorama de creatividad y libertad al momento de realizarlo, por este motivo es que los estudios al tratar de categorizarlos o clasificarlos encuentran una gran ramificación de composiciones partiendo de una única técnica (Mileto C. & Vegas F., 2013).

A continuación, se presentan esquemas a manera de resumen de las Tapias y algunas de sus variantes que han sido recopiladas dentro de su investigación en el libro de (Mileto C. & Vegas F., 2013):

Figura 13. Esquemas de las variantes de la técnica del tapial ampliamente utilizados en la Península Ibérica.

Fuente: La restauración de la Tapia en la Península Ibérica (Mileto C. & Vegas F., 2013).

TAPIA SIMPLE	TAPIAS SUPLEMENTADAS EN SUS PARAMENTOS
<input type="checkbox"/> Tapia simple de tierra.	<input type="checkbox"/> Tapia calicostrada con cuñas.
	<input type="checkbox"/> Tapia calicostrada con cuñas y tongada interior.
<input type="checkbox"/> Tapia Real.	<input type="checkbox"/> Tapia calicostrada de yeso con cuñas
	<input type="checkbox"/> Tapia calicostrada de yeso con cuñas y tongada interior.
<input type="checkbox"/> Tapia real con mampuestos.	<input type="checkbox"/> Tapa Valenciana (cuñas y tongada).
	<input type="checkbox"/> Tapia Valenciana (cuñas).
<input type="checkbox"/> Mampostería encofrada.	<input type="checkbox"/> Tapia careada con piedra.
<input type="checkbox"/> Tapia real con mampuestos trabada con madera.	
<input type="checkbox"/> Tapia de hormigón de cal.	
<input type="checkbox"/> Tapia de yeso.	

TAPIA CON SUPLEMENTOS EN SUS JUNTAS



- ☐ Tapia con juntas horizontales de yeso.
- ☐ Tapia con juntas reforzadas de yeso.
- ☐ Tapia con brenchas de yeso.
- ☐ Tapia con rafas de yeso.
- ☐ Tapia con juntas reforzadas de yeso y rafas.
- ☐ Tapia con rafas acampanadas y verdugadas de ladrillo.
- ☐ Tapia con brenchas y rafas de yeso.
- ☐ Tapia real con brenchas y rafas de yeso careada con piedra.

TAPIAS MIXTAS



- ☐ Tapia con machones y verdugadas de ladrillo con cajón de tierra
- ☐ Tapia con machones y verdugadas de tapia calicostrada.
- ☐ Tapia con machones de ladrillo y verdugadas de piedra.
- ☐ Tapia entre esquinas y machones de sillería.
- ☐ Tapia con machones y verdugadas de ladrillo con cajones encofrados de mampostería.
- ☐ Tapia con machones y verdugadas de ladrillo con cajones de mampostería o hiladas ladrillo.

Se puede consultar el ANEXO 09 del presente documento para poder visualizar los bosquejos de todas las variantes de Tapia clasificadas en los esquemas de la Figura 13, con el objetivo de apreciar con más claridad la composición y forma constructiva respectiva.

2.2.3.2 EL ADOBE

Las tipologías constructivas de mampostería de adobe son ejecutadas con piezas de tierra hechas en moldes y puestas al sol para secarlos, más no son cocidos. Normalmente, sus dimensiones son en proporciones de 1:2 (entre ancho y largo), y cuyo espesor suelen estar entre los 6 cm y los 10 cm, siendo las dimensiones más comerciales las piezas de adobe de 6 x 15 x 30 cm. A diferencia del tapial, estas piezas no son prensadas, y su aplicación es de mayor rapidez y versatilidad para cualquier proyecto, sin mencionar que existen empresas que fabrican estas piezas industrialmente y que brinda servicios de transporte hasta la obra y, aunque siempre se deberá respaldar en estudios previos de la tierra, el uso de estos prefabricados lo pueden gestionar personas no cualificadas para la construcción de sus propias viviendas, si hablamos de las edificaciones en zonas rurales (Catalán, 2018).

Figura 14. Fabricación tradicional de las piezas de mampostería de adobe.
Fuente: Construcción con tierra: Reinterpretación de una tradición (Catalán., 2018).



2.2.3.3 EL COB

La técnica de COB para edificaciones de tierra es de origen inglés, y consiste en construir los muros de la vivienda in situ; es decir, que de forma manual y sin ninguna ocupación de encofrados de cualquier tipo, se le va dando forma al muro de manera monolítica. En otras palabras, es una técnica bastante artesanal y eficiente, puesto que al no poseer alguna especie de juntas descarta cualquier posibilidad de infiltración de agua en la edificación, cosa que es un aspecto importante en la construcción y más aún en las de tipo tierra. Dentro de su composición, se encuentra repartida en aproximadamente un 40 % en arcillas y un 60% de arena, quienes ofrecen una propiedad conglomerante y capacidad resistente, respectivamente; además de incorporar a estas masas de tierra, fibras vegetales (2 – 4 mm), las cuales proporcionarán cierta resistencia a tracción a los muros de tierra. (Catalán, 2018)

Figura 15. Ejemplo de una construcción de tierra empleando la técnica COB. (b.) Una casa de Inglaterra construida con COB.

Fuente: Construcción con tierra: Reinterpretación de una tradición (Catalán, 2018).



2.2.3.4 BLOQUES DE TIERRA COMPRIMITA – BTC

Estas piezas al igual que la mampostería de adobe se fabrican mediante moldes con medidas estandarizadas, a diferencia de que en este caso las piezas son sometidas a presiones muy elevadas, y posteriormente puestas a secar bajo el sol; es la acción de comprimir la tierra lo que le otorga propiedades más eficaces como una mayor resistencia a compresión y al mismo tiempo pudiendo fabricar piezas de menores dimensiones, en cuanto a resistencia a compresión hablamos de rangos entre 1 – 5 N/mm², y para poder fabricarlos se requiere únicamente un 1% de la energía necesaria para fabricar un ladrillo de cerámica tradicional. (Catalán, 2018)

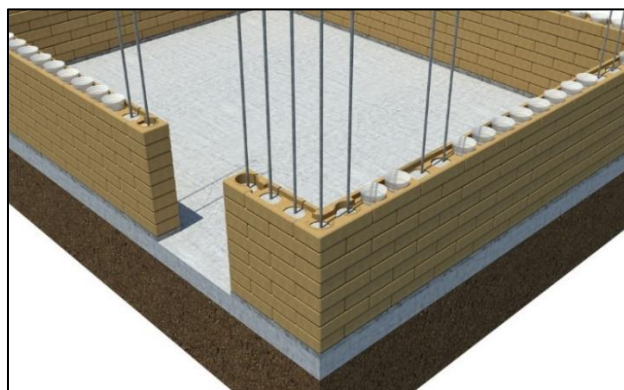
Actualmente existen diversas empresas dedicadas a la producción industrial de BTC, lo que permite mayor durabilidad y versatilidad al momento de ser empleado para proyectos constructivos por la rapidez que representa esta técnica; por otro lado, para la construcción de un muro con BTC es necesario disponer de un mortero diferentes a los empleados en bloques de adobe comunes, ya que en este caso no estará compuesto de fibras vegetales y tierra. (Catalán, 2018)

*Figura 16. Ejemplo de construcción de viviendas con Bloques de Tierra Comprimita (BTC).
Fuente: Arquitectura Viva (Maldonado, 2013).*



Lo más importante de esta técnica, es que con investigaciones de hoy en día se ha logrado optimizar su comportamiento mecánico a base de adicionar cal o cemento a la masa de tierra con objeto de incrementar su resistencia a compresión (10.8 N/mm²), valor equivalente a una pieza de cerámica según la normativa española; además, a nivel mundial se ha considerado en la construcción de viviendas de esta tipología ubicadas en zonas sísmicas la incorporación de armado de acero, como podemos ver en la Figura 17, pero para lograrlo es imprescindible modificar la configuración y diseño de la piezas de tal manera que se transformen en bloques machihembrados y, a su vez, eliminando la necesidad de utilizar mortero para las uniones entre estos (Terram Colombia, 2024).

Figura 17. Ejemplo de BTC machihembrados con armadura de acero como refuerzo antisísmico.
Fuente: Terra Colombia, 2024.

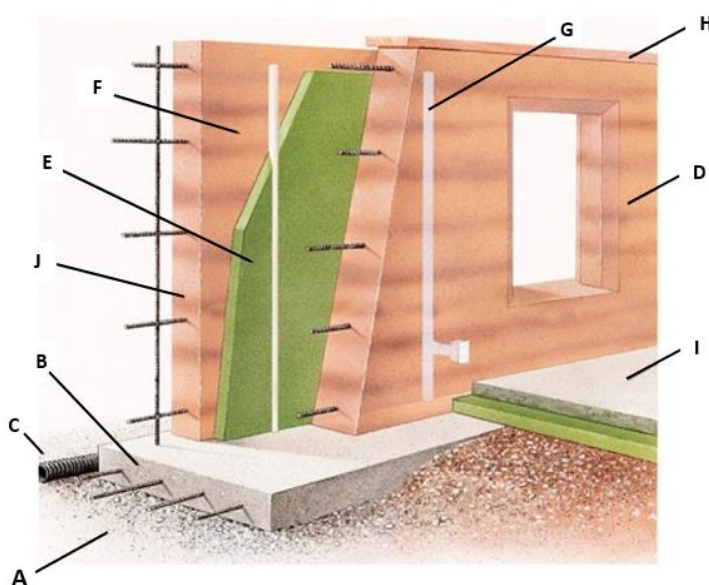


2.2.3.5 SIREWALL

Este sistema de construcción con tierra es patente de la empresa británica *Terra Firma Builders*, y radica en la tapia, es decir, para construir muros utiliza paneles tipo sándwich en cuyo núcleo interior posee un aislamiento de poliestireno rígido, y a ambos lados del aislamiento se sitúa la tierra compactada por apisonadores neumáticos y/o manuales como podemos ver en la Figura 18, por lo general la tierra es extraída del propio lugar, con adición de porciones de cemento (en cantidades entre el 6 – 10%), determinado para cada proyecto en específico; por otro lado, este sistema no requiere de algún tipo de selladores ni paneles de yeso o revestimientos. El resultado de estas combinaciones y diseño sofisticado, es un muro de alto rendimiento y con grandes propiedades mecánicas (Terra Firma Builders LTD, 2024).

Este mecanismo de tapiales ha sido perfeccionado en los últimos 28 años, tanto en sus acabados, su eficiencia energética, y en su comportamiento estructural de resistencia a la compresión con rangos entre 20MPa – 30 MPa; en casos donde el proyecto se localice en zonas sísmicas se puede estimar la incorporación de barras de acero corrugado como refuerzo dispuesto como se observa en la Figura 18 para sostener el aislamiento del polímero a cada de la tierra (SIREWALL, s.f.).

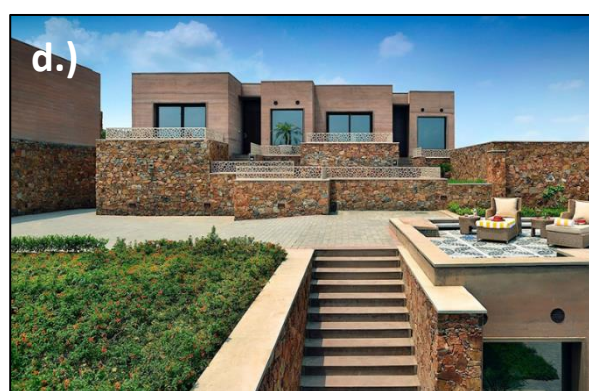
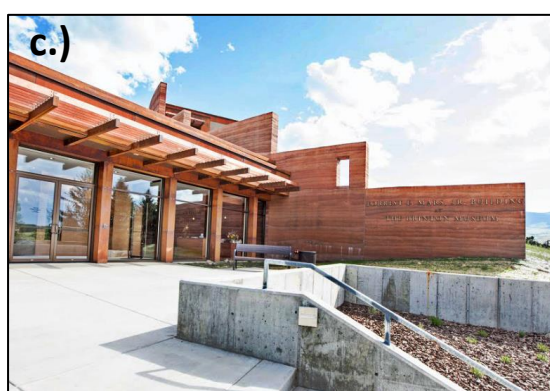
Figura 18. Corte transversal de un muro típico de SIREWALL.
Fuente: SIREWALL.



- A. Zanja de escombros: lecho de 4 pulgadas de roca de drenaje.
- B. Zapata de hormigón armado: hasta 6 pies de ancho.
- C. Tubo de drenaje.
- D. Muro interior de tierra apisonada de 12", reforzado con varillas de acero.
- E. Aislamiento de espuma de 4 pulgadas.
- F. Muro exterior de tierra apisonada de 8 pulgadas, reforzado con varillas de acero.
- G. Tubería EMT para funcionar como conducto eléctrico.
- H. Placa superior de madera, anclada a la pared, lista para la armadura del techo.
- I. Piso interior.
- J. Recubrimiento antigraffiti opcional.

Figura 19. Proyectos ejecutados con sistema SIREWALL. (a.) Centro de bienvenida del sureste de Wyoming, EE.UU. (b.) Sede central de Telenor, Islamabad, 2018. (c.) Museo Brinton, EE.UU. (d.) Hotel Boutique de Nueva Delhi.

Fuente: SIREWALL.



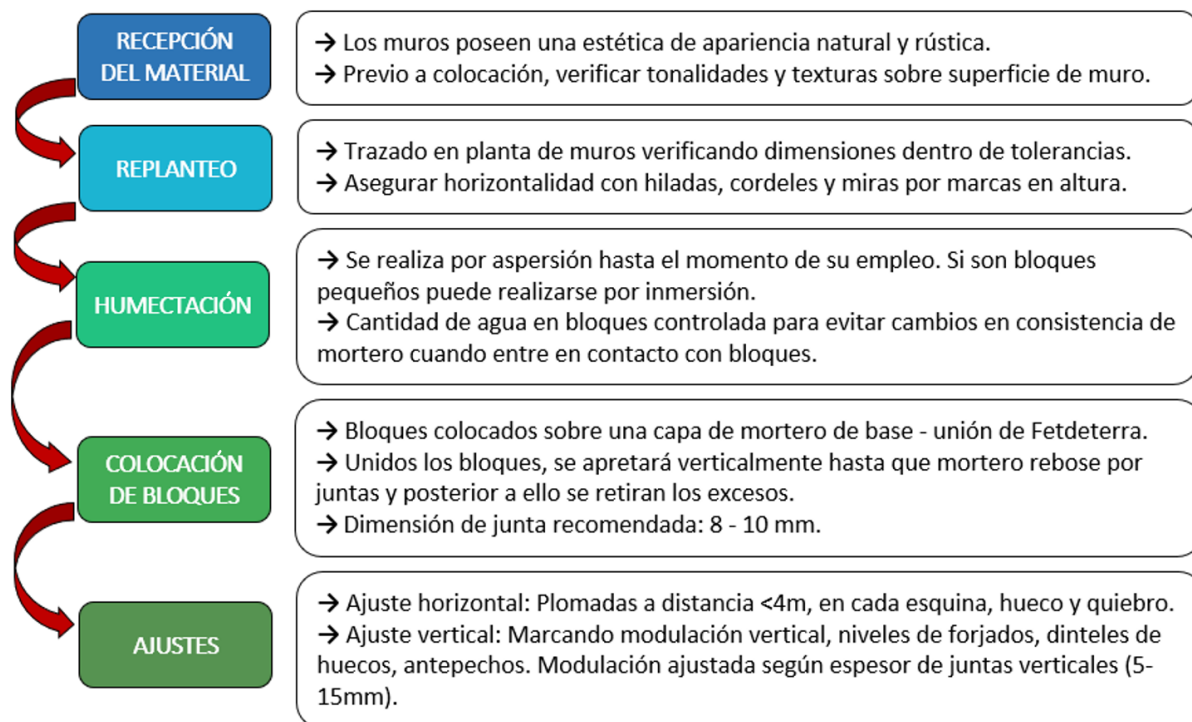
2.2.3.6 EL TAPIALBLOCK

Este sistema constructivo, al igual que SIREWALL, es una patente de una empresa catalana FETDETERRA, y lo importante también es mencionar que, debido a la categoría de producto, la innovación de la técnica, la modernización y reinterpretación del material de construcción (tierra), le fue otorgado en 2017 el premio Construmat (Catalán, 2018).

Como su propio nombre dice, esta técnica emplea el sistema constructivo del tapial que, como se ha explicado anteriormente, los muros construidos son bloques de tierra cruda prensada en encofrados, cuyo proceso de secado es al aire libre; sin embargo, la propuesta de esta empresa es la industrialización de esta técnica y la prefabricación de estos bloques de tierra de alta resistencia, por tanto, poseen control total del material en cuanto a su composición, humedad, diseño y geometría de cada pieza prefabricada. La prefabricación trae consigo ventajas como la agilización de procesos de ejecución, traduciéndose en un ahorro de costes. (Fetdeterra, 2025)

Figura 20. Esquema de ejecución y colocación de los muros Tapialblock.

Fuente: FETDETERRA.



En esta técnica, para la unión de los bloques se emplea un mortero especial (categoría M – 5) elaborado con las mismas características que los bloques, para asegurar la compatibilidad de materiales y, de esta manera consiguen homogenizar el acabado final en la totalidad del muro; además, para manipular los bloques prefabricados de gran/mediano formato con el mayor cuidado, la empresa brinda servicios de alquiler de grúas equipada con pinzas para manipulación y montaje de estos como los que vemos en la Figura 21. (Fetdeterra, 2025)

Figura 21. (a.) Montacargas para manipulación de bloques prefabricados de gran formato. (b.) Grúa especializada para manipulación de bloques prefabricados de mediano – pequeño formato.

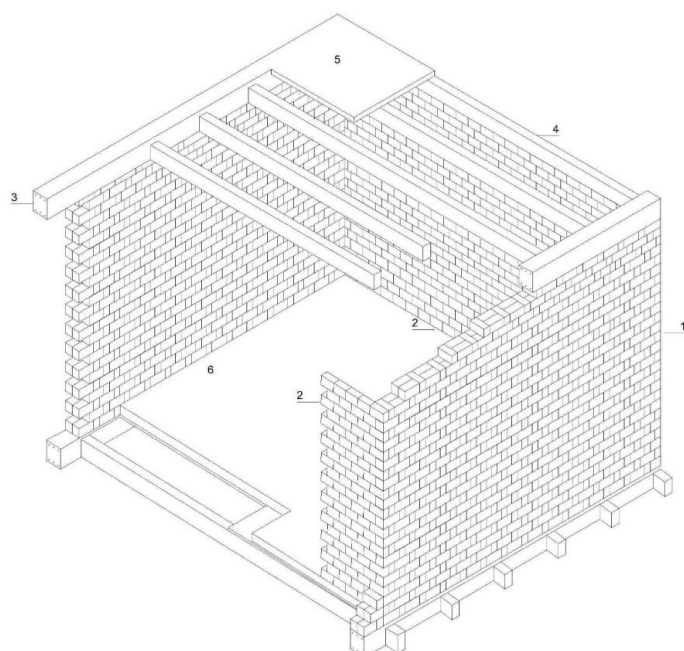
Fuente: FETDETERRA.



Para tener un concepto más preciso del sistema global de esta técnica, se muestra en el siguiente esquema un ejemplo del sistema constructivo general basado en Tapialblock, donde podemos ver la combinación del sistema de muros de tierra y elementos de hormigón armado:

Figura 22. Croquis del sistema constructivo de Tapialblock del tipo 10/20/10 a base de doble muro estructural.

Fuente: FETDETERRA.

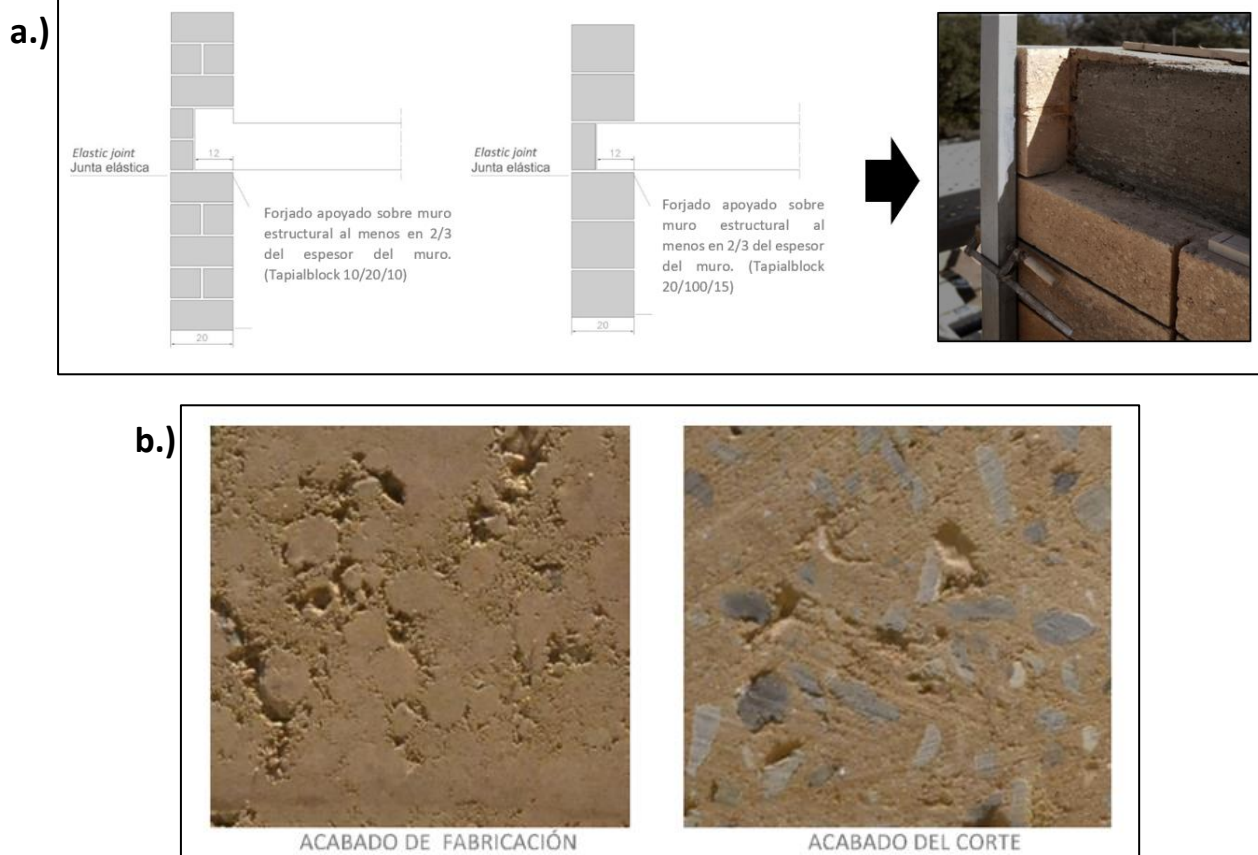


1. Bloque de tierra Tapialblock 10/20/10 de Fetdeterra. Formato pequeño. Para muro estructural de 20 cm.
2. Bloque de tierra Tapialblock 10/20/10 de Fetdeterra. Formato pequeño. Para muro simple de 10 cm.
3. Zuncho de hormigón 20x25 cm para transmisión de carga a muro de tierra estructural.
4. Viga de hormigón.
5. Capa de compresión de 5 cm.
6. Pavimento sobre forjado de hormigón.

Dentro de este sistema es importante mencionar la configuración entre la unión del muro estructural con el forjado, definido de tal manera que evita la transmisión de cargas de forma puntual sobre el muro, dicho de otro modo, la distribución de cargas se da a través de un zuncho de atado para asegurar el correcto reparto de esfuerzos a compresión de forjado a muro, y este zuncho apoyará sobre el muro entre 2/3 de su espesor o un ancho no menor a 12 cm (Figura 23 – a). Por otro lado, los bloques se pueden cortar mecánicamente con el fin de crear agujeros en los muros, teniendo en cuenta que el acabado de corte será diferente a la superficie de fabricación y según las preferencias se podría mostrar, o caso contrario ocultar colocando la superficie de corte en la junta vertical (Figura 23 – b); no obstante se recomienda realizar la menor cantidad de huecos por temas de conservación de la integridad estructural del muro. (Fetdeterra, 2025)

Figura 23. (a.) Detalle de la unión entre el forjado y el muro de tierra estructural. (b.) Diferencia entre un acabado de fabricación del muro y la superficie de corte mecanizado del muro.

Fuente: FETDETERRA – Guía para la ejecución de muros de tierra con bloques prefabricados Tapialblock.



Respecto a los dinteles dentro de la tipología de la Figura 22, las condiciones técnicas que ofrece Fetdeterra (s.f.) en su “Guía para la ejecución de muros de tierra con bloques prefabricados Tapialblock” es considerar el apoyo del dintel 1/5 de la luz en ambos lados y como mínimo 15 cm y 30 cm en cerramientos no portantes y portantes, respectivamente; también recomienda reforzar las zonas alrededor del hueco para minimizar esfuerzos ya sea de carga concentrada o de esfuerzos a tracción que se generan en estas uniones o juntas. Esto les da un mayor margen para los tipos de ejecución de dinteles que impacta directamente a la estética y su mecanismo estructural por supuesto. (Figura 24)

Figura 24. Diferentes tipos de dinteles que se pueden considerar para el Tapialblock.
Fuente: FETDETERRA – Guía para la ejecución de muros de tierra con bloques prefabricados Tapialblock.



2.2.3.7 PANELES DE TIERRA PREFABRICADOS

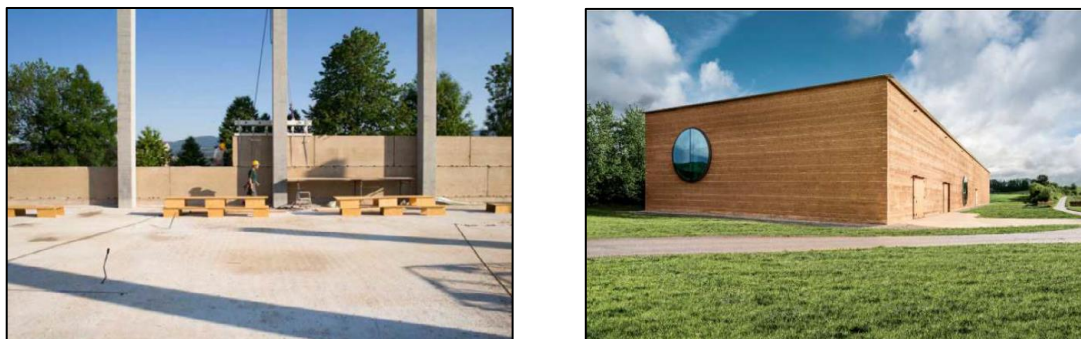
Los paneles de tierra prefabricados tienen casi el mismo contexto de tipología estructural que el sistema de tapial, es decir, se hace uso de las características de inercia térmica y de regulación de humedad de la tierra y a partir de ello crear piezas estructurales con mucha resistencia a la compresión, en tal caso, diversas empresas adoptaron esta idea e hicieron sus propias investigaciones para mejorar las propiedades, y es por esta razón que existen distintas patentes de esta técnica. (Catalán, 2018).

Por lo general, estos paneles de tierra prefabricados son elaborados con material de la propia zona del proyecto, y junto a este se suele agregar al amasado fibras naturales el cual ayuda tanto al aislamiento térmico y ligeramente a hacer más liviana los paneles. Lo relevante de esta técnica es que, al igual que las anteriores técnicas de tapiales, estos se pueden usar para fachadas convencionales que serán autoportantes y para cualquier sistema de cerramiento, la única diferencia es que para esta técnica es necesario anclarse a una estructura portante auxiliar de hormigón (pilares y/o vigas). (Catalán, 2018)

Un ejemplo de interés que muestra la aptitud y la calidad de proyectos que se pueden llevar a cabo empleando paneles de tierra prefabricados es el Centro de Hierbas para Ricola en Laufen ubicado en Suiza, este proyecto corresponde a la edificación de tierra más grande de Europa contando con una fachada de 11 metros de altura y una longitud de 100 metros; estos paneles en gran parte se realizaron con tierra local conformada por toba volcánica con cal y arcilla magra (aporta plasticidad), compactándose entre intervalos de 8 capas de tierra directamente en el encofrado. (Metalocus, 2025)

Figura 25. Procedimiento de colocación de los paneles prefabricados de tierra en la construcción del edificio: Centro de Hierbas para Ricola en Laufen – Suiza.)

Fuente: METALOCUS.



En conclusión, al ser piezas prefabricadas, se traduce en una agilización de procesos constructivos, aminorando los costes que esto conllevaría en una construcción tradicional, sin perjudicar su eficacia.

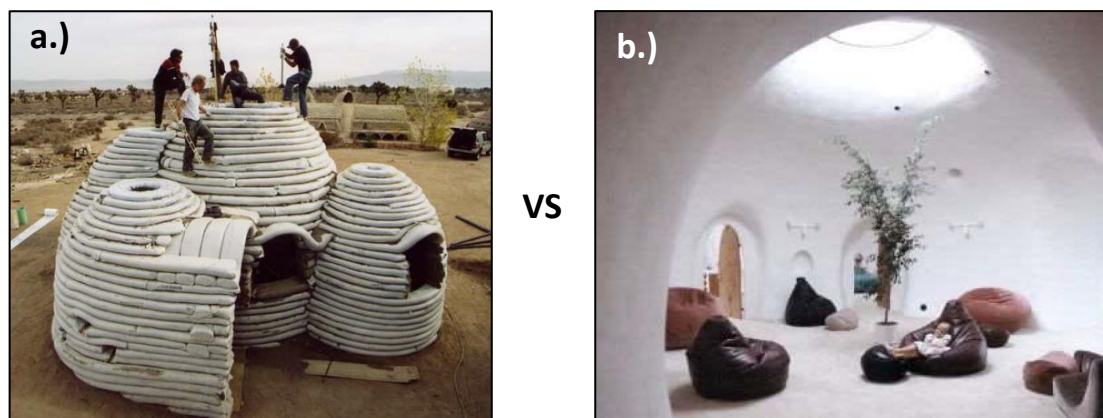
2.2.3.8 SUPERADOBE

Esta técnica de construcción con tierra consiste básicamente en realizar una mezcla de amasado de tierra junto con cemento y agua, para luego ser colocado en bolsas tubulares la cuales son apiladas unas a otras, además estas son sujetadas por alambres con espino galvanizado; por lo general, la tipología más común de viviendas construidas con esta técnica tienen una forma circular lo que dará lugar a formar arcos y bovedillas como configuración de la vivienda, características propias de un diseño capaz de tolerar movimientos sísmicos. Por último, se aplica un revoque e impermeabilización exterior con una mezcla de cal, arena y fibras, mientras que en el interior un revoque simple de adobe

con yeso o cal. Aquí en España, esta técnica es considerada una técnica que amerita su divulgación, puesto que su aplicación, además de pertenecer a la arquitectura sostenible, el Superadobe puede mostrarse como una buena alternativa para los problemas de viviendas de emergencia, de carácter social y de bajo coste; no obstante, se puede adquirir resultados de mayor calidad y estética, tal como se muestra en la comparación de la Figura 26 diferenciando entre una construcción bastante simple y otra con mayores condiciones estéticas (BBC, 2019), (Casares, 2017) and (Mannise, 2024).

Figura 26. (a.) Construcción básica de una vivienda ejecutada con técnica del Superadobe. (b.) Ejemplo de una vivienda elaborada con técnica de Superadobe con resultados más estéticos.

Fuente: Construcción con tierra: Reinterpretación de una tradición (Catalán R., 2018).



2.2.4 EJEMPLOS TÍPICOS EN ESPAÑA

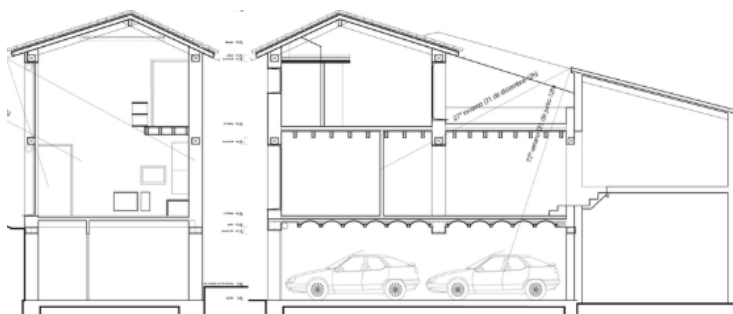
2.2.4.1 CASA TAPIAL EN AYERBE – HUESCA

Este proyecto de vivienda de construcción a base de tierra fue elaborado con la técnica de la Tapia con tierra cruda en el año 2014, contando con 276 m² de vivienda y cuyo 80% de peso total de la edificación se les atribuye a las masas de tierra con la que fueron contruidos los muros que conforman tanto la parte estructural como la de cerramiento de la edificación, en otras palabras, es una vivienda económicamente viable de optar para construcción. (Edra Arquitectura km0, 2014)

Estos muros de tierra compactada aportan propiedades como aislante térmico y regulador higrotérmico, es decir, que en temporadas de invierno los elementos de tierra acumulan el calor durante el día para luego transferirlo al interior de la vivienda durante la noche. Por tanto, esto se traduce en un importante ahorro de costes energéticos, y estas propiedades que se mencionan se adquieren gracias a la incorporación de paja de cebada que corresponde a un 40 % del volumen total de los muros, siendo lo demás restante del amasado de tierra y agua. (Catalán 2018); (Edra Arquitectura km0, 2014).

Figura 27. Vivienda elaborada con Tapial en Ayerbe, Huesca. Ganadora del premio Internacional de Arquitectura Contemporánea en Tierra Cruda – Terra Award 2016.

Fuente: Xavier d'Arquer, 2014.

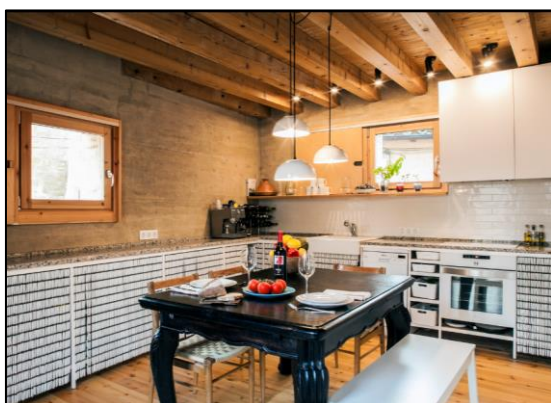


Como se ha visto en apartados anteriores, para llevar a cabo la técnica de la tapia no solicita mano de obra especialmente cualificada o requiere de mucha tecnología lo que la hace una de las técnicas de construcción con menor cantidad de impacto ambiental; no obstante, se deben atender los requerimientos estructurales adecuados en cuanto a la situación y disposición de los huecos tanto para puertas como ventanas, ya que al ser una estructura monolítica compacta los huecos pueden afectar su vulnerabilidad estructural al concentrarse las tensiones en estas zonas, ante esto es que se debe tener una organización metódica de los encofrados y del andamiaje en el perímetro de la obra. Por otro lado, tal como se muestra en la Figura 28 – a, la estructura horizontal de la cubierta está conformada por elementos de madera que apoyan en zunchos del mismo material, y para brindarle a los muros una mayor resistencia ante posibles cargas laterales (viento o sismo), en el interior de los muros se le colocaron elementos verticales de madera y metálicos cada metro como se observa en la Figura 28 – b. (Edra Arquitectura km0, 2014); (Catalán 2018)

Figura 28. (a.) Elementos estructurales horizontales de madera que conforman la cubierta. (b.) Encofrado de madera del Tapial y la colocación de refuerzos verticales de madera y metálicos en los muros.

Fuente: Xavier d'Arquer, 2014.

a.)



b.)



2.2.4.2 PISCINA MUNICIPAL DE TORO – ZAMORA

Este proyecto constructivo emplea la técnica de tierra apisonada o tapiales en la envolvente del edificio cumpliendo su rol como muros estructurales, contando con espesores de 60 cm con tierra obtenida de la zona, como se observa en la Figura 29. De esta manera desde el exterior se percibe con apariencia cerrada, mientras que en el interior ofrece una perspectiva más luminosa y abierta como se ve en la Figura 30, logrando estos efectos mediante patios que a su vez colaboran con la regulación térmica interior del edificio. (Casares, 2017)

La complejidad estructural principalmente fue en el área de la piscina, ya que se intentaba salvar una luz de 35,00 metros entre muros de arriostramiento y una altura de 6,40 metros teniendo en su cubierta cargas permanentes bastante reducidas. La solución fue la de rigidizar el plano de la cubierta a través de vigas de madera laminada de 210 mm x 1250 mm ancladas a un nervio perimetral de remate embebido en el muro tapial; por otro lado, se instala en el núcleo del tapial una columna de acero galvanizado de Ø155.8 mm, además de postesar el muro mediante tirantes metálicos ayudando a mitigar la aparición de carga laterales asegurando su estabilidad (ver en el ANEXO 10 el detalle constructivo del tapial). Además, el muro de tierra al estar en presencia de ambiente húmedo fue necesario disponer de estabilizadores superficiales de apariencia perlante en el muro para mejorar sus propiedades hidrófugas, fungicidas y alguicidas para proteger los muros junto a los mecanismos de ventilación cruzada de los patios interiores, contribuyendo a una mejor regulación de humedad e inercia ambiental. (Antelo E., Sánchez S., Crespo C. & Raya A., 2012)

Figura 29. Planta arquitectónica del edificio de la Piscina Municipal de Toro en Zamora con los muros perimetrales de Tierra apisonada o Tapiales.

Fuente: *Arquitectura de Tierra en el S.XXI*, 2017.

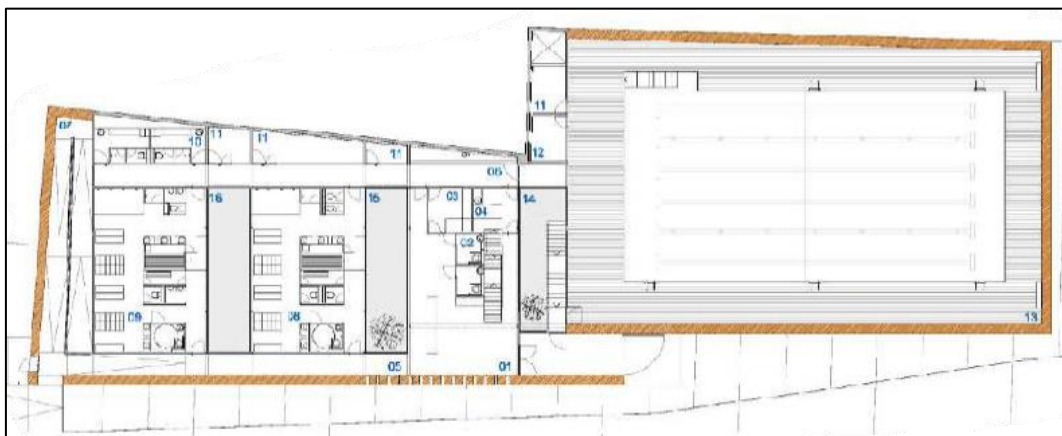


Figura 30. Parte exterior e interior de la piscina climatizada de Toro – Zamora.

Fuente: *Revista de investigación y arquitectura contemporánea*, Universidade da Coruña, 2012.



2.2.4.3 ESCUELA SANTA EULALIA RONCANA – BARCELONA

Esta edificación consta de seis cúpulas o bóvedas núbias elaboradas por Bloques de Tierra Compactada (BTC) junto con paramentos de adobe de forma irregular, todo esto está sostenido por muros de tapia dispuesto en curva (Figura 31); además, para potenciar su propiedad térmica se incorporó perlita expandida, mientras que para mejorar su comportamiento de resistencia estructural la composición para la mezcla del tapial se elaboró con proporciones de cemento blanco y fibras de madera (Casares, 2017).

El estudio llevado a cabo por Casares (2017), menciona las siguientes características técnicas de la edificación de tierra:

- La parte interna de la cúpula de BTC es de color terroso, pero fue tratado con aditivos hidrófugos incoloros, además de una mezcla de resina de silicona.
- En la parte externa, para impermeabilizar la estructura, se le colocó solo resina de silicona.
- Los tapiales curvos poseen un espesor de 40 centímetros.
- Se empleó tierra del mismo recinto para la elaboración de los tapiales.
- Los tapiales fueron contruidos con un encofrado contrachapado de pino, y aplicando la compresión de la tierra de forma manual.

Figura 31. Características de la edificación de tierra de la Escuela Sta Eulalia Roncana – Barcelona.

Fuente: Departamento de Educación – Generalitat de Catalunya

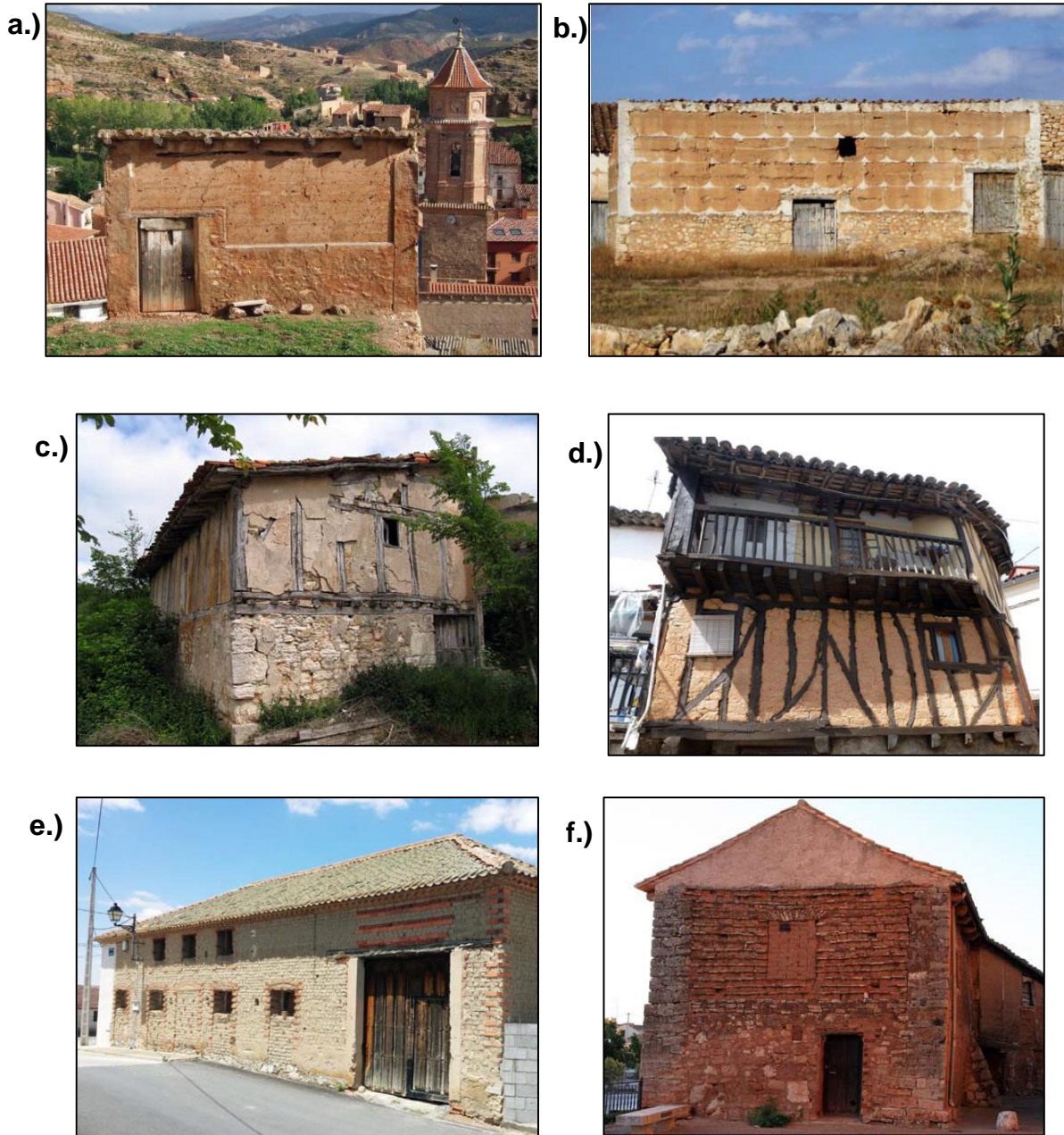


2.2.4.4 VIVIENDAS DE USO RESIDENCIAL

En este apartado se detallarán algunos ejemplos de viviendas con elementos estructurales a base de tierra de uso residencial para tipologías muros monolíticos de tierra (Tapiales), muros de fábrica de tierra (adobe) y estructuras mixtas (entramados):

Figura 32. (a.) Vivienda hecha con tapia de yeso, Rincón de Ademuz. (b.) Construcción de Tapia con brenchas de yeso, Teruel. (c.) Construcción elaborada de entramados, Burgos. (d.) Vivienda construida con entramados de madera, Cáceres. (e.) Edificio de adobe con cantoneras de ladrillo, Segovia. (f.) Fábrica con hiladas alternas de adobe y lajas de piedra y machones de piedra en las esquinas, Burgos.

Fuente: Arquitectura tradicional de tierra en España: Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámica de intervención (Gómez – Patrocinio F., 2018).



2.3 PATOLOGÍAS CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE TIERRA EN ESPAÑA

España es un país que posee un alto índice de presencia de viviendas elaboradas a base de tierra, aunque en el último siglo ante la llegada de nuevos materiales y procesos industrializados las tipologías vernáculas perdieron interés y consideración tanto para tomarse en cuenta en nuevas construcciones, como para proporcionarles mantenimiento para su conservación. Como consecuencia de este abandono hoy en día las edificaciones de esta tipología presentan una amplia variedad de patologías producto de diversos mecanismos de degradación a los que se encuentran expuestos, mismos que si no son eliminados desde su origen se desarrollan progresivamente en lesiones cada vez de mayor magnitud en la vivienda aumentando con ello el riesgo de comprometer su integridad y seguridad estructural (Gómez – Patrocinio F. et al, 2016).

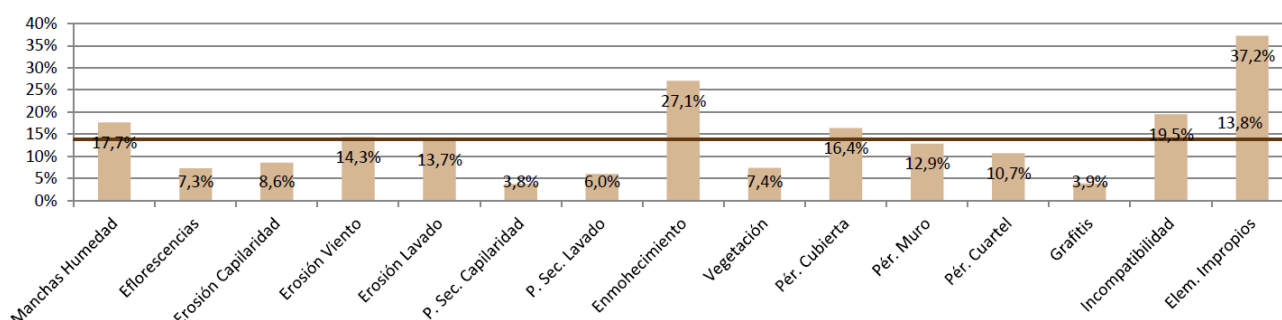
Para caracterizar las patologías que son recurrentes en las edificaciones de tierra en España es necesario consultar trabajos que enfoquen sus investigaciones de manera global; una de estas investigaciones es la investigación dedicada a una Tesis Doctoral por parte de Gómez – Patrocinio (2018), en donde aborda el tema de caracterización de la arquitectura vernácula en España desde el punto de vista de sus características constructivas y la forma en la que estas se degradaban, considerando dentro de su análisis una evaluación de manera cualitativa de un total de 1.787 casos de estudio dentro del territorio español.

2.3.1 FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN MATERIAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA

Según Gómez – Patrocinio (2018), en su estudio a partir de su base de datos documental y fotográfica identificó las lesiones y patologías que de los materiales organizándolos en tres grupos: fenómenos de degradación ocasionados por agentes atmosféricos, biológicos y antrópicos. Como se observa en la Figura 33 podemos ver los fenómenos que tienen mayor presencia dentro de todos los casos evaluados.

Figura 33. Media de los fenómenos de degradación material existentes.

Fuente: Arquitectura tradicional de tierra en España: Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámica de intervención (Gómez – Patrocinio F., 2018).



2.3.1.1 LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ATMOSFÉRICOS

➤ Manchas de humedad:

Estas constituyen un deterioro superficial ocasionado por el aumento del contenido higroscópico en los componentes estructurales. Según Gómez – Patrocinio (2018), esta patología representa un 17,7% de la muestra analizada, manifestándose con mayor frecuencia en la zona basal de los muros debido al fenómeno de capilaridad del agua del suelo. Por este motivo, la

implementación de un zócalo fabricado con materiales de baja permeabilidad (piedra o ladrillo) se emplea como estrategia preventiva para obstaculizar el ascenso hídrico hacia el material térreo para mitigar la formación de dichas lesiones.

Si bien la base de los muros es el área más propensa a presentar estas lesiones, también pueden surgir en zonas medias o superiores bajo condiciones como contacto directo del trasdós con el terreno, deficiencias en los sistemas de evacuación pluvial (aleros insuficientes), y/o adosamiento de estructuras colindantes de menor altura.

➤ **Eflorescencias:**

La humedad presente en la composición interna de un muro puede ocasionar la migración de sales solubles hacia sus superficies exteriores que, al evaporarse el agua que las contiene, estos compuestos precipitan y cristalizan en los paramentos generando estos depósitos salinos; además, si esta lesión se agrava la expansión volumétrica que conlleva puede ocasionar la disgregación superficial de los muros.

Dentro de la investigación de Gómez – Patrocinio (2018), esta alteración se ha identificado en un 7,3% de los casos analizados; en algunas ocasiones las sales no logran alcanzar la superficie exterior antes de sufrir precipitación, acumulándose en capas subsuperficiales del material térreo. Además, menciona que la formación de estas lesiones se ve incrementada tras la aplicación de productos cementosos (revestimientos y morteros de cal, yeso o cemento) en intervenciones de edificios tradicionales, dado que estos materiales contienen sales solubles y luego brotan sobre la superficie del muro.

➤ **Disgregación superficial por presencia de humedad capilar:**

La humedad del subsuelo que migra a través de la acción capilar hacia la base basales de los muros de tierra en contacto directo con el terreno, al producirse este fenómeno incrementa la higroscopicidad del material ocasionando un ablandamiento temporal y una pérdida de resistencia mecánica. De prolongarse esta condición, se acelera la degradación superficial en la base de la estructura, y si no se implementan medidas correctivas para impedir el flujo hídrico ascendente la disgregación incrementará debido a acciones de viento, tránsito de personas o animales, impactos de vegetación, etc. (Gómez – Patrocinio F. et al, 2017).

Según el estudio de Gómez – Patrocinio (2018), registró estas lesiones en un 8,6% de su muestra total, comentando que la humedad capilar reblandece la base de los muros y al estar expuesto ante las acciones mencionadas en el anterior párrafo, se producirá gradualmente una reducción de la sección transversal del muro por erosión.

➤ **Erosión superficial por acción del viento:**

Estas lesiones son provocadas por los flujos eólicos transportando partículas sólidas en suspensión que, al impactar contra los paramentos, generan un proceso de abrasión diferencial en las superficies más expuestas de las edificaciones; es decir, los vértices de los edificios presentan especial susceptibilidad a este fenómeno. Por supuesto, el contexto geográfico en un factor determinante ya que las construcciones en emplazamientos desprotegidos presentan una mayor exposición a los efectos erosivos del viento.

Gómez – Patrocinio (2018) identificó manifestaciones claras de erosión eólica superficial en el 14,3% del total de casos, además, este tipo de deterioro muestra menor incidencia en sistemas constructivos mixtos frente a aquellos ejecutados completamente en tierra (tapia o albañilería

térrea), resultado que puede ser puesto que los primeros se localizan en contextos de mayor densidad urbana lo que aumenta la protección contra el viento.

➤ **Disgregación superficial por lavado:**

La precipitación pluvial interactúa con los muros de tierra mediante escorrentía superficial e infiltración vertical, estos mecanismos conllevan el transporte descendente de partículas minerales desde las zonas altas hacia la base del muro generando un fenómeno de lixiviación progresiva que compromete la integridad estructural. Los efectos de mayor severidad se manifiestan en coronaciones de muros que no están protegidos, superficies horizontales o alféizares expuestos a lluvias, aleros y cubiertas deterioradas, etc. Gómez – Patrocinio (2018)

Como resultados de su estudio, Gómez – Patrocinio (2018) comenta que los casos de estas lesiones abarcan un 13,70% del total de los casos (245 de 1.787 totales), siendo los muros mixtos los de menor incidencia, caso contrario a los muros de tapiales y albañilerías de tierra.

2.3.1.2 LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES BIOLÓGICOS

➤ **Enmohecimiento y líquenes:**

El mecanismo principal de proliferación biológica es la presencia de humedad persistente en los muros de tierra, ya que crea las condiciones ideales para su desarrollo, especialmente en muros cuya orientación es hacia el norte (zonas con menor exposición solar), o zonas con humedad constante (zonas bajas de muros). Respecto a los efectos degradantes hacia el muro, ocasiona una reducción de eficiencia de secado natural del material, y al mismo tiempo una disminución progresiva de cohesión superficial a través de procesos bioquímicos.

Por su parte, Gómez – Patrocinio (2018) nos muestra que estas lesiones están presentes en el 27,1% del total de casos estudiados, estableciéndose como una de las más frecuentes en la globalidad de la investigación, y entre las menos vulnerables son las tipologías de albañilería de tierra, mientras que las más susceptibles son las tapias y muros mixtos. Además, es importante mencionar el efecto contraproducente de los revestimientos, ya que restringe la transpiración natural de los muros posibilitando la retención de humedad.

➤ **Desarrollo de vegetación:**

Gómez – Patrocinio (2018) nos dice que las condiciones para que el crecimiento vegetal tenga lugar en los muros de tierra se presentan cuando existe un equilibrio entre humedad y temperatura (condiciones higrotérmicas adecuadas), cuando las superficies son disgregadas o rugosas que facilita la fijación de semillas, y un alto contenido de humedad. En la base de los muros Mileto et al. (2014) el impacto de la vegetación es negativo debido a que en entramado de las raíces se extienden por la masa del muro generando tensiones pudiendo hasta fisurarlo, de esta manera se compromete su estabilidad, mientras que en zonas de la coronación de un muro desprotegido tienen un efecto estabilizador ya que consolida el material reduciendo procesos erosivos por escorrentía pluvial.

2.3.1.3 LESIONES PRODUCIDAS POR AGENTES ANTRÓPICOS

➤ **Pérdida total o parcial de la cubierta por escasez de mantenimiento:**

La cubierta es el elemento estructural con mayor susceptibilidad al deterioro por falta de mantenimiento, es decir, que su dinámica de deterioro puede iniciar con algo simple como una fractura de teja (falla puntual) y luego convertirse en una pérdida completa de protección superior. Esto a su vez trae consecuencias degenerativas secuenciales para otros elementos, como el inicio de afecciones a vigas lo que acelera la degradación del conjunto edificatorio. Como resultado de su investigación de Gómez – Patrocinio (2018) estas lesiones se registraron en un 16,4% de la muestra, sobre todo en muros de albañilería de tierra y en muros monolíticos, probablemente el sistema de conexión muro – cubierta de los muros mixtos (entramados) presentan mayor eficiencia e incrementan su durabilidad.

➤ **Colapso parcial de muros por escasez de mantenimiento:**

Como en cualquier elemento estructural, si no existen protocolos de mantenimiento, estos muros de tierra pueden presentar degradaciones hasta desembocar en fallas parciales o colapsos totales. Analizando los resultados del trabajo de Gómez – Patrocinio (2018) se aprecian estas lesiones en un 12,9% que corresponden a muros mixtos por sobre los de tapia y albañilería de tierra; se puede atribuir tal vez a la concepción constructiva de los entramados y las discontinuidades de los materiales que limitan su adherencia y por tanto facilita su desprendimiento, sobre todo en muros mixtos sin revestimiento de otros productos que ayuda a reducir significativamente las pérdidas de material.

➤ **Despedimiento del relleno de tierra en entramados por escasez de mantenimiento:**

Como se vio en el apartado anterior, el mecanismo del desprendimiento del relleno en los muros mixtos es debido principalmente a la incompatibilidad de propiedades mecánicas de los material, módulos elásticos, dilatación térmica y pérdida progresiva de adherencia Mileto et al. (2014). Dentro de la evaluación del trabajo de Gómez – Patrocinio (2018), excluyó dentro de este segmento los “muros tejidos” que, a pesar de estar englobados en esta familia, su mecanismo de fallo sigue otros lineamientos. A partir de estas directrices observó que este fenómeno afecta en un 10,7% del total de entramados estudiados, además, es considerado el principal sistema de colapso de los muros de entramado; además, su presencia es mayor en entramados con relleno de albañilería (colocación) que en rellenos monolíticos (vertido), probablemente debido a su diferencia de conexión entre elementos de relleno y madera, teniendo el monolítico mejor adaptabilidad de la masa de tierra con la subestructura de madera.

➤ **Grafitis:**

Estas lesiones si bien solo modifican el aspecto estético de las edificaciones son considerados actos vandálicos, por ende, se consideran dentro de las categorías de lesiones las cuales están presentes en un 3,9% del total de la muestra en el estudio de Gómez – Patrocinio (2018), representando una de las lesiones con menor incidencia. Es más común identificarlos en muros elaborados de tapial y albañilería de tierra, resultando más vulnerables a esto los edificios próximos a un centro urbano.

➤ **Problemas derivados del empleo de materiales industrializados en intervenciones:**

La incorporación de componentes modernos como cemento o pinturas plásticas, en intervenciones de conservación genera frecuentes incompatibilidades con los sistemas tradicionales manifestándose en lesiones como fisuraciones por diferencias en coeficientes de dilatación térmica, fallas de adherencia por materiales heterogéneos, o incremento de humedades por motivos de impermeabilidad del muro. Dentro de toda la muestra de análisis del estudio de Gómez – Patrocinio (2018), el 27,2% de casos presentaban estas lesiones en casos con intervenciones que incluyeron materiales industrializados, encontrándose con mayor frecuencia en sistemas monolíticos, por otro lado, presenta menor problemas de compatibilidad los muros mixtos respecto a la tapia y unidades de albañilería.

➤ **Instalaciones de elementos impropios:**

Siguiendo con el estudio de Gómez – Patrocinio (2018), menciona que la incorporación de elementos ajenos al sistema constructivo original (cables, señalética, etc.) representa la patología más recurrente en el estudio con 37.2% en la muestra analizada. Estas intervenciones generan afecciones tanto estéticas como estructurales debido a alteraciones materiales, eflorescencia por migración de sales o fisuración por problemas de incompatibilidad térmica o mecánica.

Tabla 5. Resultado del análisis del estudio “Arquitectura Tradicional de Tierra en España: Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámica de intervención”.

Fuente: Arquitectura tradicional de tierra en España: Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámica de intervención (Gómez – Patrocinio F., 2018).

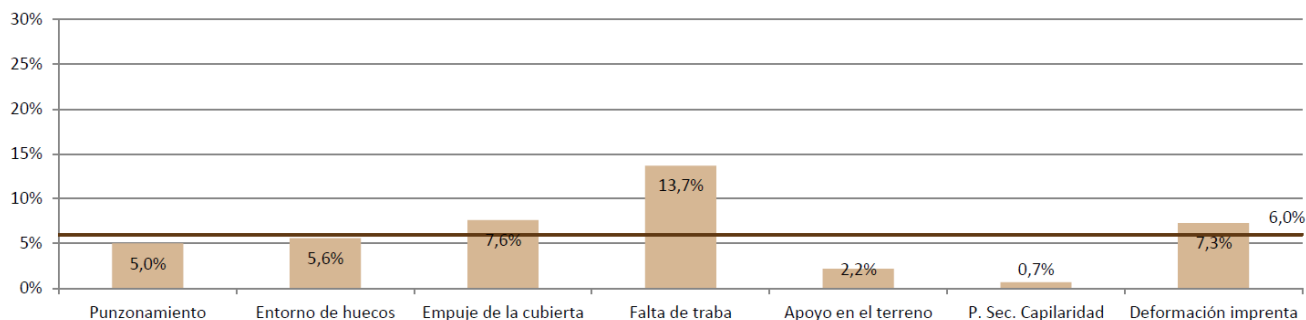
TIPOLOGÍA	INCIDENCIA	JUSTIFICACIÓN
Albañilería de tierra	27,8%	Ofrece mayor resistencia ante intervenciones puntuales.
Tapial	37,4%	Es vulnerable a perforaciones debido a la homogeneidad del material.
Entramados	54,7%	Está más vinculado a contextos urbanos con alta demanda de servicios como electricidad.

2.3.2 FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN ESTRUCTURAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA

El estudio cuantitativo de fallos estructurales en Arquitectura Tradicional de Tierra en España (Gómez – Patrocinio, 2018) analizó siete tipos de mecanismos como se observa en la Figura 34 agrupados en tres categorías: concentración de tensiones, deformaciones excesivas y acción ambiental. Estas patologías presentaron una incidencia media del 6,0%, siendo significativamente menos frecuentes que los procesos de degradación material. La fisuración por traba insuficiente entre elementos fue la más común con 13.7% de casos, mientras que la inestabilidad por pérdida de sección basal resultó la más rara con un 0.7%.

Figura 34. Fenómenos de degradación estructural y mecanismos de fallo estructural.

Fuente: Arquitectura tradicional de tierra en España: Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámica de intervención (Gómez – Patrocinio F., 2018).



2.3.2.1 LESIONES ESTRUCTURALES POR MOTIVOS DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

➤ Fisuración debida a punzonamiento debido a cargas puntuales:

La ausencia de elementos como durmientes bajo vigas de forjados genera tensiones concentradas en muros de tierra manifestándose mediante fisuras verticales bajo los apoyos, que pueden desviarse hacia zonas débiles como huecos; los muros mixtos muestran mayor eficacia al transferir cargas a su esqueleto de madera, eliminando prácticamente fisuras por punzonamiento, mientras que sistemas monolíticos y de albañilería presentan comportamientos similares, con leve ventaja para los primeros debido al mayor compactado (MVCS, 2014).

El uso de morteros de cal o yeso mejora en un 20 – 30% la resistencia a cargas puntuales respecto a morteros de tierra, al superar la resistencia de las piezas térreas y evitar fallos por cortante en juntas. Estas diferencias subrayan la importancia de sistemas de reparto activo (carreras superiores) o pasivo (morteros reforzados) para prevenir daños por concentración de tensiones (Gómez – Patrocinio, 2018).

➤ Fisuración por debilidades introducidas por vanos:

El estudio de Mileto et al. (2014), identificó que los vanos de puertas y ventanas generan discontinuidades estructurales en muros de tierra manifestándose como fisuras o deformaciones. Estas lesiones presentan una distribución desigual, es decir, que son prácticamente inexistentes en muros mixtos debido a su diseño celular que integra huecos como "cuarteles vacíos" sin alterar el flujo de cargas, mientras que afectan más a albañilería de tierra que a tapia por la mayor resistencia mecánica y monolitismo de esta última.

En sistemas homogéneos (tapia, albañilería), los vanos crean concentraciones de tensión alrededor de dinteles, aunque el uso de morteros con conglomerantes (cal, yeso) no mostró impacto significativo en la reducción de estos daños. Los resultados destacan la superioridad de los sistemas mixtos para absorber discontinuidades y sugieren que, en muros masivos la resistencia del material es clave para mitigar fisuras perimetrales (Gómez – Patrocinio F, et al., 2016).

2.3.2.2 LESIONES ESTRUCTURALES POR DEFORMACIONES EXCESIVAS

➤ Fisuración debida a la rotación del muro por empuje de cubierta:

Los empujes horizontales en la coronación de muros generados por una fijación deficiente en cumbreras de cubiertas pueden ocasionar la formación de fisuras verticales y deformaciones al crear importantes momentos de vuelco; estas lesiones se manifiestan en forma de fisuras generalizadas en encuentros con muros perpendiculares cuando el empuje es homogéneo, o mediante deformación centralizada con fisuras verticales cuando los elementos transversales retienen los extremos (Mileto et al., 2014).

En base a los resultados del estudio de Gómez – Patrocinio (2018), los muros mixtos muestran mayor resiliencia representando solo entre 2% – 3% de incidencia, gracias a la flexibilidad de su subestructura de madera que absorbe deformaciones angulares, a las esquinas reforzadas con cornijales que resisten tracciones, y a un modo de fallo menos evidente (fisuras ocultas en encuentros entre montantes y rellenos). En contraste, los muros de tapia y albañilería se muestran más vulnerables al carecer de estos mecanismos de redistribución de cargas.

➤ Fisuración debido a falta de traba entre elementos:

Gallego & Arto (2015), comentan que las discontinuidades constructivas como elementos mal trabados o modificaciones posteriores generan fisuras especialmente cuando combinan materiales con diferente rigidez y dilatación térmica. Estas patologías son tres veces más frecuentes en muros mixtos debido a su diseño inherente con subestructura de madera y rellenos no integrados, respecto a sistemas de tapia o albañilería de tierra, donde muestran incidencias similares entre sí pero con causas distintas.

En muros de albañilería, las fisuras surgen principalmente en encuentros con elementos añadidos (machones, carpinterías), mientras que en tapia monolítica se concentran en esquinas y juntas de secado; como contrapunto, los muros tejidos y aquellos con morteros suplementados (cal, yeso, etc.) reducen estas lesiones entre 40% - 50%, gracias a la cohesión de la urdimbre de fibras en tejidos, y por la mayor resistencia mecánica en sistemas de tierra – madera; por tanto resalta al mismo tiempo la importancia de los diseños integrados desde fase inicial y el uso de morteros mejorados para minimizar dichas discontinuidades (Gómez – Patrocinio, 2018).

2.3.2.3 LESIONES ESTRUCTURALES POR ACCIONES DEL ENTORNO DEL EDIFICIO

➤ Fisuración debido a problemas en apoyo en terreno:

Las fisuras y deformaciones estructurales producto de asentamientos diferenciales del terreno aparecen por una transmisión desigual de cargas o por cimentaciones superficiales localizadas en pendientes pronunciadas, y aunque estos procesos suelen estabilizarse tras la puesta en carga inicial, intervenciones posteriores como excavaciones, construcciones adyacentes o modificaciones estructurales pueden reactivar estos movimientos (MVCS, 2014). La distribución de estos daños es homogénea entre sistemas constructivos de tapias, albañilería de tierra y muros entramados, lo que sugiere que la técnica empleada tiene menor relevancia que factores geotécnicos en estos casos (Keefe, 2005).

Los edificios en pendiente son particularmente vulnerables a deslizamientos que provocan descalces y distorsiones estructurales, es por ello que se destaca la importancia de un buen estudio geotécnico previo, especialmente en terrenos heterogéneos o con pendiente, adicional a ello, es de interés realizar un monitoreo continuo tras intervenciones en el entorno edificado, ya que el equilibrio del suelo puede alterarse décadas después de la construcción (Gómez – Patrocinio, 2018).

➤ **Riesgo de inestabilidad de muro debido a la pérdida de sección en su base:**

La conclusión a la que llega el estudio de Gómez – Patrocinio (2018) revela que la humedad capilar persistente en la base de muros de tierra puede generar pérdidas de sección críticas, representando la fase avanzada de mecanismos de erosión superficial y, aunque esta patología muestra una baja incidencia en el total de casos, su potencial riesgo estructural es significativo. Es decir, del 8.6% de casos con problemas de humedad capilar, el 44.2% evolucionó a pérdidas de sección no superficiales, y el 19.1% de estos alcanzó un estado que comprometía la estabilidad del edificio.

Estos datos indican que la progresión de daños desde erosión superficial hasta inestabilidad estructural sigue un patrón predecible y que la instalación de barreras antihumedad o drenajes podrían prevenir el 80% - 90% de los casos graves. Por tanto, la homogeneidad de resultados entre técnicas constructivas sugiere que la vulnerabilidad depende más de la exposición a humedad que del sistema estructural empleado (Gómez – Patrocinio, 2018).

➤ **Riesgo de inestabilidad producto de deformaciones de imprenta de muro mixto:**

Los sistemas constructivos mixtos presentan una baja incidencia de daños estructurales gracias a su eficiente subestructura de madera; no obstante, son vulnerables a deformaciones por giro de elementos cuando aparecen cargas horizontales o se degradan los empotramientos. Estas deformaciones pueden evolucionar de dos maneras, en casos menores solo provocan la pérdida de montantes o travesaños aislados, mientras que en situaciones críticas generan esfuerzos de segundo orden que arrastran a toda la estructura hasta el colapso (Mileto et al., 2014).

Los muros tejidos muestran el doble de riesgo que los entramados tradicionales debido a que sus elementos de cierre ligeros no pueden confinar la subestructura, a diferencia de los rellenos densos en los entramados, es por ello que se destaca la importancia de reforzar los empotramientos perimetrales, y de emplear rellenos con cierta rigidez (barro apisonado tapia) en zonas sísmicas o con cargas horizontales significativas (Gómez – Patrocinio, 2018).

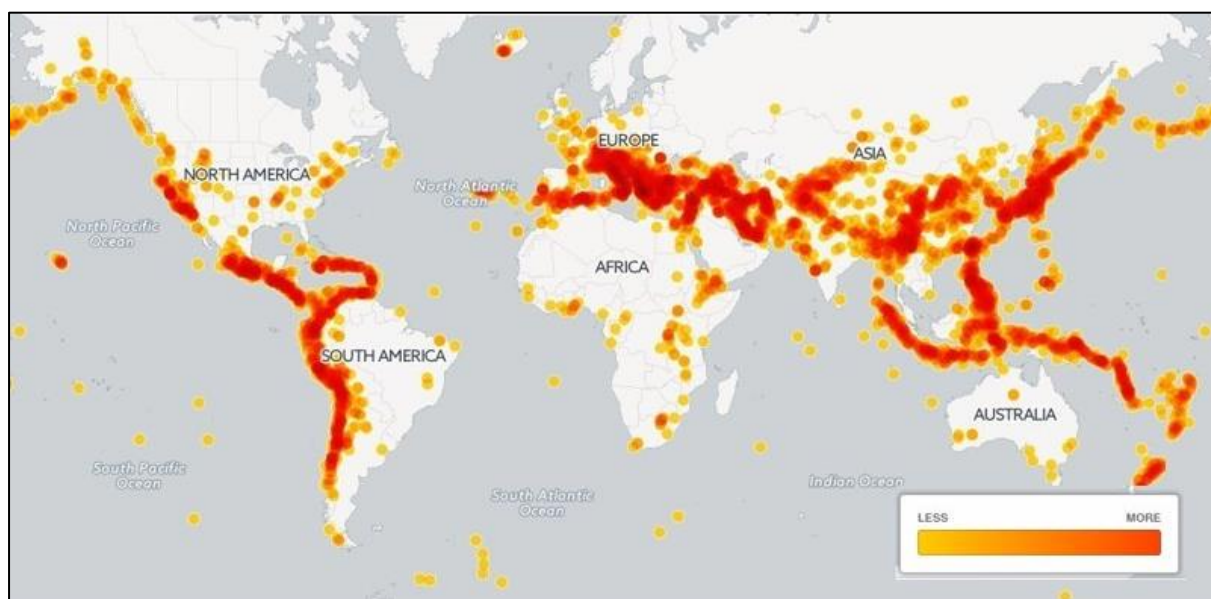
2.4 EFFECTO DE LOS SISMOS EN EDIFICACIONES DE TIERRA

Es importante mencionar lo comentado por Europa Press Internacional (2016), donde nos muestra un mapa basado en un repositorio de datos que recopila registros históricos de los 5.500 terremotos más devastadores ocurridos a nivel mundial desde la actualidad hasta el año 2150 a. C., basándose en fuentes documentales; como se aprecia en el mapa de la Figura 35, los sismos presentan una distribución que coincide con áreas de intensa actividad geológica en donde convergen placas tectónicas.

Respecto a la región de España, ha experimentado 24 terremotos catalogados como graves por la NOAA, siendo el más trágico registrado en el año 1829 en Torrevieja que ocasionó aproximadamente 2.000 víctimas mortales, en el año 1804 otro movimiento sísmico azotó Almería, provocando 164 decesos, y en 1884, un nuevo temblor dejó un saldo de 745 muertos en la región de Málaga; en general, los sismos con mayor número de fallecidos en la historia del país se concentran en el siglo XIX Europa Press Internacional (2016).

Figura 35. Zonas con mayor presencia de grandes terremotos a lo largo de la historia.

Fuente: Europa Press Internacional, 2016.



Según Blondet M., et al. (2003), aproximadamente el 30% de la población mundial reside en construcciones de adobe, especialmente en lugares donde existen escasos recursos económicos, además, según diversos estudios podemos observar que estas tipologías se suelen hallar en regiones de África, América Latina, Oriente Medio y en regiones del continente asiático, por tanto, si lo comparamos con la Figura 35 se puede estimar con facilidad que existe una gran mayoría de estos edificios emplazados en zonas de alto riesgo de exposición a un terremoto devastador.

Junto a esto, existe una insuficiencia de datos experimentales respecto al comportamiento de las edificaciones de tierra ante los sismos lo cual desemboca en una construcción con un muy bajo control de calidad, son por estas razones que estas edificaciones son principalmente vulnerables ante estos eventos, colapsando innumerable cantidad de inmuebles y con ello produciendo un alto índice de pérdidas económicas y humanas (Astorga, 2011).

Blondet et. al (2011) explica que las estructuras de mampostería de adobe son vulnerables frente a los movimientos sísmicos debido a que la mampostería no es capaz de resistir grandes esfuerzos de tracción o de corte y además es altamente frágil. Muchas viviendas de este tipo han colapsado parcial o totalmente luego de algunos terremotos ocurridos.

En el año 2007, en la ciudad de Pisco en Perú, ocurrió un terremoto de 7.9 en la escala Richter, el movimiento telúrico ocasionó afecciones sobre todo en las edificaciones de adobe en ciudades y pueblos rurales localizados en la zona costera central; es decir, los daños se traducen en cuantitativamente en más de 100 mil viviendas de mampostería de adobe seriamente dañadas o destruidas (JICA, 2008). Según la Dirección de Sismología del Instituto Geofísico del Perú (2007), en su

artículo denominado “*Parámetros de la fuente del terremoto de Pisco (Perú)*” manifestó que el número de viviendas dañadas fue más de 230 mil, mientras que las viviendas que quedaron destruidas fueron en torno de los 52 mil, además mencionan que estas últimas sufrieron las consecuencias debido a problemas de licuación de suelos, tal como se puede apreciar en la Figura 36, es un claro ejemplo de los resultados de una edificación de tierra bajo los efectos de un sismo severo.

Figura 36. Colapso de una vivienda de adobe tras el terremoto de Pisco, Perú en 2007.

Fuente: CERECIS/UNESCO (2008).



Por otro lado, en el terremoto registrado en el año 2001 en El Salvador, las cifras de edificaciones de adobe afectadas fueron en torno a las doscientas mil, las cuales fueron dañadas severamente o que sufrieron colapsos parciales, tal y como se puede observar en la Figura 37 que muestra una de estas edificaciones de tierra; junto a estas cifras, un total de 1.100 personas fallecieron bajo los escombros de dichas viviendas y aproximadamente un millón de pobladores damnificados quedaron sin hogar Blondet M., et al. (2003).

Figura 37. Colapso total de muros de adobe. Terremoto en El Salvador en febrero del 2001.

Fuente: EERI Enciclopedia Mundial de Vivienda (2003).



Es importante mencionar lo ocurrido el 8 de septiembre de 2023 en Marruecos, un sismo de magnitud 6.8 sacudió al país con un epicentro localizado a unos 70 kilómetros de Marrakech [...]. Según el Gobierno marroquí, aproximadamente 59.600 viviendas padecieron las consecuencias del terremoto, además que el 32% de estas resultaron con lesiones bastante graves y el 68% restante con algunos daños parciales entre sus elementos estructurales (Soler S., 2024); un ejemplo claro es como el que se puede observar en la Figura 38.

Figura 38. Una vivienda de adobe dañada por el terremoto de Marruecos en 2023.

Fuente: FRANCE 24, 2023.



Tras este suceso, los equipos de rescate que trabajaban entre los escombros mencionaron que las viviendas elaboradas a base de adobe, piedra y/o madera, que son habituales en estas regiones, disminuían rotundamente las posibilidades de hallar supervivientes entre los amasijos de escombros; es por ello que fue compleja la operación de rescate porque la mayoría de muros y techos se redujeron a acumulaciones de tierra al derrumbarse, sepultando todo aquello que se encontraban en el interior sin dejar cavidades que permitieran la supervivencia de sus ocupantes, cosa que sucede diferente en edificaciones de hormigón que al derrumbarse los elementos, donde se forman cámaras de aire entre los escombros (Elijechtimi, 2023).

Figura 39. Escombros de casas de materiales térreos ocasionadas por el terremoto de setiembre 2023 en la provincia de Al Haouz – Marruecos.

Fuente: Internacional 20minutos.



Tal como señala Antonio Nogales (setiembre 2023), coordinador de operaciones de rescate, tras un derrumbe de edificaciones elaborados con materiales térreos se generan un sellamiento más efectivo debido a las propiedades de los materiales, lo que disminuye drásticamente la probabilidad de rescatar con vida a las víctimas durante las primeras horas críticas, mientras que materiales como el acero y el hormigón favorecen la aparición de espacios que permitan la supervivencia.

Respecto al contexto sísmico reciente de España, el terremoto con mayor letalidad ocurrió el 20 de abril de 1956 en Albolote (Granada), cobrándose la vida de doce personas y dejando más de setenta heridos, además de muchas estructuras perjudicadas; y el ocurrido en 1969 al suroeste del Cabo San Vicente, dejando atrás cuatro víctimas mortales, quedaron colapsadas alrededor de 500 viviendas; y el evento sísmico más reciente fue el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 de magnitud 5.1 en la escala de Richter, destaca por su tragedia al cobrar nueve vidas (Cabañas et al., 2011).

El fenómeno sísmico ocurrido en Lorca, cuyo epicentro se situó en las inmediaciones de Lorca, afectó directamente a más de 90.000 personas alcanzando una intensidad de grado VII en la escala EMS europea, y posterior al suceso, se pudieron detectar daños significativos en muchas viviendas y más de 75 edificios públicos de carácter religioso resultaron afectados (EFE, 2011).

Figura 40. Daños materiales en edificaciones en zonas afectadas por el terremoto de Lorca – 2011.

Fuente: 20minutos, mayo 2011.



2.5 PROPIEDADES DE LA TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Las investigaciones de los últimos años en el terreno de las edificaciones de tierra han ido perfeccionado y desarrollado sus técnicas de construcción, además de ir consolidando su valor como material actual, al mismo tiempo estos estudios han permitido corroborar que cumple con criterios y requisitos que lo hacen considerar como ecológicos y sostenibles (Jové & Sáinz, 2009).

Es importante recalcar lo señalado por Jové y Sáinz (2009) en el Congreso de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos 2004/2009, donde mencionan que las propiedades de la tierra dependen específicamente de su origen geográfico, por ejemplo, la tierra cuyo origen se encuentra en las de montaña tendrán un carácter más arenosas, mientras que las que provienen de río serán más arcillosas. Además, para que sea apta para emplearlo en la construcción, debe estar libre de materia orgánica (plantas, humus, etc.), siendo la arcilla el principal material que actúa como aglutinante, en comparación con el limo, la arena y otros agregados sirven de relleno, aunque algunos de estos mejoran la capacidad cohesiva de la arcilla.

2.5.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Por lo general, los materiales cuyo componente principal es la tierra suelen ser solubles en agua, lo que permite que al humedecerse puedan recuperar su forma plástica inicial, esta característica hace que los elementos como los muros y los bloques de tierra sean un material totalmente reciclable y reutilizable, característica que lo hace ideal para actuaciones como ampliaciones o restauraciones de edificaciones de este tipo; el único inconveniente es que, hasta hoy en día se busca disminuir su

solubilidad con el objetivo de mejorar su resistencia mecánica, puesto que el uso de aditivos como el cemento puede llegar a contrarrestar muchas de sus cualidades naturales positivas. (Casares, 2017)

Alguna de las características con mayor relevancia que presenta la tierra como material de construcción de viviendas son las mencionadas a continuación:

❖ **Resistencia al fuego:**

En aspecto de seguridad, la tierra ofrece buena resistencia y estabilidad frente a la acción del fuego debido a su naturaleza mineral, actuando como retardante y soportando al mismo tiempo altas temperaturas; en cuanto al aislamiento acústico, los muros de tierra destacan por su densidad y espesor, así como por su textura porosa e irregular, lo que también ayuda y mejora la absorción del sonido, similar a los aislantes acústicos de alta calidad actuales (Casares, 2017).

❖ **Aislante térmico:**

El peso específico del tapial prensado varía entre unos 1.700 y 2.100 kg/m³ según su composición y el uso al que esté proyectado a emplearse, y es por esta razón que no se considera un aislante térmico, mientras que su conductividad térmica se sitúa entre 0,64 y 1,03 W/mK, aunque podrían surgir mejoras con futuras combinaciones; no obstante, funciona bien como una masa térmica por el espesor que requieren sus muros (Casares, 2017).

❖ **Aislante acústico:**

Los elementos de adobe y el tapial destacan como buenos aislantes del sonido, tal como se mencionó en el primer punto de este apartado, su textura desigual en superficie reduce el eco interno, generando ambientes interiores más silenciosos, así mismo, los edificios de tierra cruda aíslan mejor del ruido exterior que los contruidos con materiales industriales tradicionales, ya sea de hormigón, acero, entre otros (Casares, 2017).

❖ **Control de humedad:**

Los elementos de tierra tienen además la capacidad de regular eficazmente la humedad ambiental absorbiéndola y liberándola rápidamente, esto hace que contribuya a crear espacios interiores sanos y agradables, mejorando los términos del confort de los usuarios; así mismo, esta propiedad también favorece el buen rendimiento de elementos de madera como carpinterías y estructuras internas, lo que se convierte en una ventaja muy buena para las edificaciones de tipología de entramados de madera (Casares, 2017).

❖ **Consumo energético:**

El uso del tapial y el adobe desde los tiempos antiguos se debía a representaba un fácil acceso y a un bajo consumo energético para la construcción de viviendas, sin embargo, hoy en día el transporte y la maquinaria para su construcción pueden elevar sus costes, pero la energía incorporada durante su fabricación es casi inexistente, lo que los hace materiales muy eficientes energéticamente, tal vez es el principal motivo por lo que este material se cataloga en la actualidad como uno de los más sostenibles (Casares, 2017).

Tabla 6. Comparación del consumo energético entre diferentes materiales empleados en la construcción.

Fuente: Arquitectura de tierra en el s.XXI. (Casares, 2017).

MATERIAL	CE (MJ/kg)	EC (kg CO ₂ /kg)
ALUMINIO ALEACIONES	218,00	11,46
RESINAS	140,00	5,91
GRP	100,00	8,10
CAUCHO	101,00	3,18
POLIETILENO	83,00	1,94
COBRE	70,00	3,83
ACERO INOXIDABLE	56,70	6,15
BITUMINOSOS	47,00	0,48
ACERO AL CARBON	35,30	2,75
FIBRA DE VIDRIO	28,00	1,53
HIERRO EN FUNDICION	25,00	1,91
VIDRIO	15,00	0,85
GRC	10,9	2,10
MADERA	8,50	0,46
CEMENTO PORTLAND	4,60	0,83
HORMIGON ARMADO (3% ACERO)	3,50	0,32
ASFALTO	2,40	0,14
LADRILLO DE ARCILLA	3,00	0,22
HORMIGON ARMADO (3% ACERO)	1,10	0,16
ADOBE	0,00	0,06
AGREGADOS	0,11	0,005
TAPIAL (SIN ESTABILIZAR)	0,00	0,004

❖ **Resistencia al paso del tiempo:**

Cabe mencionar que, a pesar de que los ensayos técnicos a veces muestran resultados negativos para el tapial en este aspecto, muchas estructuras han resistido eficazmente durante años, que hasta hoy en día son considerados como patrimonio cultural en España; por otro lado, su naturaleza absorbente exige controlar cuidadosamente la humedad, especialmente desde el suelo y la parte superior de los elementos, tratando de impermeabilizar esas zonas, y al exterior debe diseñarse teniendo en cuenta su erosión natural para garantizar la durabilidad (Casares, 2017).

❖ **Estético:**

Un sistema de Tapial bien construido envejece de forma excepcional tanto en funcionalidad como en apariencia, su particular resistencia a la humedad impide la aparición de moho, manteniendo su color original durante años, además, los tonos ocres se intensifican con el tiempo y sus componentes reflejan la luz con gran fuerza visual (Casares, 2017).

A continuación, se presenta en forma de tabla de resumen, algunas características mecánicas recogidas en el estudio de investigación de Casares (2017), datos que consultó a su vez de otras investigaciones, normativas e informes constructivos de instituciones dedicadas al tema en cuestión:

Tabla 7. Resistencia a compresión (N/mm^2), y densidad (kg/m^3) de elementos estructurales contruidos a base de tierra.

Fuente: Arquitectura de tierra en el s.XXI. (Casares, 2017).

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m^3)	f'c (N/mm^2)
ADOBE	1200 – 1500	0,53 – 1,72
COB	1625	1,00
BLOQUE DE TIERRA COPRIMIDA (BTC)	1700 – 2000	1,0 – 5,0
TAPIALES	1900 – 2200	3,0 – 4,0

Tabla 8. Diferencia entre las resistencias al fuego de elementos contruidos de diferentes materiales.

Fuente: Arquitectura de tierra en el s.XXI. (Casares, 2017).

MATERIAL	ESPEJOR (mm)	REI (min)
MUROS DE TIERRA	150	90
HORMIGÓN ARMADO	160	90
BLOQUES DE HORMIGÓN	200	120
PARED DE LADRILLO	200	120

Tabla 9. Diferencias de conductividad entre diferentes tipos de materiales empleados para la construcción de edificaciones vernáculas.

Fuente: Arquitectura de tierra en el s.XXI. (Casares, 2017).

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m^3)	CONDUCTIVIDAD W/mK
ADOBE	1200	1,6
BLOQUE DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC)	1700	0,81
TAPIALES	1400 – 2000	0,46
HORMIGON ARMADO	2300 – 2500	2,3
HORMIGON EN MASA IN SITU	2000 – 2300	1,65
BLOQUE DE HORMIGON	860	0,91
PARED DE LADRILLO MACIZO	2170	1,04
PARED DE LADRILLO HUECO	670	0,22

Además, en el estudio llevado a cabo por Yamín, Phillips, Reyes y Ruiz (2014), se realizaron ensayos de laboratorio para tener conocimiento para la interpretación del comportamiento experimental de muros de adobe y tapias, para ello se realizaron ensayos de compresión, flexión y compresión diagonal sobre especímenes de diferentes dimensiones y configuraciones.

Tabla 10. Valores promedio de densidad de los materiales empleados para los especímenes dispuestos a los ensayos de laboratorio a compresión, tracción y compresión diagonal.

Fuente: Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzos de casas en adobe y tapia pisada. (Yamín, Phillips, Reyes & Ruiz, 2014).

ESPECIMEN	γ_{prom} (ton/m ³)
UNIDADES DE ADOBE	1,82
MURETES DE ADOBE	1,78
MURETES DE TAPIA PISADA	1,93

Tabla 11. Valores promedio de las pruebas mecánicas de caracterización de los materiales ensayados.

Fuente: Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzos de casas en adobe y tapia pisada. (Yamín, Phillips, Reyes & Ruiz, 2014).

Material	Prueba	Valor promedio (MPa)	Desviación estándar (Mpa)
ADOBE	Resistencia a la compresión de unidades de adobe	2.84	0.855
	Resistencia a la flexión de unidades de adobe	0.49	0.188
	Resistencia a la compresión de muretes de Adobe	1.1	0.256
	Módulo elástico de muretes de Adobe (E)	98.1	35.9
	Esfuerzo de tracción diagonal de muretes de adobe	0.028	0.008
	Módulo de cortante (G)	27.4	10.6
TAPIA PISADA	Resistencia a la compresión de muretes de tapia	0.55	0.184
	Módulo elástico de muretes de tapia	66.6	31.2
	Esfuerzo de tracción diagonal de muretes de tapia	0.037	0.014
	Módulo de cortante (G)	31.2	13.0

2.6 TÉCNICAS PARA MEJORAR EL COMPORTAMIENTO DE ESTE TIPO DE CONSTRUCCIONES ANTE LA ACCIÓN DE SISMOS

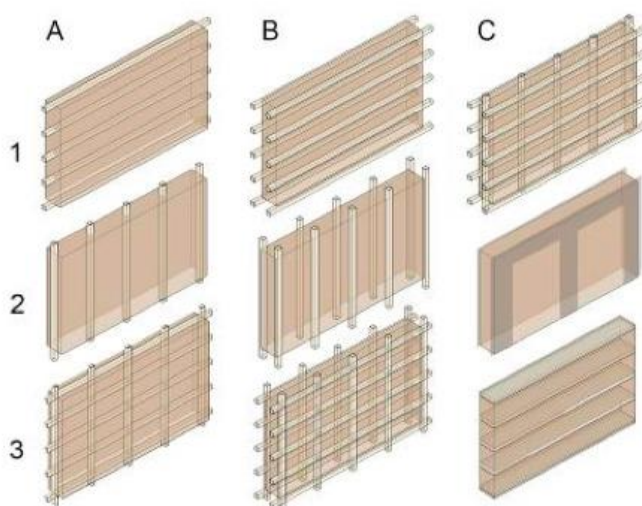
El abanico normativo que poseen las construcciones con tierra a nivel internacional y nacional es insuficiente como para permitir regularlas como material principal o estructural, lo que lo lleva a restringir su aplicación, a pesar de ello, el desarrollo de técnicas de reforzamiento para estas tipologías ha llegado a revitalizarlo; no obstante, tanto las soluciones propuestas como los ensayos analizados se basan en tipologías arquitectónicas tradicionales que, bajo escenarios sísmicos resultan frecuentemente inapropiadas e incluso contraproducentes (Cid, Mazarrón, y Cañas, 2011).

Es un hecho que la baja resistencia a tracción de los elementos de tierra explica su elevada vulnerabilidad sísmica, y teniendo en cuenta que incorporar refuerzos con materiales dúctiles mitigaría este problema, se propone que la morfología constructiva es un factor determinante, ya que puede reducir las solicitaciones a tracción y optimizar el trabajo a compresión (Gaete, 2010; Astorga, 2011).

Tal como menciona Leroy et al. (2000), se ha demostrado que la configuración mural en su relación espesor – altura influye directamente en su desempeño estructural, es decir, que la geometría es un factor determinante en el comportamiento mecánico, mientras que algunos sistemas estructurales intentan aprovechar los esfuerzos de tensión, las construcciones en tierra requieren sistemas priorizan las compresiones para garantizar su estabilidad especialmente en zonas sísmicas. La filosofía de diseño sísmico basado en estabilidad busca aprovechar la capacidad de disipación energética que exhiben los muros de tierra tras su fisuración; esto se consigue conteniendo el daño estructural y controlando el desplazamiento en los muros fracturados (Gaete, 2010).

Figura 41. Reforzamiento de muros portantes y sus características en una adecuación sísmica. (1A) Sistema CET Sistema Norma Perú. (1B) Cañas internas, Bambú Vertical. (1C) Mortero armado con alambre de púas. (2A) Confinamiento de madera con correas de nylon o fibra de vidrio. (2B) Muros textiles con cañas. (2C) Correas de nylon. (3A) Nylon y barras de acero. (3B) Mallas electrosoldadas y/o geomallas. (3C) Bandas de madera o bandas de hormigón.

Fuente: Getty Conservation Institute.



En el seminario 9ª SIACOT (2010) los autores resaltan la importancia de reforzar los muros macizos estructurales de tierra con el objeto de brindarles la suficiente tracción para hacer frente a un movimiento sísmico (conseguir mayor ductilidad). Otras de las alternativas que se plantean son la de limitar los movimientos fuera de su plano en la parte superior de los muros; ofrecer conexiones flexibles en la unión de muros perpendiculares, y la de posibilitar un balanceo fuera del plano que, básicamente en una edificación cuyo diseño es elaborado en función de la resistencia intenta siempre eludir (Gaete, 2010).

Por otro lado, si hablamos bajo el contexto del ámbito nacional, tal y como se comentaba en el apartado 2.2.1 del presente documento, es importante mencionar que en la investigación de Mileto C. et al. (2019), encontraron en sus bases de datos que, en las construcciones de tapias ubicadas en zonas de actividad sísmica alta en España, los edificios adoptaron medidas de contingencia tales como el empleo de ménsulas en fachadas, juntas de yeso y ladrillo, y contraventanas con el objetivo de mitigar los movimientos y así evitar la aparición de grietas; mientras que en las estructuras de entramados de madera se hallaron elementos diagonales dentro de sus sistemas constructivos que contribuyen en la reducción de esfuerzos de los sismos.

2.6.1 MORTERO CON MALLA ELECTROSOLDADA

Para describir y entender el funcionamiento de esta técnica de reforzamiento empleando mallas electrosoldadas en las edificaciones de tierra se consulta el proyecto de investigación publicado en la Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas (RICSH), donde se analizan diferentes propuestas de reforzamiento estructural para viviendas tradicionales localizadas en el centro histórico de Chiapa de Corzo, México, proyecto que surgió en 2014 y fue llevado a cabo por el Cuerpo Académico de Desarrollo Urbano de la Universidad Autónoma de Chiapas (CADU- UNACH) (Escamirosa et al., 2013).

La investigación de Escamirosa et al. (junio de 2019) se centra en analizar el comportamiento sísmico de las construcciones de adobe reforzadas a través de la aplicación de membranas de hormigón armado con la disposición de una malla electrosoldada instaladas en ambas caras de los muros portantes, y para su evaluación de la resistencia ante un movimiento sísmico se realizaron a través de mediciones con acelerógrafos ubicados en los elementos estructurales de cubierta, registrando datos tanto en el estado original de la vivienda como después de la intervención de reforzamiento estructural.

Para esta propuesta de reforzamiento estructural fue necesario la ejecución de trabajos previos que consistieron en extraer tanto las puertas como el mortero en ambos lados de las caras de los muros de la primera vivienda, mientras que en la segunda vivienda se retiró simplemente la capa de cal que tenía sobre los muros (Escamirosa et al., junio de 2019); en ambos casos, los procedimientos que se llevaron a cabo fueron los siguientes:

- Los muros fueron revestidos a mano con una capa de mortero compuesta por cemento – arena, con proporciones de 1:3, es decir, equivalente a una resistencia promedio de 227 kg/cm².
- Este mortero posteriormente fue allanado hasta obtener 1 cm de espesor como mínimo.
- Luego, se procedió a colocar en ambas caras de muro la malla de acero de calibre 10 en cuadrículas de 6 pulgadas por 6 pulgadas. (6" x 6" / Ø10 x Ø10).
- Para esta instalación se tomó en cuenta lo comentado en la NTC del 2004 (Normas Técnicas Complementarias), donde se recomienda emplear traslapes de 60 cm en los segmentos donde hay sujeción con los muros.
- Después, se procede a realizar unas perforaciones con una broca de 5/16" de diámetro siguiendo las intersecciones de una retícula de 30 cm de espaciamiento entre ejes, estos agujeros servirán para colocar un alambre el cual sujetará la malla de acero entre ambas caras del muro.
- Posteriormente, se implementa una segunda capa de mortero con las mismas características de la primera, y sobre su superficie se coloca una capa delgada de cemento – cal hidratada (en proporciones de 1:10) para la apariencia final del muro reforzado.
- Por último, se aplica sobre la superficie una capa de pintura para el acabado estético del muro.

Figura 42. Procedimientos para la implementación del refuerzo estructural con mallas de acero de los muros de adobe de las viviendas.

Fuente: Mejoramiento estructural de la vivienda tradicional de adobe de Chiapa de Corzo, México (Escamirosa et al., 2019).



Tras el análisis de la investigación de Escamirosa et al. (junio de 2019), los resultados que obtuvieron señalan que las viviendas adquirieron un incremento de capacidad sismorresistente ya que, al evaluar los máximos periodos fundamentales de vibración de las viviendas analizadas, antes y después de implementar los refuerzos, mostraron una disminución significativa en estos valores; es decir, que las viviendas obtuvieron una ganancia de resistencia en los muros estructurales, disminuyendo su flexibilidad y aumentando su rigidez. En términos numéricos, los valores recomendables para que las edificaciones sean reconocidas como sanas estructuralmente, los periodos fundamentales de vibración suelen estar en los rangos entre 0.08 – 0.12 segundos (Hernández et al., 1979), siendo los registros en las viviendas reforzadas de 0.135 segundos, valor más aproximado comparado con los 0.151 segundos, previo al reforzamiento.

Figura 43. Instalación de acelerógrafos con sistema Android en las viviendas.

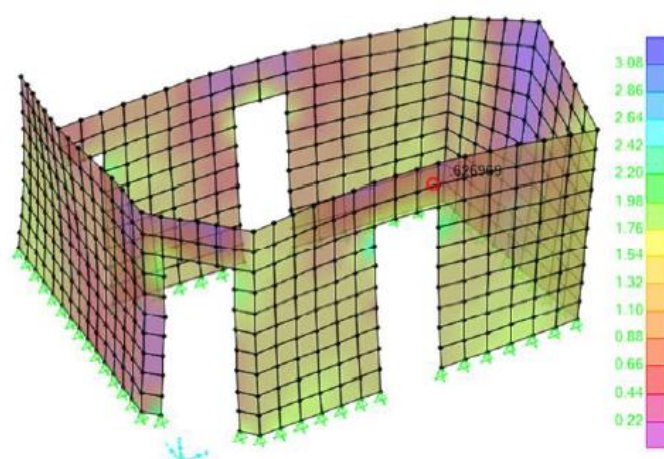
Fuente: Mejoramiento estructural de la vivienda tradicional de adobe de Chiapa de Corzo, México (Escamirosa et al., 2019).



Como parte adicional de ese trabajo, desarrollaron un modelo analítico tridimensional representan la primera vivienda, y aplicando el método de elementos finitos se analizó su comportamiento ante cargas sísmicas, tal como se observa en la Figura 44; evaluando su respuesta de los elementos estructurales con y sin refuerzo, pudieron notar que las cifras de su periodo fundamental de vibración se redujo en aproximadamente un 13%, observando de la misma manera, una reducción importante de los desplazamientos entorno a un 45% antes y después del refuerzo (Escamirosa et al., junio de 2019).

Figura 44. Modelo tridimensional de la vivienda para evaluar el comportamiento de los muros de adobe previo y posterior a la incorporación del refuerzo.

Fuente: Mejoramiento estructural de la vivienda tradicional de adobe de Chiapa de Corzo, México (Escamirosa et al., 2019).

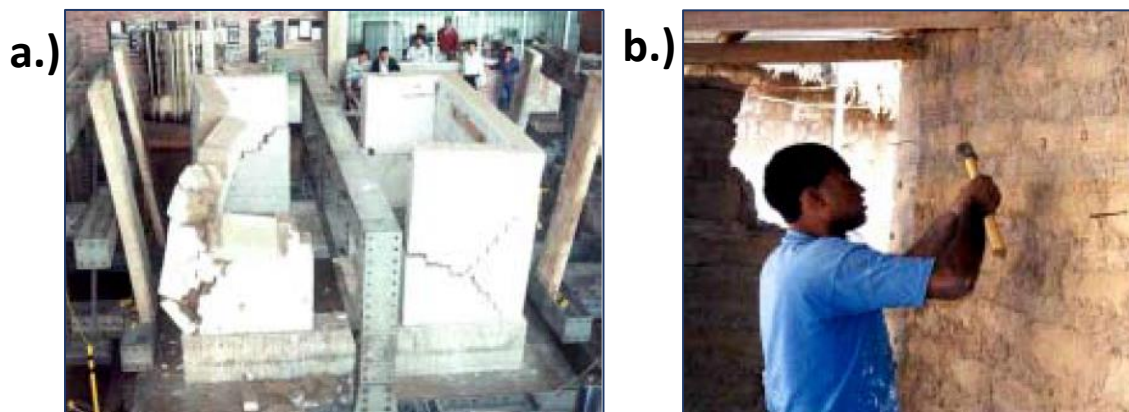


El trabajo llevado a cabo por Blondet M., García G y Brzev S. (abril de 2003), mencionan que la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) llevó a cabo diferentes sistemas de refuerzo estructural de bajo costo para viviendas existentes de adobe para posteriormente evaluar su comportamiento; y como objetivo primordial de las propuestas fue enfocarse en plantear reforzamientos externos diseñados específicamente para incrementar el tiempo de resistencia estructural ante eventos sísmicos de gran magnitud, de tal manera brindar mayor tiempo a los habitantes e incrementar la garantía de su evacuación durante los desastres.

Como parte de la investigación, se sometieron a ensayos comparativos diversos materiales de refuerzo tales como la inclusión de tablonés de madera, la implementación de cuerdas de 1/2 pulgada, y el empleo de mallas de gallinero y, por último, la incorporación de mallas electrosoldadas de acero. Durante el desarrollo de su trabajo, sus análisis se realizaron a través de simulaciones sísmicas en muros de adobe con una configuración en "U", a partir de ello, se evaluó tanto los muros sin reforzar como reforzados para poder realizar un análisis comparativo más preciso (Blondet et al., 2003).

Figura 45. (a.) Ensayo dinámico de muros en forma de "U". (b.) Colocación de Malla electrosoldada en un muro de adobe tradicional.

Fuente: Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor. (Blondet, García y Brzev, abril de 2003).



Tras realizar los ensayos dinámicos, con los resultados obtenidos del trabajo de Blondet M. (2003), se pudo identificar como solución óptima un sistema compuesto por las mallas electrosoldadas de alambre de 1 mm dispuesta con espaciamentos de 3/4 de pulgada. No obstante, los muros reforzados que mostraron un buen comportamiento ante movimientos sísmicos fueron los muros que tuvieron refuerzos con una malla con distribución de sus elementos en patrones verticales y horizontales, simulando un sistema de elementos aporticados de vigas y pilares.

Cabe destacar que, la validación de estas dos alternativas en condiciones reales se obtuvo durante el sismo de Arequipa ocurrido en el año 2001, en donde las viviendas reforzadas con estos sistemas, implementados previamente en un programa piloto, mostraron una resistencia ante el evento sísmico sin sufrir daños significativos; por otro lado, las estructuras que no presentaban ningún tipo de sistemas de refuerzo presentaron daños estructurales severos o incluso colapso total.

Figura 46. Viviendas elaboradas de adobe colapsadas por el terremoto en Arequipa en junio de 2001.

Fuente: Portal de Archivos Peruanos, PAPE.



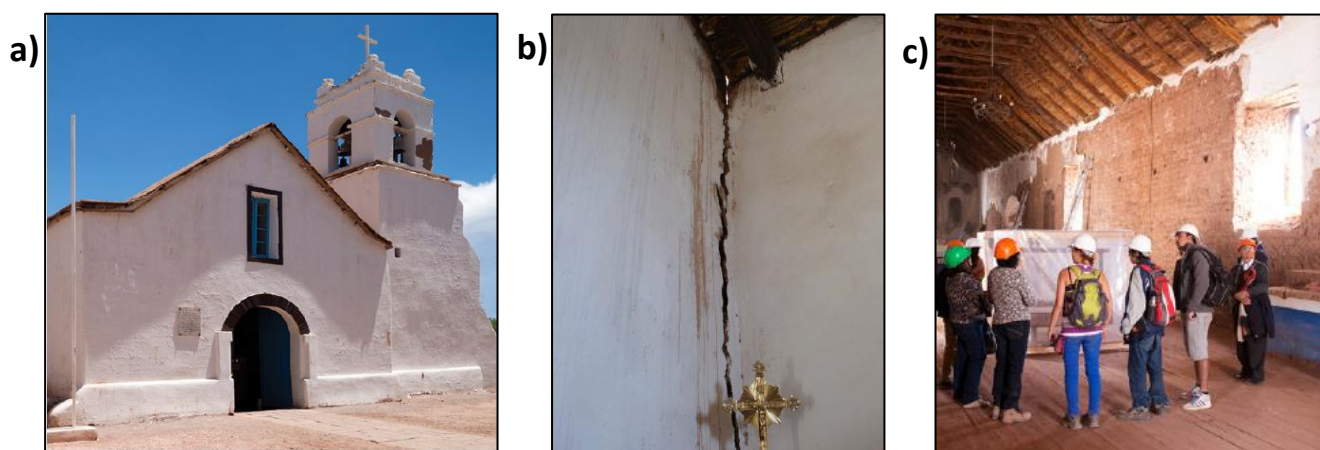
2.6.2 ENMALLADOS DE SOGAS SINTÉTICAS O SISTEMA DE DRIZAS

Las construcciones de mampostería de adobe tienen la particularidad de presentar limitaciones estructurales significativas, particularmente tienen una baja resistencia a esfuerzos tensionales y cortantes, además de una marcada fragilidad que las hace inadecuadas para construcciones sobre todo en regiones con elevada actividad sísmica (Leceta R., Ignacio J., Huerta J. & Alexander R., 2020).

Para esta técnica de reforzamiento, podemos citar el proyecto de Beatriz Yuste y Magdalena Pereira (2017) junto con la Fundación Altiplano MSV, quienes llevaron a cabo la restauración de la Iglesia de San Pedro de Atacama en Chile; iglesia cuyos orígenes datan del siglo XVI elaborada con muros de adobe, y la cual había sufrido daños severos acumulados procedentes de las consecuencias de varios sismos, sucesivos incendios e incluso inundaciones.

Figura 47. (a) Vista frontal de la Iglesia de Atacama. (b) Daños en sus muros de adobe. (c) Visita guiada y taller práctico para los trabajadores.

Fuente: Revista Loggia: Arquitectura y Restauración, Núm. 30 (2017).



El trabajo más distinguido de este proyecto fue la consolidación estructural de los muros de adobe e implementar un sistema antisísmico que lo protegiera, por supuesto teniendo en cuenta la normativa de seguridad que posee Chile para edificaciones ante los sismos. Todo el sistema de restauración comenzó, en primer lugar, con la inyección de morteros en los daños que se presentaban en la superficie, en segundo lugar, realizar recalces y sustitución de los adobes, además de la integración de contrafuertes en los muros que tienen las mayores longitudes (Yuste & Pereira, 2017).

Aún más importante, es la parte del reforzamiento de los muros de adobe para brindarles capacidad antisísmica, para ello, el refuerzo debe cumplir con ciertas características como la compatibilidad de los materiales que se incorporan, y/o la reversibilidad de la propuesta, para esto consultaron las investigaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y de la institución “Getty Seismic Adobe Project”, y tras esto se llegó a la conclusión de seleccionar un sistema de confinamiento a través de sogas sintéticas (Yuste & Pereira, 2017).

En su trabajo, Yuste y Pereira (2017), mencionan que las sogas sintéticas actúan a través de un tensado manual dispuestos en ataduras tanto verticales (cada 60 cm) como horizontales (primer tercio de muro: 30 cm, últimos dos tercios: 40 cm) con el fin de mitigar los desplazamientos de los muros. Además, este enmallado está conformado por cuerdas de 12 mm de diámetro, con las siguientes propiedades mecánicas: poseen una capacidad de alargamiento del 35%, aproximadamente, y una resistencia máxima a la tracción de 1,315 kgf. Es importante señalar el sistema de fijación que se

emplea, realizando perforaciones en la sección del muro e instalando elementos de anclaje constituidos por cuerdas de 5 mm de diámetro.

Figura 48. Enmallado de sogas sintéticas de los muros de adobe, intersección y anclajes de las sogas.
Fuente: Revista Loggia: Arquitectura y Restauración, Núm. 30 (2017).



Por otro lado, la Pontificia Universidad Católica del Perú elabora ensayos de laboratorio en muros de tierra y modelos de vivienda de mampostería de adobe como estructuras antisísmicas desde hace aproximadamente 40 años, con el objetivo de analizar su comportamiento frente a las solicitaciones de estos (Blondet, Camata, Spacone, Tarque & Varum, 2010), estas evaluaciones se elaboran mediante dos enfoques complementarios: Ensayos en laboratorios de viviendas tipo, y su modelización numérica; es en base a la información que obtienen para poder realizar propuestas de algún sistema refuerzo para estas tipologías de viviendas.

Una de estas investigaciones llevados a cabo por Leceta R., Ignacio J., Huerta J. & Alexander R. (febrero de 2020), del Repositorio Académico de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, se enfocó en realizar un análisis sísmico de un prototipo de vivienda de mampostería de adobe en conjunto con una propuesta de un sistema de reforzamiento estructural con el empleo de sogas sintéticas. Para ello, fue necesario elaborar un modelo computacional que considere los esfuerzos de las sogas, además de sus desplazamientos límites y las formas de agrietamientos de los muros y elementos circundantes, y teniendo en cuenta todo ello, se establece al material de mampostería de adobe, como si fuese un material no lineal.

Para poder comprender mejor la metodología que llevaron a cabo en esta investigación, se procede a realizar una descripción de los procesos y las consideraciones que tomaron en cuenta y entender mejor su perspectiva de trabajo:

❖ Ensayo de laboratorio:

➤ Modelo de la vivienda:

Para esto, se construyó a escala real un modelo básico de vivienda de mampostería de adobe de una sola planta, que comprendía cuatro muros de 25 cm de espesor, cuatro vigas collares, un techo, una ventana y una puerta (ambos con un dintel de caña) (Leceta et al. 2020); cuyas dimensiones generales son las siguientes:

Figura 49. Modelo de vivienda construida con mampostería de adobe para los ensayos de laboratorio para someterla ante cargas sísmicas.

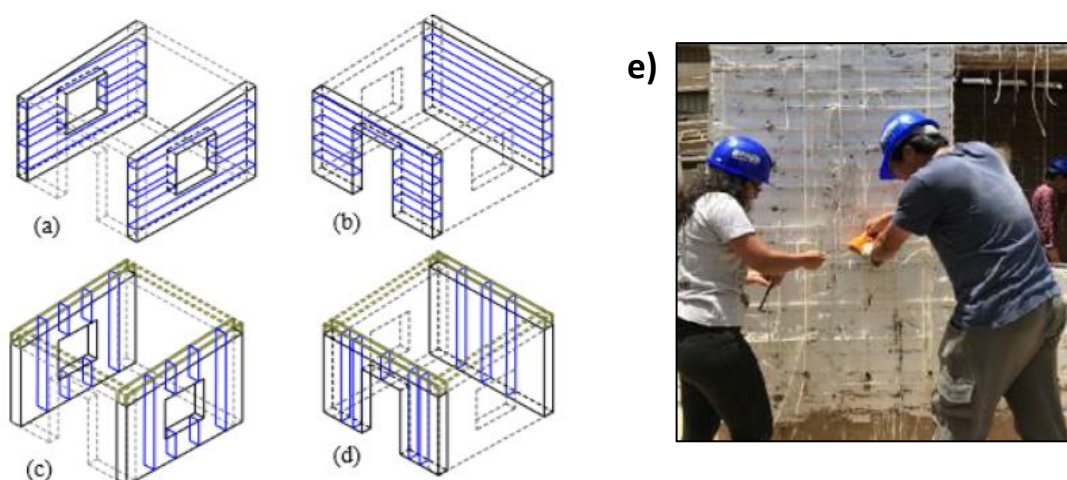
Fuente: Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas, Leceta R. et al. (2020).



- **Construcción:**
Construida con mampostería de adobe de dimensiones: 25 cm x 25 cm x 7 cm, unidos con mortero también de adobe.
- **Reforzamiento de los elementos estructurales con las sogas sintéticas:**
El reforzamiento es colocado después e construido el modelo de vivienda y consta de la disposición de sogas sintéticas o drizas 100% polipropileno de 5/32" o 4 mm de diámetro, esto se realiza con el fin de contribuir con la resistencia a tracción de los muros al estar colocados en forma de una malla (horizontal y vertical) actuando como líneas de tensión, teniendo en cuenta que el refuerzo de sogas se extiende hasta rodear la viga collar que une muro y techo; para su colocación, se realizó a través de agujeros hechos por taladros para amarrar las sogas (Leceta et al. 2020).

Figura 50. Esquemas de refuerzo del enmallado y la disposición de las sogas en los muros de adobe, y su colocación y tensado de las sogas de refuerzo.

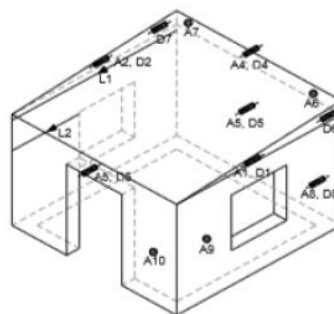
Fuente: Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas, Leceta R. et al. (2020).



➤ Ensayo del modelo de la vivienda:

Colocación de la vivienda sobre la mesa vibradora (placa rectangular de 4.4 metros de lado y con un movimiento unidireccional simulando el sismo. Para ese estudio, la amplitud máxima que se considera fue de 13.8 m/s^2 , a partir de sus resultados obtuvieron tanto desplazamientos como su aceleración absoluta (Leceta et al. 2020).

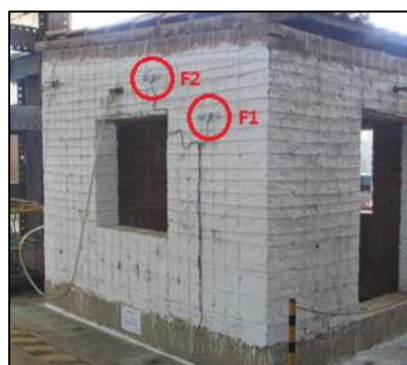
Figura 51. Dispositivos de medición LDVT ubicados en la estructura colocada sobre la mesa vibratoria.
Fuente: Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas, Leceta R. et al. (2020).



➤ Resultados del ensayo:

De sus resultados se observó que los máximos fueron registrados en los puntos de medición D1 y D6, notando unos desplazamientos máximos de 67.7 mm y 80.7 mm, respectivamente, además de una amplitud máxima de 136 mm; mientras que en las celdas F1 y F2 arrojó un resultado cifras de fuerzas en 64.7 N y 44.7 N, respectivamente (Leceta et al. 2020). Por otro lado, los daños que se observaron tras someterlo a la simulación se observan en la Figura 52.

Figura 52. Puntos de medición que arrojaron los valores máximos de en cuanto a fuerzas y desplazamientos registrados, y resultado de los daños en la vivienda tras la simulación.
Fuente: Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas, Leceta R. et al. (2020).



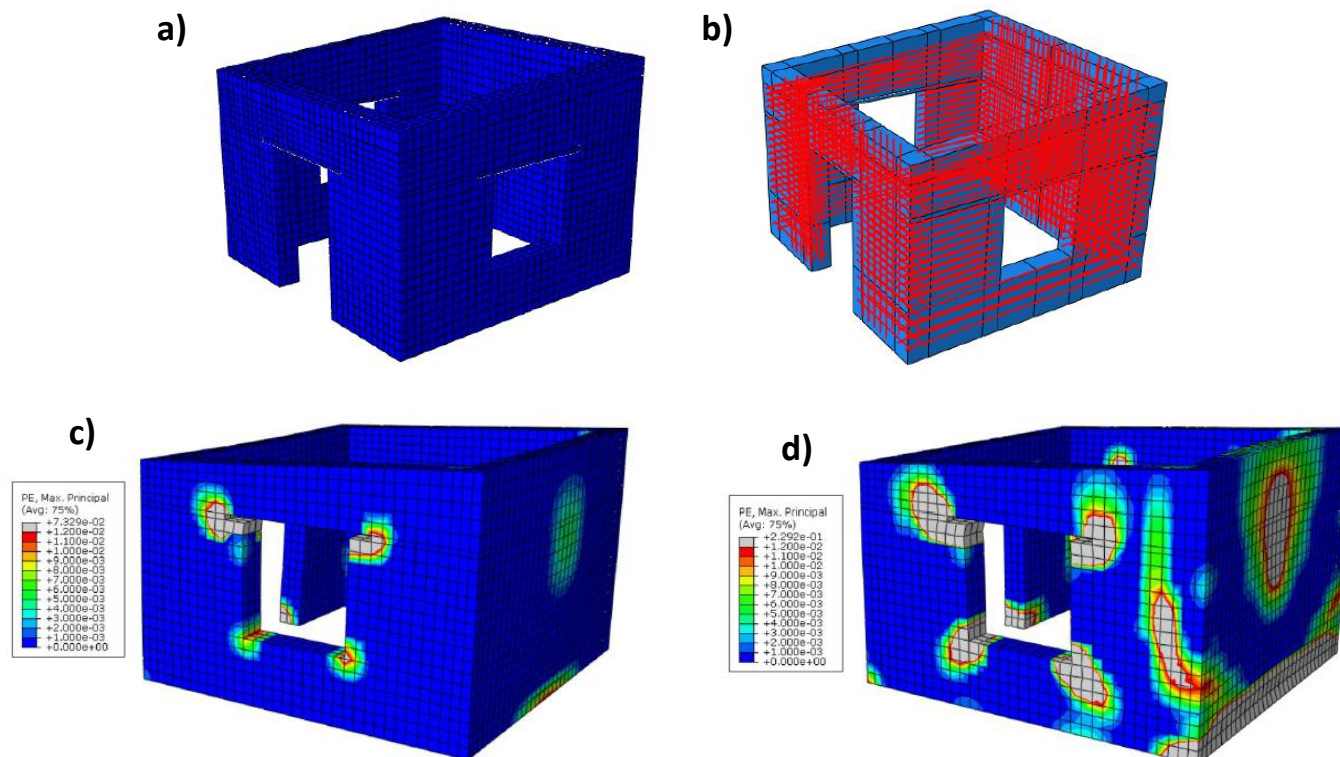


❖ Análisis numérico y comparación de resultados:

Para el análisis numérico se realizó en el software de cálculo Abacus CAE, donde se elaboró el modelo de la misma vivienda y dimensiones de elementos con sus respectivas propiedades mecánicas, para ello las sogas se calcularon como elementos tipo cable y los elementos se introdujeron como elementos 3D continuos lineales (8 nodos), teniendo en cuenta que el tamaño de discretización para el cálculo de elementos finitos fue de 100 mm (Leceta et al. 2020):

Figura 53. (a) Elaboración de modelo computacional de la vivienda en el software Abacus. (b) Inserción en el modelo de los elementos de refuerzo. (a) Deformación unitarias plásticas con tiempo 2.2 s. (d) Deformación unitarias plásticas con tiempo 4.17 s.

Fuente: Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas, Leceta R. et al. (2020).



❖ Comparación de respuestas entre modelo computacional y ensayo:

Tabla 12. Resumen de los resultados y comparación entre modelo computacional y el ensayo de laboratorio en cuanto a sus máximos desplazamientos entre sus puntos de control.

Fuente: Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas, Leceta R. et al. (2020).

	DESPLAZAMIENTOS AMPLITUD MAXIMA A LOS 8.6 s	
	ENSAYO DE LABORATORIO	MODELO COMPUTACIONAL
PUNTO D1	67.7 mm	82.2 mm
PUNTO D6	80.7 mm	96.1 mm

2.6.3 REFUERZO CON GEOMALLA

Esta tipología de refuerzo se puede explicar al consultar el trabajo de investigación elaborado por Sergio Astorga (2011) en su trabajo que consiste en evaluar el comportamiento de los muros de adobe reforzados con la aplicación de geomallas sometidos a esfuerzos cíclicos laterales, pretendiendo proponerse como un sistema de refuerzo antisísmico.

A continuación, se realiza a manera de resumen la caracterización de los muros ensayados en laboratorio, poseen las características tanto geométricas como mecánicas siguientes:

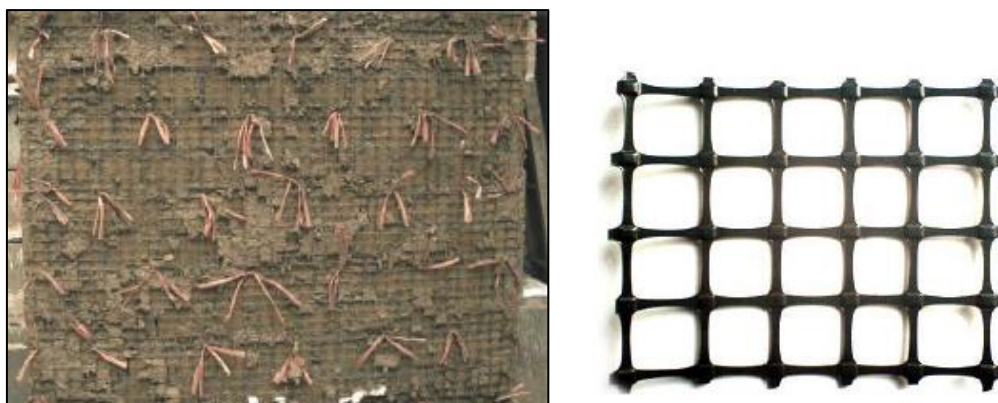
- Los ensayos fueron ejecutados en muros de 25 cm y 40 cm de espesor.
- Geométricamente, los muros tienen unas dimensiones de 1.50 metros tanto en ancho como en largo.
- Fueron conformados por elementos de mampostería de adobe de dimensiones de 40 cm x 40 cm x 10 cm para los muros de 40 cm de espesor, mientras que para los de espesor de 25 cm se emplearon unidades de mampostería de 40 cm x 25 cm x 10 cm.
- La composición de las unidades de mampostería es en proporciones de 5:1:1, que corresponde a partes de tierra, arena gruesa y paja, respectivamente.
- Es importante mencionar que la resistencia a compresión individual de cada unidad de mampostería es de aproximadamente 3 MPa.

Los muros fueron contruidos sobre una cimentación de hormigón ciclópeo con una proporción de 1:12 considerando un 50% de piedras grandes con unas dimensiones aproximadas de 35 cm x 45 cm x 180 cm; mientras que en la parte superior del muro se construye una viga también de hormigón armado con dimensiones de 25 cm x *espesor de muros* x 180 cm; esto se efectúa con el fin de que exista una correcta y eficiente distribución de cargas sobre el muro cuando se ensaye (Astorga, 2011).

Ahora, respecto al sistema de reforzamiento, se emplea en ambas caras del muro a ensayar una malla cuadrículada de polipropileno de alta densidad el cual refuerza internamente e incrementará la rigidez de los muros y, al mismo tiempo funciona como un sistema de arriostramiento horizontal en los muros. Para que quede bien integrada la geomalla al muro, esta se sujeta en ambos lados del muro con cintas de rafia de 70 centímetros de longitud, con solapes de unos 15 centímetros entre ellas, y en la posición horizontal se colocan a cada 30 centímetros (Astorga, 2011).

Figura 54. Características físicas de los muros a ensayarse en laboratorio y la geomalla de alta densidad utilizada, con abertura máxima de 5 cm.

Fuente: Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales, por Astorga Sergio (2011).



Por último, se colocó un enfoscado de 2 centímetros de espesor en ambas caras con un mortero del mismo material y proporciones con el que están hechos las unidades de mampostería, con esto se logra mantener cierta uniformidad en la unidad de muro a ensayar (Astorga, 2011).

Figura 55. Disposición de la geomalla sobre el muro de adobe a ensayar y enfoscado final del muro.

Fuente: Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales, por Astorga Sergio (2011).



Como resultado del trabajo de investigación de Astorga (2011), se puede decir que, el material de adobe es un material con un comportamiento que es complicado de pronosticar, debido a su particular característica de comportamiento no lineal, además, como ya se sabe, ante esfuerzos horizontales, el adobe resulta bastante débil de combatir a un esfuerzo cortante; no obstante, junto al refuerzo de geomalla, muestra una mejoría en su respuesta ante estas acciones.

Según los ensayos, tras la aplicación de las cargas que transfiere un sismo un elemento estructural como un muro, los daños comienzan a aparecer en zonas como los vanos y las esquinas especialmente, que es donde las tensiones se suelen concentrar. En pocas palabras, cuando los muretes fueron sometidos a los ensayos, y según los datos que se obtuvo, apuntan a que la geomalla si bien no contribuye a soportar los esfuerzos cortantes del sismo en primera instancia, su apoyo se da a notar a partir de los instantes en que el muro empieza a colapsar, es en estas facetas cuando su contribución resulta importante (Astorga, 2011).

2.6.4 REFUERZO CON MADERAS DE CONFINAMIENTO

Este sistema consiste en la instalación de elementos de madera dispuestos horizontal y verticalmente en ambas caras del muro (exterior e interior), conformando una estructura compuesta que combina las propiedades de la tierra y la madera. El objetivo principal es incrementar la resistencia a flexión de los muros manteniendo la unidad estructural durante eventos sísmicos, sin rigidizar excesivamente la construcción Yamín L., Phillips C., Reyes J. C., y Ruiz D. (2007).

Este método de reforzamiento, desarrollado por los autores del presente documento, representa una solución técnica eficaz para mejorar la seguridad estructural de viviendas de adobe en zonas sísmicas, conservando al mismo tiempo sus características arquitectónicas tradicionales Yamín L., Phillips C., Reyes J. C., y Ruiz D. (2007):

Componentes principales:

- Elementos de madera: Listones estructurales de sección rectangular dispuestos en forma de entramado.
- Sistemas de conexión: Elementos de madera con listones estructurales de sección rectangular dispuestos en forma de entramado.
- Platinas de acero: Elementos metálicos que unen los componentes en esquinas y cruces.

Proceso de instalación:

- Preparación de la superficie del muro (limpieza y humectación).
- Colocación del entramado de madera en ambas caras.
- Perforación guiada a través del muro para los pernos de conexión.
- Fijación con platinas metálicas en los puntos críticos.
- Acabado final con mortero de protección.

Especificaciones técnicas:

- Madera: Tratada contra humedad y xilófagos, densidad mínima 0.55 g/cm^3 .
- Pernos: Diámetro mínimo 10 mm, acero galvanizado.
- Platinas: Espesor mínimo 3 mm, acero ASTM A36.
- Espaciamiento: Máximo 50 cm entre elementos de conexión.

Ventajas del sistema:

- Mejora significativamente el comportamiento sísmico.
- Mantiene la estética arquitectónica original.
- Utiliza materiales locales y de bajo costo.
- Permite cierta ductilidad en el comportamiento estructural.
- Fácil de reparar y mantener.

Consideraciones de diseño:

- Los elementos horizontales deben ser continuos en todo el perímetro.
- Las conexiones en esquinas deben reforzarse especialmente.
- Se recomienda proteger la madera con mortero en zonas de alta humedad.
- El sistema fue desarrollado específicamente para construcciones existentes.

2.6.5 REFUERZO CON INTRODUCCIÓN DE VIGAS DE CORONACIÓN

Guillermo Casares (2017) en su trabajo correspondiente en el estudio y evaluación de estructuras de viviendas de adobe, establece como una propuesta de reforzamiento la incorporación de zunchos de coronación, ello lo realiza pensando como principio fundamental dentro del comportamiento sísmico apropiado, haciendo que la edificación consiga una integración estructural del edificio como una unidad monolítica; es decir, que se convertiría en un sistema estructural mixto con mayor eficiencia ante solicitaciones dinámicas.

Figura 56. Construcción de una viga de coronación o collar de hormigón armado sobre un muro de mampostería de adobe de una vivienda en El Salvador (2002).

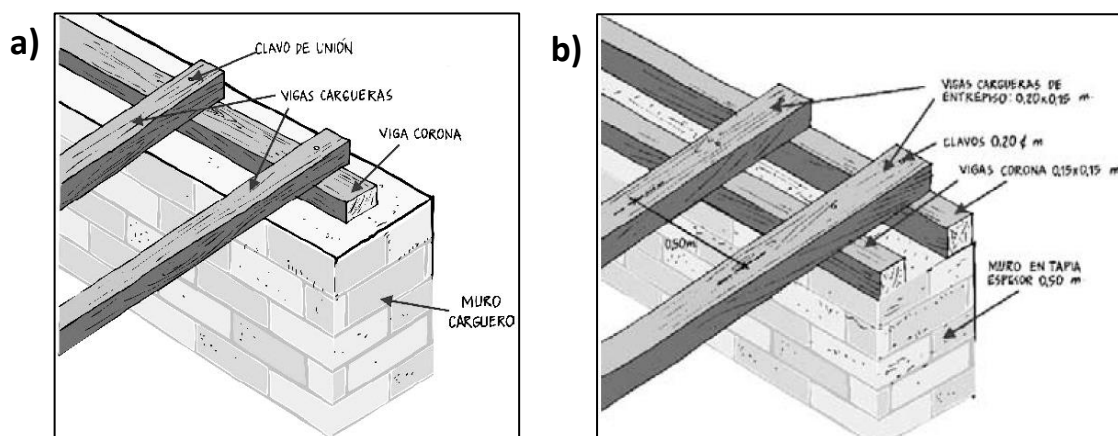
Fuente: Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor. (Blondet M. et al., 2003).



Junto a esto, es importante mencionar el artículo, dentro de la Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural, elaborado por Yamín L., Phillips C., Reyes J. C., y Ruiz D. (2007), donde mencionan que la importancia de incorporar estos elementos en todo el perímetro de las viviendas construidas con materiales térreos (adobe o tapia) que carezcan de estos, pudiendo ser tanto de madera como de hormigón armado; sin embargo, si se opta por este último, es importante tener en cuenta el fenómeno de retracción durante su proceso de fraguado, ya que puede comprometer la conexión entre la viga y el muro de tierra, incidiendo directamente en su propiedad de protección contra humedad y de organismos xilófagos.

Figura 57. (a) Viga de coronación sencilla de madera con vigas de carga. (b) Viga de coronación doble de madera con vigas de carga.

Fuente: Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casa en adobe y tapia pisada. (Yamin L. et al., 2017).



En otras palabras, esta propuesta considera al mismo tiempo dos enfoques: el primero es el de mejorar la estabilidad global de la estructura, y a segunda sería establecer el funcionamiento de la viga de coronación como un elemento de transición entre los muros de tierra y el sistema de cubierta; es decir que, los elementos fabricados con materiales de mayor superioridad mecánica (hormigón, hormigón armado) respecto a los elementos elaborados a base de tierra, permiten proporcionar a la estructura global una mayor capacidad portante, además de un adecuado sistema de anclaje en cubiertas cuando esta no se pueda fijar directamente con los muros de adobe (Casares, 2017).

En uno de sus estudios Blondet M. (2002), sostiene que las vigas de coronación o collares dispuestas de forma continua como un cinturón, son componentes de suma importancia si hablamos de la respuesta de una edificación de tierra ante un sismo, por supuesto para que se genere un buen comportamiento sísmico esta viga debe estar correctamente amarrada al muro portante. Junto a esto, resalta que se puede emplear al mismo tiempo conectores de madera tipo tijeral o tipo armadura entre los dinteles y la viga de coronación, tal como se muestra en la Figura 58 – derecha; de esta manera genera el efecto de crear una estructura tipo caja al amarrar los muros y al reforzar las zonas más vulnerables de una edificación ante la acción de un sismo.

Figura 58. Ensayo de laboratorio de una vivienda de adobe evaluando su comportamiento sísmico sin reforzar (izquierda). Ensayo de laboratorio de una vivienda de adobe evaluando su comportamiento sísmico con refuerzo interior de cañas y viga collar (Derecha).

Fuente: Adobe in Peru: Tradition, Research and Future. Modern Earth Building 2002.



3. GAP DE CONOCIMIENTO

3.1 SITUACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES DE TIERRA EN ESPAÑA FRENTE AL SISMO

3.1.1 SISMICIDAD EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

Un examen de los registros desde los años 1900 revela que estos fenómenos sísmicos resultan particularmente letales en naciones con escasos recursos, cuyas estructuras y construcciones no están preparadas para resistir tales movimientos telúricos, siendo las regiones históricamente más afectadas por estos terremotos ‘catastróficos’ Asia Oriental, Oriente Medio, la zona central del Pacífico, Sudamérica y el sur de Europa Europa Press Internacional (2016).

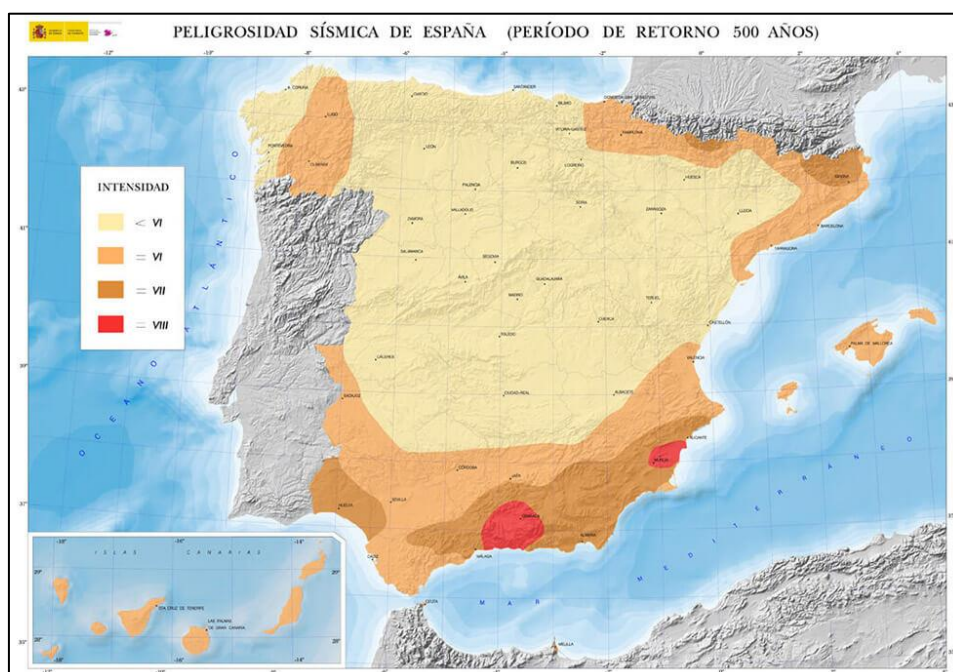
Respecto a la Península Ibérica en cuestión, Daniel Hernández (abril de 2016) menciona que esta posee una actividad sísmica moderada, con terremotos históricos que no superan magnitud 7,6 en escala de Richter; no obstante, el riesgo potencial se encuentra sujeto a la zona que se esté evaluando debido a las diferencias geológicas, influenciadas por la tectónica de la microplaca Ibérica.

Si se analiza el sureste peninsular se observa la región con mayor actividad y peligro sísmico (unión de la Microplaca Ibérica con la Placa Africana), y en base a diversas fuentes estiman que en un período de retorno de 500 años podrían ocurrir terremotos de hasta Intensidad VIII aproximadamente (Figura 59), los cuales sí podrían causar daños graves o colapso parcial en edificios antiguos, tal como en el terremoto ocurrido en Lorca (2011), cuya intensidad registrada fue de VII – VIII (Hernández, 2016).

En lo que respecta al otro extremo de la Península Ibérica, Hernández (2016) también señala que en la región de los Pirineos se puede contemplar igualmente que presenta un riesgo significativo (unión de la Microplaca Ibérica con la Placa Euroasiática), con posibles sismos de Intensidad VII para un periodo de retorno de 500 años (Figura 59), y como se resaltó en el párrafo anterior, los sismos de esta intensidad pueden provocar tanto grietas como caída de chimeneas y daños en estructuras antiguas.

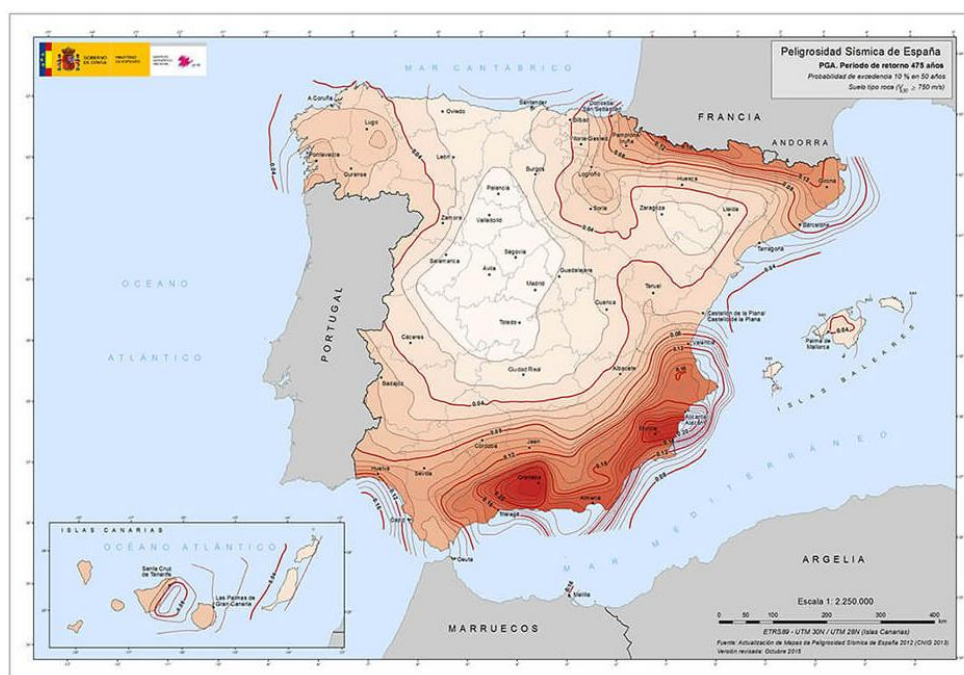
Figura 59. Mapa de peligrosidad sísmica de España 2002 (en valores de intensidad, escala EMS – 98).

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



Es importante mencionar que, en la actualidad, los tradicionales mapas de isosistas (Figura 59), que evalúan el peligro sísmico según intensidades, han dado paso a mapas más elaborados que se basan en la aceleración máxima horizontal del suelo, es decir, que proporciona un parámetro más exacto y útil para la ordenación del territorio de España, al mismo tiempo esta información es esencial para organismos como Protección Civil y para definir la normativa de edificaciones sismorresistentes nacionales. Al aplicar este criterio con un intervalo de retorno de 475 años, se puede corroborar que las regiones peninsulares con mayor riesgo sísmico son de igual manera el Sureste y la región de los Pirineos (Hernández, 2016) tal y como podemos observar en la siguiente imagen:

Figura 60. Mapa de peligrosidad sísmica en España 2015 (en valores de aceleración).
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



3.1.2 INTEGRIDAD ESTRUCTURAL Y VULNERABILIDAD SÍSMICA

Para comprender mejor la vulnerabilidad sísmica de una edificación, Maldonado E. y Chio G. (junio de 2009), sostienen que esta consiste en clasificar a las estructuras según sus características de calidad y de su capacidad para poder resistir terremotos, por supuesto, en una escala que va de baja a alta vulnerabilidad. Además, las funciones de vulnerabilidad pueden derivarse de daños reales o ser generadas mediante simulaciones en laboratorios, es decir, las funciones observadas se basan en registros de sismos pasados (datos históricos), mientras que las calculadas se emplean cuando no hay datos disponibles, lo que impulsa a apoyarse en modelos que reproducen el comportamiento estructural de los edificios que se requiera describir su vulnerabilidad.

En su trabajo, Leceta Romero y Huerta Julca (febrero de 2020), explican que las edificaciones hechas a base de tierra presentan una elevada vulnerabilidad ante los terremotos, riesgo que es especialmente relevante en países con economías emergentes, en donde se aprecian los métodos ancestrales de edificación y los recursos insuficientes que favorecen la multiplicación de viviendas con escasa seguridad. Estas estructuras tradicionales son frágiles ante movimientos sísmicos particularmente debido a la combinación de su excesivo peso, de su mínima resistencia y de su propensión a fracturarse con facilidad; es decir que, durante un sismo las fuerzas generadas por este superan la capacidad de soporte de los elementos estructurales de tierra, lo que desemboca a la

generación de fallos estructurales que a su vez pueden desencadenar el derrumbe total del edificio (Blondet, Brzev, Rubiños & Villa, 2011).

Para un mejor contexto, dentro de su trabajo de Leceta y Hurtado (2020), también comentan que en estas tipologías de viviendas existen dos fallos críticos singulares; en primer lugar, la ausencia de un diafragma rígido y de una unión efectiva entre este y los muros, es decir que esta característica ayudaría a distribuir las fuerzas laterales hacia los elementos más resistentes en cada nivel de la vivienda; y en segundo lugar, mencionar la mínima capacidad flexional de los muros de tierra descargados, añadiéndole la pérdida de cohesión bajo condiciones de vibraciones lo que provoca la aparición de grietas, y posteriormente generar la falla estructural fragmentada.

Yamin L., Phillips C., Reyes J. y Ruiz D. (2007), en su trabajo del Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada, sostienen que:

Las edificaciones de adobe y tapia pisada presentan usualmente unas características constructivas que contribuyen a aumentar su vulnerabilidad sísmica. Frecuentemente la edad de estas edificaciones y el deterioro de las propiedades mecánicas de sus materiales llevan a una disminución adicional de su capacidad de soportar un terremoto. (p. 287)

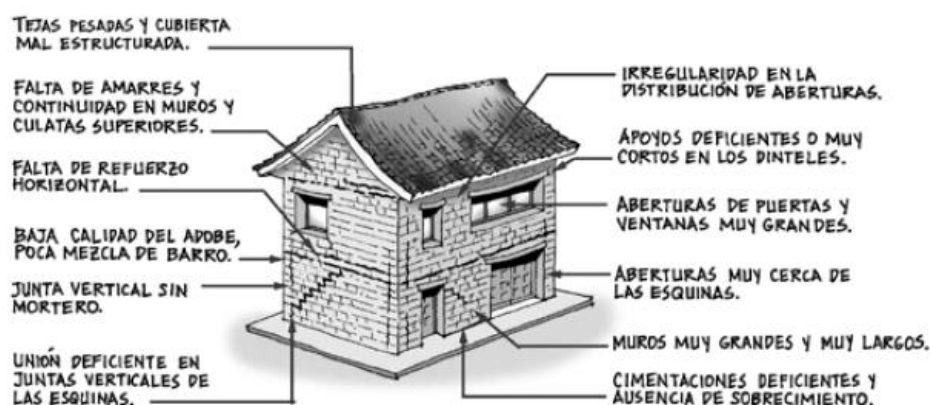
Con frecuencia, la antigüedad de este tipo de edificaciones y su deterioro progresivo de sus materiales reducen aún más su capacidad para resistir eventos dinámicos como los terremotos, siendo algunos de sus principales factores que lo producen los siguientes:

- Disposiciones irregulares tanto en planta como en altura de la vivienda.
- Mala distribución de los muros cargueros.
- Pérdidas de verticalidad de los muros.
- Humedades y filtraciones, y erosión de los revestimientos.
- Incompatibilidad de materiales.
- Falta de diafragmas rígidos y entrepisos excesivamente pesados.
- Luces bastante largas, junto a entrepisos demasiado flexibles.

Teniendo en cuenta todas estas características y condiciones que presentan las viviendas hechas a base de tierra, se puede decir que las edificaciones de dos pisos a más son particularmente vulnerables a las fuerzas horizontales que se puedan generar durante un evento sísmico (Yamin L., Phillips C., Reyes J. & Ruiz D., 2007).

Figura 61. Deficiencias estructurales típicas en edificios de tierra de dos niveles

Fuente: Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casa en adobe y tapia pisada (Yamin L. et al., 2007).



3.1.3 RIESGO SÍSMICO

Hasta la fecha es posible identificar edificaciones de mampostería de adobe y tapiales en muchas partes del mundo, tal como se observa en la Figura 62, donde se muestran las zonas donde hay presencia de construcciones de tierra, mientras que, en la Figura 63, se observan las zonas con mayor actividad sísmica a nivel mundial. Ente ambas Figura 62 y Figura 63 se puede llegar a definir que una considerable cantidad de construcciones de tierra se localizan dentro de zonas de elevado riesgo sísmico, entre ellas, la región sur de la Península Ibérica.

Figura 62. Presencia de arquitectura de tierra en el mundo.

Fuente: Craterre.org

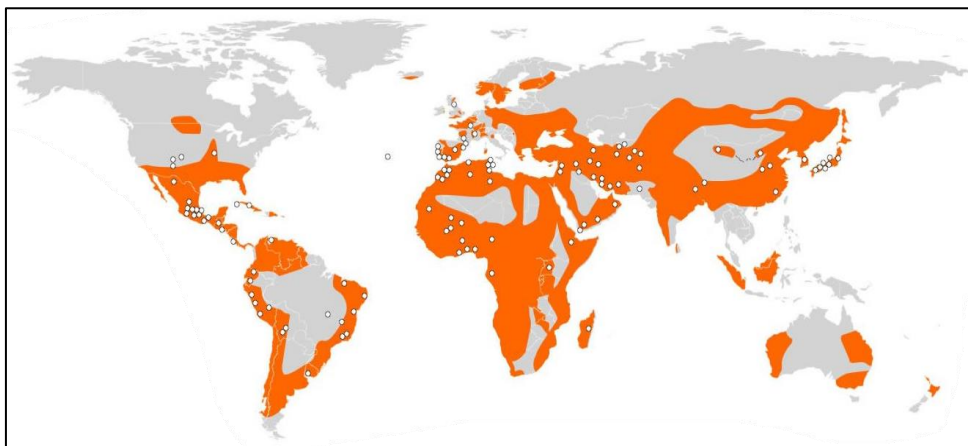
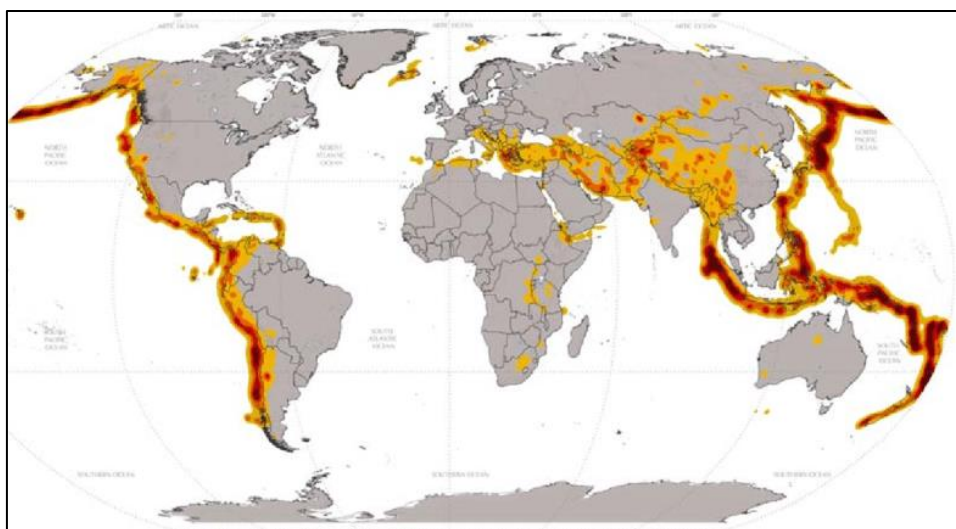


Figura 63. Mapa de peligro sísmico en el mundo.

Fuente: UNISDR, 2017.



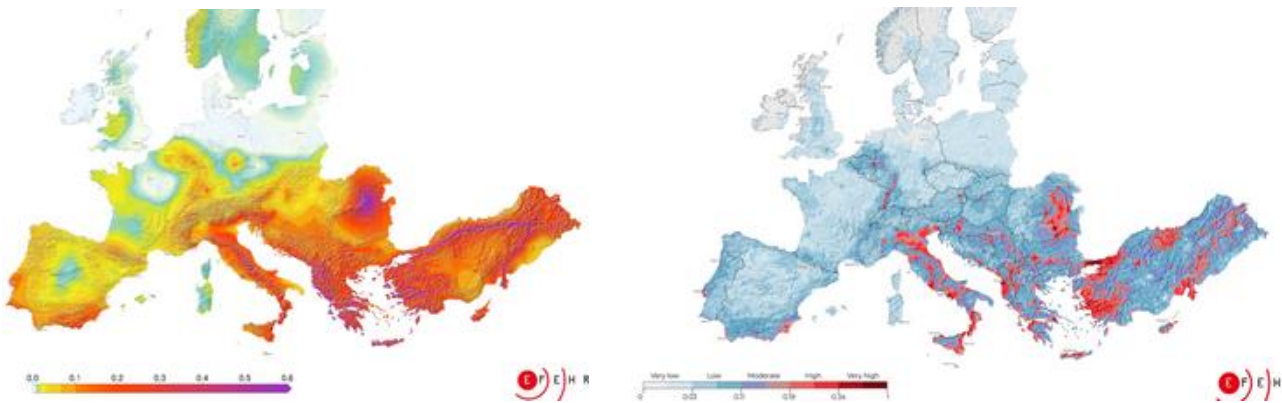
Los terremotos en Europa durante el siglo XX causaron más de 200.000 muertes y enormes pérdidas económicas. Eventos recientes, como el de Turquía y Siria, confirman que los sismos son una amenaza constante, puesto que un terremoto en zonas pobladas puede provocar daños catastróficos en infraestructuras clave (De Elena C., 2023).

La organización EFEHR (European Facilities for Earthquake Hazard and Risk), por sus siglas en inglés) ha desarrollado mapas de predicción sísmica basados en datos históricos, identificando zonas más propensas de sufrir algún terremoto además de su impacto potencial. Según esta organización, resulta importante saber las diferencias entre “peligro sísmico” y “riesgo sísmico”, en la Tabla 13 se puede observar las características que las definen.

Tabla 13. Definición de un peligro sísmico y un riesgo sísmico, aplicado a las zonas más expuestas dentro de la región europea y a la Península Ibérica.
Fuente: European Facilities for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR).

	DEFINICIÓN	ÁREAS CRÍTICAS
PELIGRO SÍSMICO	Probabilidad de que ocurra un terremoto dañino en una zona. Para determinarlo, se analizan eventos pasados, la geología local, la tectónica y otros factores que influyen en la intensidad del movimiento del suelo.	Zonas más expuestas: Principalmente la cuenca mediterránea e Islandia. En España, las áreas de mayor peligro son el sureste peninsular, el suroeste andaluz y, en menor medida, los Pirineos.
RIESGO SÍSMICO	Impacto esperado de un terremoto, considerando la población expuesta, la vulnerabilidad de las infraestructuras y otros factores. Los expertos evalúan el tipo de suelo, los materiales de construcción y la ubicación de los edificios.	Regiones de mayor riesgo: Sur y este de Europa, este del Mediterráneo y algunas zonas de Alemania. En España, el sureste y el sur de Andalucía son las áreas con mayor exposición poblacional a terremotos.

Figura 64. Peligro sísmico en Europa (Izquierda). Riesgo sísmico en Europa (Derecha).
Fuente: European Facilities for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR).



Tal y como se observa en la Figura 64, aunque España no sea tan propensa a sufrir terremotos de grandes magnitudes como en otras regiones del mundo, no está del todo excepto de sufrir actividades sísmicas importantes. A continuación, se describen las zonas que presentan el mayor riesgo sísmico de España:

➤ **La zona sísmica del Mar de Alborán:**

Esta región se ubica entre la Península Ibérica y el norte de África y representa una de las zonas sísmicas con mayor actividad de España. A lo largo de la historia ha sufrido numerosos terremotos intensos que han causado daños y muertes importantes, lo que ha motivado a plantear mecanismos de refuerzo en las construcciones e incentivar la educación pública frente a emergencias sísmicas, por tanto, las zonas próximas a esta en particular son altamente vulnerables (López, octubre de 2023).

Es por estas razones que se prioriza la concienciación y la implementación de sistemas de alerta temprana sobre la población, sobre todo debido al uso generalizado de edificaciones a base de materiales pesados a nivel nacional.

➤ **La costa mediterránea:**

En base a la información del punto previo, se deduce que la costa mediterránea española, donde se encuentran ciudades como Valencia, Alicante y Murcia también presenta riesgo sísmico, aunque los terremotos fuertes son poco comunes; no obstante, se han tomado medidas preventivas como la creación de estructuras resistentes y la modernización de infraestructuras, especialmente en Valencia, además de promover simulacros y programas educativos para preparar a la población ante posibles temblores en esta área con actividad sísmica (López, octubre de 2023).

➤ **La región de Murcia y Alhama de Murcia:**

La Región de Murcia es una zona que también presenta alto riesgo sísmico especialmente en lugares como Alhama de Murcia, lugar que ha vivido terremotos importantes a lo largo de la historia, por tanto, esto ha motivado a reforzar la inspección de las infraestructuras y todo tipo de edificaciones para así tomar medidas preventivas, entre ellas se han implementado normativas de construcción más estrictas y se han creado planes de emergencia para asegurar que la población esté lista en caso de un sismo (López, octubre de 2023).

➤ **La región de los Pirineos:**

Como se ha comentado en este documento en apartados anteriores, la región de los Pirineos, también se caracteriza por ser una región con riesgo sísmico en España, aunque los temblores en esta área suelen ser leves o moderados, pueden afectar estructuras y generar preocupación; así que las autoridades han trabajado en mejorar las condiciones en zonas habitadas, mientras que en las áreas protegidas se desarrollan estudios geológicos constantes con el fin de tratar de estar listos frente a eventuales deslizamientos o fisuras en el terreno (López, octubre de 2023).

➤ **Melilla y el Norte de África:**

Por último, tenemos a Melilla que, ubicada en el norte de África, se encuentra en una zona de contacto entre placas tectónicas como se ha visto anteriormente, lo que la convierte en un área con alto riesgo sísmico, pero no logran ser tan frecuentes los temblores fuertes; y al igual que en las otras regiones con riesgo sísmico, las autoridades locales han trabajado también en medidas de preparación; sin embargo, a pesar de su geografía particular el estado español

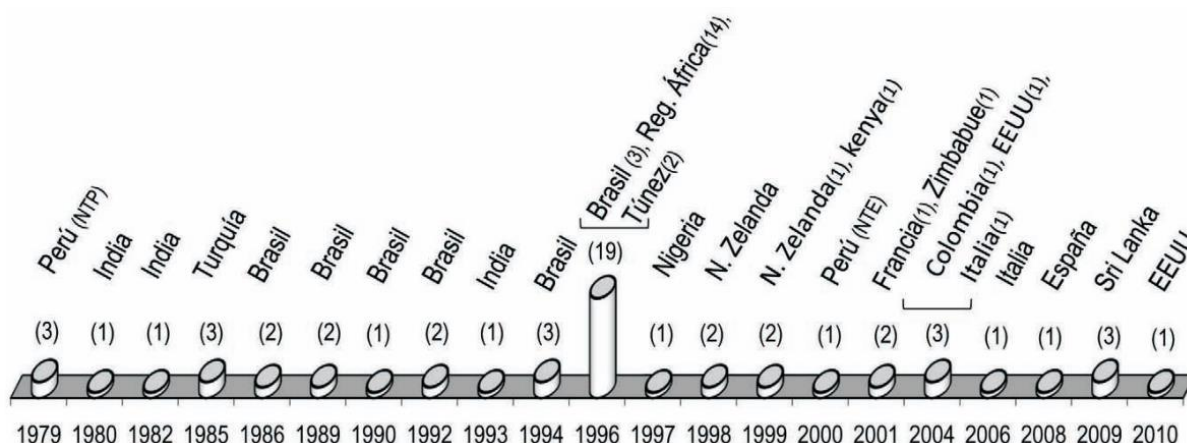
continúa adaptando sus proyectos públicos para garantizar una respuesta adecuada ante los futuros terremotos que acontecerán el lugar (López, octubre de 2023).

3.1.4 DESAFÍOS DE LAS EDIFICACIONES DE TIERRA ANTE LOS SISMOS EN ESPAÑA

Según Cid, Mazarrón y Cañas (2011), y Catalán (2018), sostienen que, aunque la tierra se ha usado desde hace siglos como material de construcción, la falta de una normativa clara dificulta su empleo hoy en día, especialmente en países desarrollados, donde se puede observar de forma comparativa en la Figura 65 la cantidad de normativas internacionales en vigor entre diferentes países para las edificaciones de tierra. Ante el aumento del interés por este material tradicional, varios países buscan establecer regulaciones que permitan su uso tanto legal como técnico, resolviendo así los problemas que acarrea la ausencia de un marco normativo para las edificaciones de tierra.

Figura 65. Número de normativas vigentes para construcciones de tierra en diferentes países.

Fuente: Las normativas de construcción con tierra en el mundo (Cid, Mazarrón y Cañas, 2011).



En su investigación, Raquel Catalán (2018), menciona que en la actualidad de España, aunque el interés por construir con tierra ha crecido, su aplicación es limitada por la ausencia de una normativa porque, mientras otros países ya han regulado en gran medida este sistema, en España solo existe una norma vigente desde 2008, la UNE 41410; esta es la primera normativa oficial no experimental elaborada por el subcomité AEN/CTN 41 SC 10 de AENOR, que corresponde a los Bloques de Tierra Comprimida (BTC), y establece desde la definiciones hasta requisitos técnicos y ensayos abarcando distintos usos sin centrarse en uno solo.

Tabla 14. Las normativas y reglamentos internacionales y el contenido que abarca cada uno.
Fuente: Las normativas de construcción con tierra en el mundo (Cid, Mazarrón y Cañas, 2011).

País/Grupo	Norma/Reglamento	REF.	EST.	Técnica	Campo de aplicación	Selección suelos	Requisitos productos	Ensayos	Fabricación	Construcción	Diseño
Brasil 1	NBR 8491, 1986.	7	x	Bloque comprimido macizo	Condiciones exigibles para recibir los bloques	x	x				
	NBR 8492, 1986.	8			Ensayos de resistencia a compresión y absorción de agua para bloques			x			
	NBR 10832, 1989	9			Procedimiento de fabricación con prensa manual/hidráulica	x			x		
	NBR 10833, 1989	10		Bloque comprimido macizo y perforado		x			x		
	NBR 10834, 1994.	11		Bloque comprimido perforado sin función estructural.	Condiciones de recepción	x	x				
	NBR 10835, 1994	12			Forma y dimensiones de los bloques		x				
	NBR 10836, 1994	13			Ensayos de resistencia a compresión y absorción de agua			x			
	NBR 12023, 1992	14		Bloques suelo-cemento	Procedimientos de ensayos			x			
	NBR 12024, 1992	15						x			
	NBR 12025, 1990	16						x			
	NBR 13554, 1996	17						x			
	NBR 13555, 1996	18						x			
	NBR 13553, 1996	19		Pared monolítica sin función estructural	Condiciones exigibles para los materiales para paredes monolíticas sin función estructural.	x	x				
Colombia 2	NTC 5324, 2004	20	x	Bloques macizos de suelo-cemento para muros y divisiones.	Caracterización y métodos de ensayo de los bloques macizos suelo-cemento.	x	x	x			
EEUU 3	NMAC, 14.7.4, 2004	21		Adobe, Bloques de tierra comprimida y tapial	Reglamento de construcción	x	x	x		x	
4	ASTM E2392 M-10	22		Adobe, tapial	Guía para construcción de sistemas con tierra	x		x	x	x	
España 5	UNE 41410:2008	23		Bloques de tierra comprimida	Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo	x	x	x			
Francia 6	XP P13-901, 2001	24		Bloques de tierra comprimida	Terminología, dimensiones y métodos de ensayo	x	x	x			

India 7	IS 2110 : 1980	25	x	Pared in-situ de suelo-cemento	Especificaciones técnicas para paredes no mayores de 3,2 m de altura y anchura >300mm muros de carga o >200mm particiones.	x	x			x	
	IS 1725 : 1982.	26	x	Bloques de tierra comprimidos estabilizados.	Requisitos y pruebas para bloques de tierra de uso en construcción en general. Procedimientos de ensayos.	x	x	x			
	IS 13827 : 1993	27		Adobe y tapial	Directrices para la mejora de la resistencia sísmica de edificios de tierra		x			x	
Kenya 8	KS 02-1070:1,1999.	30	x	Bloques de suelo estabilizados con cemento o cal	Requisitos para la construcción con este bloque	x	x	x			
Nueva Zelanda 9	NZS 4297, 1998.	32		Adobe, bloque comprimido,	Diseño estructural y de durabilidad de los edificaciones de tierra					x	x
	NZS 4298, 1998.	33		tierra vertida, tapial	Caracterización de materiales y especificaciones de construcción para el uso de tierra cruda. Procedimientos de ensayos	x	x	x	x	x	
	NZS 4299, 1999.	34		Adobe, bloque comprimido, tapial	Requisitos de diseño y construcción para adobe, bloques comprimido o tapial que no necesitan diseño específico.					x	x
Perú 10	NTE E 0.80, 2000	35		Adobe	Requisitos para la construcción de adobe simple y adobe estabilizado	x	x	x	x	x	x
11	NTP 331.201, 1979	36	x	Adobe estabilizado con asfalto	Definiciones, condiciones generales y requisitos		x	x	x		
	NTP 331.202, 1979.	37			Procedimientos de ensayo	x					
	NTP 331.203, 1979.	38			Muestreo y recepción.		x				
Regional África 12	ARS 670, 1996	39		Bloques de tierra comprimida	Terminología BTC.	x					
	ARS 671, 1996	40			Clasificar los BTC						
	ARS 672, 1996	41			Clasificación de morteros de tierra.						
	ARS 673, 1996	42			Definir formas de albañilería						
	ARS 674, 1996	43			Requisitos de BTC ordinarios	x	x				
	ARS 675, 1996	44			Requisitos aplicables a BTC vistos	x	x				
	ARS 676, 1996	45			Requisitos de morteros ordinarios		x				
	ARS 677, 1996	46			Requisitos de morteros vistos		x	x			
	ARS 678, 1996	47			Requisitos para albañilería revestida					x	x
	ARS 679, 1996	48			Requisitos para albañilería vista					x	x
	ARS 680, 1996	49			Estado del arte fabricación BTC	x			x		
	ARS 681, 1996	50			Estado del arte para morteros tierra.	x			x		
	ARS 682, 1996	51			Estado del arte para construcción					x	
	ARS 683, 1996	52			Pruebas requeridas	x	x				
Sri Lanka 13	SLS 1382-1:2009	53	x	Bloques de tierra comprimida	Requerimientos	x	x				
	SLS 1382-2:2009	54		Bloques de tierra comprimida	Métodos de ensayo			x			
	SLS 1382-3:2009	55		Bloques de tierra comprimida	Guía sobre producción, diseño y construcción				x	x	x
Túnez 14	NT 21.33:1996	56		Bloques de tierra comprimida	Especificaciones para BTC ordinarios, características geométricas, físico-químicas...		x	x			
	NT 21.35:1996	57			Definición y clasificación de BTC		x				
Zimbabue 15	SAZS 724, 2001.	61		Tapial	Guías para el diseño, construcción y ensayos para estructuras de tapial.	x	x	x		x	x

Tal como vemos en la Tabla 14, las normas sobre Bloques de tierra Comprimida (BTC) son de las más desarrolladas, con regulaciones abundantes en cada uno de los países que se analizaron en su investigación, además que detallan aspectos como su forma (dimensiones y geometría), tamaño, apariencia y propiedades fisicoquímicas (Cid, Mazarrón & Cañas, 2011).

Es importante mencionar que, en el Código Técnico de Edificación (CTE) fija objetivos generales para la edificación en España, pero deja libertad en cuanto a los medios empleados sin ser necesario ejecutar el seguimiento de los Documentos Básicos (DB), permitiendo soluciones alternativas justificadas por parte de los proyectistas bajo su propia responsabilidad; esta falta de directrices específicas en el caso de la construcción con tierra permite mayor flexibilidad para desarrollar métodos propios dentro del marco normativo (Catalán, 2018; Romero A., 2017).

3.2 PLNATEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Tal y como se pudo observar, el presente trabajo de investigación lo que pretende es analizar el comportamiento sísmico de las edificaciones de tierra en España, evaluando las patologías que son particulares en este tipo de edificaciones en el territorio nacional, con el objetivo central de poder desarrollar propuestas técnicas de actuación en caso de sismo para entidades como los equipos protección civil, o entidades como ayuntamientos y sus departamento encargados de la protección y conservación de este tipo de patrimonio arquitectónico y cultural.

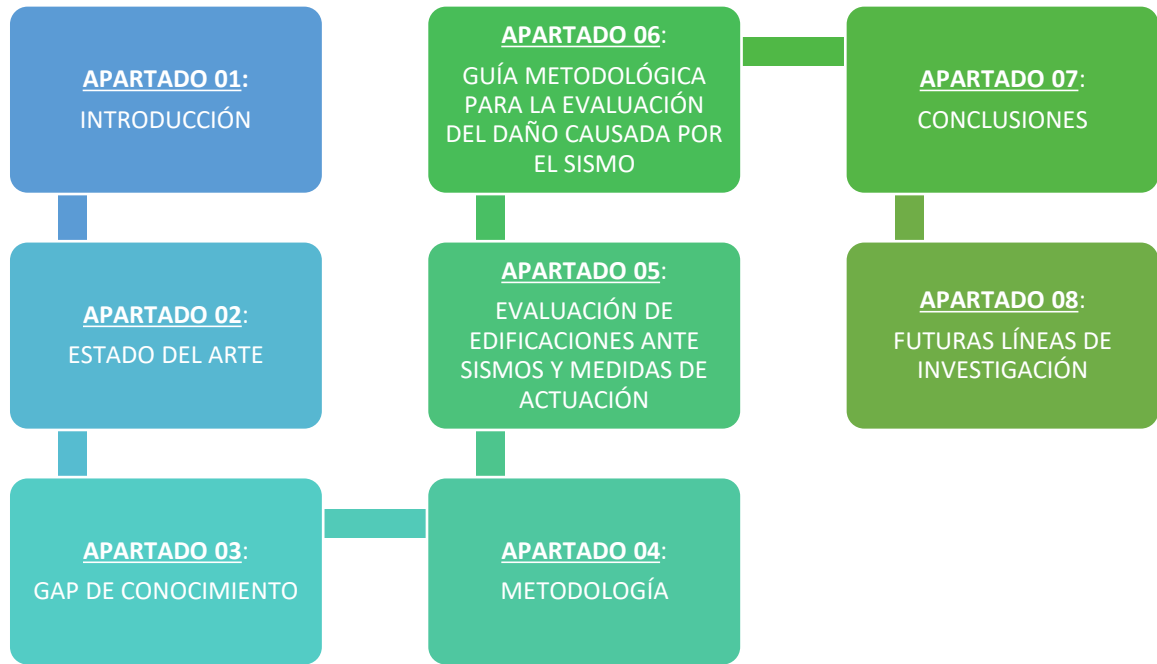
Para ello, se propone Identificar y categorizar las patologías que son frecuentes en edificaciones de tierra, teniendo en cuenta los aspectos materiales y estructurales, y tanto previos como posteriores a un evento sísmico, estableciéndolos en apartados diferentes con el fin de poder contrastar las características de cada una de estas, analizando los patrones de daño asociados a cada tipología y así poder determinar, por ejemplo, si un lesión ha sido ocasionado por el sismo o había estado presente previo a este, o poder determinar si una lesión se ha agravado con el paso de estos eventos naturales. Junto a esto, también se propone establecer criterios con el objeto de poder valorar dichos daños posteriores a un terremoto, con el fin de contextualizar la situación de seguridad que posee una edificación de tierra, en función a su integridad estructural.

4. METODOLOGÍA

4.1 PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Dentro de este apartado se pretende explicar de forma resumida el planteamiento general del presente informe del Trabajo de Fin de Máster, el cual presenta el siguiente esquema:

Figura 66. Gráfica del planteamiento y estructuración del informe de Trabajo de Fin de Máster.
Fuente: Elaboración propia.



4.2 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

- En el apartado 01 de este documento, se contextualiza la problemática de las edificaciones de tierra respecto a su ubicación en zonas sísmicas de España, destacando la vulnerabilidad estructural de estas viviendas ante los eventos telúricos. Además, se presentan los objetivos generales y específicos de la investigación, enfocados en analizar el riesgo sísmico, evaluar las patologías recurrentes y, por supuesto, las técnicas de reforzamiento para mejorar la resiliencia de estas construcciones.
- En el apartado 02 de este documento, se revisa el conocimiento actual sobre la sismicidad en España, incluyendo sus propiedades sismotectónicas y niveles de riesgo; también se analiza la arquitectura de tierra en contexto de ámbito nacional, describiendo las tipologías constructivas, tales como el tapial, mampostería de adobe, BTC, etc. Así mismo, engloba el tema de la descripción de las propiedades principales de la tierra como material de construcción. Además, se evalúan ejemplos representativos y patologías por degradación tanto material como estructural de las edificaciones de tierra. Finalmente, se examinan las técnicas de reforzamiento sísmico en este tipo de arquitectura, por ejemplo, la implementación de mallas electrosoldadas, geomallas, incorporación de elementos confinamientos de madera y su efectividad.

- Dentro del apartado 03 de este documento, se identifican los vacíos críticos en la investigación sobre edificaciones de tierra en España, tales como la falta de estudios integrales que vinculen sismicidad peninsular con la vulnerabilidad estructural. Además, se mencionan los desafíos específicos a los que se encuentra sometido las edificaciones de tierra ante la problemática central, proyecciones de riesgo; y en base a esta información se plantean las líneas prioritarias para la presente y para futuras investigaciones.
- En el apartado 04 de este documento, se detalla el enfoque metodológico adoptado en el Trabajo de Fin de Máster, donde se observa de manera generalizada el contenido completo de la investigación.
- En el apartado 05 de este documento, se centra en clasificar y analizan las lesiones y patologías que son recurrentes en las edificaciones de viviendas de tierra en España previos a estar expuesta a un evento sísmico, como después de este, resaltando las diferencias entre las degradaciones materiales, tales como por causas de agentes atmosféricos, biológicos, etc; y los fallos por motivos estructurales, tales como fisuras o colapsos. Además, en este apartado se establecen los criterios para poder valorar riesgos según el daño que se observe en algún caso práctico, para que así se propongan los protocolos de intervención posterior a un terremoto.
- En la sección 06 de este documento, se expone la propuesta de evaluación de daños de una vivienda de tierra en España, empleando las herramientas que han sido desarrolladas resultado del trabajo de investigación, aplicando la metodología propuesta desde la recopilación de información hasta la propuesta de acciones para su intervención.
- En el apartado 07 de este documento, se sintetizan las conclusiones derivadas de la investigación, enfatizando la relación entre tipologías constructivas, vulnerabilidad sísmica, la efectividad de los reforzamientos caracterizados en el estudio, explicando la relevancia del trabajo de investigación en función a las problemáticas que aborda el trabajo, además de cómo éste sigue lineamientos de sostenibilidad con los criterios globales de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
- En este apartado 08 de este documento, se proponen algunas líneas futuras de trabajo, que pueden formar las bases para estudios posteriores referentes al tema en cuestión.

5. EVALUACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES DE TIERRA ANTE LOS SISMOS

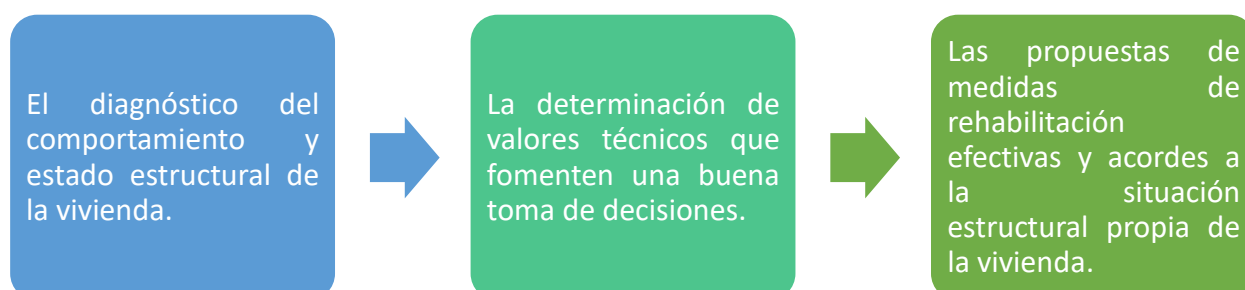
5.1 PATOLOGÍAS Y DAÑOS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Las construcciones de tierra como el adobe, el tapial o los entramados constituyen en España un patrimonio arquitectónico vulnerable, especialmente en las regiones sísmicas, tal y como se ha explicado de este informe en los apartados de *INTEGRIDAD ESTRUCTURAL Y VULNERABILIDAD SÍSMICA* y de *DESAFÍOS DE LAS EDIFICACIONES DE TIERRA ANTE LOS SISMOS EN ESPAÑA*, podemos decir que se ha demostrado que estas técnicas de construcción tradicionales, pese a su adaptación cultural y ambiental que se lleva hoy en día, presentan debilidades intrínsecas ante acciones dinámicas debido a características como su baja resistencia tracción, a su fragilidad ante todo tipo de deformaciones y la muy probable heterogeneidad material.

Es por ello que en este apartado se pretende realizar un análisis para identificar las patologías preexistentes que comprometen la integridad estructural previa a un evento sísmico para posteriormente evaluar las patologías producidas bajo las solicitaciones dinámicas de un sismo en los elementos estructurales de una vivienda típica de tierra. En función a este propósito, este diagnóstico resulta fundamental para poder establecer una línea base que diferencie los daños y patologías recurrentes en las edificaciones de tierra de aquellos daños inducidos por el sismo. En otros términos, lo que permitiría es evaluar los elementos estructurales antes y después de un sismo (sobre todo este último) dentro de una inspección/reconocimiento para así tener una proyección y mejorar al mismo tiempo la comprensión y conocimiento de los agravamientos de los daños que, a su vez, nos da las herramientas para poder planificar o prever posibles colapsos de elementos estructurales parciales o totales, ya sean de forma inminentes o a medida del tiempo.

Para describir los daños y patologías recurrentes previos al sismo y posterior a este, en primer lugar, se realiza una información descriptiva tanto textual como visualmente a través de ejemplos e imágenes prácticas en cada uno de los aspectos patológicos hallados en la investigación.

Con todo esto, la metodología que se propone además de recopilar información acerca del material estructural que se haya empleado para la construcción de la vivienda que se analice, hará acopio de información que permita fundamentar el sistema constructivo de la vivienda; es decir, datos que se pueden recabar en el reconocimiento inicial:



Es importante establecer una secuencia tanto cronológica como sistemática respecto a toda la temática que se pretende presentar; es decir, aplicado desde la recopilación de datos hasta el diagnóstico lo que ayudará a proporcionar mayor claridad al proceso metodológico que se describirá en los apartados posteriores, tal como se muestra en la Figura 70 del presente documento.

Teniendo en cuenta lo mencionado, el proceso inicial facilitará información de importancia como la identificación de las características del sistema constructivo y estructural de la vivienda que se esté evaluando, conocer las condiciones actuales de su desempeño estructural, y al mismo tiempo, determinar los agentes externos que inciden directamente como factores de riesgo sobre el sistema estructural. A continuación, se muestra en esquemas de resumen las tipologías constructivas de vivienda presentes en el contexto de España, documentación que fue recopilada y moldeada necesaria dentro del planteamiento y metodología de evaluación de daños en una vivienda de tierra explicado en apartados posteriores del presente documento, y que se pueden apreciar con mayor detalle dentro del catálogo creado y recogido en el ANEXO 11, ANEXO 12 y ANEXO 13 del presente documento:

Figura 67. Caracterización constructiva con mampostería de tierra en viviendas de tierra en España consideradas para el sistema de evaluación.

Fuente: Elaboración propia.

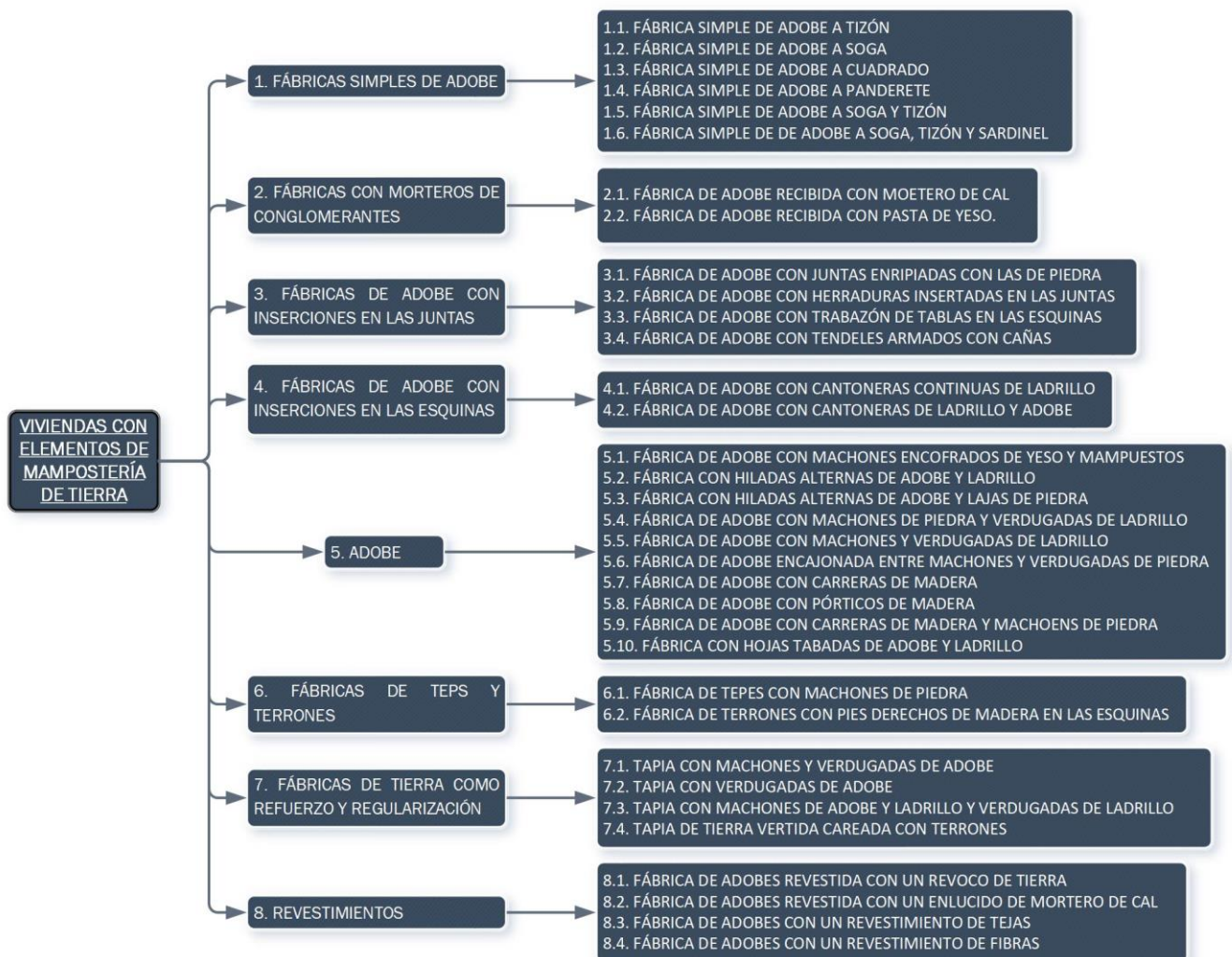


Figura 68. Caracterización constructiva con muros de tapial en viviendas de tierra en España consideradas para el sistema de evaluación.

Fuente: Elaboración propia.

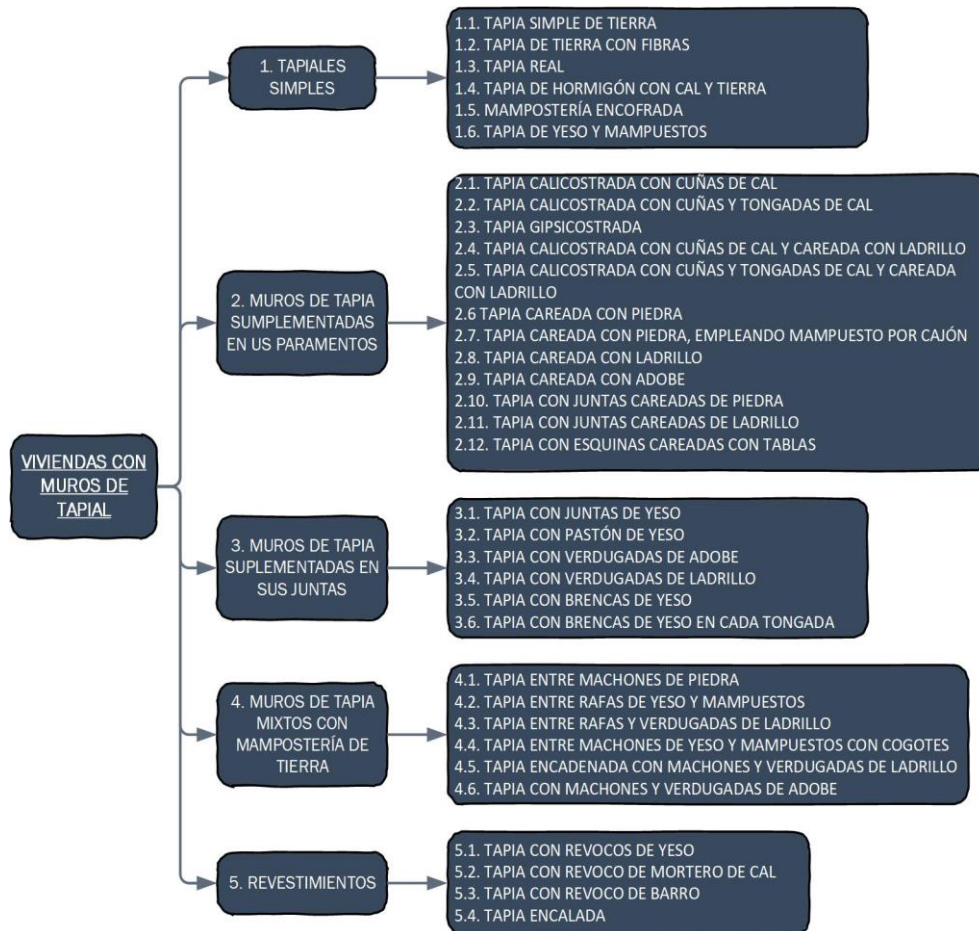


Figura 69. Caracterización constructiva de muros mixtos de tierra y madera en viviendas de tierra en España consideradas para el sistema de evaluación.

Fuente: Elaboración propia.

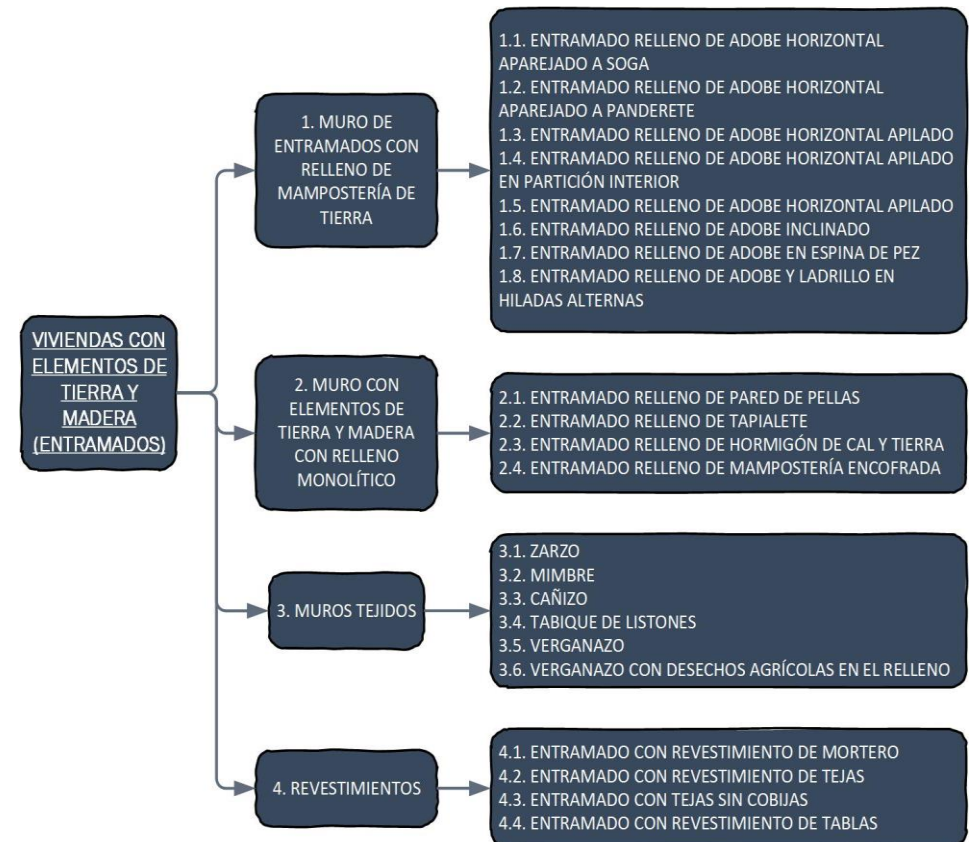
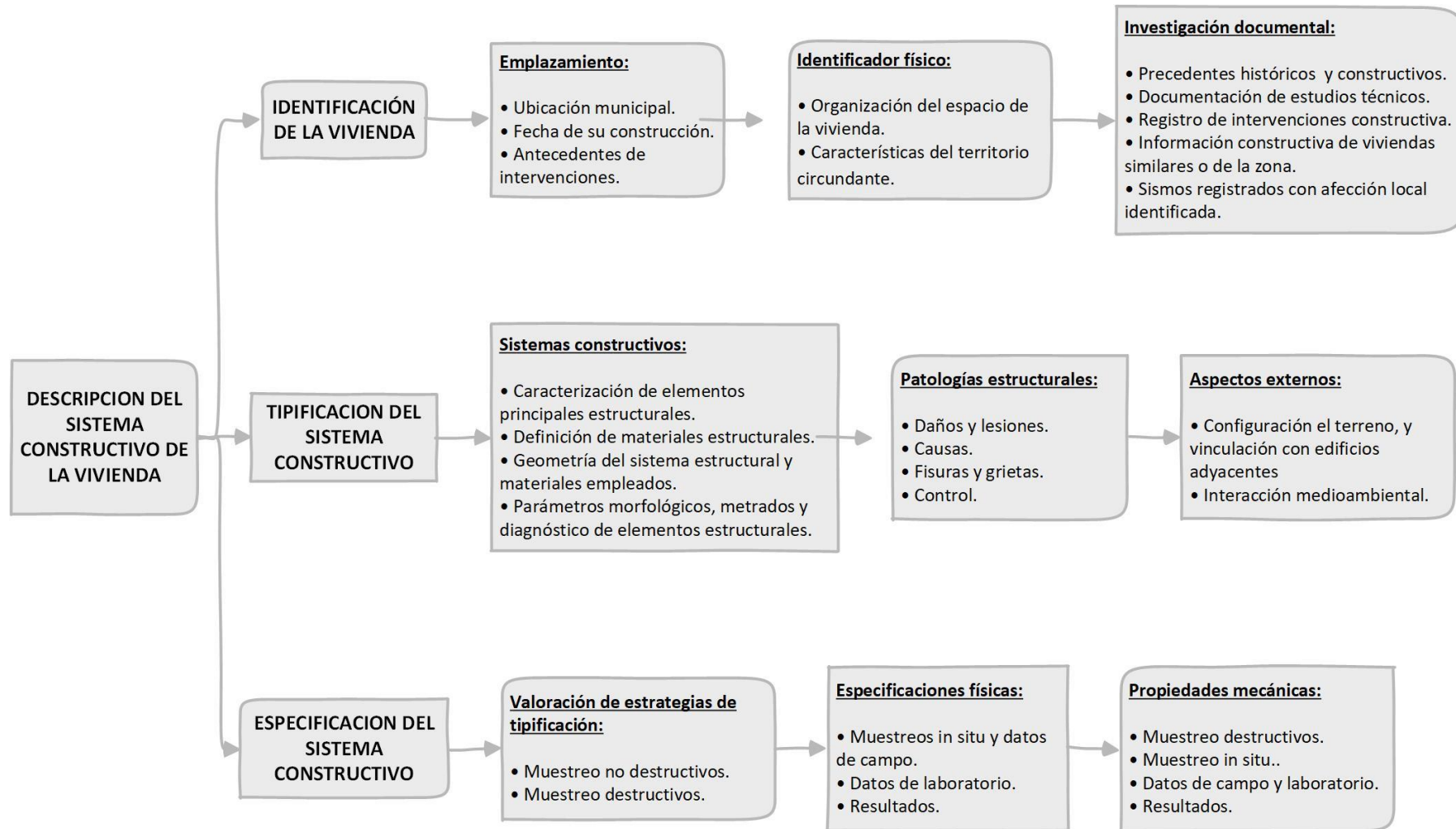


Figura 70. Metodología propuesta para la descripción y definición del sistema constructivo de viviendas de tierra

Fuente: Elaboración propia.



5.1.1 PATOLOGÍAS Y DAÑOS RECURRENTES PREVIOS A UN EVENTO SÍSMICO

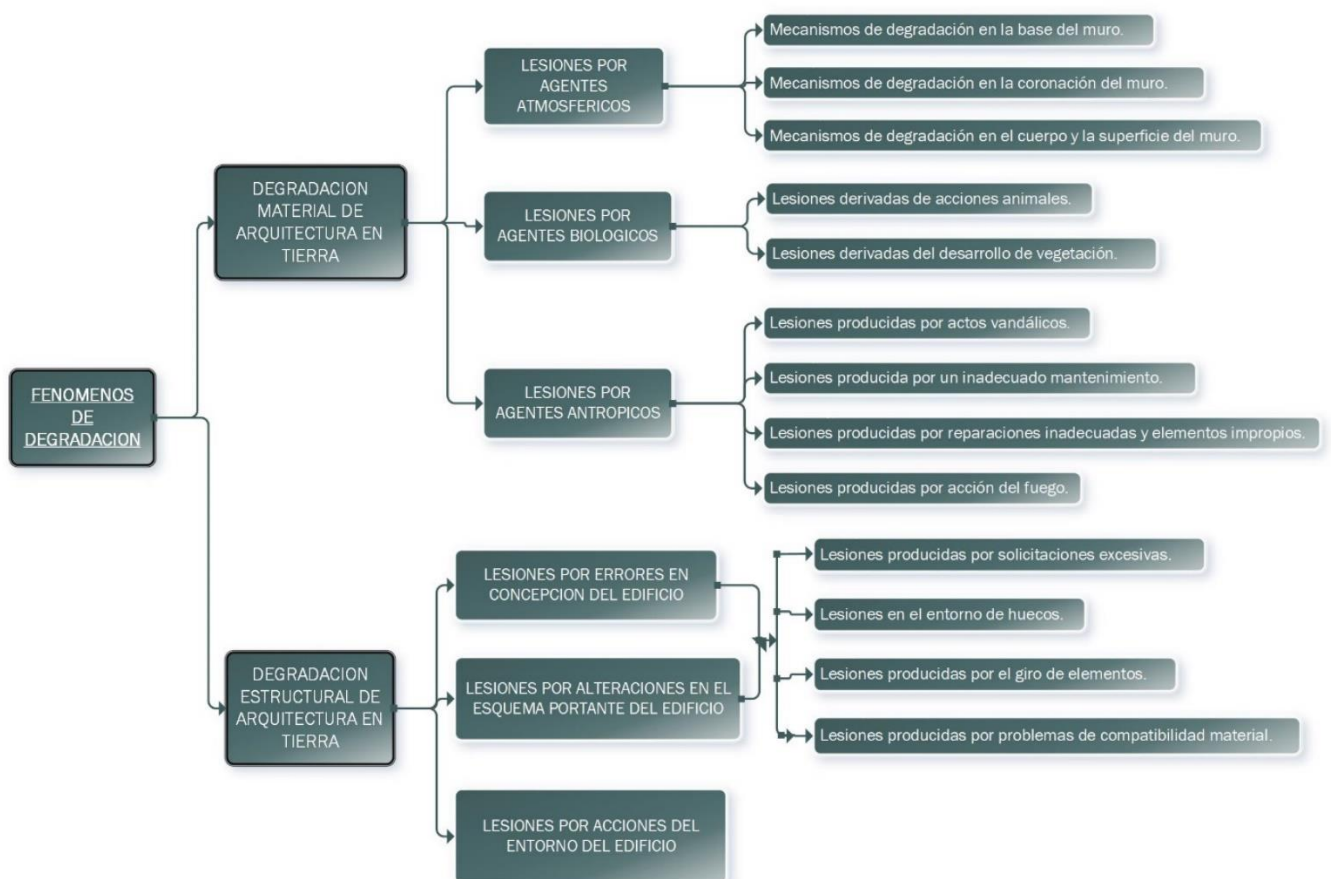
Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, estos sistemas constructivos tradicionales han experimentado un paulatino reemplazo por materiales industriales, lo que ha desembocado en el abandono, demolición o alteraciones inadecuada de las edificaciones de tierra; todos estos aspectos en adición a la exposición de diversos factores hacen que el repertorio de patologías estructurales sea considerable.

Ante esto, lo que se pretende a continuación es elaborar una descripción textual y visual de los daños y lesiones que son frecuentes en la arquitectura vernácula de tierra. Además, esta información proporcionará una base para elaborar un futuro eje de un catálogo de daños y lesiones más especializado, y en base a esta información se podría facilitar el desarrollo de estrategias de reparaciones.

Para dejar un contexto global de la información que recoge a manera de resumen las lesiones y patologías que se abordan, se observa a continuación el siguiente esquema:

Figura 71. Esquema de patologías en viviendas de tierra recurrentes previo a efectos de un sismo.

Fuente: Elaboración propia.



5.1.1.1 DEGRADACIÓN MATERIAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA

A) LESIONES POR AGENTES ATMOSFÉRICOS

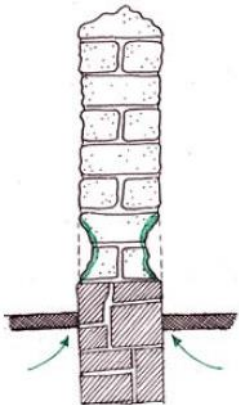
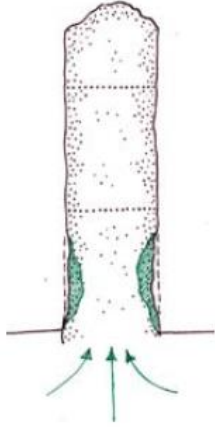
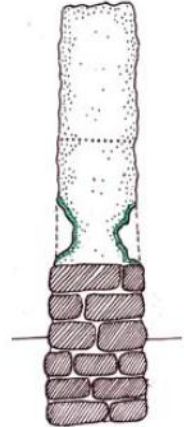
❖ *Mecanismos de degradación en la base del muro de tierra:*

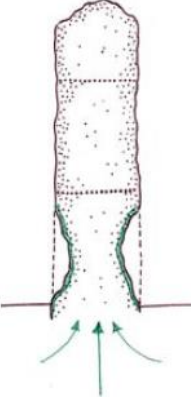
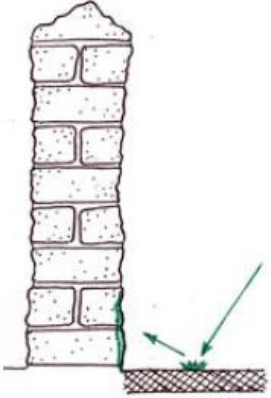
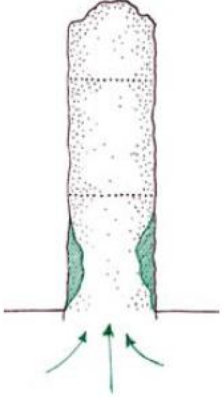
La base de los muros de tierra es el elemento que está en contacto directo con el suelo y esto constituye un foco prioritario de deterioro debido a la capacidad de absorción capilar de agua del terreno incrementando así su humedad, esto ocasiona degradaciones comenzando por alteraciones cromáticas e higrotérmicas y culminando en pérdidas de sección de muro y su siguiente inestabilidad (o colapso en caso avanzado). La humedad constante a su vez facilita la migración de sales solubles las cuales forman eflorescencias superficiales o su acumulación en la parte interna del muro; adicionalmente, la humedad crónica es un buen ambiente para la proliferación biológica (hongos, líquenes) que aceleran la disgregación superficial.

Por otro lado, si se dispone de un zócalo de materiales hidrófugos por ejemplo de alguna mampostería (ladrillo, etc.) en la base de los muros de la vivienda con el objetivo de poder reducir en lo posible la migración de la humedad del suelo hacia los materiales de tierra del muro; sin embargo, su efectividad dependerá de no incurrir en fallas en su diseño como: altura insuficiente, juntas sin sellar o falta de barreras impermeables, propiedades del material (porosidad, compactación o uso de estabilizantes) y, por supuesto, fuentes hídricas externas. Estas últimas abarcan ya sea escorrentías por pendientes del terreno, urbanización con drenaje inadecuado y debido a salpicaduras de pavimentos adyacentes a los muros, acelerando así su erosión.

Tabla 15. Lesiones producidas por agentes atmosféricos – Mecanismos de degradación en la base de los muros de tierra en viviendas.

Fuente: Elaboración propia.

<i>Pérdida de sección en muros de mampostería de adobe por motivos de capilaridad.</i>	<i>Erosión superficial en muro de tapia debido a la capilaridad.</i>	<i>Pérdida de sección en muro de tapia pisada con zócalo, por motivos de capilaridad.</i>
		

<i>Pérdida de sección del muro debido a la capilaridad.</i>	<i>Erosión en la base del muro de tapial o mampostería de adobe debido a la salpicadura de lluvia.</i>	<i>Presencia de manchas de humedad en muros de tierra.</i>
		

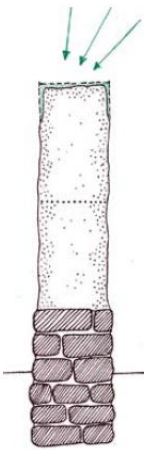
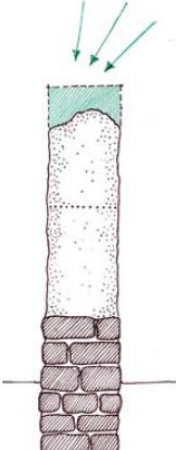
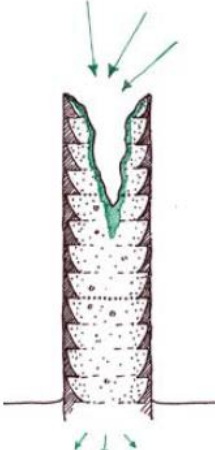
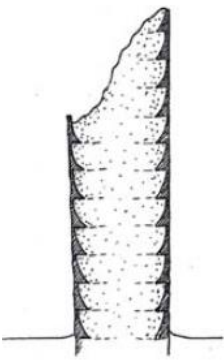
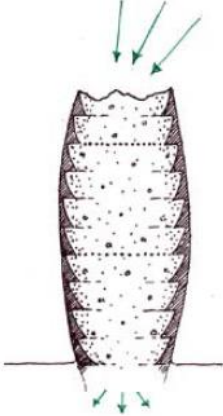
❖ *Mecanismos de degradación en la coronación del muro de tierra:*

La coronación de los muros de tierra es una zona crítica de degradación, pero con mecanismos diferentes de los vistos anteriormente en los de la base del muro; es decir que, mientras que el factor de la humedad en la base de los muros proviene del suelo, para la coronación del muro predominan las repercusiones de la lluvia.

La exposición directa a las precipitaciones ocasiona un lavado superficial del muro, en otras palabras, produce la pérdida de material por “erosión hídrica”, esto afecta especialmente a muros que no dispongan de aleros, además del fenómeno de filtración descendente en donde el agua penetra por la coronación y migra en dirección a la base, evaporándose antes de llegar (con excepción de muros con revestimientos no transpirables, como la tapia calicostrada acumulando la humedad internamente).

Además, es importante mencionar que los daños diferenciales tienen una tendencia a aparecer en base a la orientación de la vivienda; es decir, según la localización geográfica de España, las zonas norte de las viviendas se caracterizan por tener sombra de forma prolongada, situación que incita a que se desarrollen humedades persistentes, mientras que las áreas ventiladas sufren daños cíclicos tales como lavados, o sales. Por último, en sistemas como el de la tapia calicostrada, el fenómeno del lavado interno del muro está vinculado con una reducción de la resistencia mecánica sin signos externos iniciales, lo que puede derivar en fallas estructurales silenciosas, mostrando únicamente signos de abombamientos por pandeo de la capa superficial en el muro.

Tabla 16. Lesiones producidas por agentes atmosféricos – Mecanismos de degradación en la coronación de los muros de tierra en viviendas.
Fuente: Elaboración propia.

<i>Erosión por lavado en un muro de tapia pisada.</i>	<i>Pérdida de sección por lavado de un muro tapial.</i>	<i>Núcleo lavado en un muro de tapia calicostrada.</i>
		
<i>Desprendimiento de la costra de un muro tapial calicostrado debido al lavado del muro.</i>	<i>Abombamiento de un muro de tapia calicostrada por el lavado de su núcleo interno.</i>	
		

❖ *Mecanismos de degradación en la superficie y el cuerpo del muro de tierra:*


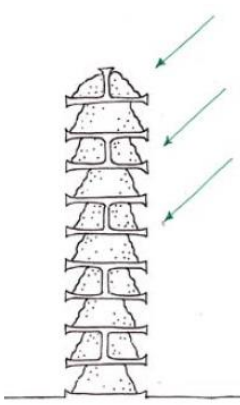
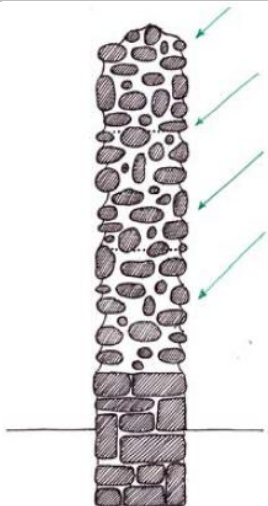
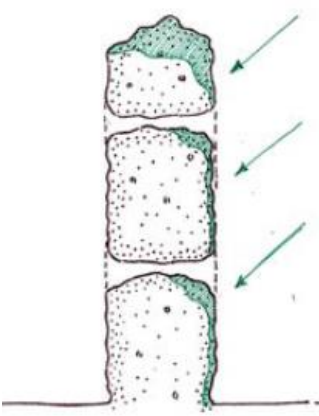
Las patologías que se suelen encontrar en el cuerpo de los muros de tierra tienen orígenes diversos, por ejemplo, se puede dar debido a la extensión de daños desde la base o coronación hacia la parte central, o directamente por agentes externos.

La erosión hídrica superficial, como se mencionó en apartados anteriores que es provocada por escorrentías debido a la falta de aleros y/o a la acción combinada entre lluvia y viento, genera la acción de lavado diferencial según el material de composición del muro, por ejemplo:

- En revoques de tierra genera la pérdida acelerada de capas superficiales.
- Mientras que en morteros de cal o yeso produce una degradación más lenta, pero con relieves irregulares, lesiones conocidas como "escalonamiento".
- En aparejos, los muros sin estabilizantes se homogenizan superficialmente, mientras que aquellos con juntas de cal o yeso acentúan desniveles entre piezas y mortero.

En climas fríos, la gelifracción ocasiona que las superficies se descamen al congelarse el agua presente en los poros, mientras que, en las zonas expuestas del muro la erosión eólica desgasta especialmente esquinas y muros sin revestimiento. Además, particularmente en los sistemas mixtos como la tapia careada muestran un lavado selectivo de la tierra, dejando piedras o ladrillos en voladizo hasta el punto de fracturarse, mientras que en los mechinales mal sellados canalizan el agua hacia el interior acelerando así el deterioro localizado.

Tabla 17. Lesiones producidas por agentes atmosféricos – Mecanismos de degradación en la coronación de los muros de tierra en viviendas.
Fuente: Elaboración propia.


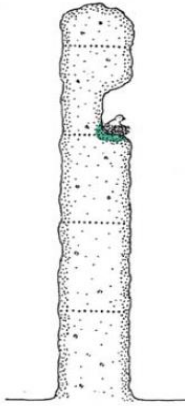

<p>Lavado de la masa de tierra en un muro de tapia.</p>	<p>Lavado de las piezas en un muro de adobe recibido con mortero de cal.</p>
	
<p>Lavado superficial de un muro de tapia de hormigón.</p>	<p>Erosión de los mechinales en un muro de tapia.</p>
	

B) LESIONES POR AGENTES BIOLÓGICOS

❖ *Lesiones derivadas de acciones animales:*

Además de los agentes climáticos, considerados la principal fuente de deterioro en las construcciones de tierra, existen otros factores de índole natural que pueden contribuir al desgaste progresivo de los componentes estructurales elaborados con este material. Dentro de esta categoría de patologías, se incluyen todas aquellas alteraciones provocadas por la interacción de organismos vivos en el entorno edificado, tales como el crecimiento de flora o los efectos derivados de la actividad faunística sobre los elementos constitutivos de los muros.

Tabla 18. Lesiones producidas por agentes biológicos – Lesiones derivadas de la acción de animales.
Fuente: Elaboración propia.

<i>Ave anidada en un muro de tapia de hormigón.</i>	<i>Anidamiento de aves en un muro de tapia.</i>	<i>Muro de adobe perforado por insectos.</i>
		


❖ *Lesiones derivadas del desarrollo de vegetación:*

Debido a su composición orgánica y sus propiedades para la retención hídrica, los muros de tierra son vulnerables al desarrollo de organismos vegetales, algunas semillas pueden germinar en sus superficies rugosas, con aproximadamente un contenido de humedad superior al 18%, valores que favorecen la proliferación de musgos, líquenes y plantas vasculares, intensificando los ciclos de humedad/secado.

Al mismo tiempo, la vegetación inferior puede generar la acidificación en la superficie de los muros, aumentando la absorción térmica, mientras que las raíces de plantas superiores pueden ejercer una presión mecánica en el muro, lo que conlleva a agravar las grietas. Además, la presencia de diversos hongos degrada los componentes estructurales, por ejemplo, la pudrición de color pardo puede reducir la resistencia a compresión del muro estructural, y la blanda afecta su capacidad de flexibilidad.

Por último, los árboles cercanos tienen efectos mixtos en los muros de tierra; es decir, que erosionan con ramas y raíces, pero también los protegen del impacto directo de las ráfagas de viento e interceptando también la lluvia.

Tabla 19. Lesiones producidas por agentes biológicos – Lesiones derivadas de la acción de la vegetación.
Fuente: Elaboración propia.

<p><i>Desarrollo de vegetación superior sobre una construcción de mampostería de adobe – Zaragoza.</i></p>	<p><i>Desarrollo de musgo sobre un muro de mampostería de adobe.</i></p>
	

<p><i>Desarrollo de vegetación sobre un muro tapial.</i></p>	<p><i>Proliferación de musgo en un muro de mampostería de adobe – Palencia.</i></p>
	


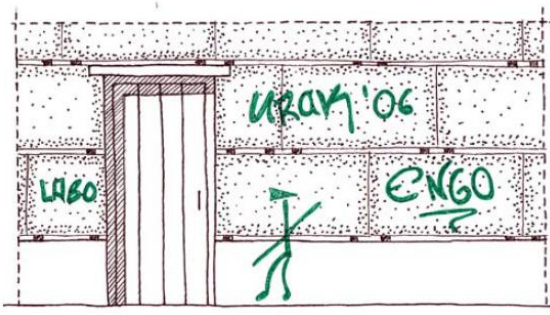
C) LESIONES POR AGENTES ANTRÓPICOS

❖ *Lesiones producidas por actos vandálicos:*

Los actos vandálicos en arquitectura de tierra se manifiestan principalmente a través de los graffitis, en donde el uso de aerosoles o pinturas penetra hasta en la superficie aproximadamente unos 2 a 3 mm, y a su vez, reduce la transpirabilidad de este material en un 40% – 60%. Luego está el expolio que implica la extracción manual de elementos como ladrillos, vigas, etc. Comprometiendo la integridad estructural progresivamente y generando daños colaterales con herramientas que producen fracturas radiales. Además, podemos tomar en cuenta los incendios intencionados, que en muros de tierra causan una deshidratación irreversible de las arcillas presentes en su composición al superar temperaturas de unos 600°C.

Estos actos se ven favorecidos por factores de riesgo como la ubicación, donde edificios más cercanos a los núcleos urbanos tienen mayor probabilidad de sufrir vandalismo, especialmente en zonas con baja vigilancia e iluminación nocturna, así como por el estado de conservación, ya que las construcciones abandonadas registran con mayor frecuencia incidentes vandálicos que aquellas a las que le realizan un mantenimiento regular.

Tabla 20. Lesiones producidas por agentes antrópicos – Lesiones producidas por actos vandálicos.
Fuente: Elaboración propia.

<i>Graffitis en una vivienda de mampostería de adobe – Valencia.</i>	<i>Esquematzación de graffitis en un muro de tapia pisada.</i>
	

❖ *Lesiones producidas por un inadecuado mantenimiento:*

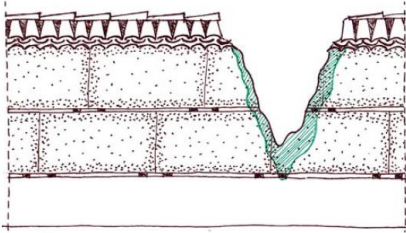
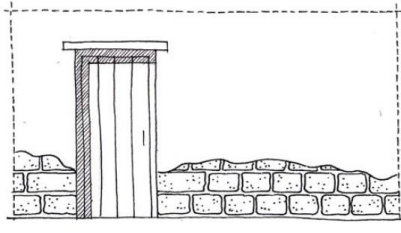
La arquitectura de tierra exige un mantenimiento continuo y especializado debido a las características intrínsecas de sus materiales, los cuales absorben y liberan humedad requiriendo una protección constante y, como se ha visto anteriormente, posee una alta sensibilidad a la erosión ya que esta se degrada rápidamente sin la presencia de revestimientos o aleros, recalando que la falla de un solo elemento como cubiertas o zócalos acelera en gran medida el deterioro general de la edificación.

El abandono de estas estructuras desencadena consecuencias graves tales como la pérdida de elementos protectores como carpinterías, que expone los huecos a la intemperie y vandalismo iniciando ciclos de degradación; además, las cubiertas dañadas permiten filtraciones que pudren estructuras de madera en menos de dos años en climas húmedos; y la falta de revestimientos genera erosión por lluvia con acanaladuras de 1-3 cm anuales.

Tanto la falta de mantenimiento como una aplicación incorrecta de este lleva a pérdida de protecciones, lo que puede permitir la entrada de agua causando lavado de muros y/o pudrición de madera en caso de entramados, seguido de colonización biológica por hongos e insectos que comprometen la resistencia estructural.

Tabla 21. Lesiones producidas por agentes antrópicos – Lesiones producidas por un inadecuado mantenimiento de las viviendas.
Fuente: Elaboración propia.

<p><i>Pérdida de las carpinterías en un edificio – Burgos.</i></p> 	<p><i>Lavado con acanaladuras por la degradación del alero – León.</i></p> 
<p><i>Erosión de un muro por efecto de la degradación del alero – Ávila.</i></p> 	<p><i>Desprendimiento del relleno en un edificio de muros entramados – Salamanca.</i></p> 

<i>Pérdida de sección por degradación del alero en una cerca de tapia.</i>	<i>Pérdida del revestimiento en una construcción de adobe.</i>
	

❖ *Lesiones producidas por reparaciones inadecuadas y elementos impropios:*

Las intervenciones inapropiadas en construcciones de tierra ocasionan perjuicios estructurales y fisicoquímicos bastante importantes, por ejemplo, los revestimientos hidrófugos (tales como los morteros de cemento o pinturas acrílicas) anulan la capacidad de transpiración del material, lo que conlleva una disminución de su permeabilidad al vapor de agua, por tanto induce a la acumulación de humedad intersticial con altos niveles de saturación, reduciendo así su resistencia mecánica a compresión; esto al mismo tiempo, al inhibir los procesos naturales de evaporación se promueve la formación de eflorescencias salinas.



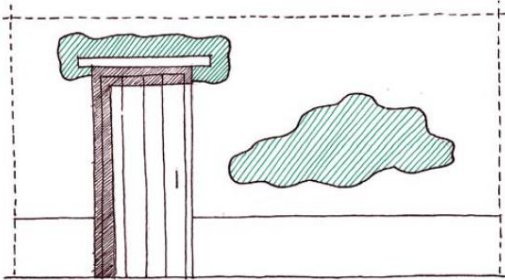
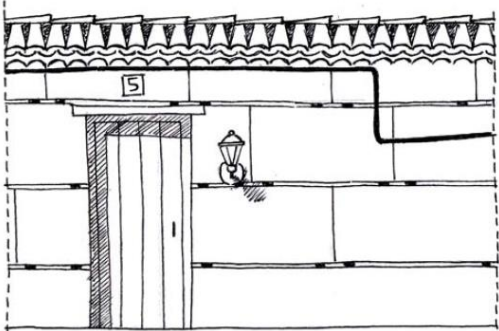
Por otro lado, la colocación incorrecta de instalaciones, tales como un cableado o luminarias, mediante perforaciones con martillos neumáticos produce fisuras radiales, mientras que la aplicación de morteros para fijaciones genera tensiones estructurales. Todos estos fenómenos se intensifican mediante mecanismos de degradación acelerada, tales como los ciclos higrotérmicos bajo barreras impermeables los cuales provocan movimientos diferenciales por expansión/contracción que desprenden los acabados superficiales, y la oxidación de componentes metálicos generando así fisuraciones en la masa mural.

También es importante mencionar que la reparación de estos daños plantea desafíos específicos, puesto que la remoción mecánica de estos revestimientos puede provocar la pérdida de 2 – 3 centímetros del sustrato original, deteriorando aún más las propiedades conservativas de la tierra.

Tabla 22. *Lesiones producidas por agentes antrópicos – Lesiones producidas por un inadecuado mantenimiento de las viviendas.*

Fuente: Elaboración propia.

<i>Problemas de adherencia en una construcción revestida con cemento – Zamora.</i>	<i>Reparación inadecuada de un edificio de entramado de madera – Burgos.</i>
	

<p><i>Alteración del carácter de una cerca de tapia por la construcción de un nuevo acceso en forma de torreón – Albacete.</i></p>	<p><i>Elementos impropios instalados en una construcción de adobe – Palencia.</i></p>
	
<p><i>Resarcido de lagunas en el revestimiento con cemento.</i></p>	<p><i>Instalación de elementos impropios.</i></p>
	

❖ *Lesiones producidas por la acción del fuego:*

La respuesta estructural de los materiales térreos frente a la acción del fuego exhibe notables ventajas, pero al mismo tiempo con limitaciones fundamentales; es decir, al tratarse de un material inherentemente incombustible, la tierra en estado natural conserva su estabilidad estructural incluso expuesta a temperaturas extremas de hasta 1.100°C, por tanto, estos materiales actúan como una barrera protectora para los elementos internos de la vivienda.

No obstante, como se mencionó en apartados anteriores, es importante recalcar que, al superar el umbral térmico de 600°C, los materiales térreos experimentan un proceso irreversible de deshidroxilación de sus componentes arcillosos lo que compromete su específicamente a su capacidad portante, además de que lo hace más propenso a la microfisuración por tensiones térmicas durante un proceso de enfriamiento abrupto.

Los componentes no térreos evidencian mayor riesgo, por ejemplo, en los sistemas de entramados, las estructuras de madera muestran una tasa de carbonización bastante elevada bajo condiciones de incendio convencional (300-500°C), pudiendo sufrir pérdidas de hasta el 80% de su resistencia a flexión al alcanzar los 300°C, mientras que los elementos fibrosos como los refuerzos de paja, sufren combustión completa en intervalos inferiores a 15 minutos al exponerse a 250°C.

Tabla 23. Lesiones producidas por agentes antrópicos – Lesiones producidas por la acción del fuego.
Fuente: Elaboración propia.

<i>Construcción de vivienda con mampostería de adobe quemada – Segovia.</i>	<i>Vivienda con sistema de entramados tras un siniestro – Burgos.</i>
	

5.1.1.2 DEGRADACIÓN ESTRUCTURAL DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA

A) LESIONES POR ERRORES EN CONCEPCIÓN DEL EDIFICIO

❖ *Lesiones producidas por solicitaciones excesivas:*



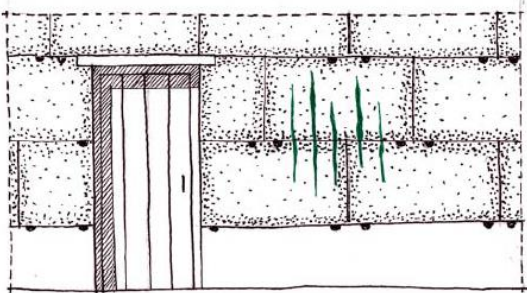
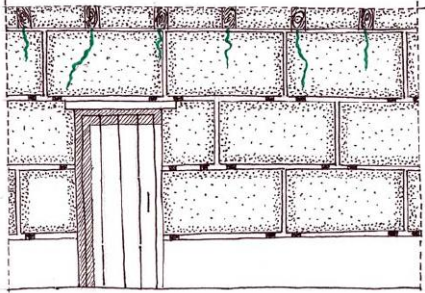
Las patologías derivadas de un diseño estructural inadecuado en construcciones de tierra evidencian vulnerabilidades críticas, ya que cuando los muros de carga presentan espesores inferiores al 10% de su altura libre (como un muro de 30 cm para 3 m de altura en edificios de más de una planta), se generan fisuras verticales por tracción en las bases y deformaciones plásticas progresivas en edificaciones de adobe no estabilizados. Además, las cargas concentradas agravan estos problemas, especialmente en casos de punzonamiento donde tensiones locales producen fisuras en forma de abanico.

Los mecanismos de fallo se acentúan por la limitada resistencia característica del adobe, la cual sufre una fluencia lenta bajo cargas sostenidas superiores al de su capacidad, y por sistemas de transmisión de cargas deficientes donde forjados sin diafragma rígido generan diferencias entre las vigas, o incluso, la ausencia de durmientes puede concentrar esfuerzos en la superficie del muro de tierra.

Las zonas críticas como esquinas de huecos son áreas susceptibles a este tipo de lesiones, que se ven incrementadas sus tensiones debido a la reducción de sección resistente, mientras que los encuentros entre materiales heterogéneos (como el adobe y la madera), generan puntos de debilidad estructural; no obstante, estos factores combinados demuestran la necesidad de crear diseños adaptados a las particularidades mecánicas de los materiales térreos.

Tabla 24. Lesiones producidas por errores en la concepción del edificio – Lesiones producidas por solicitaciones excesivas.

Fuente: Elaboración propia.

<p><i>Fisuración de un muro de adobe en el apoyo de una viga – Ávila.</i></p>	<p><i>Fisuración en el apoyo de una viga se desvía hacia una junta constructiva – Zamora.</i></p>
	
<p><i>Fisuración por aplastamiento de un muro de tapia.</i></p>	<p><i>Fisuración de un muro de tapia por punzonamiento en el apoyo de las vigas.</i></p>
	



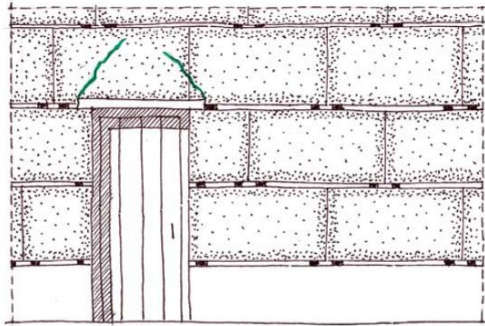
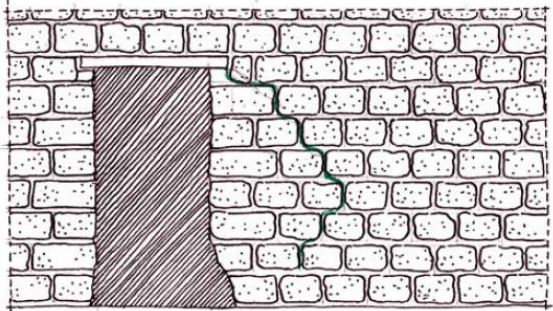
❖ *Lesiones en el entorno de los huecos:*

El diseño de huecos en muros de tierra son puntos críticos ya que en estas zonas se generan problemas estructurales específicos debido a la concentración de tensiones en las esquinas de los vanos, donde la redistribución de cargas crea esfuerzos de tracción diagonal que derivan en fisuras ascendentes a 45°, especialmente en huecos ubicados bajo vigas de forjado o cerca de esquinas estructurales.

Los paneles estrechos entre huecos con relaciones altura/ancho son propensos a sufrir los efectos del pandeo, lo que conlleva a una reducción de su carga admisible en comparación con un muro continuo. Por otro lado, en vanos grandes las deformaciones en los dinteles que superen $L/300$ son propensos a sufrir un fallo inminente, siendo especialmente críticos los dinteles de madera no reforzados y los de adobe sin refuerzo. Estos problemas se agravan por factores como la erosión de las jambas, en donde cada centímetro perdido disminuye la resistencia al vuelco, o incluso, la falta de rigidez en dinteles con empotramientos insuficientes.

Tabla 25. Lesiones producidas por errores en la concepción del edificio – Lesiones en el entorno de los huecos.

Fuente: Elaboración propia.

<p><i>Paño de adobe dañado por la excesiva deformación del dintel inferior – Palencia.</i></p>	<p><i>Colapso de un muro inducido por la degradación de las jambas del acceso – Palencia.</i></p>
	
<p><i>Formación de un arco de descarga sobre un vano en un muro de tapia.</i></p>	<p><i>Colapso de un muro de adobe inducido por la degradación de las jambas de un vano.</i></p>
	



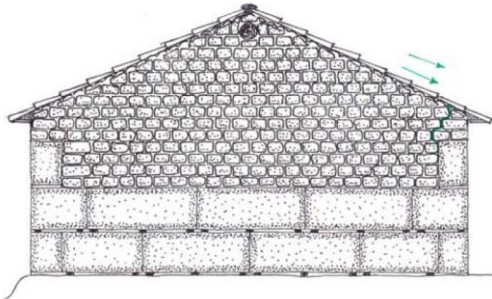
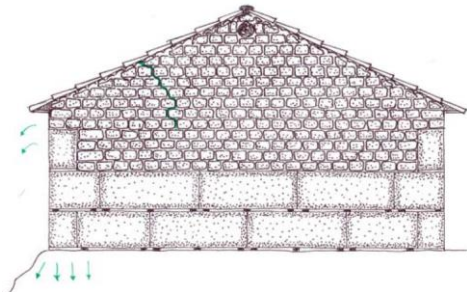
❖ *Lesiones producidas por el giro de elementos:*

Un problema importante es el giro de muros de tierra puede originarse por mecanismos como el empuje de la cubierta o el deslizamiento de la base; para el primer caso, la falta de fijación adecuada de la estructura de cubierta genera un empuje horizontal en la coronación, provocando una rotación del muro hacia el exterior, a su vez, generan fisuras características que incluye fisuras verticales en los encuentros con muros transversales y en apertura en la esquina superior. Este problema se agrava en los muros con sistemas de tapia sin trabazón en esquinas o cuando existen testeros débiles, tales como los encuentros entre el adobe y el tapial.

Por otro lado, en el segundo mecanismo, el giro por deslizamiento de base, ocurre por cimentaciones superficiales en terrenos inclinados o en excavaciones adyacentes que reducen el apoyo lateral, manifestándose con la aparición de fisuras verticales y/o diagonales desde la base y con asentamientos diferenciales en un extremo del muro. En conclusión, ambos fenómenos comprometen gravemente la estabilidad estructural y requieren de intervenciones diferenciadas según sea se origen.

Tabla 26. *Lesiones producidas por errores en la concepción del edificio – Lesiones producidas por giros de elementos.*

Fuente: Elaboración propia.

<i>Giro de la fachada por empuje de la cubierta – Salamanca.</i>	<i>Giro de una construcción por descalce de su cimentación – Zaragoza.</i>
	
<i>Fisuración por empuje de la cubierta de un edificio de adobe y tapia.</i>	<i>Fisuración de un edificio de adobe y tapia por el descalce de su cimentación.</i>
	


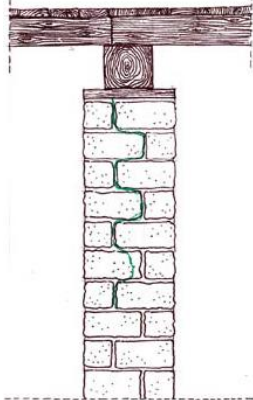
B) LESIONES POR ALTERACIONES EN EL ESQUEMA PORTANTE DEL EDIFICIO:

❖ *Lesiones producidas por solicitaciones excesivas:*

La longevidad característica de numerosas edificaciones vernáculas conduce frecuentemente a procesos de ampliación motivados ya sea por la evolución de las necesidades habitacionales o funcionales, y cuando estas modificaciones implican un desarrollo vertical mediante sobreelevaciones, es probable que se genere un aumento significativo de las cargas gravitatorias que deben ser absorbidas por los muros y posteriormente transmitidas a la cimentación. Junto a esto, es importante considerar el efecto del envejecimiento material y la exposición prolongada a factores ambientales puede ocasionar una merma progresiva de la capacidad portante original, que evidencian el estado de sobre esfuerzo mediante patrones de fisuración por compresión análogos a los descritos anteriormente.

Por otro lado, cuando se suprimen algunos componentes estructurales primarios, tales como pilares o sectores de muro de carga, puede desencadenarse una redistribución forzada de los flujos tensionales dentro del sistema constructivo, generando frecuentemente estados de carga críticos en los elementos remanentes. En estos casos las condiciones de sobrecarga se materializan preferentemente a través de mecanismos de fallo diferenciados tales como el fenómeno de aplastamiento localizado en los muros sometidos a compresión excesiva, así como las manifestaciones de efectos de pandeo en los soportes verticales esbeltos.

Tabla 27. *Lesiones producidas por alteraciones en el esquema portante del edificio – Lesiones producidas por solicitaciones excesivas.*
Fuente: Elaboración propia.

<p><i>Construcción de pilares de ladrillo para evitar el aplastamiento del muro en la sobreelevación de un edificio – Albacete.</i></p>	<p><i>Fisuración por pandeo de una columna de adobe sobrecargada.</i></p>
	

❖ *Lesiones en el entorno de los huecos:*

La creación y modificación de vanos constituye una intervención recurrente en procesos de adaptación en la arquitectura de tierra a nuevas exigencias funcionales y de habitabilidad; no obstante, estas operaciones requieren especial precaución por su potencial para generar múltiples patologías estructurales, esto radica en que la ejecución de nuevos huecos en paños murales sometidos a elevadas sollicitaciones puede provocar una redistribución crítica de tensiones hacia zonas debilitadas, lo que contribuye a acelerar los procesos de fisuración e incluso induciendo mecanismos de fallo progresivo que comprometan la estabilidad parcial de la edificación.

Mientras que la apertura de vanos en áreas estructuralmente críticas acelera la degradación de los tramos afectados, también suele ocurrir por la acumulación progresiva de perforaciones en muros aparentemente estables generando una transferencia de cargas cada vez más concentrada en los sectores residuales portantes. Este tipo de acciones incrementa el estado tensional de estos paños remanentes, pudiendo conducir a situaciones de fatiga material, y dichas condiciones se ven agravadas por la pérdida concomitante de rigidez global en la sección modificada, predisponiendo a deformaciones diferenciales en los elementos superiores. Además, entre las intervenciones más habituales destaca la ampliación de vanos existentes para acomodar accesos vehiculares o mejorar condiciones lumínicas. Estas modificaciones introducen notables esfuerzos flectores en las fábricas superiores que frecuentemente exceden la capacidad resistente de los sistemas de dintelado tradicional.

Tabla 28. *Lesiones producidas por alteraciones en el esquema portante del edificio – Lesiones en el entorno de los huecos.*

Fuente: Elaboración propia.

<i>Fisuración del muro de adobe por la ampliación de un vano – Jaén.</i>	<i>Formación de un arco de descarga sobre un hueco – Ciudad Real.</i>
	

❖ *Lesiones producidas por el giro de elementos:*

Como se menciona en apartados anteriores, las fisuras asociadas a la rotación de elementos constructivos son daños recurrentes y de gran severidad en las construcciones de tierra, los perjuicios relacionados con el desplazamiento del muro en su zona basal y con la presión ejercida por la cubierta en su extremo superior, también pueden originarse debido a modificaciones en la estructura a lo largo de su ciclo de vida. La edificación de nuevos espacios por debajo del nivel de sustentación de los muros o la remoción de terreno en lotes adyacentes para la ejecución de nuevas obras pueden inducir el deslizamiento de las fundaciones; además, las lesiones derivadas de estos desplazamientos pueden dar paso a la formación de grietas verticales en la intersección del elemento rotado con muros perpendiculares y el derrumbe parcial de la edificación; asimismo, las excavaciones en el entorno para el tendido de infraestructuras comunitarias o el mantenimiento de la red vial pueden generar efectos similares a estas lesiones.

Otra situación recurrente es la variación en la presión ejercida por la cubierta inclinada sobre la parte superior de los muros que la soportan, ya que suele estar ligada al deterioro de la unión con la viga de cumbrera. Además de estos procesos, la ejecución de ampliaciones, añadidos verticales y reformas estructurales de envergadura puede ocasionar aumentos significativos en las cargas transmitidas por la cimentación al suelo en determinados sectores, y con este motivo, estas modificaciones pueden dar lugar a hundimientos desiguales, quienes se evidenciarán mediante la aparición de fisuras diagonales en los ángulos de la vivienda.

Tabla 29. *Lesiones producidas por alteraciones en el esquema portante del edificio – Lesiones producidas por el giro de elementos.*
Fuente: Elaboración propia.

<i>Construcción de adobe descalzada por la ampliación del viario – Zaragoza.</i>	<i>Sobreelevación de una parte de una construcción – Teruel.</i>
	

❖ *Lesiones producidas por problemas de compatibilidad material:*

Al abordar las patologías estructurales ocasionadas por modificaciones en los sistemas de carga de la edificación, es importante no dejar de lado los perjuicios de la respuesta mecánica entre los componentes originales del inmueble heterogéneos y los materiales incorporados durante trabajos de rehabilitación en esta misma condición.

La utilización de elementos con características de rigidez o coeficientes de dilatación térmica diferentes a los de la tierra puede generar fisuras en las zonas de transición, asociadas a movimientos por expansión térmica o deformaciones no uniformes; además, estas deficiencias suelen manifestarse con especial rapidez en intervenciones que incorporan materiales contemporáneos tales como hormigón o acero, en edificaciones con muros de tierra. Son por estas razones que es crucial que los materiales empleados en las restauraciones presenten propiedades mecánicas y térmicas compatibles con los elementos existentes, garantizando además una correcta conexión estructural entre ambos sistemas.

Tabla 30. *Lesiones producidas por alteraciones en el esquema portante del edificio – Lesiones producidas por la incompatibilidad de materiales.*

Fuente: Elaboración propia.

<i>Problemas de compatibilidad entre un muro de tierra y un trasdosado de ladrillo – Teruel.</i>	<i>Problemas de compatibilidad entre un muro de tierra y un enfoscado – valencia.</i>
	

C) LESIONES POR ACCIONES DEL ENTORNO DEL EDIFICIO

Al margen de la intervención humana, factores como el envejecimiento natural o las condiciones ambientales del entorno donde se ubica un edificio pueden desencadenar procesos patológicos que deriven en fisuras y deformaciones estructurales, además, la fatiga material y el deterioro progresivo de los componentes constructivos durante la vida útil de la edificación reducen gradualmente su capacidad resistente, forzando así a que la estructura se adapte mediante deformaciones que redistribuyan las cargas hacia los elementos y sus configuraciones con mayor estabilidad; cabe señalar que este fenómeno afecta particularmente a los elementos sometidos a esfuerzos de tracción, pudiendo provocar deformaciones progresivas o incluso su fallo estructural.

De manera análoga, la carga permanente ejercida por el edificio sobre el terreno induce un proceso de compactación gradual, generando asentamientos continuos en la cimentación, luego, cuando las cargas se transmiten de manera desigual al subsuelo o cuando este presenta estratigrafías heterogéneas con capas blandas de espesor irregular, pueden desarrollarse asentamientos diferenciales, y es en estas circunstancias en que la distorsión del terreno de apoyo introduce tensiones estructurales significativas, ocasionando graves fisuraciones y deformaciones en el edificio.

Tabla 31. Lesiones producidas por acciones del entorno de la edificación.
Fuente: Elaboración propia.

Degradación de la subestructura de madera de un entramado – Salamanca.	Salida de plano de la imprenta de madera en un muro entramado.
	
Inestabilidad por la pérdida de sección sufrida en la base – León.	
	

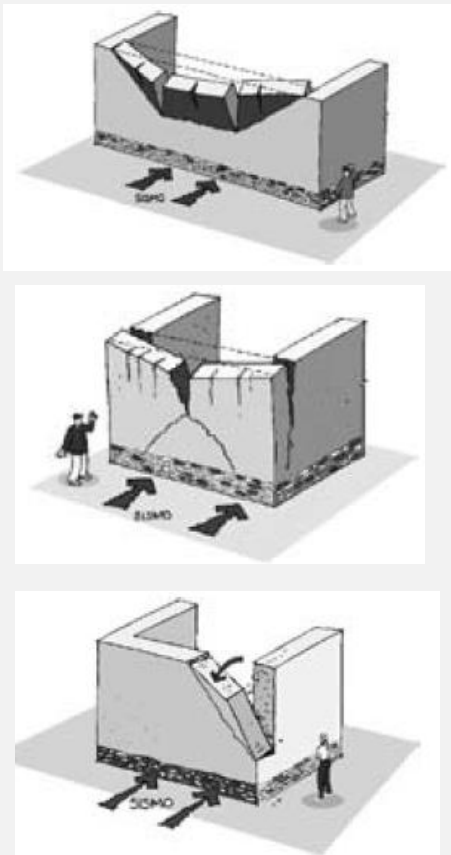
5.1.2 PATOLOGÍAS Y DAÑOS RECURRENTES POSTERIOR A UN EVENTO SÍSMICO

Los movimientos sísmicos se encuentran entre los fenómenos naturales que con mayor severidad pueden generar tensiones de tracción en las viviendas de tierra, ocasionando daños estructurales generalizados; en las zonas de España donde hay alta actividad sísmica, los sismos ocurren con cierta periodicidad, y es por este motivo que en dichas zonas se intenta consolidar una tradición arquitectónica vernácula antisísmica que se materialice tanto en el reforzamiento de los sistemas constructivos originarios como en la incorporación sistemática de elementos de disipación sísmica en las edificaciones tradicionales.

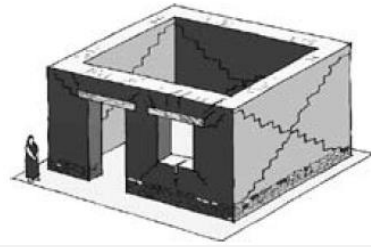
Las estrategias antisísmicas empleadas en la arquitectura vernácula de tierra presentan una notable diversidad a nivel global tal y como se detalla en el apartado de reforzamientos de estas edificaciones en este informe de investigación; no obstante, en el contexto español, donde el riesgo sísmico es considerablemente bajo, con excepción de algunas áreas concretas de Murcia y Andalucía Oriental, no puede hablarse de una tradición constructiva antisísmica generalizada en el patrimonio arquitectónico nacional.

Los tipos de fallas y agrietamientos en los elementos estructurales de una vivienda de tierra, asociados con fuerzas sísmicas son las siguientes:

Tabla 32. Tipos de fallas y agrietamientos en edificaciones de tierra asociados a fuerzas sísmicas.
Fuente: Elaboración propia. (Yamin et al., 2007).

TIPO DE FALLA	GRÁFICO REPRESENTATIVO
<p>➤ Existen tres esquemas por flexión perpendicular al plano del muro:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ En el primero, por lo general se presentan en muros largos, donde se aprecian agrietamientos horizontales en la base o a una altura intermedia del muro, además de agrietamientos verticales. ○ En segundo lugar, son apreciables agrietamientos verticales en la zona central, sumando un agrietamiento diagonal que establece el principal mecanismo de falla o fisuración en la parte superior del muro. ○ En tercer lugar, las fallas se centran en la parte de las esquinas del muro, ya sea porque son esquinas no confinadas de muros sueltos, o porque estas no están conectadas con muros transversales correctamente. 	

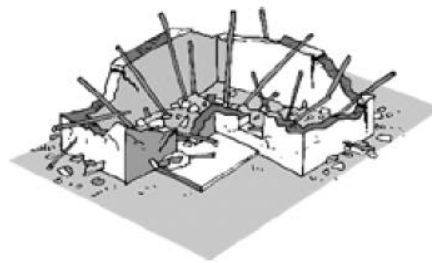
- *Fallas por cortante en el plano del muro:*
Estos agrietamientos tienen correlación con cubiertas o pisos de elevado peso, en adición de aberturas pertenecientes a ventanas o puertas de la edificación.



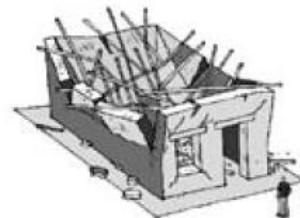
- *Falla producida por una mala conexión de los muros entre un piso y otro:*
Esta patología muestra un mecanismo de falla presentando agrietamientos casi horizontales en el entrepiso, ocasionando inestabilidad del segundo piso.



- *Falla generalizada de la cubierta por ausencia de apoyos adecuados:*
Puede ocasionarse por una mala estructuración de la vivienda, siendo muy frecuente en edificaciones con cubiertas muy pesadas y con deterioro avanzado.



- *Caída de la cubierta hacia el interior de vivienda:*
Por motivos de construirse mal apoyadas sobre los muros, presentando a posteriori agrietamiento en las zonas superiores de los muros.



Al igual que lo visto en el apartado previo, en donde se expone un mejor contexto de las patologías y lesiones recurrentes en viviendas de tierra, para el presente caso de los daños procedentes de un evento sísmico se pretende hacer lo mismo. Bajo este contexto se presentan una serie de gráficos de los daños que describen los elementos estructurales de una vivienda de adobe, y para ello es relevante apoyarnos en la información obtenida por el Getty Seismic Adobe Project, en uno de sus estudios en donde abordan el tema de estudiar prototipos de pequeña escala de viviendas de materiales térreos sometiéndolos a ensayos de laboratorio bajo una simulación de cargas sísmicas, ello con el objetivo de evaluar las respuestas globales de estos modelos.

Para conocer mejor el contexto sobre el cual se llevó a cabo dicho proyecto, a continuación, se describen las condiciones y los criterios que tomaron en cuenta:

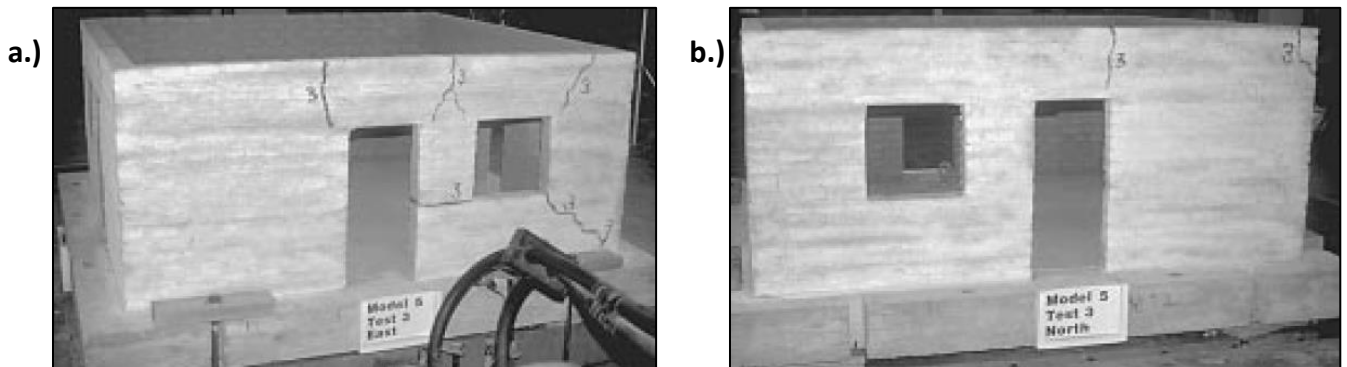
- Los modelos a pequeña escala se llevaron a cabo en una mesa vibratoria ubicada en el Centro de Ingeniería Sísmica John A. Blume, en la Universidad de Stanford; dicha mesa posee unas dimensiones de 1,52 m y un movimiento uniaxial que puede generar desplazamientos máximos de 38 centímetros; es decir, que es una mesa vibratoria pensada para ensayar prototipos con escalas aproximadas de 1:5.
- Por otro lado, cada prototipo de vivienda de adobe fue construida bajo una pieza de hormigón de 1,67 metros.
- La geometría de los muros construidos para los prototipos fue de un espesor de un ladrillo de adobe comercial, mientras que, para el mortero se empleó la misma mezcla utilizada para la creación de las piezas de mampostería, es decir, una mezcla de arcilla y arena en proporciones de 1:5. Además, la esbeltes que presenta los muros de tierra, en relación altura – espesor, es de un factor de 11, es decir que, los muros tienen un espesor bastante pequeño.
- Para los procedimientos del ensayo cada uno de los prototipos fueron sometidos a series de 10 movimientos, simulando diferentes intensidades de eventos sísmicos, lo cual se traduce en un aumento de desplazamientos entre un 20 – 30 % mayor a la serie previa.

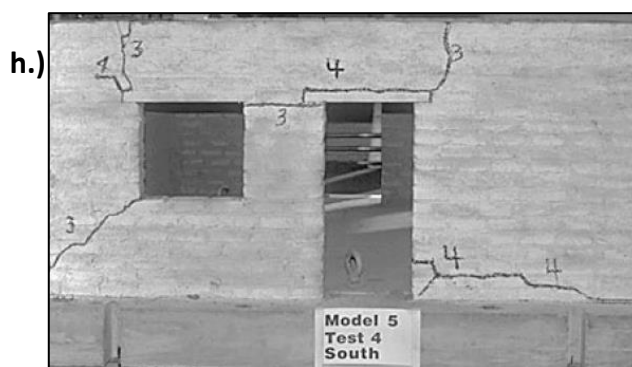
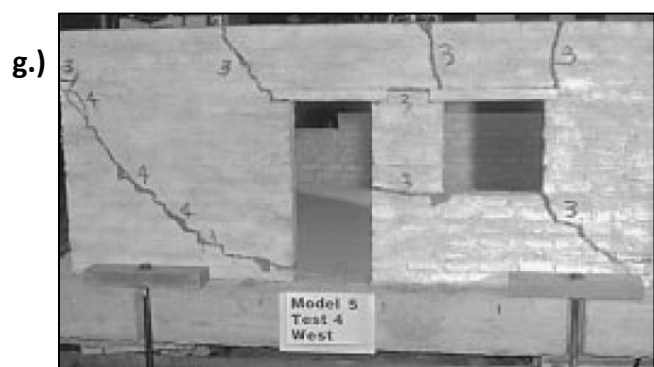
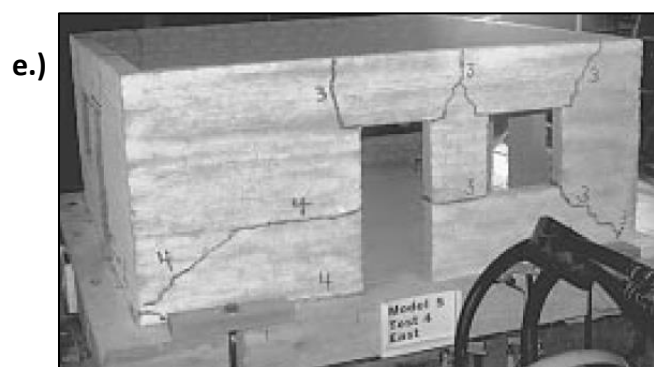
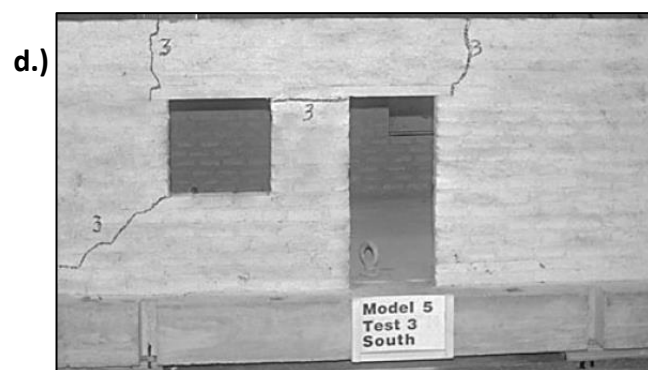
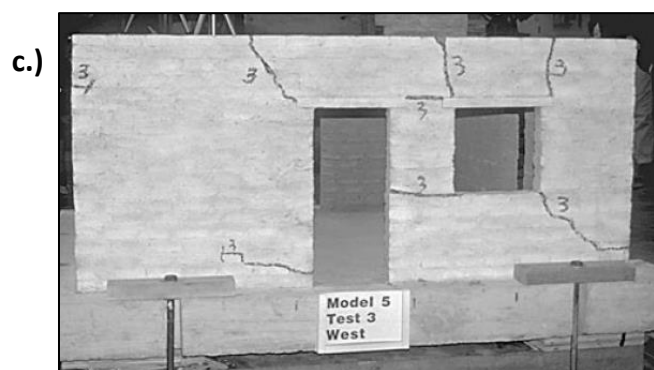
Tabla 33. Series de movimientos aplicados en los ensayos de cargas sísmicas en viviendas de adobe.
Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

NIVEL DE PRUEBA	EPGA Máx.	DESPLAZAMIENTOS (cm)
I	0.12	2.54
II	0.18	5.08
III	0.23	7.62
IV	0.28	10.16
V	0.32	12.70
VI	0.40	15.88
VII	0.44	19.05
VIII	0.48	25.40
IX	0.54	31.75
X	0.58	38.10

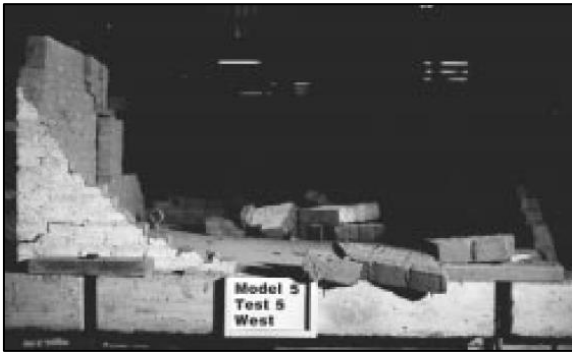
Figura 72. Reporte fotográfico del ensayo de una vivienda de adobe expuesta a simulaciones de cargas sísmicas en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)





k.)

**LEYENDA DEL REPORTAJE FOTOGRÁFICO:**

- a.) Aparición de fisuras con serie de ensayo N° III en el Muro Este (fuera del plano).
- b.) Aparición de fisuras con serie de ensayo N° III en el Muro Norte (fuera del plano).
- c.) Aparición de fisuras con serie de ensayo N° III en el Muro Oeste (fuera del plano).
- d.) Aparición de fisuras con serie de ensayo N°III en el Muro Sur (fuera del plano).
- e.) Generación de grietas con serie de ensayo N° V en el Muro Este (fuera del plano).
- f.) Generación de grietas con serie de ensayo N° V en el Muro Norte (fuera del plano).
- g.) Generación de grietas con serie de ensayo N° V en el Muro Oeste (fuera del plano).
- h.) Generación de grietas con serie de ensayo N° V en el Muro Sur (fuera del plano).
- i.) Colapso de muros de tierra con serie de ensayo N° VIII de Muro Norte (en el plano).
- j.) Colapso de muros de tierra con serie de ensayo N° VIII de Muro Sur (en el plano).
- k.) Colapso de muros de tierra con serie de ensayo N° VIII de Muro Oeste (en el plano).

Dentro de este ensayo de laboratorio no se han incorporado detalles fotográficos de la serie de ensayos I y II, puesto que en dichos movimientos la estructura no presentó ningún tipo de agrietamiento ni daños; no obstante, a partir del nivel de prueba 03 (serie N°III), que le corresponde una aceleración máxima estimada del suelo de 0.23, comienzan a aparecer fisuras menores en los muros dentro y fuera de su plano, además de poco desplazamiento visible; luego, para la serie de ensayo N°04 (serie N°V), con una aceleración estimada del suelo de 0.32, se puede notar el desarrollo completo del patrón de agrietamiento en los muros, además de grieta de flexión fuera del plano de los muros y grieta de corte en el plano, y los muros se balancearon notablemente y probablemente bastante cerca del colapso; y por último, en la serie de ensayo N°05 (serie N°VIII), con EPGA de 0.48, se evidenció el colapso completo del 75% de los muros (Muro Este, Sur y Oeste).

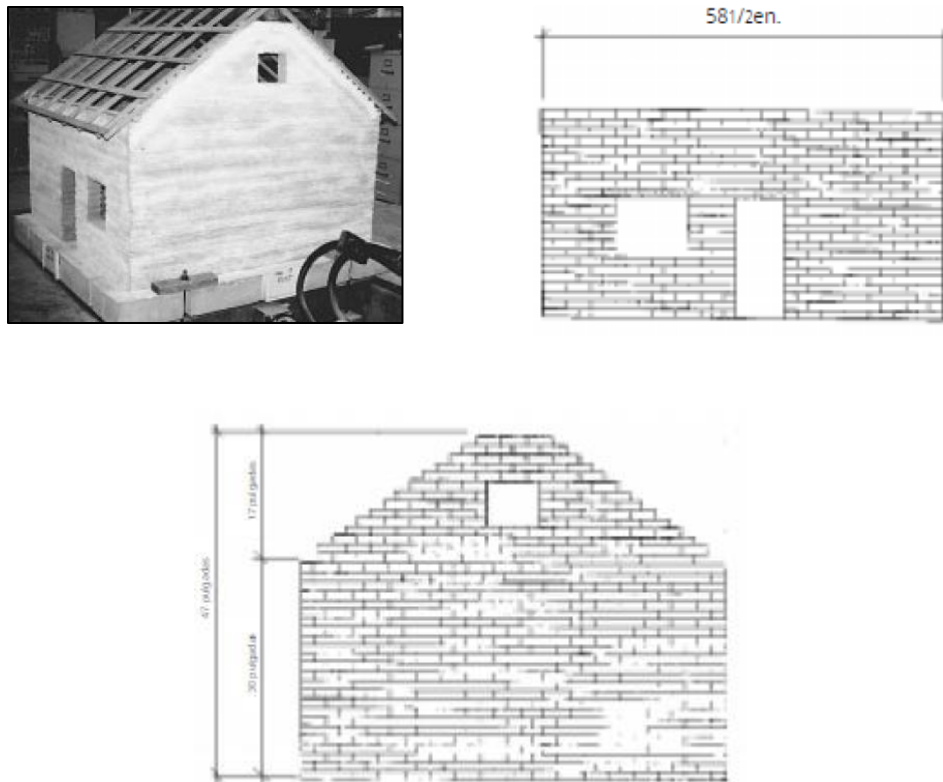
Por otra parte, dentro del mismo proyecto, se realizó otro ensayo construyendo otro prototipo de vivienda con una tipología que se asemejaba más a las viviendas que fueron y son construidas con este tipo de materiales, es decir, una vivienda que consta, por supuesto, de un techo, y de un ático; por tanto, la respuesta ante cargas sísmicas para este modelo permitiría conocer de forma general y completa su comportamiento.

Y, al igual que el anterior modelo, ara conocer mejor el contexto sobre el cual se llevó a cabo el ensayo, a continuación, se describen las condiciones y los criterios que tomaron en cuenta:

- El modelo de vivienda está basado en la arquitectura de adobe con un estilo “tapanco”, con una cubierta a dos aguas.
- También, los muros estructurales Norte y Sur de la vivienda se le habían incorporado dos huecos simulando una ventana y una puerta en cada uno de los muros, mientras que solo uno de los muros hastiales (muro oeste) se le consideró un hueco simulando una ventana abuhardillada pequeña.
- Para este ensayo se elaboraron dos modelos con la misma tipología, en primer lugar, un modelo donde no se consideró ningún tipo de refuerzo, con el objetivo de conocer realmente su comportamiento natural ante esfuerzos sísmicos, considerado como un “modelo de control”, útil para compararlo con otros modelos donde sí se consideren algún tipo de refuerzo o reacondicionamiento y evaluar correctamente los contrastes. Y un segundo modelo en donde se consideró un diafragma de madera en el piso del ático y la estructura del techo (sistema de correas horizontales y verticales), además de varillas de fibra de vidrio verticales ubicada en los agujeros de las paredes que fueron perforados previamente.
- Para los procedimientos del ensayo cada uno de los prototipos, al igual que el anterior prototipo, fueron sometidos a series de 10 movimientos, simulando diferentes intensidades de eventos sísmicos, lo cual se traduce en un aumento de desplazamientos entre un 20 – 30 % mayor a la serie previa, por supuesto, tomando en cuenta las mismas condiciones descritas en la Tabla 33.

Figura 73. Segundo prototipo de vivienda ensayada en el laboratorio sometida a cargas sísmicas.

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)



A continuación, se muestra el reporte fotográfico de la respuesta y comportamiento estructural de la vivienda ante la serie de sismos propuestos:

Figura 74. Resultado estructural de la vivienda sin reforzamiento expuesta ante el nivel de prueba V (EPGA = 0.32).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

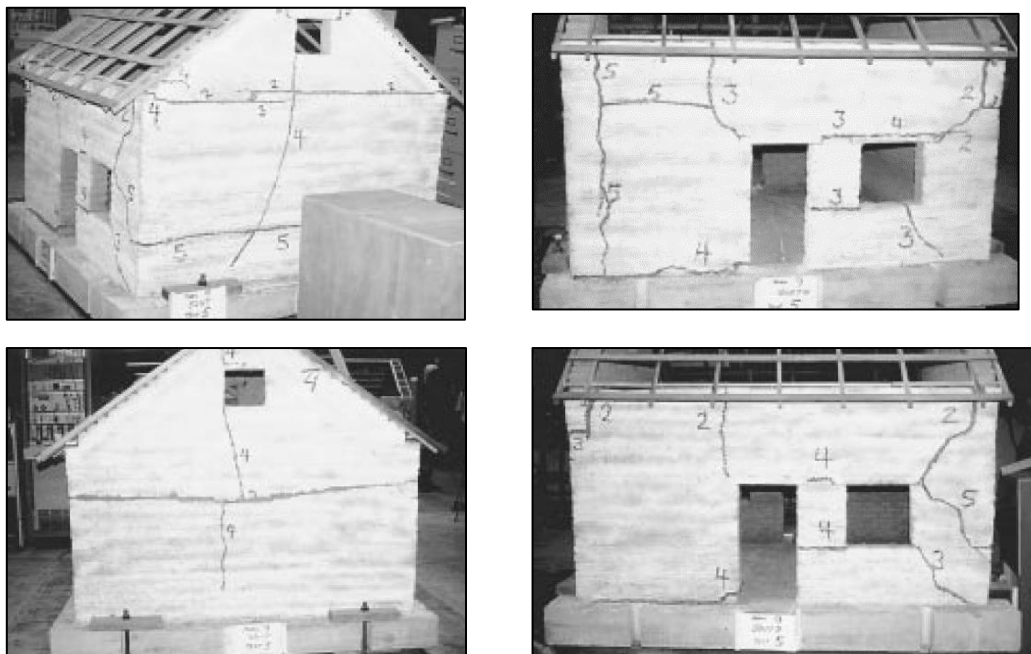


Figura 75. Resultado estructural de la vivienda sin reforzamiento expuesta ante el nivel de prueba VI (EPGA = 0.40).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

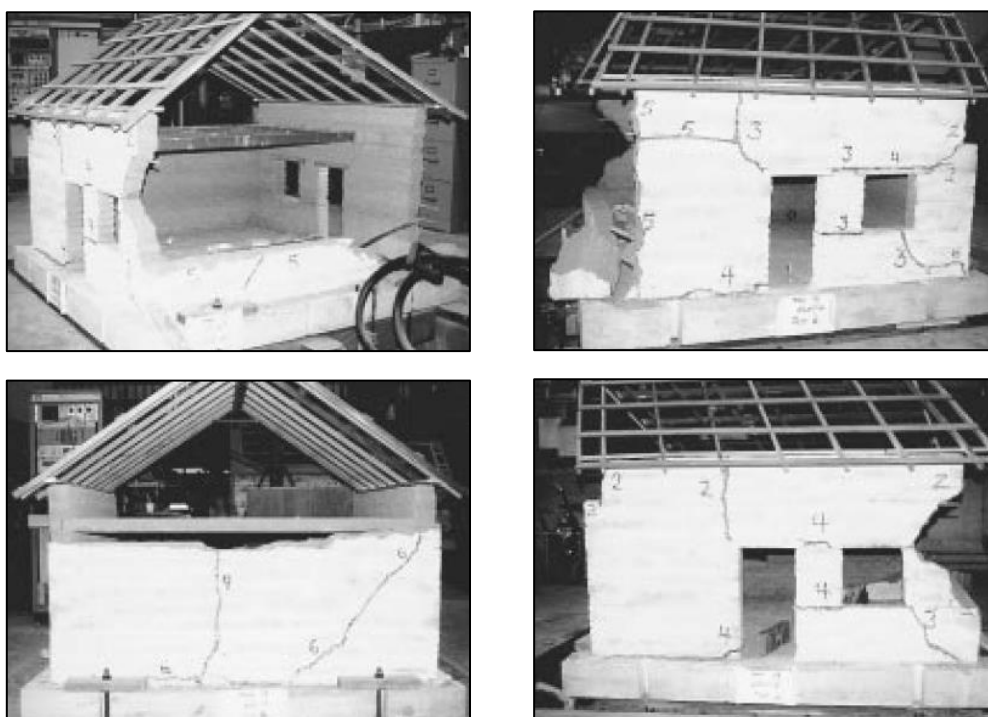


Figura 76. Resultado estructural de la vivienda con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio expuesta ante el nivel de prueba III (EPGA = 0.23).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

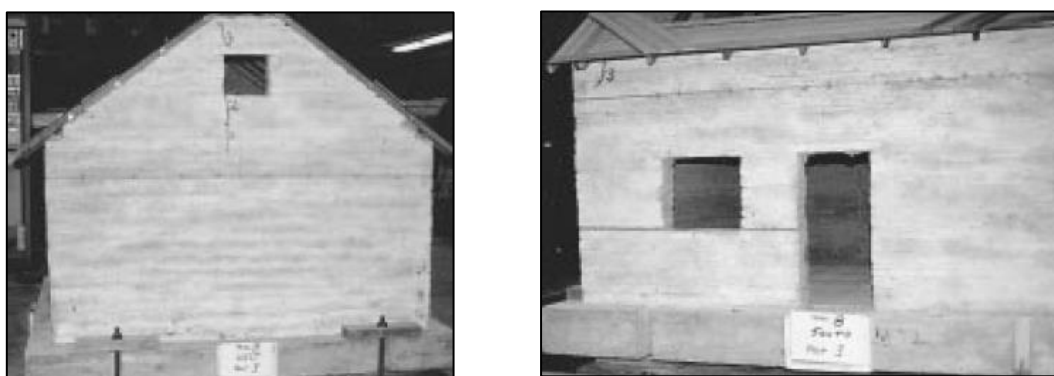
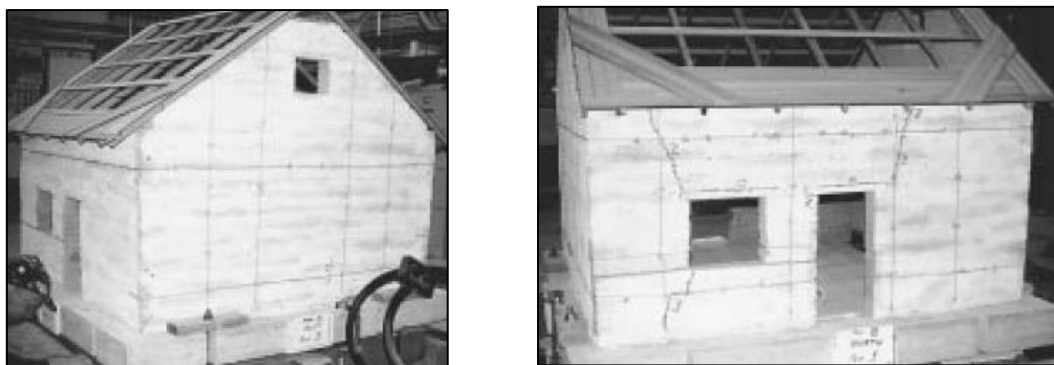


Figura 77. Resultado estructural de la vivienda con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio expuesta ante el nivel de prueba IV (EPGA = 0.28).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

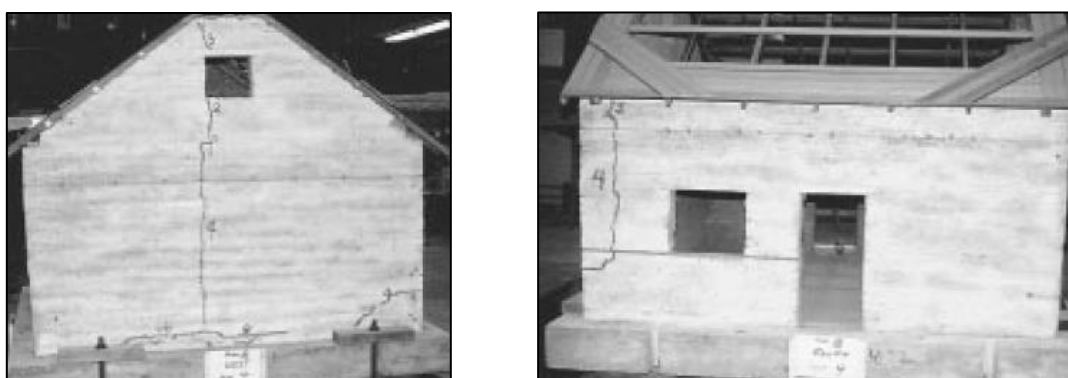
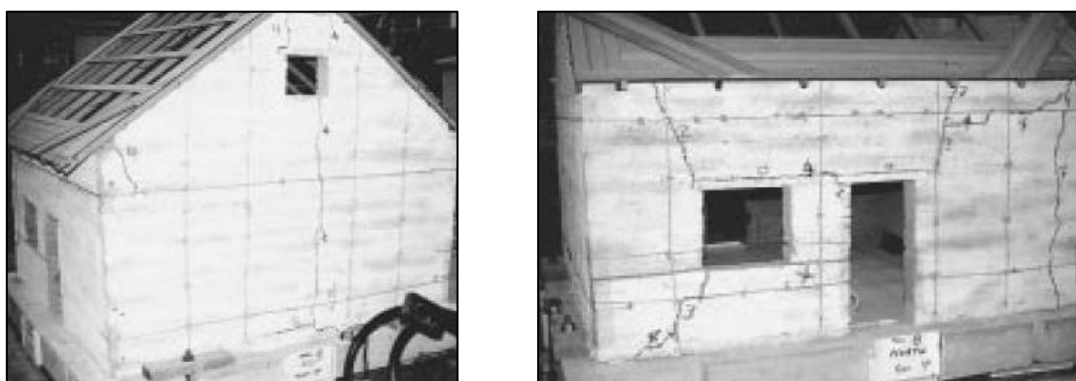


Figura 78. Resultado estructural de la vivienda con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio expuesta ante el nivel de prueba V (EPGA = 0.32).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

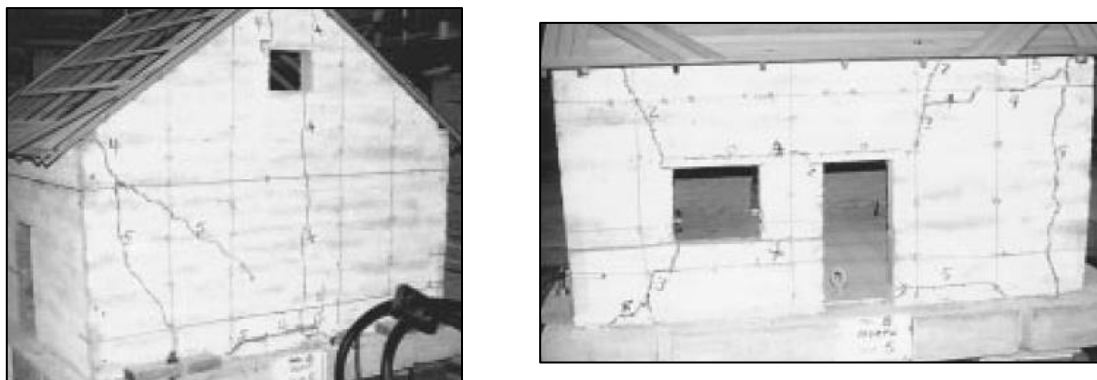


Figura 79. Resultado estructural de la vivienda con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio expuesta ante el nivel de prueba VI (EPGA = 0.40).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

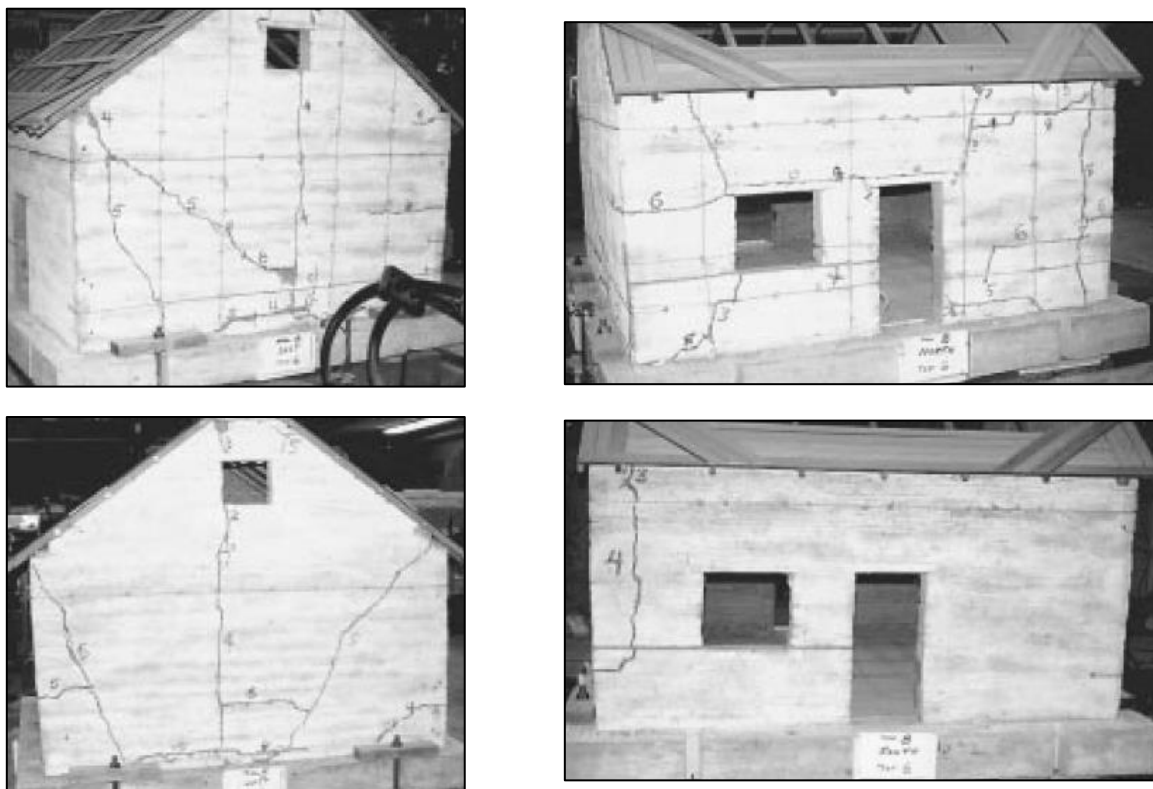


Figura 80. Resultado estructural de la vivienda con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio expuesta ante el nivel de prueba VII (EPGA = 0.44).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

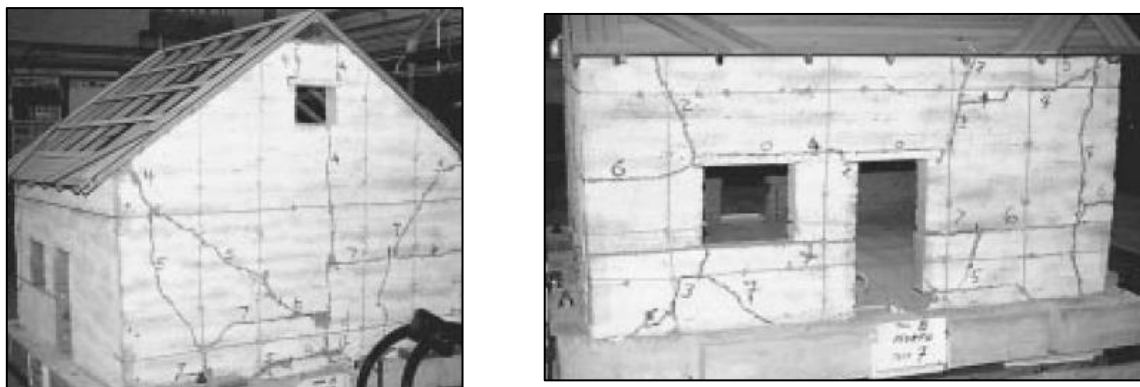


Figura 81. Resultado estructural de la vivienda con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio expuesta ante el nivel de prueba VIII (EPGA = 0.48).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

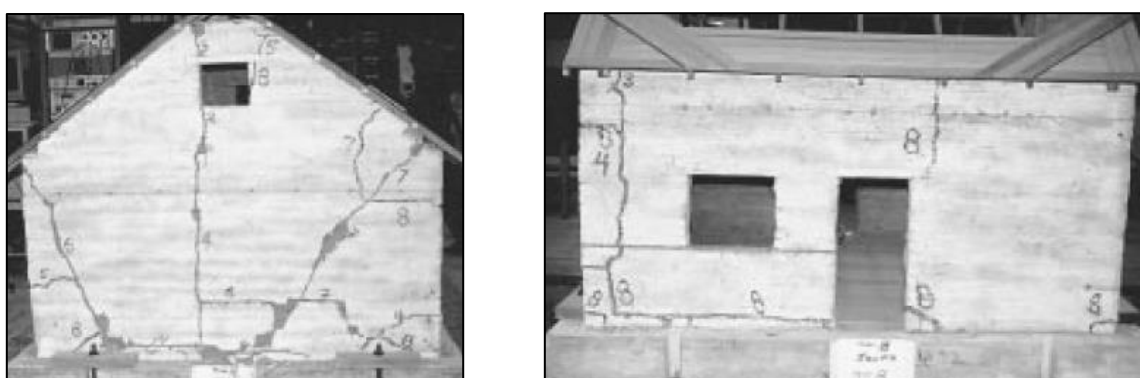
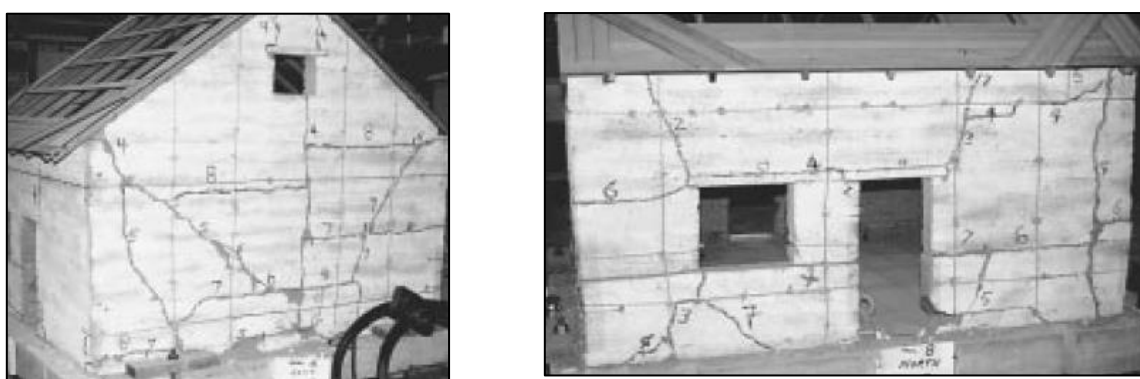


Figura 82. Resultado estructural de la vivienda expuesta con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio ante el nivel de prueba IX (EPGA = 0.54).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)

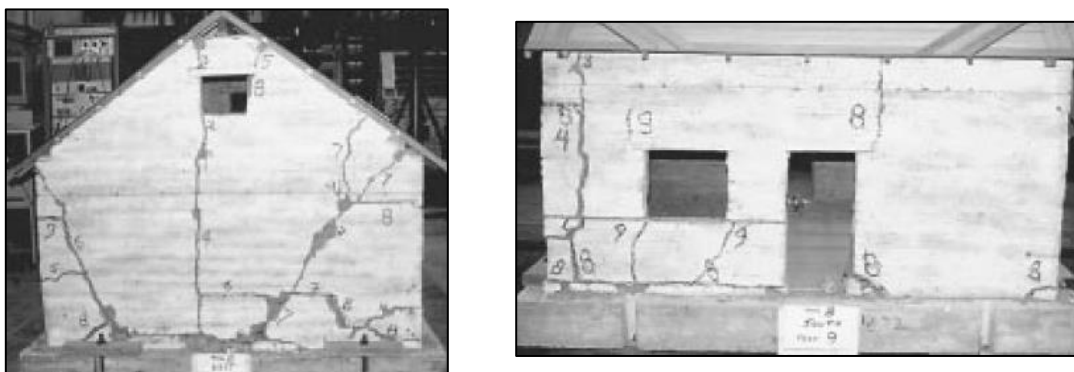
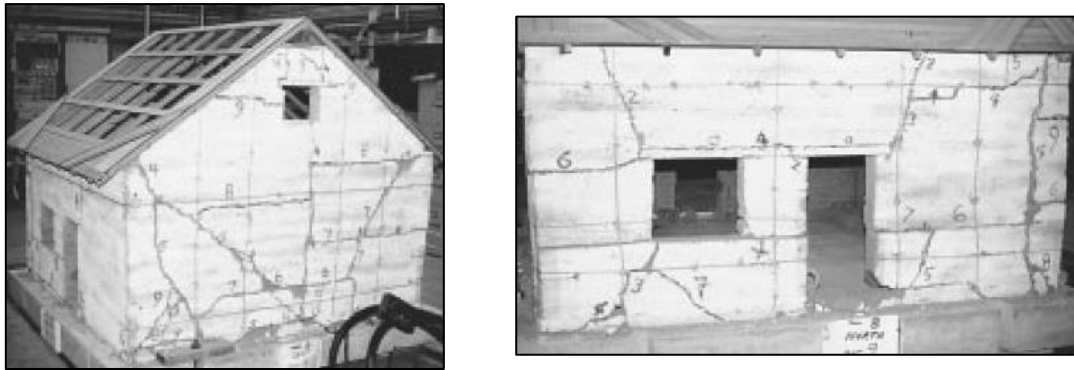
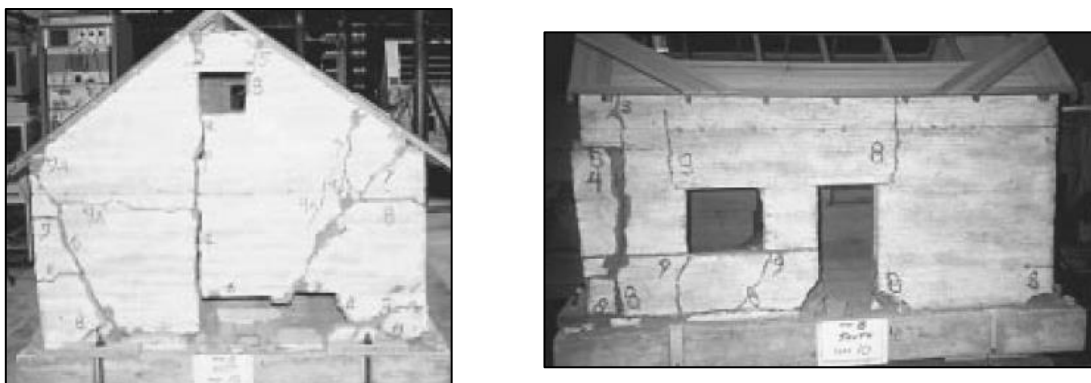
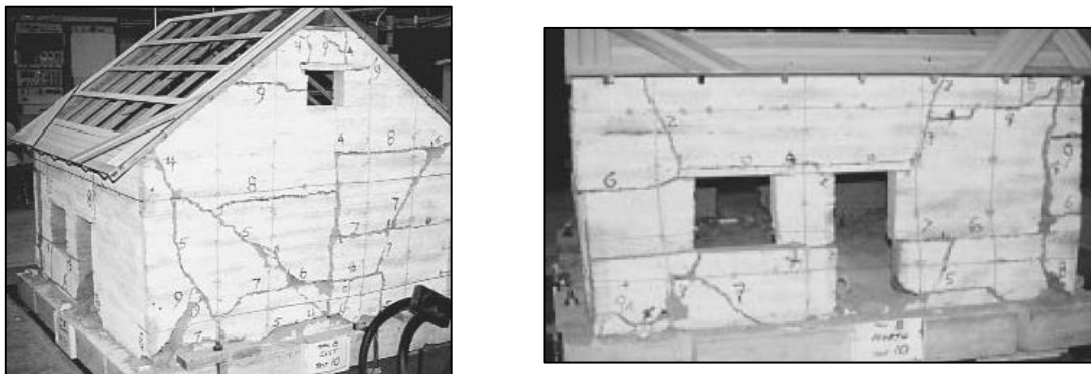


Figura 83. Resultado estructural de la vivienda expuesta con reforzamiento de correas y varillas de fibra de vidrio ante el nivel de prueba X (EPGA = 0.58).

Fuente: Elaboración propia. (Getty Seismic Adobe Project, 2000)



5.2 CRITERIOS PARA VALORAR LOS RIESGOS EN FUNCIÓN AL DAÑO

Para este apartado se establece una propuesta de un listado de criterios que conforman una guía para poder valorar, en función de los daños que presenta la construcción de tierra, los riesgos que estos conllevan y así poder estimar cuán afectado se encuentra el edificio que se esté evaluando, pudiendo así valorar la situación de una manera más efectiva y a partir de esto facilitar una toma de decisiones lo más prudente y conveniente posible.

Tabla 34. Criterios para valorar los daños y para identificar los riesgos que posee una edificación de tierra tras haber sufrido un evento sísmico.
Fuente: Elaboración propia.

CLASIFICACIÓN DEL DAÑO		DESCRIPCIÓN	RIESGOS
GRADO 01	DAÑOS LEVES	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En este grado se puede detectar fisuras superficiales en revestimientos y en los elementos estructurales, pudiendo ser fisuras de 1 mm de ancho, o inferiores. ➤ También se pueden identificar una ligera erosión superficial en los muros de la vivienda, con aproximadamente 5% (o inferiores) de pérdida de sección de muro. ➤ Detección de pequeñas caídas de material en alguno de los muros de tierra. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los daños conllevan a una degradación estética bastante acelerada. ➤ Si es que no existe intervención alguna posterior a esto, existe un posible avance de la humedad en los elementos estructurales de la vivienda. ➤ Además, se puede ver reducida la capacidad de estanqueidad ante lluvia.
GRADO 02	DAÑOS MODERADOS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificación de fisuras profundas con aproximadamente entre 1 – 5 mm de profundidad, que atraviesan las capas de revestimiento. ➤ Determinación de una pérdida de sección de los muros en cantidades próximas al 5% – 15% del total del muro. ➤ Se detectan caídas de áreas importantes de superficie de los enlucidos y material de los muros. ➤ Se pueden visualizar deformaciones visibles en elementos estructurales tales como los muros, las vigas, partes de cubierta, si es una edificación de sistema de entramados se pueden detectar en los elementos de madera, etc. ➤ Identificación de asientos diferenciales leves en la edificación y su entorno. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En este grado, la capacidad portante de los elementos afectados se verá reducido significativamente. ➤ Tendrá mayor presencia las infiltraciones de agua que aceleran la degradación. ➤ Además, destacará una inestabilidad progresiva si es que las causas persisten.

GRADO 03	DAÑO GRAVE O IMPORTANTE	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificación de fisuras estructurales bastante importantes, en torno a los 5 mm o superiores, ➤ Se pueden observar desplomes en los muros o elementos de madera (para entramados), en rangos aproximados a 1/100. ➤ Se detectan pérdidas de sección en muros en porcentajes superiores al 15% o hallazgos de huecos por erosión en estos elementos. ➤ Se observan despegamiento de elementos estructurales, tales como vigas de madera de los apoyos, de cubierta con sus apoyos, etc. ➤ Se determinan asientos diferenciales bastante pronunciados; es decir, con inclinaciones superiores a 1/50. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Para este grado será notable el colapso parcial de los elementos estructurales, tales como desplome de muros, o hundimiento de cubiertas, etc. ➤ Este grado de daños sugiera un peligro para ocupantes, debido a los desprendimientos de piezas parciales de los elementos estructurales de la vivienda. ➤ Debido a lo anterior se puede Inhabilitar parcial o totalmente la vivienda.
GRADO 04	DAÑO CRÍTICO	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se detectan muros con pérdida de sección con valores superiores al 30% del total del muro, lo que compromete severamente la capacidad resistente de este. ➤ Se observan fracturas completas en los muros estructurales y en cubierta, con daños estructuralmente severos en muros, cubiertas, etc. ➤ Se pueden contemplar estructura con mecanismos de fallo activos, tales como rótulas plásticas, arcos de descarga, etc. ➤ Se pueden observar áreas del suelo con afecciones del fenómeno de licuefacción o socavación avanzada en el entorno de la vivienda. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Para este grado de daño, existe el riesgo inminente de derrumbe total o parcial sin aviso de elementos o piezas estructurales de la vivienda. ➤ Por tanto, existe un alto peligro para vida de sus ocupantes.
GRADO 05	DESTRUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Donde se pueda observar una edificación con colapso estructural total o casi total. 	-

5.3 POSIBLES EFECTOS TRAS UN TERREMOTO Y NECESIDADES DE INTERVENCIÓN

Las construcciones históricas de adobe y tapial representan un patrimonio cultural y arquitectónico invaluable en España, que es una manifestación clara de técnicas tradicionales adaptadas a su entorno; sin embargo, su vulnerabilidad característica ante eventos sísmicos plantea desafíos importantes para su preservación. Es importante comentar que, frente a los daños que pueda producirles un terremoto, sería esencial priorizar las intervenciones para equilibrar tanto la seguridad estructural, la autenticidad material, así como la sostenibilidad, procurando eludir soluciones drásticas como la demolición sistemática y su reemplazo por estructuras de hormigón, por ejemplo.

Bajo contextos post – sísmicos, la respuesta inmediata suele inclinarse hacia la sustitución de las edificaciones dañadas, amparándose en que el nuevo edificio tendría mayor resistencia ante futuros eventos; no obstante, este enfoque no solo perjudica el patrimonio cultural, sino que ignora al mismo tiempo el potencial de adaptación de las técnicas tradicionales de edificaciones de tierra, la cual posee una huella ambiental significativamente menor si la comparamos con materiales industriales como el hormigón y el acero estructural asociados a las nuevas construcciones.

Cada vez son más los estudios que demuestran que, con los refuerzos adecuados y las metodologías de intervención estratificadas, ya sea, desde reparaciones puntuales hasta consolidaciones estructurales completas, las construcciones de tierra pueden recuperar su estabilidad y prolongar su vida útil.

Es esencial comentar que existen diversas consideraciones que se deben tomar en cuenta de forma previa a una correcta toma de decisiones acerca de qué intervención es la más recomendable en función al caso y sus características específicas. Por tanto, resulta difícil el poder validar de forma genérica si una técnica de intervención es la óptima al tener que estudiar cada caso en particular, conociendo datos relevantes como la técnica original del edificio, si es que el edificio dispone de un Plan Director o algún tipo de marco normativo regule las intervenciones toleradas, incluso si es que existe la presencia de algún técnico al momento de su evaluación. Algunos de estos criterios a considerar están sustentados en los lineamientos generales de la teoría de la restauración que se aplica en España, entre las cuales tenemos:

- ❖ Se deberá documentar, en primer lugar, el estado de daños y lesiones del edificio, previo a emplear algún tipo de intervención.
- ❖ Siempre y cuando sea posible, se deberá tener también documentado tanto los materiales como los métodos de intervención que se van a emplear, para asegurar una óptima compatibilidad entre ambas.
- ❖ Cualquier intervención deberá procurar al máximo el respecto hacia la integridad tanto estética, histórica como física, para conservar el bien cultural.
- ❖ Una vez determinada la intervención que se procederá a emplear, deberá procurar ser lo mínima posible, con objeto de no perjudicar alguna intervención que se ejecute en un futuro, incluso, de ser posible, es preferible si la intervención sea reversible.

Para ello, en este apartado se propone un esquema de intervenciones progresivas basado en la gravedad de los daños, que va desde el mantenimiento preventivo hasta la demolición, siendo esta última alternativa como último recurso; pensando en que cada alternativa busca maximizar la conservación de la versión original de la edificación:

Figura 84. Técnicas de intervención propuestas en función a los criterios de valoración de daños propuesta en el apartado 5.2 del presente documento.

Fuente: Elaboración propia.

ACCIONES DE PREVENCIÓN

- Estas acciones consisten en la ejecución no urgente de labores de acción preventiva.
- Están orientadas a preservar la funcionalidad de los elementos constructivos antes de que los deterioros se desarrollen al grado de que puedan afectar su desempeño estructural o habitacional.
- La naturaleza perecedera de elementos elaborados con materiales térreos ha convertido las acciones de prevención en un aspecto inherente a la arquitectura vernácula, tras la aparición leve de daños en elementos estructurales y no estructurales.

ACTUALIZACIÓN

- Estas actuaciones consisten en implementar soluciones puntuales en lugares que presentan patologías iniciales.
- Posee un enfoque adaptativo, priorizando la adecuación de la vivienda antes que su conservación.
- Trata de realizar modificaciones selectivas actuando sobre elementos específicos sin alterar la estructura global de la vivienda.

REPARACIÓN

- Estas acciones, además de tener como objetivo el corregir los procesos de deterioro del inmueble, buscan incorporar elementos constructivos o sistemas técnicos puntuales para adecuarlo a las exigencias estéticas y necesidades funcionales inmediatas.
- Su objetivo es el de restaurar la funcionalidad de los elementos afectados y el de extender su periodo de servicio de ser posible.
- Habitualmente, estas intervenciones se concretan mediante remedios locales o actuaciones circunscritas que emplean materiales de fácil adquisición comercial.
- Estas reparaciones se ejecutan con un enfoque pragmático, careciendo de consideraciones sobre la preservación de la autenticidad material.

RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN

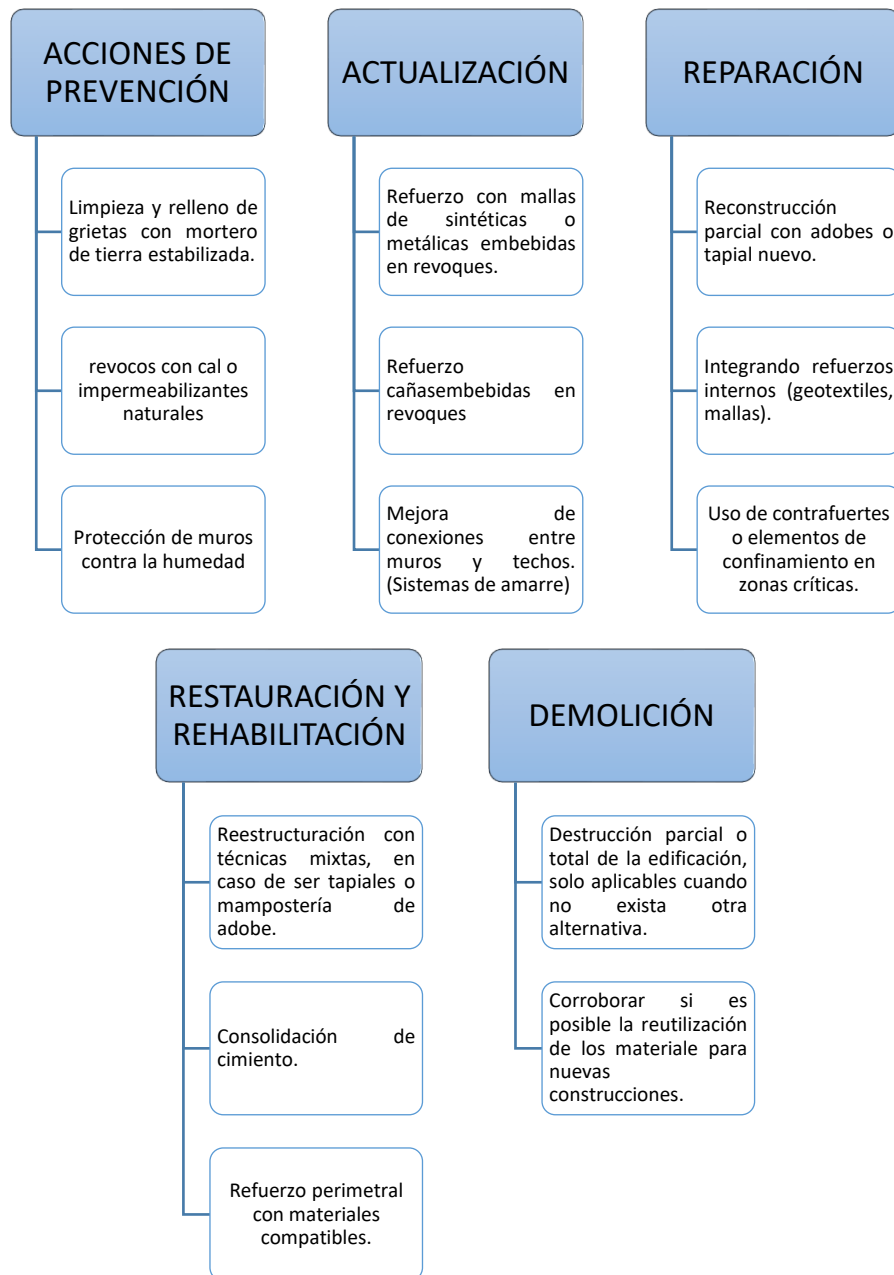
- Ambas intervenciones nacen de un proceso evolutivo que integra labores desde mantenimientos y reparaciones hasta adecuaciones, alcanzando tal grado que afecta globalmente al inmueble o a sectores significativos del mismo.
- La diferencia técnica fundamental entre una restauración y una rehabilitación es que, la primera busca recuperar y estabilizar la edificación respetando escrupulosamente su esencia material y constructiva original, mediante técnicas compatibles y criterios de mínima intervención; y la segunda, prioriza la adaptación funcional y el mejoramiento prestacional, aceptando modificaciones que puedan comprometer parcialmente la autenticidad material a cambio de garantizar condiciones contemporáneas de uso.

DEMOLICIÓN

- Estas actuaciones implican la eliminación total o parcial de una edificación con el objetivo de prevenir riesgos a través de la eliminación controlada de de estructuras en estado crítico.
- Pueden plantearse desde un punto de vista estratégico y preventivo, en casos de un colapso estructural inminente.

Figura 85. Ejemplificación de las medidas que pueden ser consideradas dentro de las intervenciones planteadas en la Figura 84 del presente documento.

Fuente: Elaboración propia.



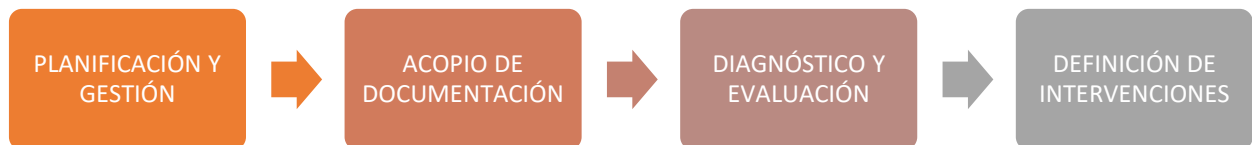
Nota importante: Cuando se esté evaluando el estado de la integridad estructural de una vivienda tras un sismo, esta puede tener más de un tipo de intervención, en función al resultado de la evaluación total del edificio pudiendo aplicarse una técnica en un área localizada, y otra totalmente diferente en otra, dentro de la misma vivienda.

5.3.1 METODOLOGÍA DEL PLANTEAMIENTO

La metodología que se debe seguir para poder aplicar tanto las propuestas de clasificación de daños y su posterior designación de intervenciones cuando se pretenda realizar una evaluación a una vivienda de tierra tras un sismo es bastante sencilla. A continuación, se muestra un esquema resumido para observar el procedimiento global de aplicación:

Figura 86. Esquema del procedimiento global de aplicaciones para la evaluación de una vivienda de tierra después de un evento sísmico.

Fuente: Elaboración propia.



- ❖ Respecto a la primera fase, lo que se intenta desde un principio es consolidar y definir los lineamientos generales para la gestión del trabajo de valoración; es decir, que los propios organismos de la administración (como instituciones de seguridad, defensa civil, etc.) presentan ya sus protocolos de actuación y gestión tras algún evento de desastre natural, para el presente caso un sismo, esto con el objetivo de proceder con un orden y tratar de evitar en lo posible saturación y obstaculización de sus funciones al momento de ocuparse con las necesidades de la población. Por otro parte, si es el caso en que el procedimiento deban realizarlo los mismos propietarios, también deba existir una planificación básica del proceder ante estas situaciones de tal forma que se ejecute de la mejor forma posible.

Es importante aclarar de este último punto que, cuando no existe la posibilidad de establecer un enfoque sistemático para el diagnóstico estructural de la vivienda, se suele recurrir a un proceso de identificación empírica de las causas de las patologías y sus posibles soluciones, por tanto su complejidad radica en identificar con precisión las manifestaciones de los daños y sus orígenes, lo que incrementa el riesgo de optar por intervenciones que no abordan los problemas raíz, y por tanto, poniendo en riesgo la vida de los propietarios (Correia, 2004).

- ❖ En la segunda fase, se pretende hacer una recopilación de toda la documentación posible de acerca de la vivienda que se esté evaluando, con el objetivo de conocer mejor su situación y tener una visión más clara al momento de proponer una intervención. Esta información puede ser referente a la identificación del lugar y el entorno de la vivienda y de las condiciones estructurales de la vivienda; incluso información que es posible obtener a través de exámenes de laboratorio e in situ.
- ❖ Luego, para la tercera fase, se desarrolla el estudio e interpretación de la documentación e información obtenida de la segunda fase, y donde se puede aplicar la Tabla 34 correspondiente al apartado 5.2 del presente documento, con lo que permite estimar el estado de integridad estructural de la vivienda asignándole una categoría de daño.
- ❖ Por último, en la cuarta fase, se determina la intervención a aplicar en base a los resultados de la evaluación de la fase anterior, haciendo uso del esquema de inventario intervenciones propuesto en la Figura 85 dentro del apartado 5.3 del presente documento.

6. GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO CAUSADO POR EL SISMO

Siguiendo el lineamiento del procedimiento global propuesto en la Figura 86 del presente documento, para la evaluación de daños en una vivienda de tierra después de un sismo, empleando las herramientas creadas del trabajo de investigación, se propone el siguiente sistema de proceso más concreto y definido:

- ✚ Lo que concierne a la primera fase del procedimiento global corresponde a los procedimientos administrativos individuales de cada organismo o entidad con su planificación de tareas de inspecciones de principio a fin, por tanto, este apartado no forma parte del procedimiento detallado dentro de la propuesta de evaluación del trabajo de investigación.
- ✚ Siguiendo con la propuesta, respecto al apartado de la recopilación de documentación e información el encargado de llevar a cabo la evaluación podrá respaldarse en la metodología planteada en la Figura 70 del presente documento, donde se muestra la manera clara el mecanismo de la recopilación de información inicial y, a su vez, se puede consultar la información plasmada y organizada dentro del archivo Excel desarrollado para asistir estos procedimientos. Dentro de esta fase es necesario confeccionar la siguiente información de la vivienda:
 - **Datos generales de la vivienda:**
Donde se recopilan datos de emplazamiento, tipos de identificadores físicos de la vivienda, usos del recinto, investigación documental y registros relevantes para el caso si es que existen, y observaciones adicionales que puedan resultar de interés y que pueden influir en la toma de decisiones posteriores. (revisar el esquema de Figura 70 del presente documento y sus apartados de detalle).
 - **Datos generales de la tipología de la técnica constructiva:**
En este nivel se pretende recopilar información referente a la caracterización estructural de la vivienda, arquitectónica y de los elementos y agentes circundantes de la vivienda evaluada; aquí se recogerán datos como el tipo de técnica específica empleada para la construcción de la vivienda (Figura 67, Figura 68 y Figura 69), el tipo de elementos verticales, horizontales, los materiales empleados en cada uno de ellos. Para ello, se puede apoyar de la información proporcionada por el apartado “01. Caracterización Constructiva” del archivo Excel desarrollado para identificar con facilidad la tipología de vivienda a la que pertenece.
 - **Análisis y evaluación patológica de la vivienda:**
Luego, lo siguiente es llevar a cabo el análisis y evaluación de patologías y lesiones de la edificación y para ello, dentro de este mismo Excel, se elabora un Catálogo de daños que se puede consultar para ejecutar la inspección, pudiendo identificar tanto las lesiones y patologías que sufre una vivienda bajo condiciones habituales (apartado de Excel “02. Patologías Pre – Sismo”), como las lesiones y daños ocasionados generalmente en los elementos estructurales de las viviendas de tierra cuando es sometida a las acciones de un sismo (apartado de Excel “03. Patologías Post – Sismo”).

Para facilitar la identificar y ayudarse a diferenciar algunas patologías previas y posteriores a un evento sísmico, es posible apoyándose en la información incorporada en el reportaje fotográfico diseñado para este fin, y de ser necesario consultar los apartados de “Causas” y “Efectos” descritos para cada una de las patologías con el objetivo de poder establecer una vinculación con la demás información, obtenida en fases posteriores, del elemento lesionado y la globalidad del edificio.

Lo cierto es que, en casos específicos, existen patologías y lesiones que poseen patrones similares de identificar ya sean previas o posteriores a un sismo de baja magnitud, tales como las Lesiones producidas en el entorno de los huecos, o las Lesiones producidas por sollicitaciones excesivas; sin embargo, como resolución para estos casos se puede revisar de dos maneras: que las lesiones aparezcan por primera vez tras el sismo, o que hayan existido y tras el sismo hayan agravado aún más estas (lesiones correspondiente a un daño de Grado 4 o superior). En todo caso, la valoración del daño del elemento estaría sometido a la misma Tabla 34 (del presente documento) y poder estimar los riesgos a los que se encuentra asociado.

Para estos casos sería de ayuda si existe alguna constancia o registro del estado de la vivienda previo a un evento sísmico monitoreando a su vez las condiciones en las que se encuentra la edificación utilizando el Catálogo de patologías “02. Patologías Pre – Sismo”, de esta manera se simplifica la identificación de las lesiones y patologías previas y las provocadas por el sismo.

○ **Especificación de condiciones del sistema constructivo:**

Al mismo tiempo, forma parte del análisis y evaluación patológica los procedimientos de muestreos, ya sean in situ como en laboratorio, de los elementos constructivos que se consideren pertinentes. La obtención de estos datos e información que se puede rescatar contribuye a garantizar una mejor toma de decisiones en cuanto a las necesidades de intervención.

✚ Con toda la información obtenida de los pasos anteriores, basándose en esto el encargado de la evaluación de la vivienda procederá a realizar el diagnóstico y valoración de los daños apoyándose en la propuesta de escala de este visto en la Tabla 34 dentro del apartado 5.2 del presente documento.

✚ Por último, una vez que se conozca la magnitud del daño global que posee la vivienda de tierra, se procede a establecer la acción de intervención que más se ajuste al caso de evaluación en función tanto a la escala de daño que posea, como de la información recopilada de la vivienda, apoyándose en la propuesta de intervenciones de la Figura 85, y a las acciones a las que están asociadas cada una de ellas, del apartado 5.3 del presente documento. Como propuesta de correlación entre el daño estimado de la vivienda y su posible intervención que necesite será la siguiente:

Tabla 35. Propuesta de correlación entre el daño de la vivienda y su tipo de intervención necesaria.
Fuente: Elaboración propia.

CATEGORÍA DE DAÑO	INTERVENCIÓN PROPUESTA
GRADO DE DAÑO 01 →	ACCIONES DE PREVENCIÓN
GRADO DE DAÑO 02 →	ACTUALIZACIÓN
GRADO DE DAÑO 03 →	REPARACIÓN
GRADO DE DAÑO 04 →	RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN
GRADO DE DAÑO 05 →	DEMOLICIÓN

Nota importante: Cuando se esté evaluando el estado de la integridad estructural de una vivienda tras un sismo, esta puede tener más de un tipo de intervención, en función al resultado de la evaluación total del edificio pudiendo aplicarse una técnica en un área localizada, y otra totalmente diferente en otra, dentro de la misma vivienda.

7. CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES

Esta investigación fue proyectada como una contribución dentro del contexto español, dejando claro las problemáticas y los desafíos a los que se enfrentan las edificaciones de tierra revisado en el apartado 3, al integrar de manera coherente los datos empíricos recogidos en el apartado 5 para el cumplimiento de los objetivos planteados, y la metodología de evaluación que se llevó a cabo descrito en el apartado 4, del presente documento. Así mismo, su implementación permitirá subsanar una brecha crítica en la protección del patrimonio construido en tierra en España, ofreciendo a los agentes clave instrumentos técnicos sólidos, pero operativamente accesibles para la gestión del riesgo sísmico; además, el desarrollo de la guía/catálogo representa no solo un producto académico, sino una herramienta concreta tanto para la salvaguarda de vidas humanas, como la preservación del patrimonio arquitectónico vulnerable.

Los resultados obtenidos de esta investigación permitieron desarrollar una guía o catálogo de daños estandarizados (pre – post sismo), diseñado como una herramienta técnica de alto impacto, la cual puede ser aprovechada por entidades estatales de seguridad, además, este documento representará un componente estratégico que podrá integrarse, por ejemplo, en planes de rehabilitación patrimonial y políticas públicas dirigidos a la reducción de riesgo de desastres, permitiendo priorizar intervenciones en zonas de alta vulnerabilidad sísmica. En el caso del personal de protección civil, la guía facilitará la evaluación rápida y objetiva de daños recurrentes y posteriores a terremotos, posibilitando la identificación inmediata de estructuras inhabitables o con riesgo de colapso inminente, lo que resulta crucial para la toma de decisiones en contextos de emergencia. Un aspecto innovador de esta propuesta consiste en su adaptabilidad operativa; es decir, la guía incorporó recursos visuales como fotografías comparativas y diagramas esquemáticos basados en casos reales analizados durante la investigación, optimizando así su utilidad para el trabajo en campo; igualmente, se prevé que este instrumento técnico pueda articularse con sistemas de evaluación de riesgo ya existentes, potenciando su aplicabilidad en distintos contextos territoriales.

Por otro lado, el valor agregado que posee la guía radica en su enfoque integral, en otras palabras, puede ser aplicado desde una perspectiva preventiva, al documentar y caracterizar lesiones previas al sismo (recurrentes en condiciones habituales), facilitando la implementación de medidas de reforzamiento proactivo en áreas identificadas como críticas. Asimismo, el documento establecerá criterios técnicos para clasificar los daños posteriores a un sismo según su severidad y asociando cada categoría con protocolos específicos de intervención que contempla desde reforzamientos localizados hasta demoliciones controladas en casos extremos.

Uno de los problemas más significativos es que, muchas veces la cantidad de intervenciones que hacer en una edificación (previo o posteriores a un terremoto) pueden alcanzar la envergadura de una obra de reconstrucción nueva, haciendo que el esfuerzo económico que exigen estas actuaciones no sea tan frecuente y que la reacción más común de los propietarios sea optar por la demolición/sustitución de los elementos restantes del edificio y decidir por la construcción de una edificación de hormigón y acero, bajo el argumento de ofrecer mayor confianza y seguridad ante futuros eventos sísmicos. Sin embargo, este planteamiento presenta dos problemas fundamentales: por un lado, contribuye a la pérdida irreversible del patrimonio arquitectónico y cultural; por otro, pasa por alto las cualidades fundamentales de los sistemas constructivos tradicionales de tierra.

Para corregir este problema, la investigación abordó el tema de la innovación aportando valor añadido a las edificaciones de tierra patrimonios nacionales en España, valiosos para ser conservados en la mayor calidad posible, contribuyendo a reducir los riesgos para sus ocupantes al momento de hacer frente a un sismo evaluando las viviendas, y en función al daño observado poder definir una acción de intervención orientándolo en lo posible a la conservación de la vivienda y no a la opción fácil de demolición y sustitución del edificio por uno hecho a base de materiales industrializados como el hormigón y el acero. Las técnicas de construcción en tierra poseen notables ventajas medioambientales en comparación con materiales industrializados, ya que su producción requiere significativamente menos energía, genera mínimas emisiones de CO₂ y aprovecha recursos locales, incluso la reutilización de este, lo que las convierte en opciones sostenibles por excelencia.

7.2 APOORTE DE SOSTENIBILIDAD

Basándonos en estos enfoques expuestos en el subapartado anterior, podemos definir que esta investigación se encuentra orientada con las siguientes directrices establecidas por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

Figura 87. Vinculaciones de los resultados del trabajo de investigación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Fuente: Naciones Unidas – Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).



➤ Nº9 – Industria, innovación e infraestructura:

“Las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de la combustión de energía y de los procesos industriales aumentaron un 0,9 % hasta alcanzar un nuevo máximo histórico de 36,800 millones de toneladas métricas, muy por debajo del crecimiento del PIB mundial, con lo que se revierte una tendencia de desacoplamiento de las emisiones y del crecimiento económico, que duraba ya una década”. (Informe sobre las ODS 2023)

Con este trabajo de investigación se pretende mantener unas infraestructuras resilientes, sostenibles y de calidad, tales como la arquitectura vernácula de tierra en España, es posible alcanzar este objetivo promoviendo la continuación de estas edificaciones sostenibles al ser intervenidos con procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y por supuesto, al no ser inmediatamente reemplazadas por otras industrializadas con altos costes medioambientales asociados (hormigón armado).

➤ **Nº11 – Ciudades y comunidades sostenibles:**

Según el Informe sobre los ODS 20203 elaborado por las Naciones Unidas, uno de los desafíos más urgentes a los que se enfrentan las ciudades de la actualidad son, “los niveles de consumo urbano de energía y de contaminación son algunos de los principales retos. Las ciudades apenas ocupan el 3 % de la superficie terrestre, pero suponen entre el 60 % y el 80 % del consumo energético y el 75 % de las emisiones de carbono. Asimismo, muchas ciudades son más vulnerables a los efectos del cambio climático y a los desastres naturales debido a su elevada concentración de población y a su ubicación, por lo que mejorar la resiliencia urbana es crucial para evitar pérdidas humanas, sociales y económicas.”

Con este trabajo de investigación se pretende lograr que las ciudades y los asentamientos humanos con edificaciones de tierra presentes en España sean con esto resilientes y sostenibles, abordando las metas planteadas para el objetivo Nº11 de los ODS:

- **11.4:** Intenta abordar el tema de la protección y salvaguarda del patrimonio cultural y natural del mundo. El trabajo de investigación ejerce influencia sobre este punto al tratar de omitir en lo posible la opción de demolición y/o sustitución de las edificaciones de tierra afectadas por un sismo por otras de hormigón y acero.
- **11.5:** Esta meta plantea, de cara al 2030, disminuir la mayor cantidad posible el número de muertes causadas por los desastres y, por consiguiente, el número de personas afectadas por ellos, las pérdidas económicas directas, y sobre todo en proteger a la población escasos recursos y personas en situaciones de vulnerabilidad. El trabajo de investigación pretende atender esto al haber propuesto diferentes niveles de intervenciones y sus acciones correspondientes, además de haber explorado diversas técnicas de reforzamiento estructural empleados a nivel mundial para tipologías de viviendas de tierra, donde se demuestra la mejora de efectividad del comportamiento estructural ante sismos.
- **11.6:** Esta meta también planea mitigar el impacto ambiental negativo de las ciudades, teniendo como indicadores la calidad del aire, la gestión de los desechos municipales, entre otros. El trabajo de investigación incide sobre este punto al recalcar las propiedades implícitas de las edificaciones de tierra tales como el aislamiento térmico y acústico que poseen los muros de tierra. Esto se traduce en una reducción de los consumos energéticos asociados a la climatización de la vivienda y el confort de sus ocupantes, cosa que en edificaciones de hormigón armado supone un problema persistente si se quiere atender estas necesidades de sus ocupantes.

- **11.b:** Esta meta procura incrementar el número de ciudades y/o asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover un uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él, la resiliencia ante desastres, la mitigación del riesgo de estos, y la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles. Para ello, pueden ser alcanzados con los planteamientos propuestos del trabajo de investigación, como la conservación del patrimonio de edificaciones de tierra, de sus propiedades de aislamiento térmico y acústico que poseen, en hacer más resilientes estas edificaciones con las técnicas de reforzamiento y los niveles de intervención en función al grado de daño, y en la posibilidad de minimizar los recursos empleados en situaciones posteriores a un sismo, puesto que este tipo de edificaciones puede reciclar su propio material para su restauración o acción de intervención.

➤ **Nº12 - Producción y consumo responsables:**

El principal propósito de este objetivo es el de garantizar las modalidades de consumo y producción sostenibles, algo que resulta imprescindible para sostener los medios de subsistencia de las generaciones actuales y futuras, ofreciendo la posibilidad de mantener el uso de las edificaciones de tierra y no pasar a una de hormigón armado (que conlleva a un consumo mucho mayor de recursos y, por tanto, en contra de la mejora de calidad medioambiental), extendiendo así su vida útil al hacer notar que cada vez son más resilientes ante los daños del entorno y al mismo tiempo minorando su vulnerabilidad ante los sismos. El no optar por la reconstrucción de la vivienda con otro material se traduce en una reducción del consumo de recursos para construirla, en una mitigación de generación de residuos al tratarse de la capacidad de emplear los mismos materiales (o del propio entorno) de la vivienda para las acciones de intervención, fomentando así una “Economía Circular”. En pocas palabras, mantener la arquitectura de tierra en España es conservar un estilo de vida más sostenible, consumiendo menos, generando menor impacto ambiental y reduciendo la huella de carbono en sus actividades cotidianas asociadas.

➤ **Nº13 – Acción por el clima:**

Con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio climático evoluciona a un ritmo mucho más rápido de lo previsto. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) subraya que es esencial reducir de forma sustancial, rápida y sostenida las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) en todos los sectores, a partir de ahora, y durante toda esta década. Para limitar el calentamiento global a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales, las emisiones deben estar ya disminuyendo y reduciéndose a casi a la mitad para 2030.

El trabajo de investigación realiza su aporte ante este objetivo al reducir la huella de carbono con la reutilización de las viviendas hechas con material de tierra, y no dirigiéndose a la construcción de edificios con materiales industrializados (hormigón y acero), cuya producción está vinculado a emisiones de Gases de Efecto Invernadero en proporciones descomunales a nivel mundial; además, contribuye a integrar medidas relativas al cambio climático ya sean en políticas, estrategias y/o planes a nivel nacional.

8. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO E INVESTIGACIÓN

Las exploraciones e investigaciones complementarias que se pueden realizar posterior a este trabajo de investigación son considerables, aportando conocimiento que se puede integrar en diferentes rubros de la temática central, tales como:

- ✚ Se pueden realizar estudios específicos de propuestas para mejorar las condiciones de las edificaciones de tierra ante los sismos en España, estudiando las diversas técnicas de refuerzos en edificaciones de tierra recogidas a lo largo de este trabajo.
- ✚ Además, se puede optar por la exploración de propuestas de nuevas técnicas de reforzamiento de elementos estructurales para que la edificación reciba la menor cantidad de daño posible ante un evento sísmico haciéndola aún más resiliente.
- ✚ Es posible investigar a cerca de criterios para seguir en los casos de rehabilitación de este tipo de edificaciones analizado desde un punto de vista más especializado y preciso en ingeniería estructural en edificaciones de tierra, con el objetivo de fundar las bases de la creación de una normativa específica para estos casos particulares y que pueda emplearse a nivel nacional en España, incluso en la Península Ibérica.
- ✚ Se puede examinar o estudiar valoraciones de nivel de riesgos en España en estructuras de tierra frente a sismo con proyección a proponer dichos planteamientos a nivel de territorio, a nivel municipal, e incluso a nivel autonómico, por supuesto, teniendo en cuenta el grado de vulnerabilidad sísmica para cada zona dentro del territorio español y las tipologías de edificaciones de tierra presentes en ellas.
- ✚ Es conveniente que se ejecuten verificación de la validez de las diferentes propuestas de técnicas de reforzamiento en edificaciones de tierra típicas en España, elaborando modelos de cálculo numérico para analizar los efectos de sismos históricos en zonas con construcciones de este tipo. Todo ello con el objetivo de propiciar la validación de las técnicas propuestas planteadas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ✚ Agencia EFE (11 setiembre de 2023). *¿Puede haber en España un terremoto como el de Marruecos?*. Europa Press. [Redacción digital de informativos Telecinco]. Disponible en: https://www.telecinco.es/noticias/sociedad/20230911/puede-haber-en-espana-terremoto-como-marruecos_18_010423248.html

- ✚ Alcutén J. (07 de febrero de 2023). *España también está en una zona de choque de placas tectónicas: ¿Podría sufrir un terremoto tan destructivo como el de Turquía?* [20minutos]. Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/5098972/0/choque-placas-tectonicas-podria-sufrir-espana-terremoto-tan-destructivo-como-turquia/>

- ✚ Anonymous (10 setiembre de 2023). *El terremoto de Marruecos en imágenes: desolación y destrucción*. 20minutos. Disponible en: <https://www.20minutos.es/imagenes/internacional/5171006-terremoto-marruecos-imagenes/>

- ✚ Anonymous (20 de febrero de 2024). *Zonas sísmicas en España: Riesgos y medidas de prevención*. [EGC Consulting]. Disponible en: <https://egcconsulting.net/zonas-sismicas-en-espana-riesgos-y-medidas-de-prevencion/>

- ✚ Antelo E., Sánchez S., Crespo C., & Raya A. (febrero de 2012). *Construir con Tapial: Piscina en Toro*. Boletín Académico. Revista de investigación y arquitectura contemporánea, 2, 27 – 35. DOI: <https://doi.org/10.17979/bac.2012.2.0.974>

- ✚ Astorga S. (2011). *Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales*. Universidad de Sevilla.

- ✚ Blondet, M., Torrelva, D., & Villa García, G. (2002). *Adobe in Peru: Tradition, Research and Future*. Modern Earth Building 2002 – International Conference and Fair, Berlin, Germany.

- ✚ Blondet M., Vila García G. & Brzev S. (2003). *Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos: Tutor*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

- ✚ Blondet, Camata, Spacone, Tarque, & Varum. (2010). *Numerical modelling of in plane behavior of adobe walls*. Lima: Congreso de ingeniería sísmica 2010.

- ✚ Blondet M., Vargas J., Tarque N., & Iwaki C. (2011). *Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima: PUCP.

- ✚ Blondet, M., Villa Garcia, G., Vargas, J., Sosa, C., & Soto, J. (2017). Informe DGI. Desarrollo de método de diseño de refuerzo sísmico y comprobación experimental. Lima.

- ✚ Cabañas L., Carreño E., Izquierdo A., & Martínez J. (julio de 2011). *Informe del sismo de Lorca del 11 de Mayo de 2011*. Instituto Geográfico Nacional (IGN). Disponible en: <https://www.ign.es/web/sismotectonica-por-zonas>

- ✚ Casares G. (2017). *Arquitectura de Tierra en el s.XXI*, [Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado], Escuela Técnica Superior de Arquitectura (UPM).
- ✚ Catalán R. (2018). *Construcción con tierra: Reinterpretación de una tradición*. [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- ✚ Cid J., Mazarrón F. R., & Cañas I. (setiembre de 2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63 (523), 159 – 169. <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>
- ✚ Correia, M. (2004). *Estratégias na Conservação do Património em Terra. Memórias del 3º siacot – Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra*. pp. 333-342. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- ✚ Correia M., Dipasquale L., Mecca, S., & Akermann K. (2011). *Terra Europae: earthen architecture in the European Union*. Pisa: Edizioni ETS.
- ✚ CRATerre (s.f.). Rehabilitación del Tapial: Hacia prácticas adaptadas. En: <https://craterre.org/ressources/#newsletters>
- ✚ D'Arquer X. (2014). *Casa vernácula del siglo XXI / Edra arquitectura km0*. Arch Daily. Disponible en: <https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>
- ✚ De Elena C. (8 febrero de 2023). *¿Dónde es más probable un terremoto en Europa? Los mapas que muestran el riesgo real*. Informativos Telecinco. Disponible en: https://www.telecinco.es/noticias/ciencia-y-tecnologia/20230208/donde-mas-probable-terremoto-europa-mapas-riesgo_18_08669239.html
- ✚ Ediciones (22 abril de 2016). *Estas son las zonas más castigadas por grandes terremotos a lo largo de la historia*. [Europa Press Internacional]. Disponible en: <https://www.europapress.es/internacional/noticia-son-zonas-mas-castigadas-grandes-terremotos-largo-historia-20160421125512.html>
- ✚ Edra Arquitectura km0 (2014). *Casa vernácula del siglo XXI / Edra arquitectura km0*. Arch Daily. Accedido el 22 de noviembre de 2024: <https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>
- ✚ European Facilities for Earthquake Hazard and Risk (s.f.). *Earthquake HAZARD & RISK across Europe*. En: <http://www.efehr.org/start/>
- ✚ EERI Enciclopedia Mundial de Vivienda (2003). Accedido el 10 de febrero de 2025: <https://www.world-housing.net/>
- ✚ EFE (11 abril 2011). *El terremoto de Lorca es el que más víctimas ha causado en España desde 1956*. 20minutos. Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/1047066/0/terremoto/lorca/1956/>

- ✚ Elijechtimi A. (11 setiembre de 2023). *Las viviendas de adobe en Marruecos dificultan la búsqueda de supervivientes del terremoto*. Yahoo!noticias. <https://es-us.noticias.yahoo.com/viviendas-adobe-marruecos-dificultan-b%C3%BAsqueda-112139197.html>

- ✚ Escamiroso L., Ocampo M., Villers R., Zebadúa S. & Mérida A. (2013). *Propuesta de reforzamiento estructural para la consolidación de la vivienda tradicional del centro histórico de Chiapa de Corzo, Chiapas* [Informe Técnico Final]. México: Secretaría de Educación Pública (SEP). Programa para el mejoramiento del Profesorado (Promep).

- ✚ Escamiroso L., Ocampo M., Arroyo R. & Peralta H. (junio de 2019). *Mejoramiento estructural de la vivienda tradicional de adobe de Chiapa de Corzo, Chiapas*. RICSCH Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas, 8 (15), 104 – 35. <https://doi.org/10.23913/ricsh.v8i15.163>

- ✚ FETDETERRA (2025). *Guía para la ejecución de muros de tierra con bloques prefabricados TAPIALBLOCK de FETDETERRA*.

- ✚ France 24 (10 setiembre de 2023). *Marruecos: más de 2.000 muertos y 300.000 personas afectadas por el terremoto*. France 24. Disponible en: <https://www.france24.com/es/%C3%A1frica/20230910-marruecos-m%C3%A1s-de-2-000-muertos-y-300-000-personas-afectadas-por-el-terremoto>

- ✚ Frye M. (5 de marzo de 2019). *¿Qué es “superadobe”?*. BBC. <https://www.bbc.com/future/article/20190228-what-is-superadobe>

- ✚ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (s.f.). *Mecanismos focales*. Disponible en: http://www.funvisis.gob.ve/old/info_mecanismos.php

- ✚ Gaete M. (17 abril de 2010). *Estrategias Morfológicas de diseño Sismo Resistente para la Construcción Contemporánea en Tierra Portante*. Arch Daily. En: Seminario de arquitectura de tierra en Portugal. [online]. Disponible en: <https://www.archdaily.cl/cl/02-41003/estrategias-morfológicas-de-diseno-sismo-resistente-para-la-construccion-contemporanea-en-tierra-portante>

- ✚ Galtier G. (2015). *La evolución de los sistemas constructivos y estructurales en Las Palmas de Gran Canaria como instrumento de datación de la construcción en Gran Canaria (1478 – 1950)* [Tesis Doctoral], Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Construcción Arquitectónica.

- ✚ Gallegos, H. (2002). *La nobleza del adobe*. Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP. Lima. p.3

- ✚ González F. (18 mayo de 2022). *Relieves exteriores, Cordilleras y depresiones, y relieve insular: Unidades morfoestructurales de la Península Ibérica*. Disponible en: <https://geoperspectivas2bachiller.blogspot.com/>

- ✚ Gómez – Patrocinio F. (octubre de 2018). *Arquitectura tradicional de tierra en España, Caracterización constructiva, Fenómenos de degradación y Dinámicas de intervención* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17416.93447>
- ✚ Gómez – Patrocinio F.; Mileto C.; Vegas F; & García L. (enero de 2016). *Procesos patológicos en muros de adobe: panorama general de los mecanismos de degradación del adobe en la arquitectura tradicional española*. En: *Arquitectura en tierra. Historia y Renovación*. XIII CIATTI. Congreso de arquitectura en tierra en Cuenca y Villagarcía de Campos 2016. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2016. Pp. 169-180
- ✚ Giuliani F., Astroza M., Barrientos S., Rodríguez L., San Bartolomé A., Huaco D., & Calixto F. (2008). *El terremoto de Pisco – Perú, 15 de agosto de 2007*. Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS/UNESCO).
- ✚ Hernández D. (abril de 2016). *La sismicidad de la Península Ibérica*. Hombre Geológico. Disponible en: <https://geologicalmanblog.wordpress.com/2016/04/08/sismicidad-peninsula-iberica/>
- ✚ Hernández O., Meli R. & Padilla M. (1979). *Refuerzo de vivienda rural en zonas sísmica* [proyecto 8167]. México: UNAM, Instituto de Ingeniería.
- ✚ Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction. A Comprehensive guide*. Londres: CRATerre.
- ✚ Instituto Geográfico del Perú (2023). Disponible en: <https://www.gob.pe/ign>
- ✚ Instituto Geográfico Nacional (2025). *Descripción sismotectónica de España*. Disponible en: <https://www.ign.es/web/sismotectonica-por-zonas>
- ✚ Instituto Geográfico Nacional (s.f.). *Informe y tablas estadísticas de la Península Ibérica*. [Centro Nacional de Información Geográfica]. [https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/SIS-Tablas estadísticas P Iberica.pdf](https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/SIS-Tablas_estadisticas_P Iberica.pdf)
- ✚ Jové F. & Sáinz J. (2009). *Arquitectura construida en tierra: Arquitectura construida en tierra, Tradición e Innovación*. Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos 2004/2009. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. P. 11-18.
- ✚ Keefe L. (4 agosto de 2005). *Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation* (1st Edition). [Ebook]. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9780203342336>
- ✚ Leceta R., & Huerta J. (2020). *Análisis dinámico no lineal de un modelo de vivienda de adobe reforzado con sogas* [Bachelor Thesis]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicada (UPC). Repositorio Académico UPC. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/650365>
- ✚ Leroy E., Kimbro E., Webster F., & Ginell W. (2000). *Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures, Final Report of the Getty Seismic Adobe Project*. GCI Scientific Program Reports. The Paul Getty Trust. <https://doi.org/10.2307/1504858>

- ✚ Lopes M., Fernandes M., Correia M., Beiao T., & Guerrero L. (23 febrero 2010). *Arquitectura Vernácula y Contemporánea, Técnicas, construcción, investigación y desenvolvimiento* [Sesión de conferencia]. 6º Seminario de arquitectura de tierra en Portugal (ATP), 9ª Seminario Iberoamericano de Construcción de Arquitectura con Tierra (SIACOT). En: <https://www.esg.pt/6atp/temas.html>
- ✚ López P. (16 octubre de 2023). *Cuáles son las zonas de riesgo sísmico en España*. UnComo. Disponible en: <https://www.mundodeportivo.com/uncomo/educacion/articulo/cuales-son-las-zonas-de-riesgo-sismico-en-espana-53948.html>
- ✚ Maldonado E. & Chio G. (junio de 2009). *Estimación de las funciones de vulnerabilidad sísmica en edificaciones en tierra*. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 25. P. 180 – 199.
- ✚ Maldonado L. (2013). *Sistemas BTC: Bloque de tierra compactada*. Arquitectura Viva. Disponible en: <https://arquitecturaviva.com/articulos/sistema-btc>
- ✚ Mannise R. (08 de noviembre de 2024). *Casas de superadobe: Qué son y cómo se hacen*. Ecocosas. <https://ecocosas.com/construccion/casas-de-superadobe/>
- ✚ Metalocus, INÉS LALUETA "Herzog & de Meuron terminan el Centro de hierbas para Ricola en Laufen" METALOCUS. Accedido el 26 de mayo de 2025: <https://www.metalocus.es/es/noticias/herzog-de-meuron-terminan-el-centro-de-hierbas-para-ricola-en-laufen>. ISSN 1139-6415
- ✚ Mileto, C., Vegas López-Manzanares, F., Villacampa Crespo, L., & García-Soriano, L. (2019). *The Influence of Geographical Factors in Traditional Earthen Architecture: The Case of the Iberian Peninsula*. Sustainability, 11(8), 2369. <https://doi.org/10.3390/su11082369>
- ✚ Mileto, C., Vegas López – Manzanares, F. (2013). *La restauración de la tapia en la Península Ibérica, criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Lisboa: Argumentum Edições. Valencia: TC Cuadernos.
- ✚ Mileto, C.; García-Soriano, L., & Vegas, F. (2014). *Los fenómenos de degradación más comunes en fábricas de tapia, en La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. pp. 52 – 59. C. Mileto y F. Vegas (eds.). Lisboa: Argumentum Edições. Valencia: TC Cuadernos.
- ✚ MVCS (2014). *Fichas para la reparación de viviendas de adobe*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de la República del Perú.
- ✚ Nogales A. (11 setiembre de 2023). *Las viviendas de adobe en Marruecos dificultan la búsqueda de supervivientes del terremoto*. El País. <https://elpais.com/espana/2023-09-11/antonio-nogales-presidente-de-bomberos-unidos-sin-fronteras-en-el-desastre-de-marruecos-es-difícil-que-aparezcan-mas-supervivientes.html>
- ✚ Portal de Archivos Peruanos (PAPE). (s.f.). Accedido el 13 de enero de 2025. En: <https://snarector.agn.gob.pe/portal-de-archivos-peruanos/>

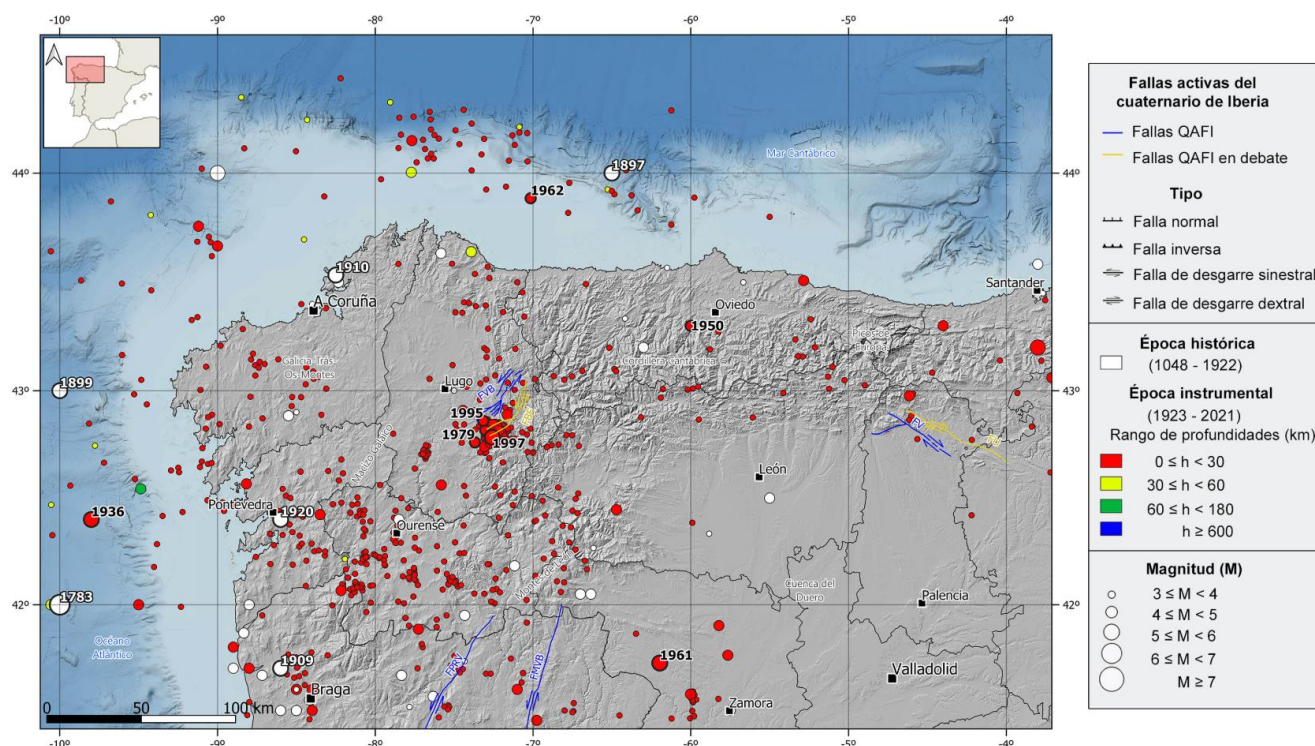
- ✚ Romero A. (junio 2017). *Viabilidad constructiva del Bloque de Tierra en España*. [Trabajo de Fin de Grado]. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Universidad de Sevilla.
- ✚ Sáinz M., & De Torres M. (s.f.). *Catálogo de proyectos y productos innovadores de tierra*. FETDETERRA.
- ✚ SIREWALL Estructural Insulated Rammed Earth (s.f.). *Tierra apisonada, un proceso de construcción alternativo para un nuevo mundo*. Accedido el 29 de enero de 2025: <https://sirewall.com/>
- ✚ Soler S. (9 de setiembre de 2023). *Las claves del terremoto en Marruecos: el más grave registrado y sin edificios preparados para el temblor*. RTVE. Disponible en: <https://www.rtve.es/noticias/20230909/claves-terremoto-marruecos-expertos/2455571.shtml>
- ✚ SOSTIERRA (2017). *Restauración y rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra en la Península Ibérica*. Disponible en: <https://sostierra.blogs.upv.es/>
- ✚ Terra Firma Builders LTD (2024). *Sirewall explained*. Disponible en: <https://www.terrafirmabuilders.ca/what-is-sirewall/>
- ✚ Terram Colombia (13 de junio de 2024). *Arquitectura de tierra: Innovación y sostenibilidad con Bloques de Tierra Comprimida (BTC)*. Disponible en: <https://terram.com.co/arquitectura-sostenible/arquitectura-de-tierra-innovacion-y-sostenibilidad-con-bloques-de-tierra-comprimida-btc/?v=12470fe406d4>
- ✚ UNISDR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2017). *GAR Atlas: Unveiling Global Disaster Risk*. Geneva, Switzerland. Disponible en: http://www.unisdr.org/files/53086_garatlaslr2.pdf
- ✚ Universidad Politécnica de Madrid (28 de marzo de 2016). *Los nuevos mapas de peligrosidad sísmica de España cuantifican los factores de incertidumbre*. Disponible en: https://www.upm.es/UPM/SalaPrensa/Noticias_de_investigacion?fmt=detail&prefmt=articulo&id=af6b2dc502983510VgnVCM10000009c7648a
- ✚ Yamín L., Phillips C., Reyes J. C., & Ruiz D. (enero de 2007). *Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casa en adobe y tapia pisada*. *Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural*, 20 (2), p.286 – 303. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.apu20-2.evsr>
- ✚ Yuste B., & Pereira M. (18 de enero del 2017). *La restauración en comunidad de la iglesia de San Pedro de Atacama*. *Revista Loggia: Arquitectura y Restauración*, 30. <https://doi.org/10.4995/loggia.2017.6811>

10. ANEXOS

10.1 ANEXO 01

ANEXO 1. Mapa temático sismotectónico de la zona noroeste de España.

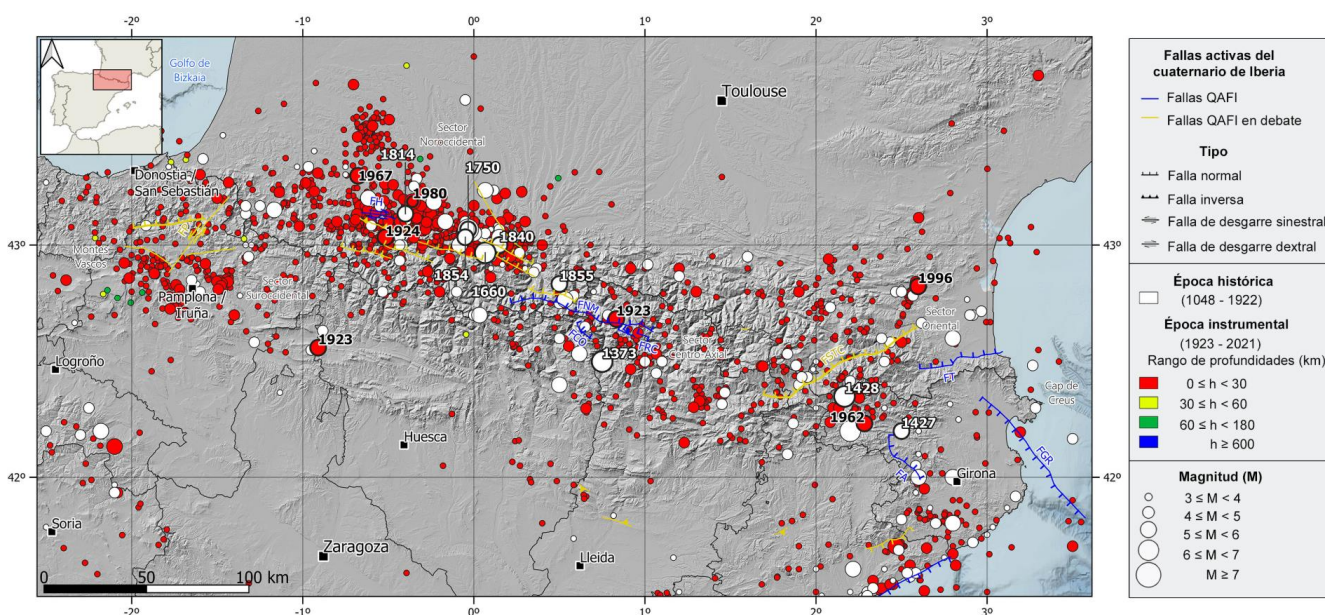
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



10.2 ANEXO 02

ANEXO 2. Mapa temático sismotectónico de la zona de los Pirineos en España.

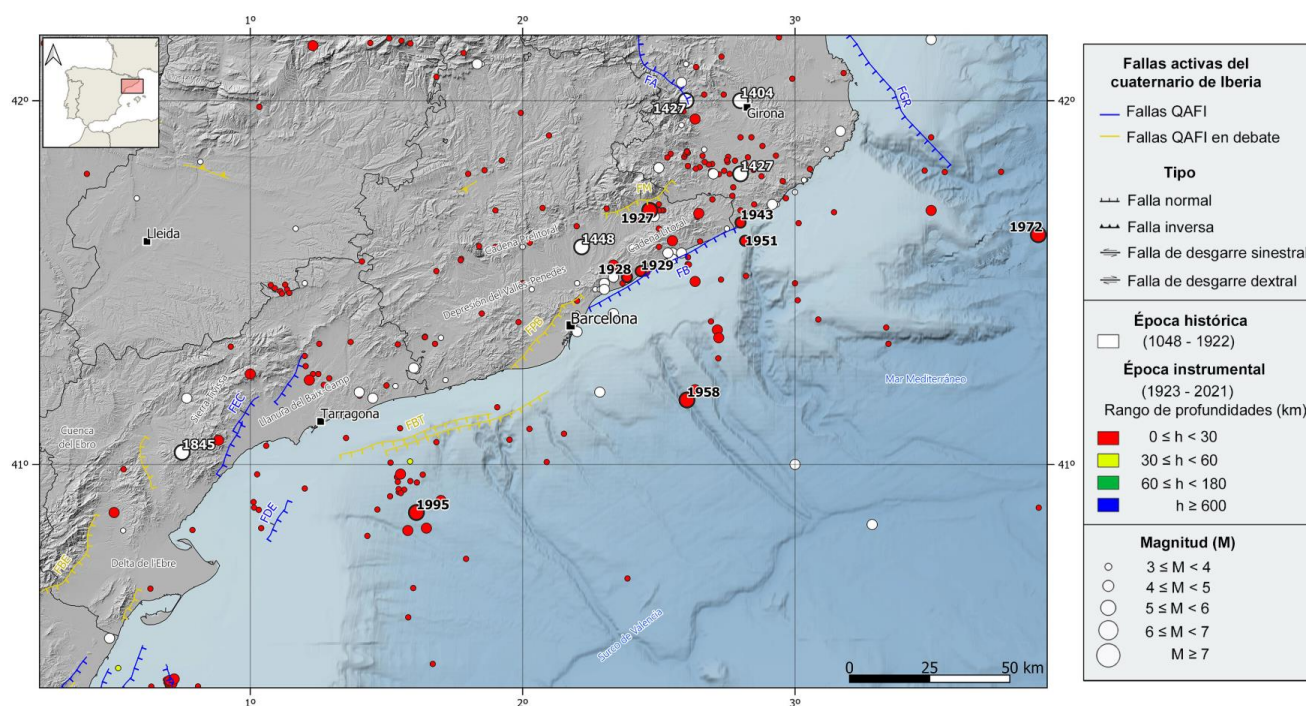
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



10.3 ANEXO 03

ANEXO 3. Mapa temático sismotectónico de la zona de la Cordillera Costero Catalana.

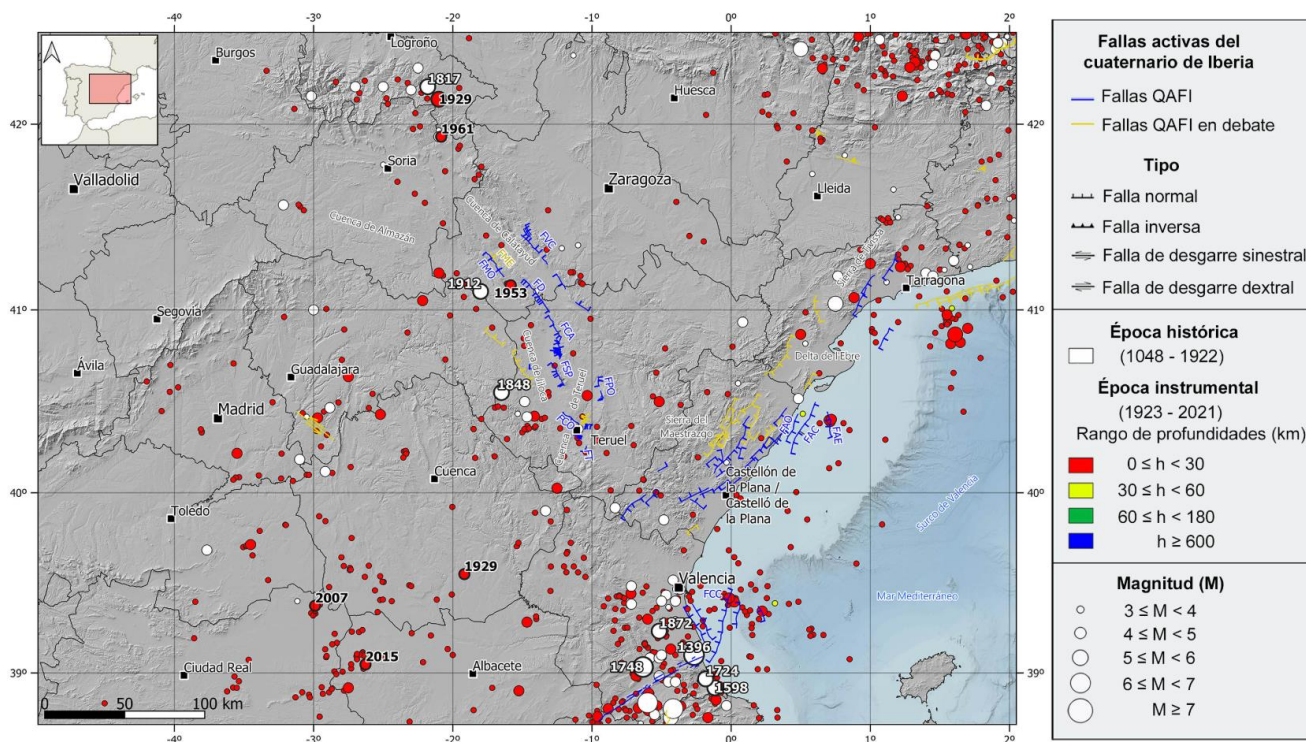
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



10.4 ANEXO 04

ANEXO 4. Mapa temático sismotectónico del Sistema Ibérico de España.

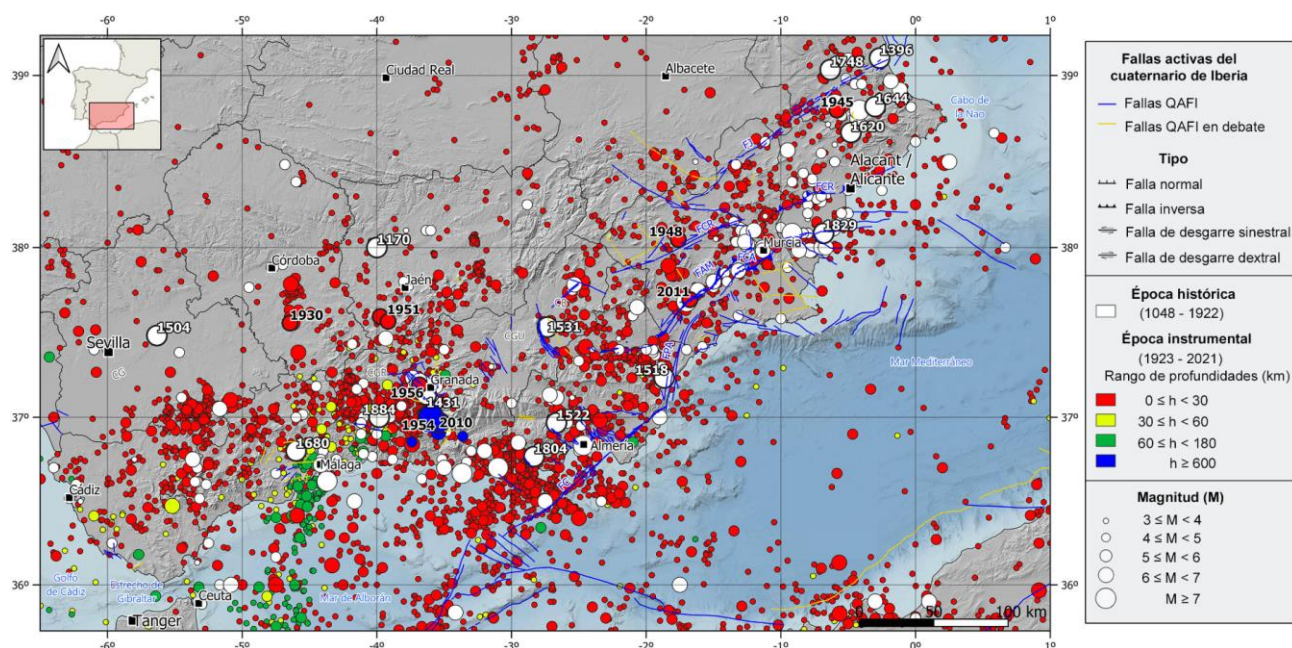
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



10.5 ANEXO 05

ANEXO 5. Mapa temático sismotectónico de la zona Bético – Balear.

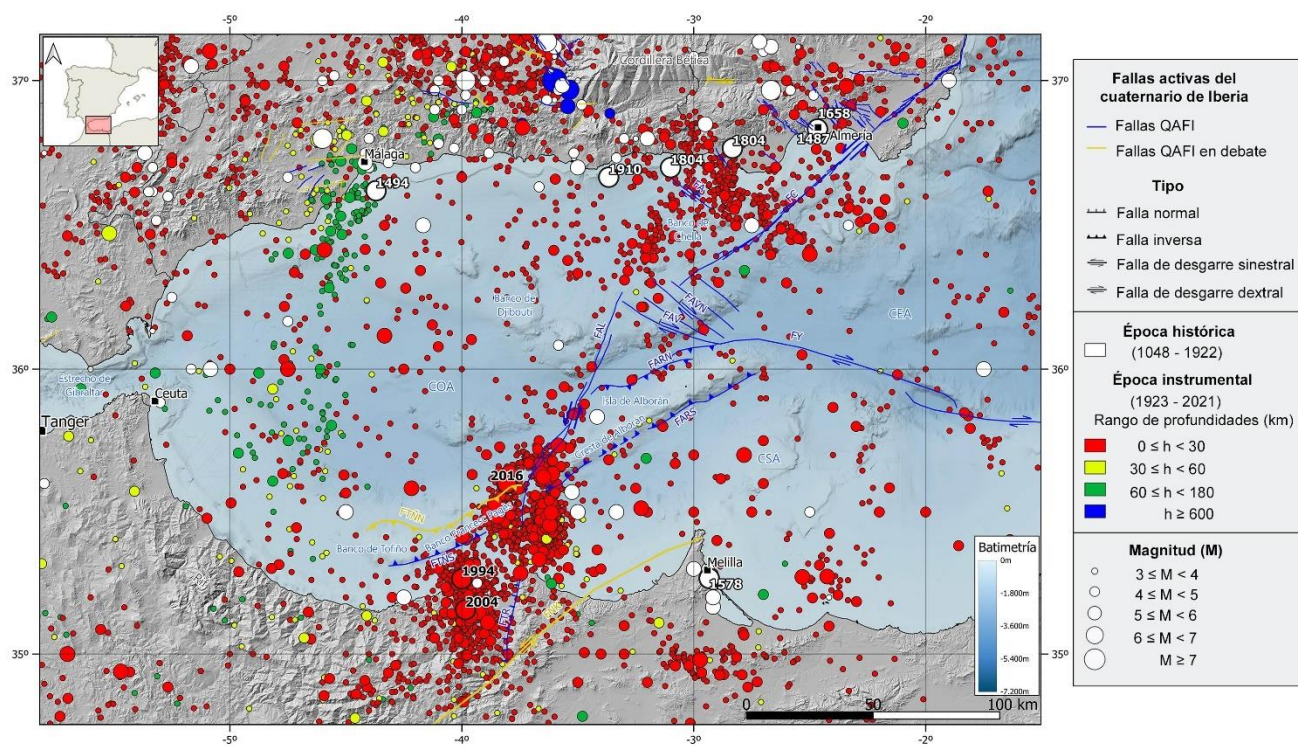
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



10.6 ANEXO 06

ANEXO 6. Mapa temático sismotectónico de la zona del mar de Alborán.

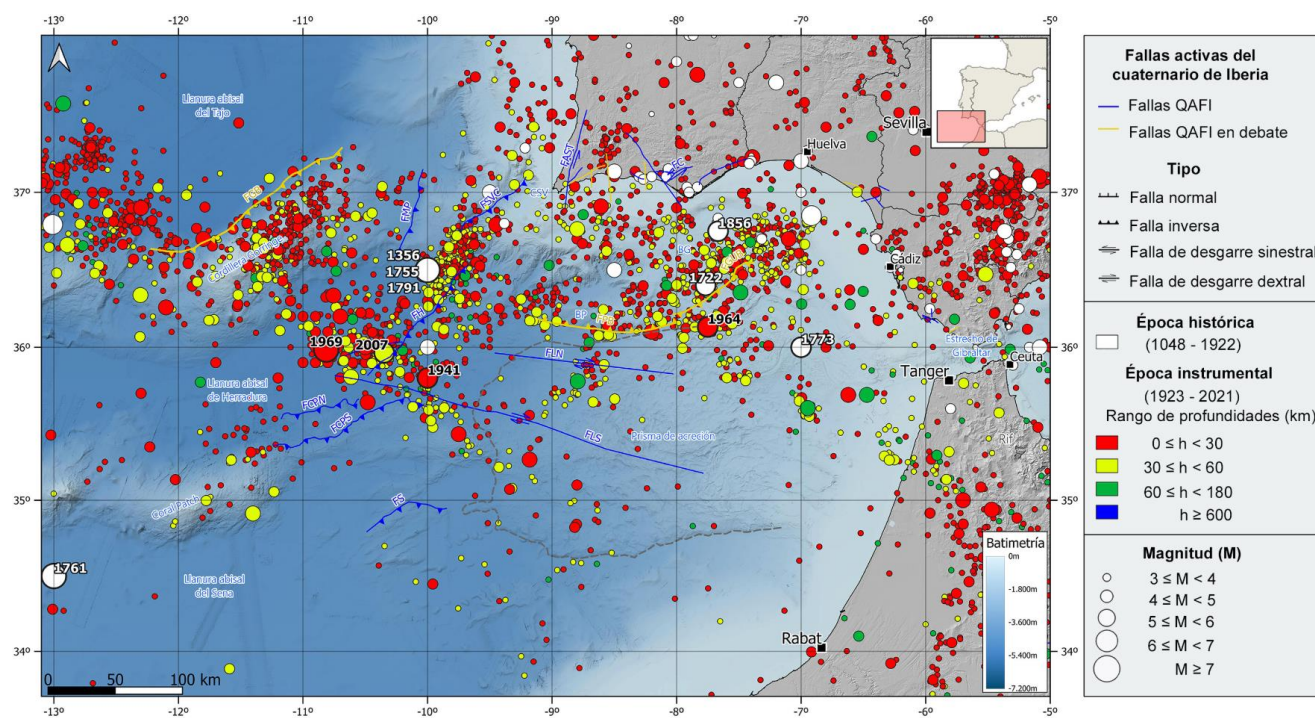
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).



10.7 ANEXO 07

ANEXO 7. *Mapa temático sismotectónico de la zona del Golfo de Cádiz – Gorringe.*

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

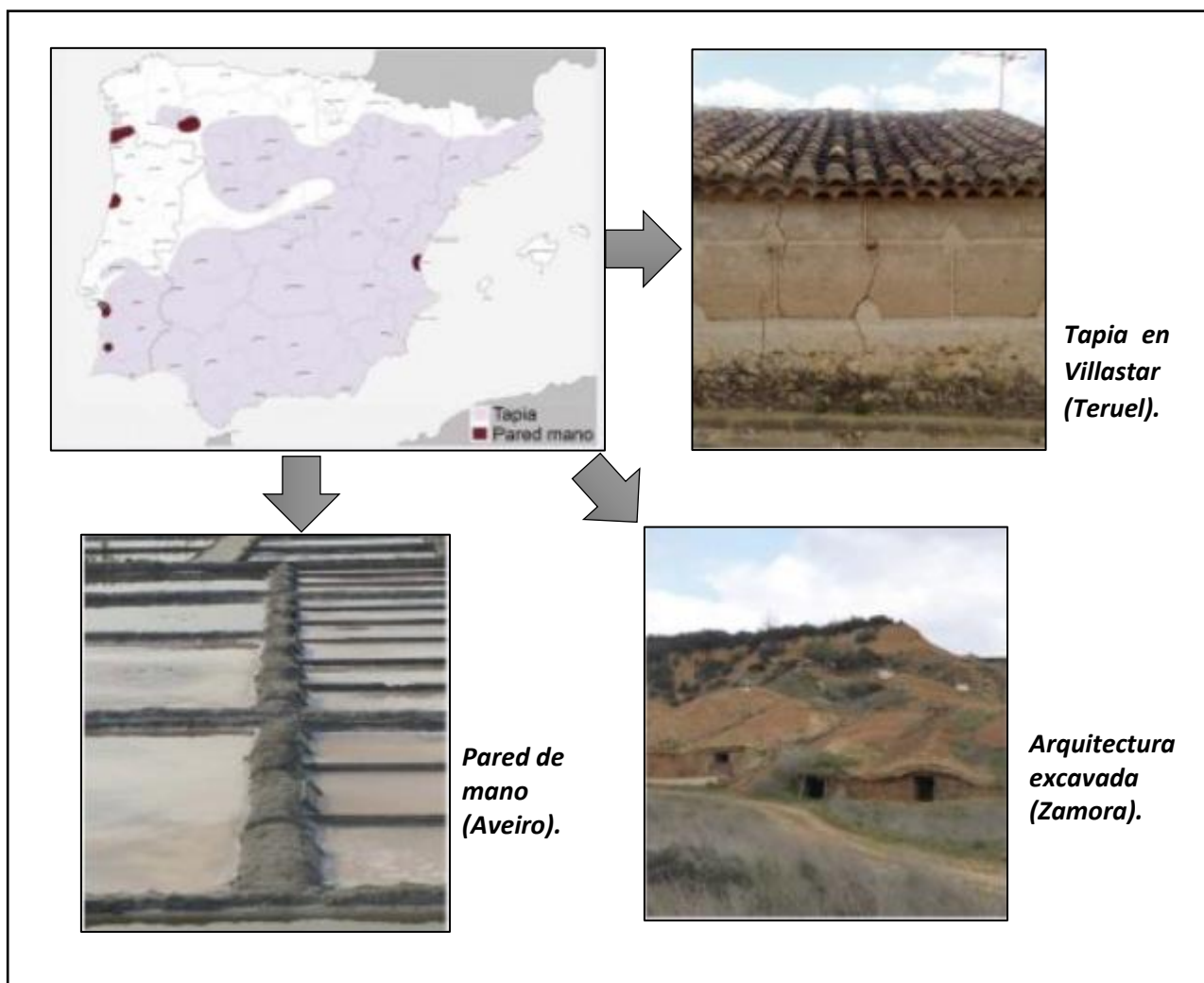


10.8 ANEXO 08

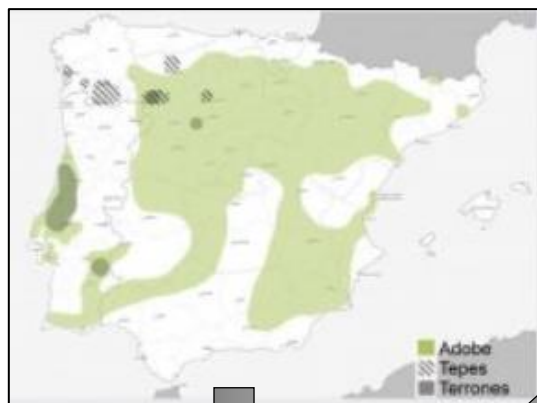
ANEXO 8. Mapeado y localización de edificaciones elaboradas con las técnicas constructivas en tierra de los 3 principales grupos seleccionados por la investigación del Proyecto SOSTIERRA: (a.) Tierra en Muros monolíticos. (b.) Tierra en muros de piezas de tierra. (c.) Tierra en entramados de madera.

Fuente: Proyecto SOSTIERRA, 2017.

a.)



b.)



**Muro de
adobe
(Burgos).**



**Muro de
Tepes
(Ourense).**



**Muro de
Terrones
(Santarém).**

c.)



**Entramado
con relleno
de adobe
(Salamanca).**



**Entramado
con urdimbre
(Soria).**



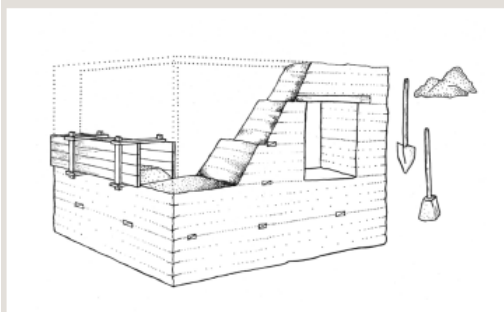
**Entramado
con listones
de madera y
tierra (León).**

10.9 ANEXO 09

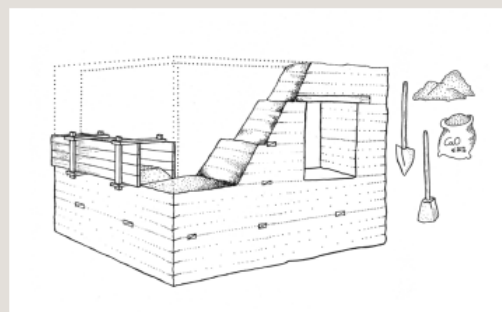
ANEXO 9. Detalles de la composición y tipología constructiva de las variantes de Tapia halladas dentro de la Península Ibérica.

Fuente: *La restauración de la Tapia en la Península Ibérica* (Mileto C. & Vegas F., 2013).

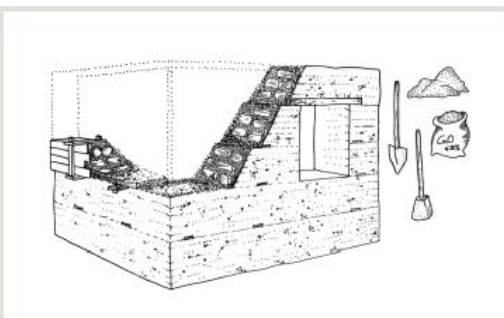
TAPIAS SIMPLES



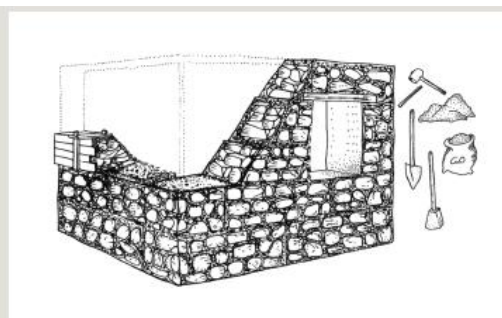
Tapia simple de tierra



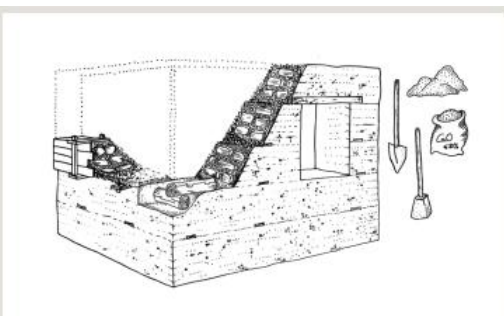
Tapia real



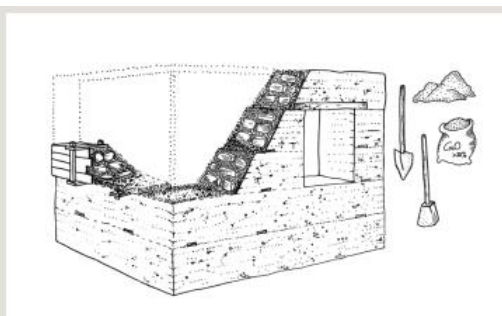
Tapia real con mampuestos



Mampostería encofrada

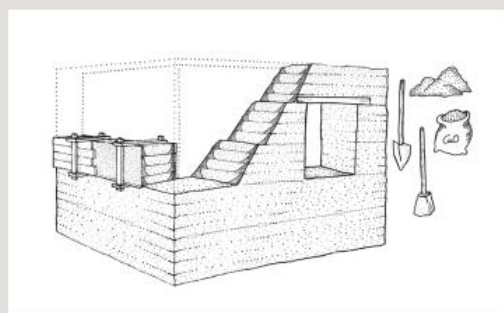


Tapia real con mampuestos trabada con madera

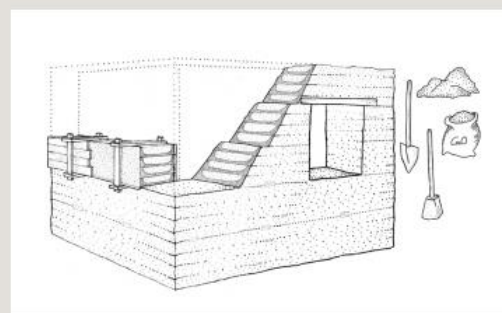


Tapia de hormigón de cal

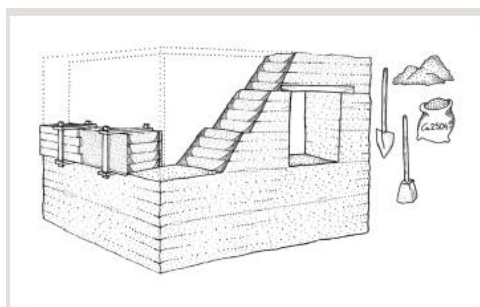
TAPIAS SUPLEMENTADAS EN SUS PARAMENTOS



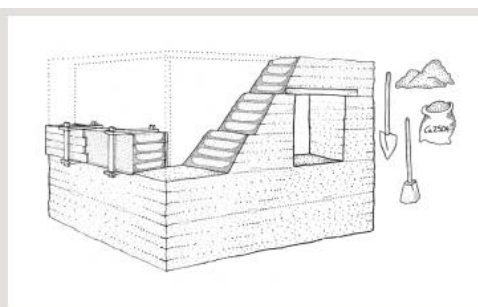
Tapia calicostrada con cuñas



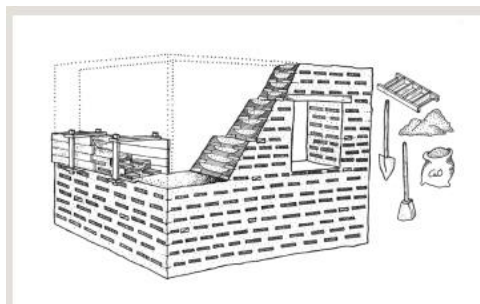
Tapia calicostrada con cuñas y tongada interior



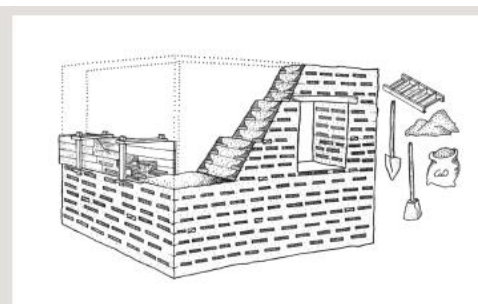
Tapia calicostrada de yeso con cuñas



Tapia calicostrada de yeso con cuñas y tongada interior

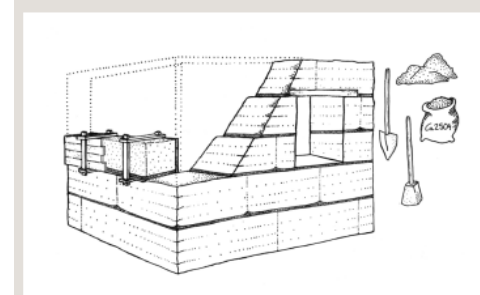


Tapia valenciana (cuña y tongada)

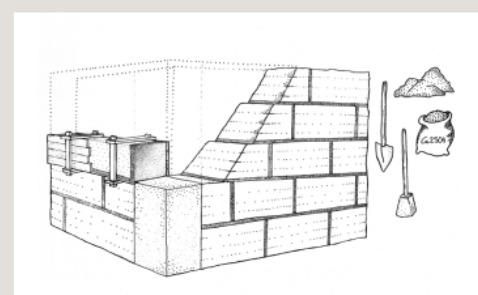


Tapia valenciana (cuña)

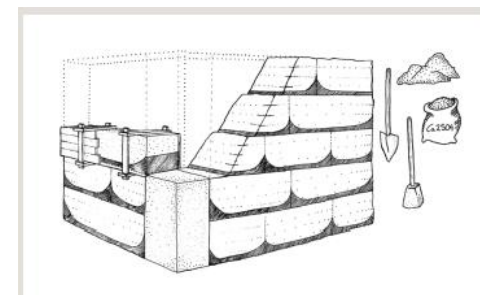
TAPIAS CON SUPLEMENTOS EN SUS JUNTAS



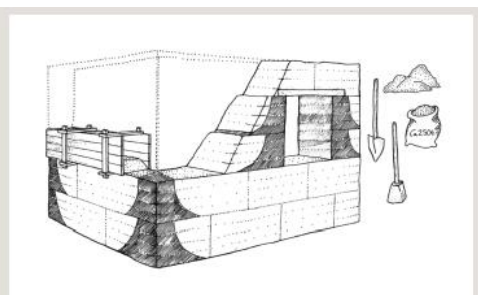
Tapia con juntas horizontales de yeso



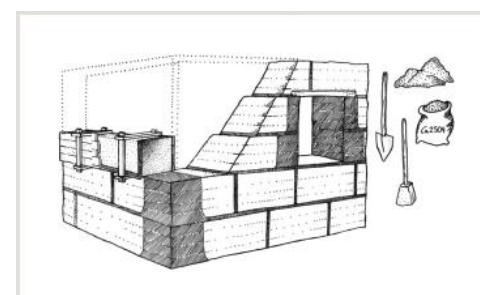
Tapia con juntas reforzadas con yeso



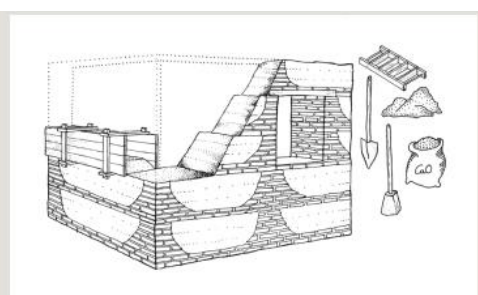
Tapia con brenchas de yeso



Tapia con rafas de yeso



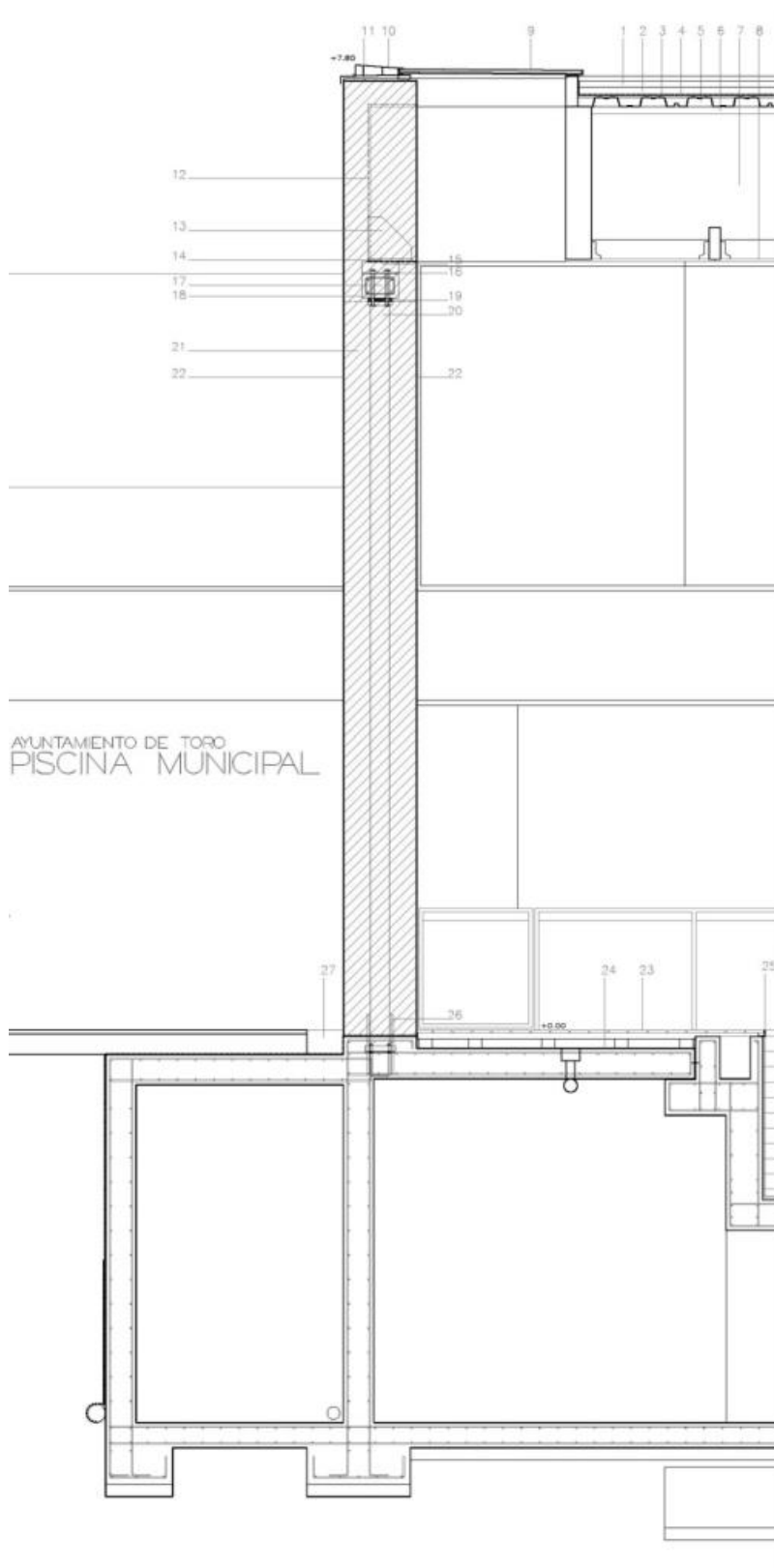
Tapia con juntas reforzadas de yeso y rafas



Tapia con rafas acampanadas y verdugadas de ladrillo

10.10 ANEXO 10

ANEXO 10. Detalle constructivo del muro estructural o Tapial en la Piscina de Toro en Zamora.
 Fuente: Revista de investigación y arquitectura contemporánea, Universidade da Coruña, 2012.



1. Capa de grava con geotextil en la cara inferior, e=50 mm
2. Aislamiento térmico mediante poliestireno extrusionado con geotextil en la cara inferior, e=60 mm
3. Lámina impermeable de etileno – propileno con geotextil en la cara inferior, e=1,14 mm
4. Tablero aglomerado hidrófugo, e=19 mm
5. Chapa nervada de acero galvanizado, e=1,2 mm
6. Aislamiento térmico mediante lana de roca con barrera de vapor en cara inferior, e=60 mm
7. Viga de madera laminada.
8. Falso techo compuesto por tablero contrachapado marino con resinas fenólicas, resistente a ambientes húmedos, e=20 mm
9. Vidrio doble de baja emisividad: 10 mm
10. Albardilla de acero cortén, e=3 mm
11. Mortero cal/tierra 1:1:4, e=20 mm
12. Separación lámina drenante, e=2 mm
13. Cartela de apoyo de acero galvanizado anclado al zuncho.
14. Apoyo con lamina drenante de polietileno, e=20 mm
15. Durmiente de madera aserrada de 30x9 cm.
16. Chapa de acero galvanizado 300x400 mm
17. Zuncho perimetral embebido en muro de tierra compactada 30x20 cm.
18. Conectores de acero galvanizado Ø20.
19. Separación poliestireno expandido, e=30 mm
20. Columna de acero galvanizado Ø155,8.
21. Muro de tierra compactada, e=60 cm.
22. Imprimación hidrófuga y fungicida.
23. Madera microcomposite.
24. Mortero hidrófugo.
25. Angulo de acero inoxidable.
26. Conectores de acero galvanizado cada 30 cm.

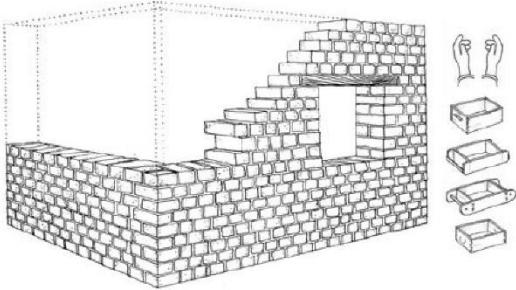
10.11 ANEXO 11

ANEXO 11. Catálogo – Caracterización constructiva de viviendas con muros de mampostería de tierra.
Fuente: Elaboración propia.

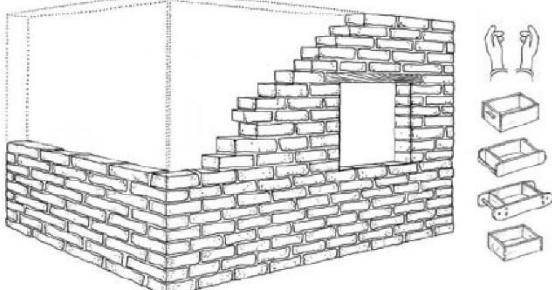
VIVIENDAS CON MUROS DE MAMPOSTERÍA DE TIERRA

1. FÁBRICAS SIMPLES DE ADOBE

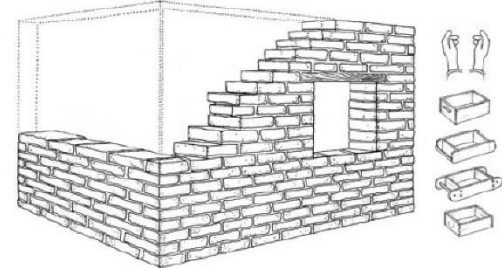
1.1. FÁBRICA SIMPLE DE ADOBE A TIZÓN



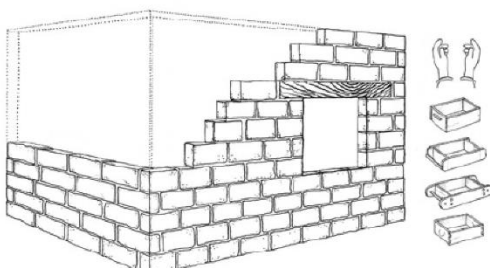
1.2. FÁBRICA SIMPLE DE ADOBE A SOGA



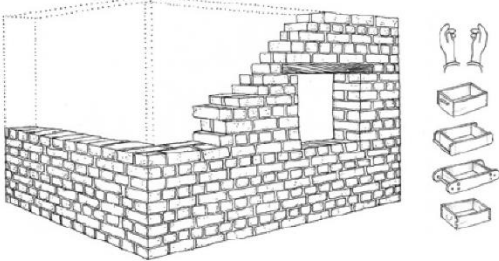
1.3. FÁBRICA SIMPLE DE ADOBE A CUADRADO



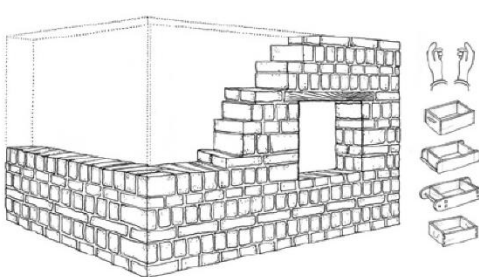
1.4. FÁBRICA SIMPLE DE ADOBE A PANDERETE



1.5. FÁBRICA SIMPLE DE ADOBE A SOGA Y TIZÓN

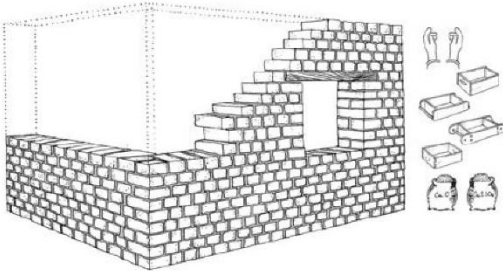


1.6. FÁBRICA SIMPLE DE DE ADOBE A SOGA, TIZÓN Y SARDINEL

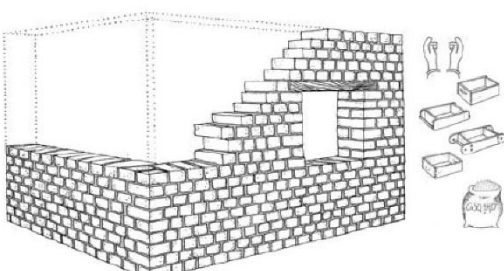


2. FÁBRICAS CON MORTEROS DE CONGLOMERANTES

2.1. FÁBRICA DE ADOBE RECIBIDA CON MOETERO DE CAL

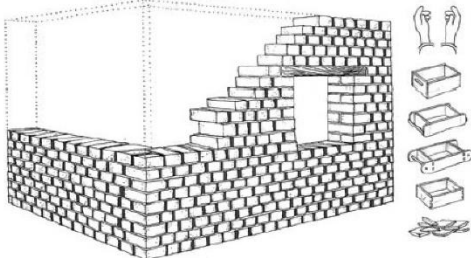


2.2. FÁBRICA DE ADOBE RECIBIDA CON PASTA DE YESO.

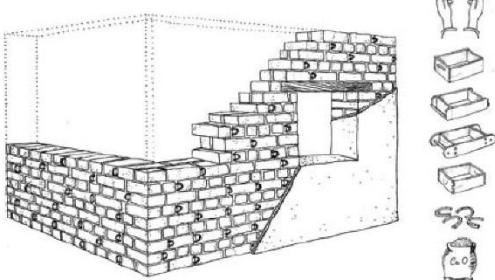


3. FÁBRICAS DE ADOBE CON INSERCIONES EN LAS JUNTAS

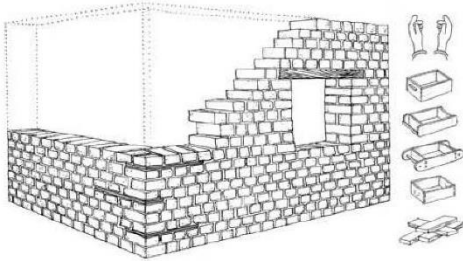
3.1. FÁBRICA DE ADOBE CON JUNTAS ENRIPIADAS CON LAS DE PIEDRA



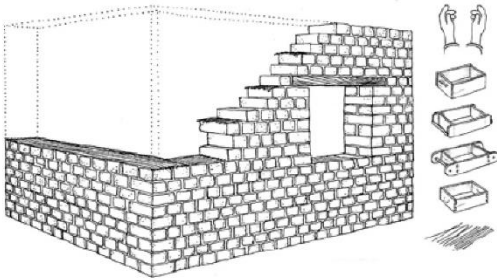
3.2. FÁBRICA DE ADOBE CON HERRADURAS INSERTADAS EN LAS JUNTAS



3.3. FÁBRICA DE ADOBE CON TRABAZÓN DE TABLAS EN LAS ESQUINAS

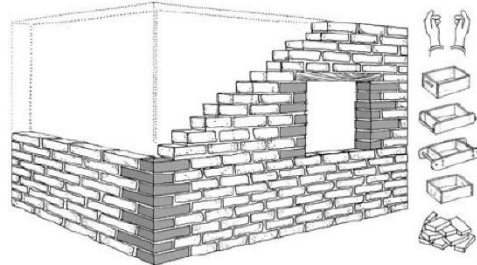


3.4. FÁBRICA DE ADOBE CON TENDELES ARMADOS CON CAÑAS

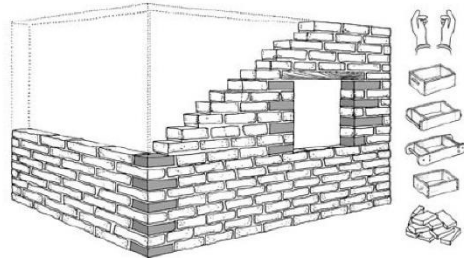


4. FÁBRICAS DE ADOBE CON INSERCIONES EN LAS ESQUINAS

4.1. FÁBRICA DE ADOBE CON CANTONERAS CONTINUAS DE LADRILLO

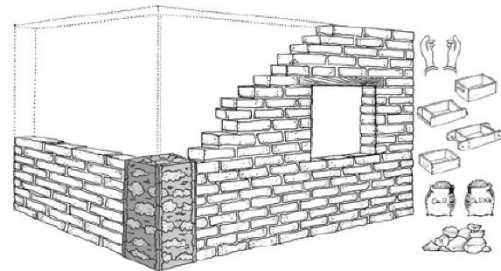


4.2. FÁBRICA DE ADOBE CON CANTONERAS DE LADRILLO Y ADOBE

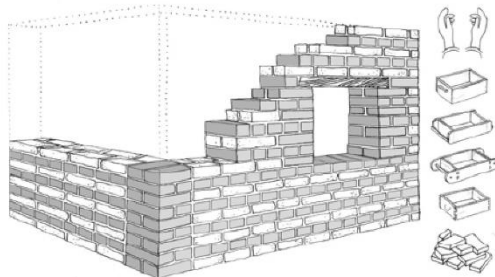


5. FÁBRICAS MIXTAS DE ADOBE

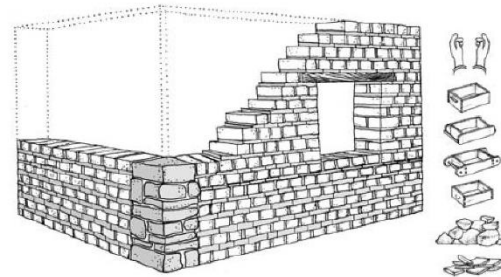
5.1. FÁBRICA DE ADOBE CON MACHONES ENCOFRADOS DE YESO Y MAMPUESTOS



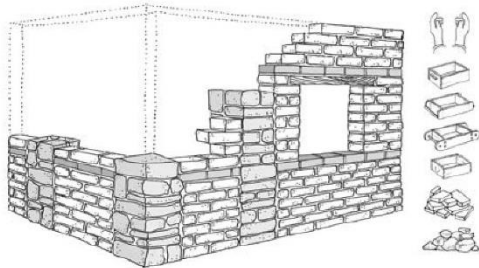
5.2. FÁBRICA CON HILADAS ALTERNAS DE ADOBE Y LADRILLO



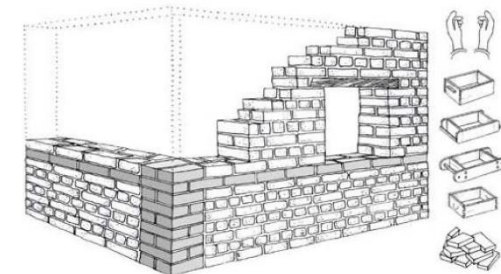
5.3. FÁBRICA CON HILADAS ALTERNAS DE ADOBE Y LAJAS DE PIEDRA



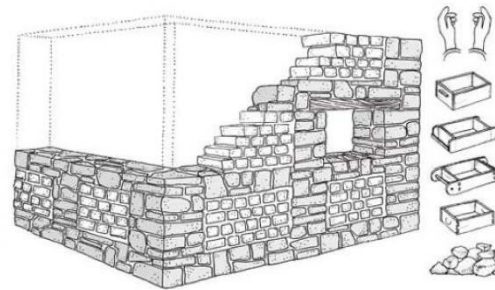
5.4. FÁBRICA DE ADOBE CON MACHONES DE PIEDRA Y VERDUGADAS DE LADRILLO



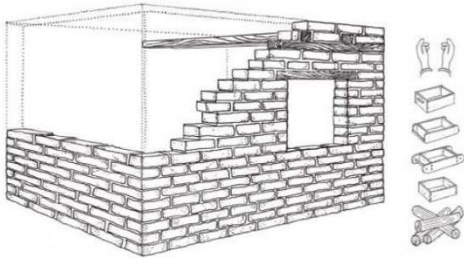
5.5. FÁBRICA DE ADOBE CON MACHONES Y VERDUGADAS DE LADRILLO



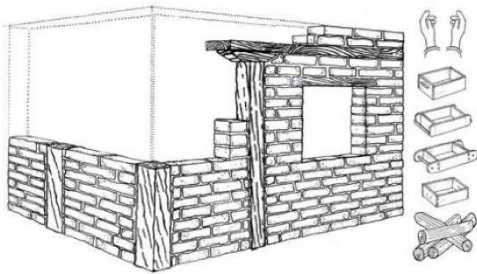
5.6. FÁBRICA DE ADOBE ENCAJONADA ENTRE MACHONES Y VERDUGADAS DE PIEDRA



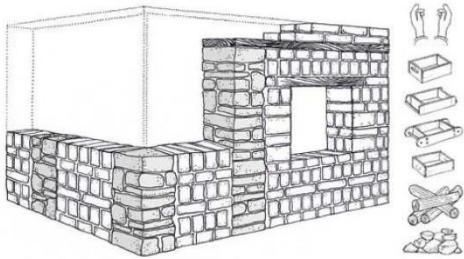
5.7. FÁBRICA DE ADOBE CON CARRERAS DE MADERA



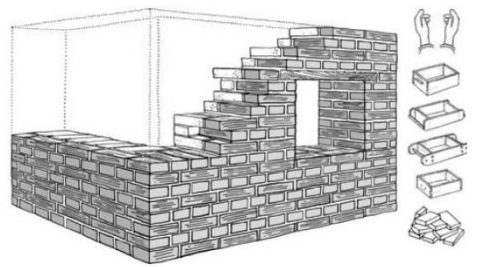
5.8. FÁBRICA DE ADOBE CON PÓRTICOS DE MADERA



5.9. FÁBRICA DE ADOBE CON CARRERAS DE MADERA Y MACHONES DE PIEDRA

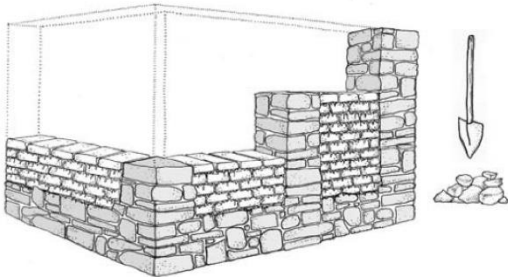


5.10. FÁBRICA CON HOJAS TABADAS DE ADOBE Y LADRILLO

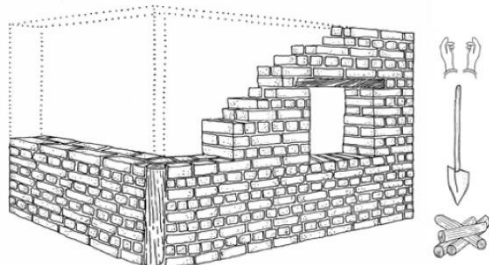


6. FÁBRICAS DE TEPS Y TERRONES

6.1. FÁBRICA DE TEPES CON MACHONES DE PIEDRA

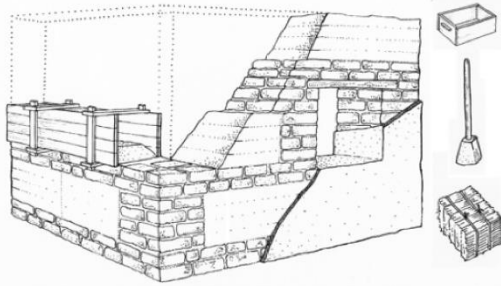


6.2. FÁBRICA DE TERRONES CON PIES DERECHOS DE MADERA EN LAS ESQUINAS

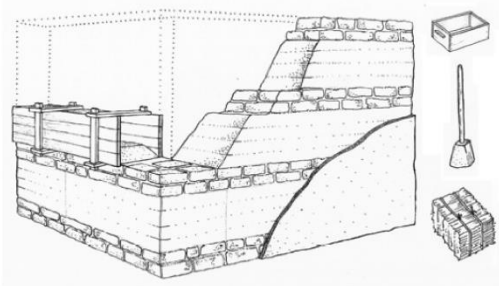


7. FÁBRICAS DE TIERRA COMO REFUERZO Y REGULARIZACIÓN

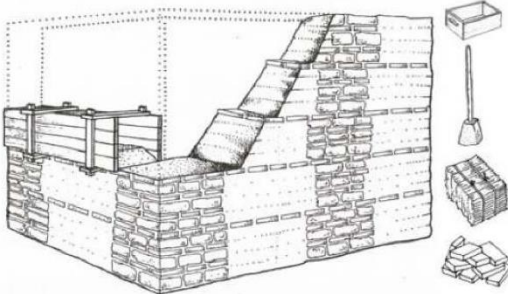
7.1. TAPIA CON MACHONES Y VERDUGADAS DE ADOBE



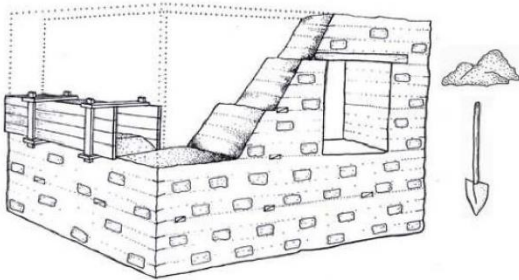
7.2. TAPIA CON VERDUGADAS DE ADOBE



7.3. TAPIA CON MACHONES DE ADOBE Y LADRILLO Y VERDUGADAS DE LADRILLO

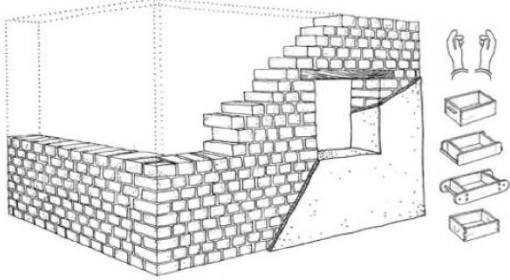


7.4. TAPIA DE TIERRA VERTIDA CAREADA CON TERRONES

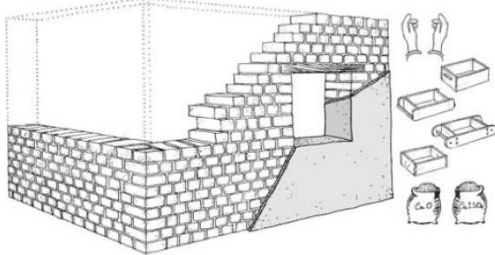


8. REVESTIMIENTOS

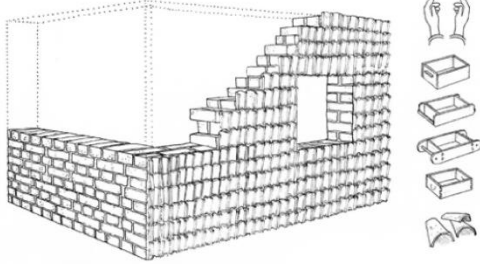
8.1. FÁBRICA DE ADOBES REVESTIDA CON UN REVOCO DE TIERRA



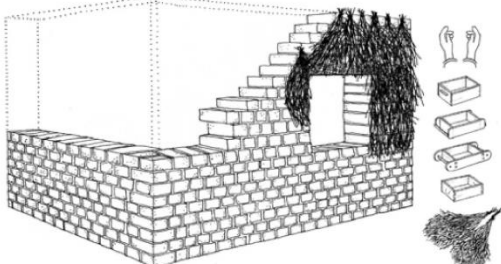
8.2. FÁBRICA DE ADOBES REVESTIDA CON UN ENLUCIDO DE MORTERO DE CAL



8.3. FÁBRICA DE ADOBES CON UN REVESTIMIENTO DE TEJAS



8.4. FÁBRICA DE ADOBES CON UN REVESTIMIENTO DE FIBRAS

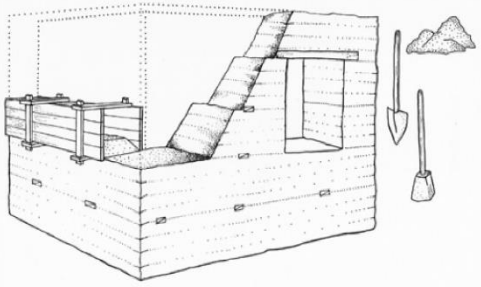
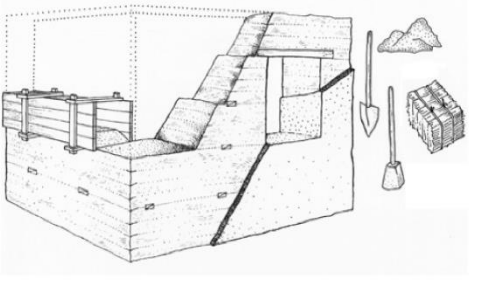
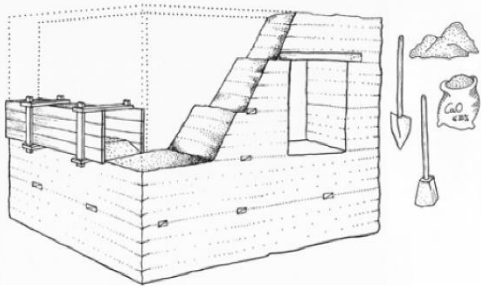
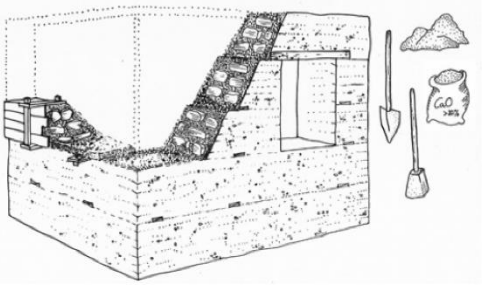
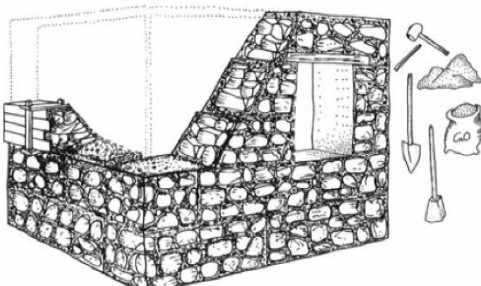
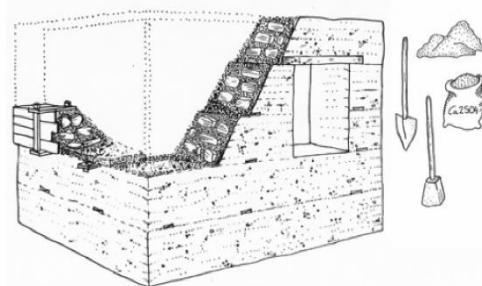
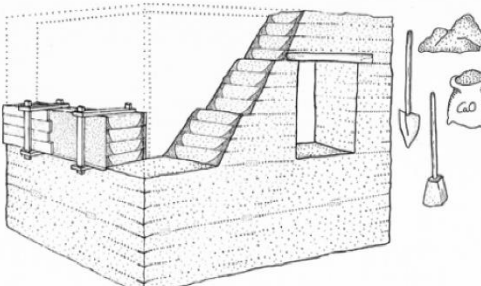
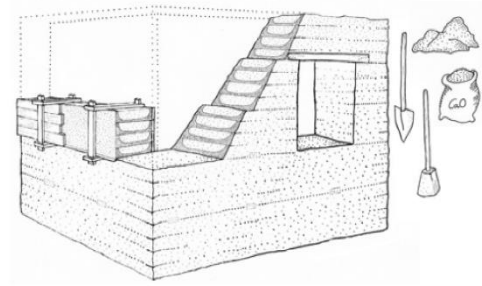
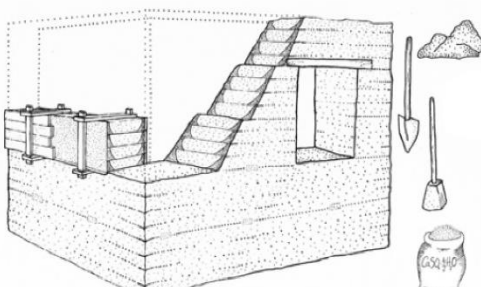
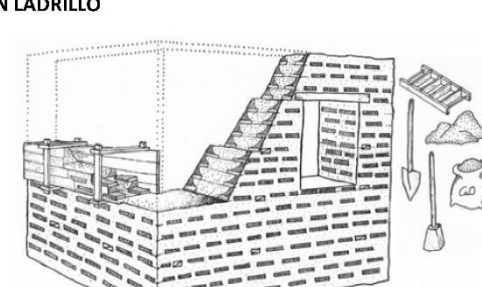


Paúl Anthony Barbarán Vilela – MUICC 2024 – 2025.

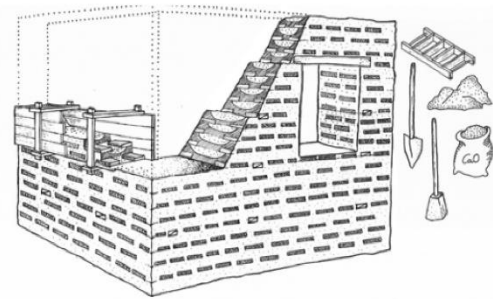
144

10.12 ANEXO 12

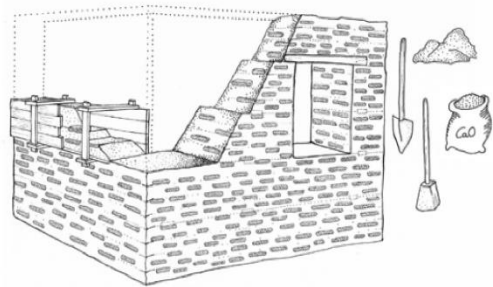
ANEXO 12. Catálogo – Caracterización constructiva de viviendas con muros de tapiales.
Fuente: Elaboración propia.

VIVIENDAS CON MUROS DE TAPIAL	
1. TAPIALES SIMPLES	
<div>1.1. TAPIA SIMPLE DE TIERRA</div> 	<div>1.2. TAPIA DE TIERRA CON FIBRAS</div> 
<div>1.3. TAPIA REAL</div> 	<div>1.4. TAPIA DE HORMIGÓN CON CAL Y TIERRA</div> 
<div>1.5. MAMPOSTERÍA ENCOFRADA</div> 	<div>1.6. TAPIA DE YESO Y MAMPUESTOS</div> 
2. MUROS DE TAPIA SUPLEMENTADAS EN US PARAMENTOS	
<div>2.1. TAPIA CALICOSTRADA CON CUÑAS DE CAL</div> 	<div>2.2. TAPIA CALICOSTRADA CON CUÑAS Y TONGADAS DE CAL</div> 
<div>2.3. TAPIA GIPSICOSTRADA</div> 	<div>2.4. TAPIA CALICOSTRADA CON CUÑAS DE CAL Y CAREADA CON LADRILLO</div> 

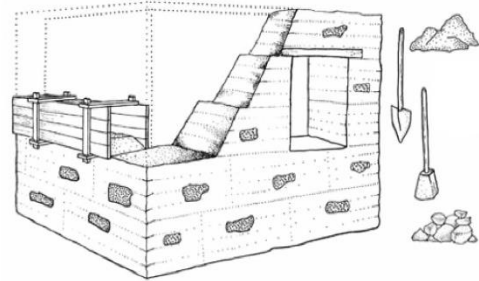
2.5. TAPIA CALICOSTRADA CON CUÑAS Y TONGADAS DE CAL Y CAREADA CON LADRILLO



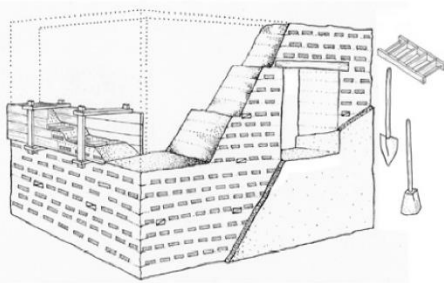
2.6 TAPIA CAREADA CON PIEDRA



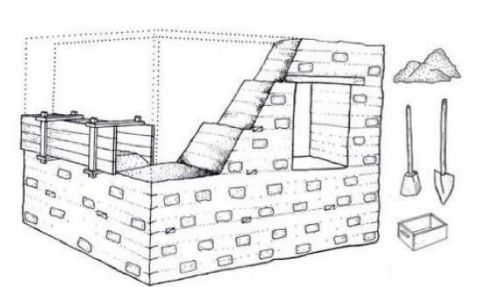
2.7. TAPIA CAREADA CON PIEDRA, EMPLEANDO MAMPUESTO POR CAJÓN



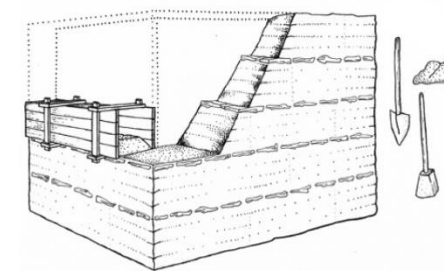
2.8. TAPIA CAREADA CON LADRILLO



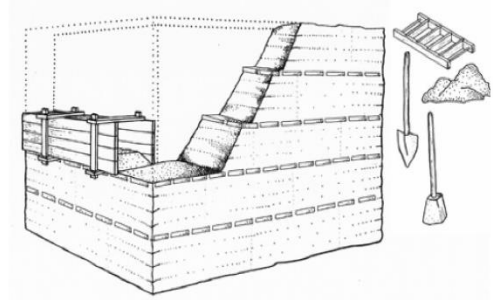
2.9. TAPIA CAREADA CON ADOBE



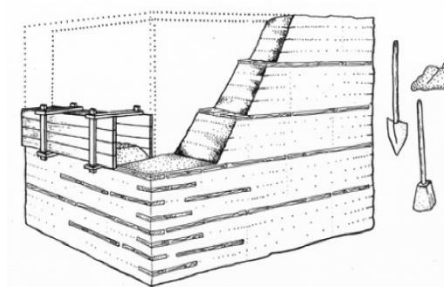
2.10. TAPIA CON JUNTAS CAREADAS DE PIEDRA



2.11. TAPIA CON JUNTAS CAREADAS DE LADRILLO

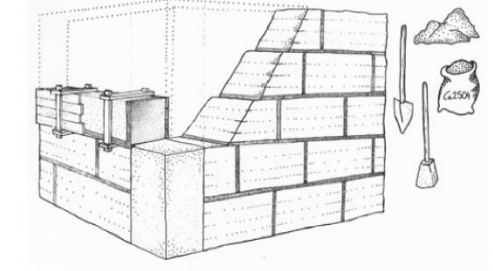


2.12. TAPIA CON ESQUINAS CAREADAS CON TABLAS

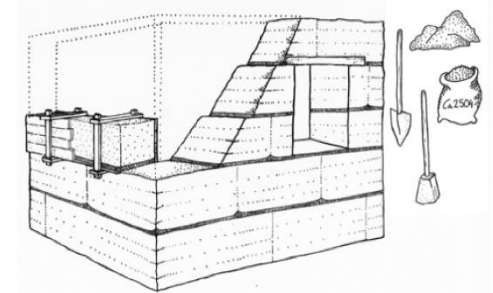


3. MUROS DE TAPIA SUPLEMENTADAS EN SUS JUNTAS

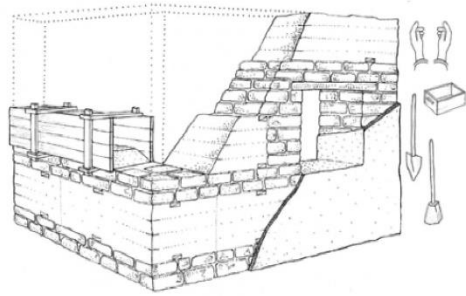
3.1. TAPIA CON JUNTAS DE YESO



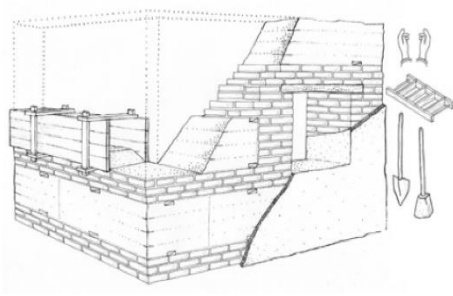
3.2. TAPIA CON PASTÓN DE YESO



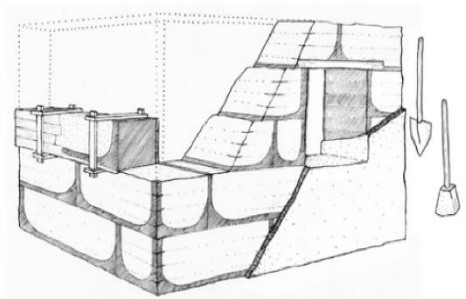
3.3. TAPIA CON VERDUGADAS DE ADOBE



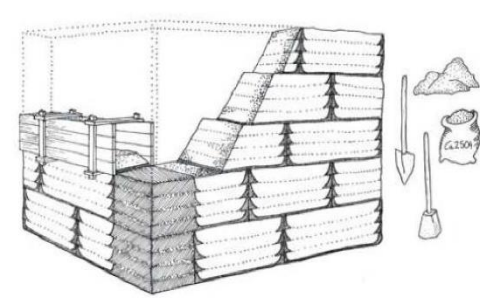
3.4. TAPIA CON VERDUGADAS DE LADRILLO



3.5. TAPIA CON BRENCAS DE YESO

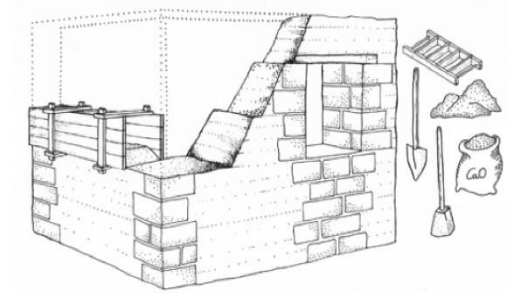


3.6. TAPIA CON BRENCAS DE YESO EN CADA TONGADA

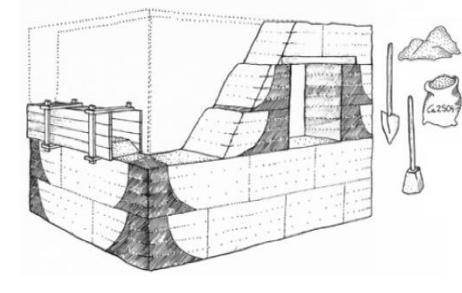


4. MUROS DE TAPIA MIXTOS CON MAMPOSTERÍA DE TIERRA

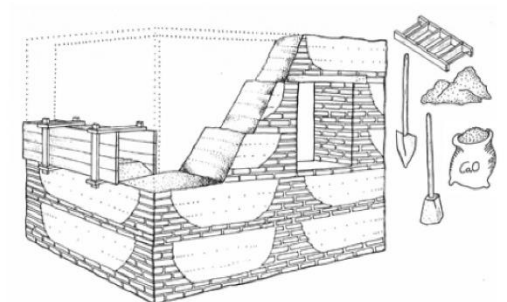
4.1. TAPIA ENTRE MACHONES DE PIEDRA



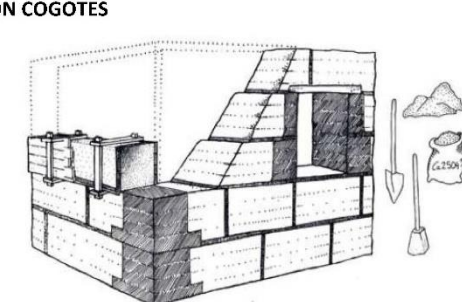
4.2. TAPIA ENTRE RAFAS DE YESO Y MAMPUESTOS



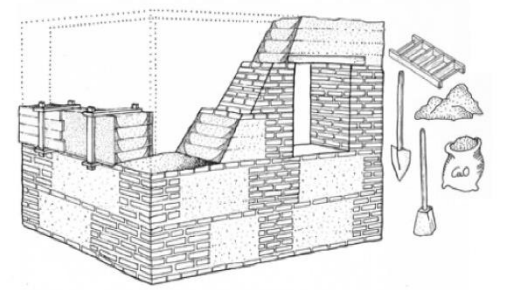
4.3. TAPIA ENTRE RAFAS Y VERDUGADAS DE LADRILLO



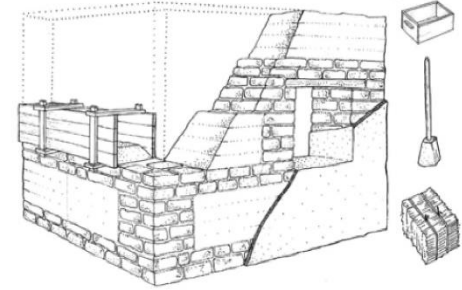
4.4. TAPIA ENTRE MACHONES DE YESO Y MAMPUESTOS CON COGOTES



4.5. TAPIA ENCADENADA CON MACHONES Y VERDUGADAS DE LADRILLO

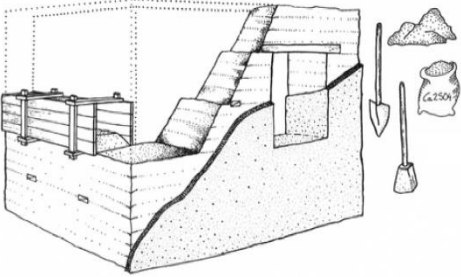


4.6. TAPIA CON MACHONES Y VERDUGADAS DE ADOBE

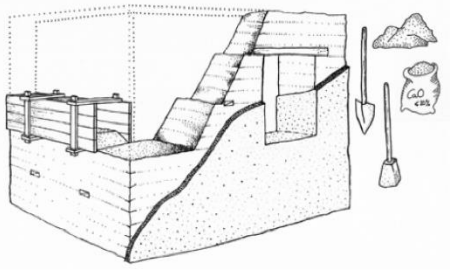


5. REVESTIMIENTOS

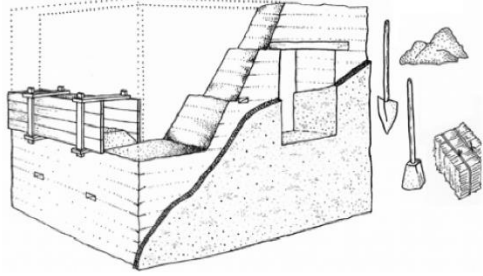
5.1. TAPIA CON REVOCOS DE YESO



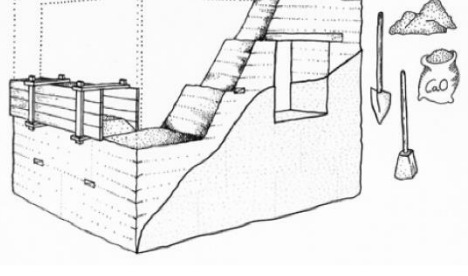
5.2. TAPIA CON REVOCO DE MORTERO DE CAL



5.3. TAPIA CON REVOCO DE BARRO

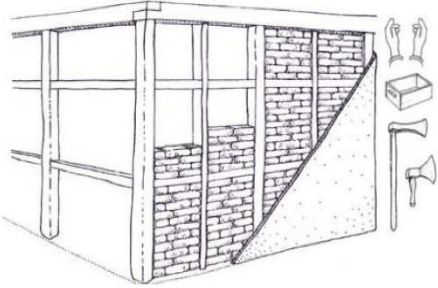
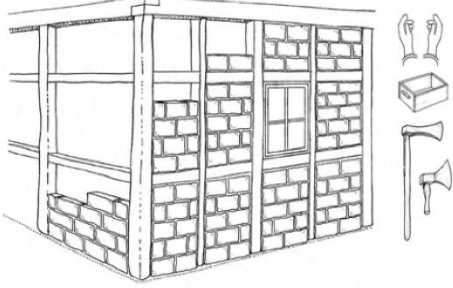
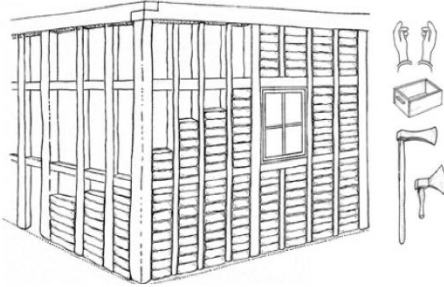
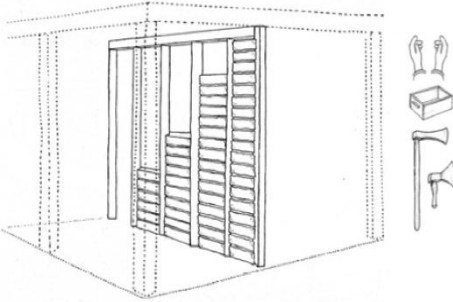
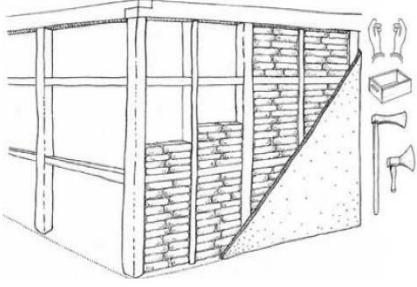
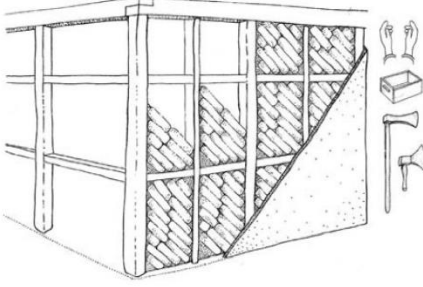
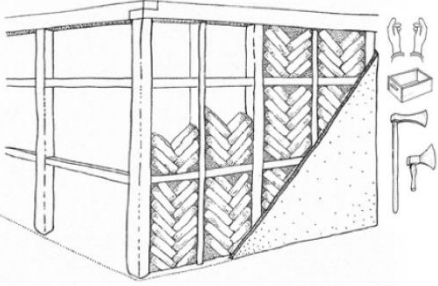
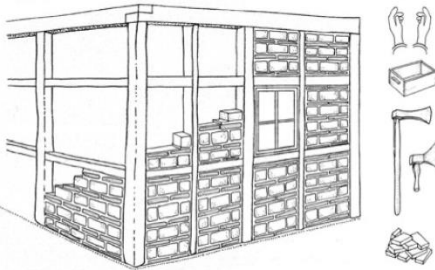
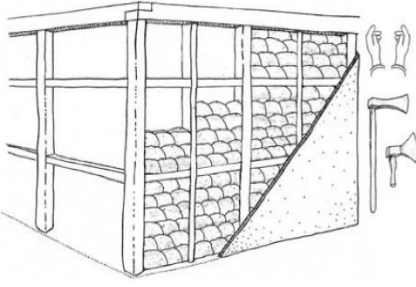
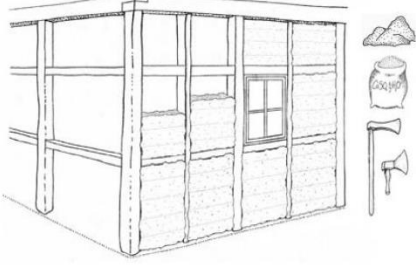


5.4. TAPIA ENCALADA

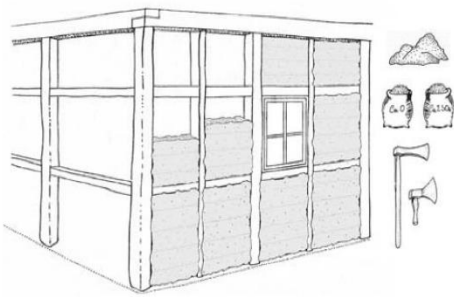


10.13 ANEXO 13

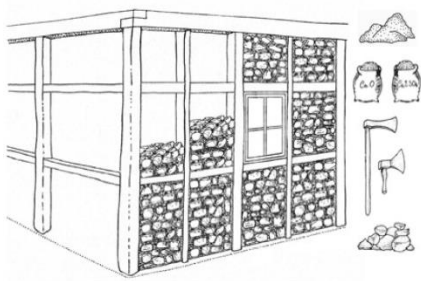
ANEXO 13. Catálogo – Caracterización constructiva de viviendas con muros de entramado o mixtos.
Fuente: Elaboración propia.

VIVIENDAS CON MUROS DE TIERRA Y MADERA - MIXTO (ENTRAMADOS)	
1. MURO DE ENTRAMADOS CON RELLENO DE MAMPOSTERÍA DE TIERRRA	
<div>1.1. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE HORIZONTAL APAREJADO A SOGA</div> 	<div>1.2. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE HORIZONTAL APAREJADO A PANDERETE</div> 
<div>1.3. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE HORIZONTAL APILADO</div> 	<div>1.4. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE HORIZONTAL APILADO EN PARTICIÓN INTERIOR</div> 
<div>1.5. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE HORIZONTAL APILADO</div> 	<div>1.6. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE INCLINADO</div> 
<div>1.7. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE EN ESPINA DE PEZ</div> 	<div>1.8. ENTRAMADO RELLENO DE ADOBE Y LADRILLO EN HILADAS ALTERNAS</div> 
2. MURO CON ELEMENTOS DE TIERRA Y MADERA CON RELLENO MONOLÍTICO	
<div>2.1. ENTRAMADO RELLENO DE PARED DE PELLAS</div> 	<div>2.2. ENTRAMADO RELLENO DE TAPIALETE</div> 

2.3. ENTRAMADO RELLENO DE HORMIGÓN DE CAL Y TIERRA

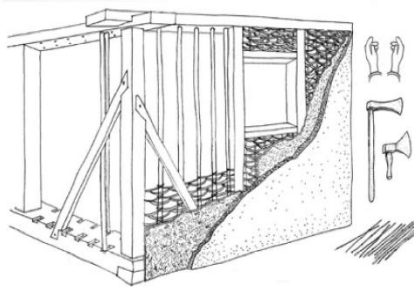


2.4. ENTRAMADO RELLENO DE MAMPOSTERÍA ENCOFRADA

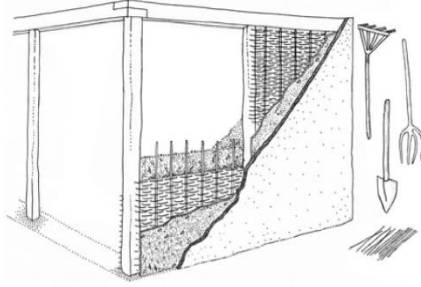


3. MUROS TEJIDOS

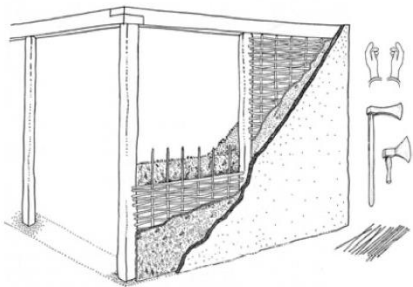
3.1. ZARZO



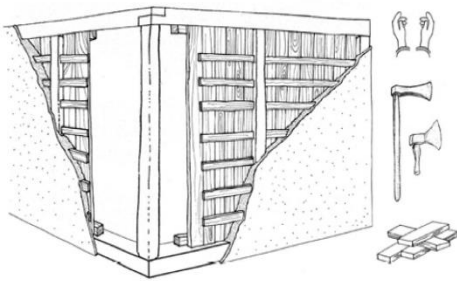
3.2. MIMBRE



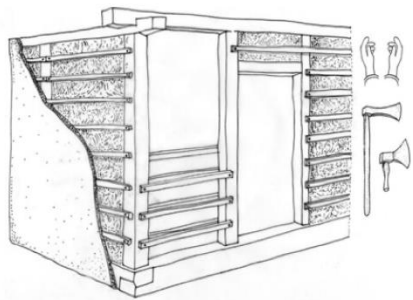
3.3. CAÑIZO



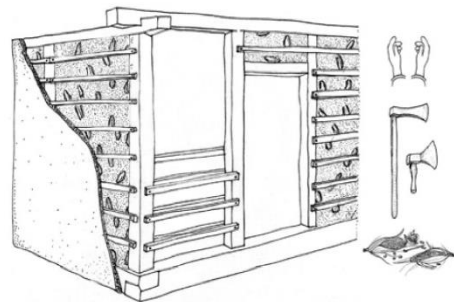
3.4. TABIQUE DE LISTONES



3.5. VERGANAZO

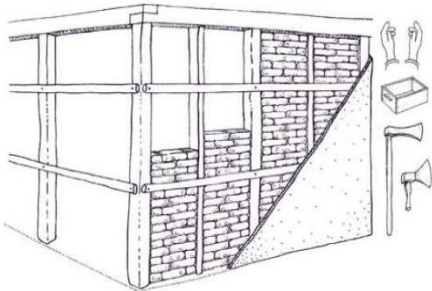


3.6. VERGANAZO CON DESECHOS AGRÍCOLAS EN EL RELLENO

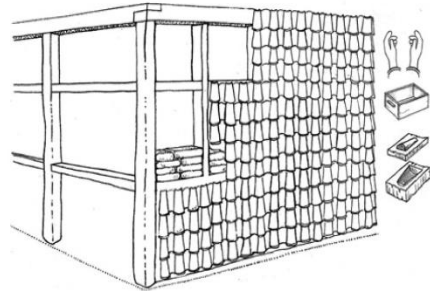


4. REVESTIMIENTOS

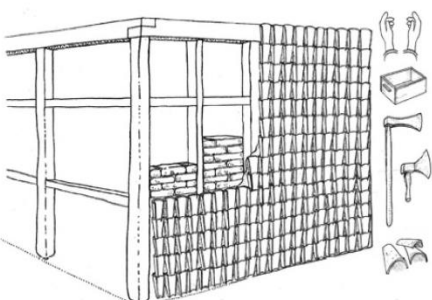
4.1. ENTRAMADO CON REVESTIMIENTO DE MORTERO



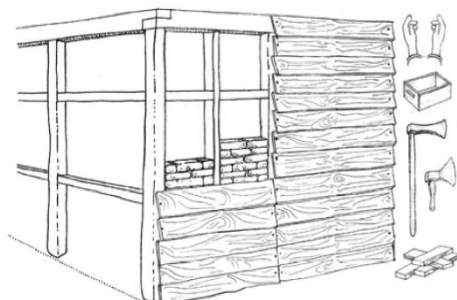
4.2. ENTRAMADO CON REVESTIMIENTO DE TEJAS



4.3. ENTRAMADO CON TEJAS SIN COBIJAS










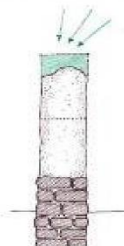
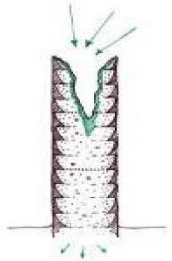
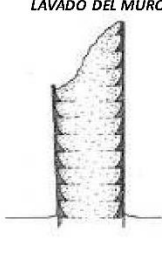
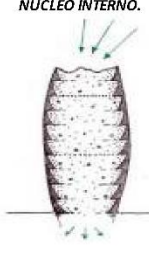





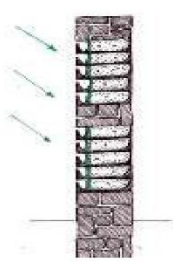
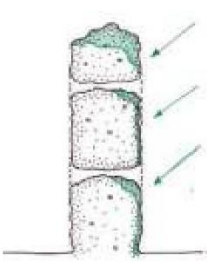

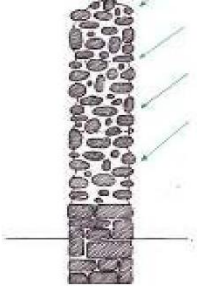
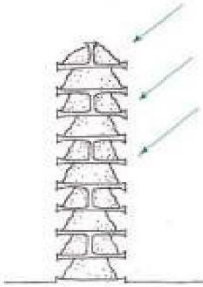


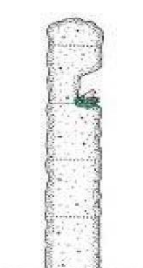
4.4. ENTRAMADO CON REVESTIMIENTO DE TABLAS



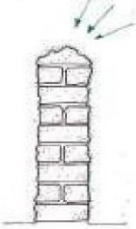


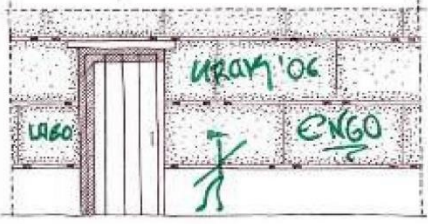







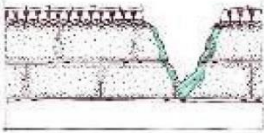
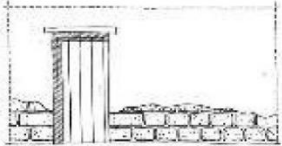
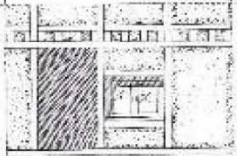




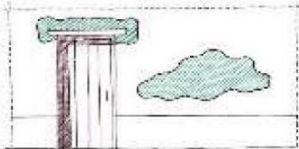
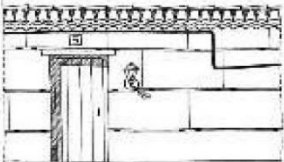
10.14 ANEXO 14





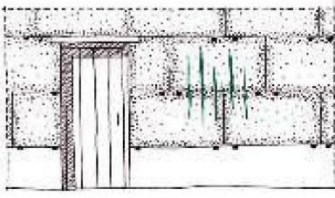
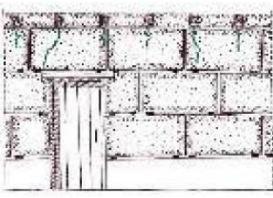

ANEXO 14. Fenómenos de degradación en edificaciones de tierra recurrentes – Pre Sismo.
Fuente: Elaboración propia.



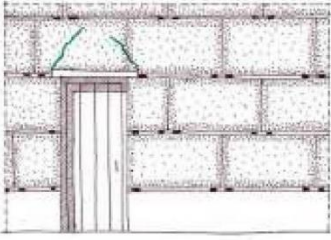
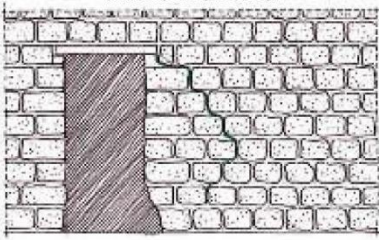




FENOMENOS DE DEGRADACION EN EDIFICACIONES DE TIERRA			
DEGRADACION MATERIAL DE ARQUITECTURA EN TIERRA			
LESIONES POR AGENTES ATMOSFERICOS			
MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN LA BASE DEL MURO DE TIERRA			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>La base de los muros es su punto más vulnerable, ya que el agua presente en el suelo asciende por los poros del material, humedeciéndolo y debilitándolo progresivamente. Primero aparecen manchas y cambios de color; luego, si el problema persiste, el muro pierde grosor y estabilidad; además, el agua también arrastra sales que emergen a la superficie (eflorescencias) o se acumulan dentro del muro generando grietas y desprendimientos.</p> <p>Por otro lado, si la vivienda está provista de zócalos hidrófugos, la efectividad de estos dependerá de no incurrir en fallas en su diseño como: altura insuficiente, juntas sin sellar o falta de barreras impermeables, propiedades del material (porosidad, compactación o uso de estabilizantes) y, por supuesto, fuentes hídricas externas.</p>	<p>→ El muro está en contacto directo con el suelo</p> <p>→ El muro está hecho a base de materiales que no son transpirables.</p> <p>→ El zócalo mal ejecutado</p> <ul style="list-style-type: none">• Altura insuficiente.• Juntas permeables. <p>→ Urbanización con materiales impermeables, o asfalto sin drenaje.</p> <p>→ Tierra no estabilizada o de alta porosidad.</p> <p>→ Salpicadura de lluvia en superficies adyacentes.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Manchas.• Alteraciones higrotérmicas.• Humedad en interfaz entre el zócalo y la tierra.• Eflorescencias. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de sección.• Inestabilidad.• Pérdida de sección en la base.• Pandeo estructural.	<p>→ Eflorescencias.</p> <p>→ Migración de sales solubles.</p> <p>→ Biodeterioro por proliferación de hongos y líquenes.</p> <p>→ Lavado interno por capilaridad.</p> <p>→ Erosión mecánica por salpicaduras.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>PROLIFERACION DE HONGOS Y LIQUENES EN LA BASE DEL MURO DE TIERRA - TERUEL</p> 	<p>HUMEDAD POR CAPIALRIDAD EN LA BASE DEL MURO DE TIERRA - ZARAGOZA</p> 	<p>PERDIDA DE SECCION Y DESPRENDIMIENTOS EN LA BASE DEL MURO DE TIERRA - BURGOS</p> 	
<p>MANCHAS DE HUMEDAD EN LA BASE DEL</p> 	<p>EFLORESCENCIAS EN LA BASE DEL</p> 	<p>MANCHA DE HUMEDAD EN LA BASE</p> 	
MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN LA CORONACIONDEL MURO DE TIERRA			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Las partes superiores de los muros de tierra son especialmente vulnerables al deterioro por lluvia cuando carecen de protección (aleros o techos). Este daño se manifiesta mediante señales claras: manchas blancas (acumulación de sales) o verdosas (hongos), costras que se despegan o abomban — indicando infiltración interna—, y surcos de erosión superficial que evidencian el lavado progresivo del material. Para prevenir estos problemas, se recomienda implementar aleros amplios que desvíen el agua de lluvia, evitar revestimientos superiores no transpirables (como morteros de cemento) que atrapen humedad, y optar por morteros de cal en coronaciones expuestas, que permiten la evaporación controlada mientras protegen la estructura.</p>	<p>→ Lluvia directa sobre muros sin protección.</p> <p>→ Revestimientos no transpirables.</p> <ul style="list-style-type: none">• Morteros de cemento en tapias calicostradas. <p>→ Zonas de orientación norte de la viviendas, o con sombras prolongadas</p> <ul style="list-style-type: none">• Humedad persistente.	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Lavado superficial.• Manchas de humedad.• Sales. <p>→ Fase avanzada:</p> <ul style="list-style-type: none">• Lavado interno.• Pérdida de resistencia estructural del muro.• Abombamiento en costras del muro.	<p>→ Eflorescencias superficiales.</p> <p>→ Acumulación de humedad en núcleo interno de los muros de tierra.</p> <p>→ Biodeterioro por humedad.</p> <p>→ Fracturación por pandeo en las costras de los muros.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>LAVADO DE LA CORONACION DE UN MURO DE MAMPOSTERIA DE ADOBE - PALENCIA</p> 	<p>LAVADO DEL NUCELO INTERNO DE LA TIERRA DE TAPIA PISADA - VALENCIA</p> 	<p>EROSION POR LAVADO EN UN MURO DE TAPIA PISADA</p> 	<p>PERDIDA DE SECCION POR LAVADO DE UN MURO TAPIAL</p> 
<p>NÚCLEO LAVADO EN UN MURO DE</p> 	<p>DESPRENDIMIENTO DE LA COSTRA DE UN MURO TAPIAL CALICOSTRADA DEBIDO AL LAVADO DEL MURO.</p> 	<p>ABOMBAMIENTO DE UN MURO DE TAPIA CALICOSTRADA POR EL LAVADO DE SU NÚCLEO INTERNO.</p> 	<p>EROSION POR EL LAVADO DE UN MURO DE MAMPOSTERIA DE ADOBE - BURGOS.</p> 


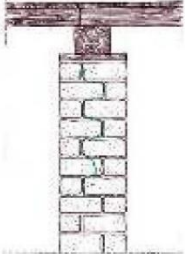



MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN EL CUERPO Y SUPERFICIE DEL MURO DE TIERRA			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Las patologías en el cuerpo del muro tienen orígenes diversos, ya sea por la extensión de daños desde la base o coronación, o por agentes externos directos. La erosión hídrica superficial, provocada por escorrentías debido a la falta de aleros o la acción combinada de lluvia y viento, genera lavado diferencial según el material: en revoques de tierra causa pérdida acelerada de capas superficiales, mientras que en morteros de cal o yeso produce una degradación más lenta pero con relieves irregulares ("escalonamiento"); en aparejos, los muros sin estabilizantes se homogenizan superficialmente, mientras que aquellos con juntas de cal o yeso acentúan desniveles entre piezas y mortero. En climas fríos, la gelifración descama superficies al congelarse el agua en los poros, y en zonas expuestas, la erosión eólica desgasta especialmente esquinas y muros sin revestimiento. Sistemas mixtos como la tapia careada muestran lavado selectivo de la tierra, dejando piedras o ladrillos en voladizo hasta fracturarse, mientras que mechinales mal sellados canalizan agua al interior, acelerando el deterioro localizado.</p>	<p>→ Falta de protección en los aleros de los muros.</p> <p>→ Inadecuada inclinación de las cubiertas.</p> <p>→ El uso de morteros heterogéneos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Tierra vs Cal.• Tierra vs Yeso. <p>→ Exposición de los muros a rafagas de vientos cargados de partículas como arena.</p> <p>→ Ciclos de hielo y deshielo en muros con contenido de humedad.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de revoques.• Aparición de relieves en el muro.• Descamación.• Microfisuras radiales. <p>→ Fase avanzada:</p> <ul style="list-style-type: none">• Exposición del núcleo estructural.• Riesgo de fractura.• Fractura de elementos careados.• Desprendimientos.	<p>→ Lavado interno de los muros.</p> <p>→ Gelificación para los climas fríos.</p> <p>→ Lavado selectivo de tierras en Tapias careadas.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p><i>EROSION DE LOS AGUAJES EN UN MURO</i></p> 	<p><i>EROSION DE MURO DE MAMPOSTERIA DE ADOBE RECIBIDO CON MORTERO DE BARRO</i></p> 	<p><i>LAVADO DE LA MASA DE TIERRA EN UN MURO DE</i></p> 	<p><i>EROSIÓN DE LOS MECHINALES EN</i></p> 
<p><i>EROSION DE MURO DE MAMPOSTERIA DE ADOBE RECIBIDO CON YESO - ZARAGOZA</i></p> 	<p><i>LAVADO SUPERFICIAL DE UN</i></p> 	<p><i>LAVADO DE LAS PIEZAS EN UN MURO DE ADOBE RECIBIDO CON MORTERO DE CAL.</i></p> 	
LESIONES POR AGENTES BIOLOGICOS			
LESIONES DERIVADAS DE ACCIONES DE ANIMALES			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Además de los agentes climáticos, considerados la principal fuente de deterioro en las construcciones de tierra, existen otros factores de índole natural que pueden contribuir al desgaste progresivo de los componentes estructurales elaborados con este material. Dentro de esta categoría de patologías, se incluyen todas aquellas alteraciones provocadas por la interacción de organismos vivos en el entorno edificado, tales como el crecimiento de flora o los efectos derivados de la actividad faunística sobre los elementos constitutivos de los muros.</p>	<p>→ Biodegradación por vegetación:</p> <p>aleros de los muros.</p> <ul style="list-style-type: none">• Crecimiento de raíces en juntas o grietas.• Crecimiento de plantas trepadoras o enredaderas.• Proliferación de musgos y líquenes. <p>→ Biodegradación por fauna:</p> <ul style="list-style-type: none">• Insectos, termitas y carcomas en muros o elementos de fibras vegetales (especialmente en los entramados).• Nidos de aves en los mechinales y/o grietas en los muros.• Agujeros en las bases de los muros hechos por roedores. <p>→ Biodegradación microbiológico:</p> <ul style="list-style-type: none">• Hongos, bacterias.• Humedad persistente.• Presencia de material orgánico.	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Manchas verdes o negras.• Rugosidad superficial.• Pérdida de cohesión por la descomposición de fibras. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aflojamiento de revoques.• Pérdida de resistencia de los muros. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fracturas en el núcleo del muro.• Erosión química por excrementos de animales.	<p>→ Humedad capilar agravada.</p> <p>→ Lavado acelerado por retenciones de agua.</p> <p>→ Fracturas por pérdida de sección del muro.</p> <p>→ Infiltración de agua por agujeros en los muros.</p> <p>→ Eflorescencias por metabolismo microbiano.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p><i>AVE ANIDADA EN UN MURO DE</i></p> 	<p><i>MURO DE ADOBE PERFORADO POR INSECTOS - SALAMANCA</i></p> 	<p><i>ANIDAMIENTO DE AVES EN UN MURO DE TAPIA.</i></p> 	

LESIONES DERIVADAS DEL DESARROLLO DE VEGETACION			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Debido a su composición orgánica y sus propiedades para la retención hídrica, los muros de tierra son vulnerables al desarrollo de organismos vegetales, algunas semillas pueden germinar en sus superficies rugosas, con aproximadamente un contenido de humedad superior al 18%, valores que favorecen la proliferación de musgos, líquenes y plantas vasculares, intensificando los ciclos de humedad/secado.</p> <p>Al mismo tiempo, la vegetación inferior puede generar la acidificación en la superficie de los muros, aumentando la absorción térmica, mientras que las raíces de plantas superiores pueden ejercer una presión mecánica en el muro, lo que conlleva a agravar las grietas. Además, la presencia de diversos hongos degrada los componentes estructurales, por ejemplo, la pudrición de color parda puede reducir la resistencia a compresión del muro estructural, y la blanda afecta su capacidad de flexibilidad.</p>	<p>→ Humedad superficial.</p> <p>→ Rugosidad de la superficie del muro.</p> <p>→ Depósito de semillas traídas por el viento o por animales.</p> <p>→ Ramas en contacto directo con el muro de tierra</p> <p>→ Temperatura adecuada para la proliferación de vegetación.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Manchas verdes o negras.• Rugosidad superficial.• Pérdida de cohesión por la muro. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fisuración por crecimiento de raíces de la vegetación.• Reducción de la densidad material del muro.• Grietas diagonales por presión radicular. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de sección en la base del muro.• Pérdida de la capacidad portante en las viviendas de entramados.• Erosión mecánica por fircción.	<p>→ Humedad capilar agravada.</p> <p>→ Lavado acelerado por retenciones de agua.</p> <p>→ Deformación estructural de los muros.</p> <p>→ Fracturas por pérdida de sección</p> <p>→ Asentamientos diferenciales en la vivienda.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>PROLIFERACIÓN DE MUSGO EN UN MURO DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE</p> 	<p>DESARROLLO DE VEGETACIÓN SUPERIOR SOBRE UNA CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE – ZARAGOZA.</p> 	<p>DESARROLLO DE MUSGO SOBRE UN MURO DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE.</p> 	<p>DESARROLLO DE VEGETACIÓN SOBRE LA SUPERFICIE DE UN MURO TAPIAL - TERUEL.</p> 
LESIONES POR AGENTES ANTROPICOS			
LESIONES PRODUCIDAS POR ACTOS VANDALICOS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Los actos vandálicos en arquitectura de tierra se manifiestan principalmente a través de los graffitis, en donde el uso de aerosoles o pinturas penetra hasta en la superficie aproximadamente unos 2 a 3 mm, y a su vez, reduce la transpirabilidad de este material en un 40% – 60%. Luego está el expolio que implica la extracción manual de elementos como ladrillos, vigas, etc, comprometiendo la integridad estructural progresivamente y generando daños colaterales con herramientas que producen fracturas radiales. Además, podemos tomar en cuenta los incendios intencionados, que en muros de tierra causan una deshidratación irreversible de las arcillas presentes en su composición al superar temperaturas de unos 600°C.</p> <p>Estos actos se ven favorecidos por factores de riesgo como la ubicación, donde edificios más cercanos a los núcleos urbanos tienen mayor probabilidad de sufrir vandalismo, especialmente en zonas con baja vigilancia e iluminación nocturna, así como por el estado de conservación, ya que las construcciones abandonadas registran con mayor frecuencia incidentes vandálicos que aquellas a las que le realizan un mantenimiento regular.</p>	<p>→ Acceso no controlado a edificios.</p> <p>→ Falta de vigilancia.</p> <p>→ Materiales inflamables en contacto con los muros (ej.: maderas, basura, etc.)</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Alteración estética.• Rugosidad superficial. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Obstaculización de poros por la pintura de los graffitis.• Pérdida de elementos estructurales.• Reducción de resistencia a <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Descamación.• Fracturas por extracción de material de forma violenta.• Carbonización de las capas superficiales.	<p>→ Biodeterioro agravado y progresivo.</p> <p>→ Inestabilidad estructural.</p> <p>→ Fisuración térmica debido a los incendios.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>GRAFFITIS EN UNA VIVIENDA DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE – VALENCIA.</p> 	<p>ESQUEMATIZACIÓN DE GRAFFITIS EN UN MURO DE TAPIA PISADA.</p> 	<p>GRAFFITIS EN UNA VIVIENDA DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE – VALENCIA.</p> 	


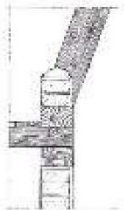

LESIONES PRODUCIDAS POR UN INADECUADO MANTENIMIENTO			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>La arquitectura de tierra exige un mantenimiento continuo y especializado debido a las características intrínsecas de sus materiales, los cuales absorben y liberan humedad requiriendo una protección constante y, como se ha visto anteriormente, posee una alta sensibilidad a la erosión ya que esta se degrada rápidamente sin la presencia de revestimientos o aleros, recalcando que la falla de un solo elemento como cubiertas o zócalos acelera en gran medida el deterioro general de la edificación.</p> <p>El abandono de estas estructuras desencadena consecuencias graves tales como la pérdida de elementos protectores como carpinterías, que expone los huecos a la intemperie y vandalismo iniciando ciclos de degradación; además, las cubiertas dañadas permiten filtraciones que pudren estructuras de madera en menos de dos años en climas húmedos; y la falta de revestimientos genera erosión por lluvia con acanaladuras de 1-3 cm anuales.</p> <p>Tanto la falta de mantenimiento como una aplicación incorrecta de este lleva a pérdida de protecciones, lo que puede permitir la entrada de agua causando lavado de muros y/o pudrición de madera en caso de entramados, seguido de colonización biológica por hongos e insectos que comprometen la resistencia estructural.</p>	<p>→ Abandono y falta de atención de los estados de conservación de las edificaciones de tierra como patrimonio.</p> <p>→ Pudrición de elementos como la madera, como en el caso de los sistemas de entramados.</p> <p>→ Desprendimiento de revocos de tierra o cal.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Entrada de agua por los agujeros en los elementos estructurales.• Filtraciones localizadas.• Generación de canales en la superficie del muro. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Erosión de alféizares.• Pérdidas parciales de cubiertas. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapso de huecos por pérdida de apoyos.• Exposición de muros al intemperie.• Exposición del núcleo estructural.• Pérdida de sección de los elementos.	<p>→ Biodeterioro por fauna y/o vegetación.</p> <p>→ Vandalismos.</p> <p>→ Humedad capilar agravada.</p> <p>→ Lavado de los paramentos de las viviendas.</p> <p>→ Erosión eólica de los muros estructurales expuestos al intemperie.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>PÉRDIDA DE LAS CARPINTERÍAS EN UN EDIFICIO – BURGOS</p> 	<p>LAVADO CON ACANALADURAS POR LA DEGRADACIÓN DEL ALERO – LEÓN</p> 	<p>EROSIÓN DE UN MURO POR EFECTO DE LA DEGRADACIÓN DEL ALERO – ÁVILA</p> 	<p>DESPRENDIMIENTO DEL RELLENO EN UN EDIFICIO DE MUROS ENTRAMADOS – SALAMANCA</p> 
<p>PÉRDIDA DE SECCIÓN POR DEGRADACIÓN DEL ALERO EN UNA CERCA DE TAPIA</p> 	<p>PÉRDIDA DEL REVESTIMIENTO EN UNA CONSTRUCCIÓN DE ADOBE</p> 	<p>DESPRENDIMIENTO DEL RELLENO DE LOS CUARTELES EN UN ENTRAMADO</p> 	
LESIONES PRODUCIDAS POR INADECUADAS REPARACIONES/ELEMENTOS IMPROPIOS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Las intervenciones inapropiadas en construcciones de tierra ocasionan perjuicios estructurales y fisicoquímicos bastante importantes, por ejemplo, los revestimientos hidrófugos (tales como los morteros de cemento o pinturas acrílicas) anulan la capacidad de transpiración del material, lo que conlleva una disminución de su permeabilidad al vapor de agua, por tanto induce a la acumulación de humedad intersticial con altos niveles de saturación, reduciendo así su resistencia mecánica a compresión; esto al mismo tiempo, al inhibir los procesos naturales de evaporación se promueve la formación de eflorescencias salinas.</p> <p>Por otro lado, la colocación incorrecta de instalaciones, tales como un cableado o luminarias, mediante perforaciones con martillos neumáticos produce fisuras radiales, mientras que la aplicación de morteros para fijaciones genera tensiones estructurales. Todos estos fenómenos se intensifican mediante mecanismos de degradación acelerada, tales como los ciclos higrotérmicos bajo barreras impermeables los cuales provocan movimientos diferenciales por expansión/contracción que desprenden los acabados superficiales, y la oxidación de componentes metálicos generando así fisuraciones en la masa mural.</p> <p>También es importante mencionar que la reparación de estos daños plantea desafíos específicos, puesto que la remoción mecánica de estos revestimientos puede provocar la pérdida de 2 – 3 centímetros del sustrato original, deteriorando aún más las propiedades conservativas de la tierra.</p>	<p>→ Aplicación de cemento o pinturas acrílicas.</p> <p>→ Perforaciones profundas con mortero a base de cemento.</p> <p>→ Uso de herramientas mecánicas bastante agresivas.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Manchas de humedad en los bordes.• Desprendimiento de los revestimientos. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de material original.• Alteración de la geometría del muro.• Fisuras radiales desde los puntos de anclaje. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de resistencia estructural.• Pérdida de resistencia• Descohesión de las capas superficiales.	<p>→ Fisuras debido a instalaciones inadecuadas.</p> <p>→ Pueden ocurrir infiltración de agua.</p> <p>→ Grandes superficies de eflorescencias.</p> <p>→ Biodeterioro acelerado.</p> <p>→ Inestabilidad estructural.</p> <p>→ Posible destrucción de unidades de mamposterías durante su retirada.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>PROBLEMAS DE ADHERENCIA EN UNA CONSTRUCCIÓN REVESTIDA CON CEMENTO – ZAMORA</p> 	<p>REPARACIÓN INADECUADA DE UN EDIFICIO DE ENTRAMADO DE MADERA – BURGOS</p> 	<p>ALTERACIÓN DEL CARÁCTER DE UNA CERCA DE TAPIA POR LA CONSTRUCCIÓN DE UN NUEVO ACCESO EN FORMA DE TORREÓN – ALBACETE</p> 	<p>ELEMENTOS IMPROPIOS INSTALADOS EN UNA CONSTRUCCIÓN DE ADOBE – PALENCIA</p> 
<p>RESARCIDO DE LAGUNAS EN EL REVESTIMIENTO CON CEMENTO</p> 	<p>INSTALACIÓN DE ELEMENTOS IMPROPIOS</p> 		

LESIONES PRODUCIDAS POR ACCION DEL FUEGO				
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS	
<p>La respuesta estructural de los materiales térreos frente a la acción del fuego exhibe notables ventajas, pero al mismo tiempo con limitaciones fundamentales; es decir, al tratarse de un material inherentemente incombustible, la tierra en estado natural conserva su estabilidad estructural incluso expuesta a temperaturas extremas de hasta 1.100°C, por tanto, estos materiales actúan como una barrera protectora para los elementos internos de la vivienda.</p> <p>No obstante, como se mencionó en apartados anteriores, es importante recalcar que, al superar el umbral térmico de 600°C, los materiales térreos experimentan un proceso irreversible de deshidroxilación de sus componentes arcillosos lo que compromete su específicamente a su capacidad portante, además de que lo hace más propenso a la microfisuración por tensiones térmicas durante un proceso de enfriamiento abrupto.</p> <p>Los componentes no térreos evidencian mayor riesgo, por ejemplo, en los sistemas de entramados, las estructuras de madera muestran una tasa de carbonización bastante elevada bajo condiciones de incendio convencional (300-500°C), pudiendo sufrir pérdidas de hasta el 80% de su resistencia a flexión al alcanzar los 300°C, mientras que los elementos fibrosos como los refuerzos de paja, sufren combustión completa en intervalos inferiores a 15 minutos al exponerse a 250°C.</p>	<p>→ Exposición directa o prolongada a llamas, con temperaturas >250°C/600°C.</p> <p>→ Combustión completa en incendios de rápida propagación.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Superficie carbonizada, aproximadamente 1 cm de espesor. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de sección resistente.• Reducción de resistencia a compresión (70% aprox.) <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapso estructural.• Fisuración poligonal o "piel de cocodrilo".• Aumento de deformaciones plásticas.• Pérdida de función de armado sistemas de mampostería de adobe o tapiales.	<p>→ Deshidratación irreversible de arcillas.</p> <p>→ Pérdida de soporte para los muros estructurales.</p> <p>→ Posible infiltración de agua a través de las grietas generadas.</p> <p>→ Fisuración por falta de cohesión en el material.</p> <p>→ Destrucción de fibras vegetales.</p> <p>→ Carbonización de elementos.</p>	
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:				
<p>CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA CON MAMPOSTERÍA DE ADOBE QUEMADA – SEGOVIA.</p> 	<p>VIVIENDA CON SISTEMA DE ENTRAMADOS TRAS UN SINIESTRO –</p> 			
DEGRADACION ESTRUCTURAL DE ARQUITECTURA EN TIERRA				
LESIONES POR ERRORES EN CONCEPCION DE LA EDIFICACION DE TIERRA				
LESIONES PRODUCIDAS DEBIDO A SOLICITACIONES EXCESIVAS				
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS	
<p>Las patologías derivadas de un diseño estructural inadecuado en construcciones de tierra evidencian vulnerabilidades críticas, ya que cuando los muros de carga presentan espesores inferiores al 10% de su altura libre (como un muro de 30 cm para 3 m de altura en edificios de más de una planta), se generan fisuras verticales por tracción en las bases y deformaciones plásticas progresivas en edificaciones de adobe no estabilizados. Además, las cargas concentradas agravan estos problemas, especialmente en casos de punzonamiento donde tensiones locales producen fisuras en forma de abanico.</p> <p>Los mecanismos de fallo se acentúan por la limitada resistencia característica del adobe, la cual sufre una fluencia lenta bajo cargas sostenidas superiores al de su capacidad, y por sistemas de transmisión de cargas deficientes donde forjados sin diafragma rígido generan diferencias entre las vigas, o incluso, la ausencia de durmientes puede concentrar esfuerzos en la superficie del muro de tierra.</p> <p>Las zonas críticas como esquinas de huecos son áreas susceptibles a este tipo de lesiones, que se ven incrementadas sus tensiones debido a la reducción de sección resistente, mientras que los encuentros entre materiales heterogéneos (como el adobe y la madera), generan puntos de debilidad estructural; no obstante, estos factores combinados demuestran la necesidad de crear diseños adaptados a las particularidades mecánicas de los materiales térreos.</p>	<p>→ Muros con poco espesor (inferiores a 1/10 de su altura).</p> <p>→ Excesivas cargas permanentes.</p> <p>→ Área de apoyo en las vigas bastante reducida.</p> <p>→ Ausencia de durmientes.</p> <p>→ Vanos sin refuerzos.</p> <p>→ Esquinas sin redondeo o sin chafalán.</p> <p>→ Concentración de esfuerzos en las esquinas de los huecos.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aparición de fisuras verticales en el primer tercio inferior del muro.• Aparición de fisuras diagonales a 45º (aprox.) desde las esquinas.• Aparición de fisuras radiales con su origen desde los apoyos. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Abultamiento por pandeo.• Desprendimientos de fragmentos. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapso por pérdida de sección.• Desplomes localizados.	<p>→ Posible infiltración por la fisuras generadas.</p> <p>→ Inestabilidad de los forjados y cubiertas.</p> <p>→ Fracturas y/o colapsos en los dinteles.</p> <p>→ Fisuraciones por escases de geometría.</p> <p>→ Punzonamiento en los apoyos.</p>	
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:				
<p>FISURACIÓN DE UN MURO DE ADOBE EN</p> 	<p>FISURACIÓN EN EL APOYO DE UNA VIGA SE DESVÍA HACIA UNA JUNTA</p> 	<p>FISURACIÓN POR APLASTAMIENTO DE UN MURO DE TAPIA.</p> 	<p>FISURACIÓN DE UN MURO DE TAPIA POR PUNZONAMIENTO EN</p> 	<p>FISURACIÓN POR PUNZONAMIENTO DE UN MURO DE TAPIA - CORDOBA</p> 

LESIONES EN EL ENTORNO DE LOS HUECOS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>El diseño de huecos en muros de tierra son puntos críticos ya que en estas zonas se generan problemas estructurales específicos debido a la concentración de tensiones en las esquinas de los vanos, donde la redistribución de cargas crea esfuerzos de tracción diagonal que derivan en fisuras ascendentes a 45°, especialmente en huecos ubicados bajo vigas de forjado o cerca de esquinas estructurales.</p> <p>Los paneles estrechos entre huecos con relaciones altura/ancho son propensos a sufrir los efectos del pandeo, lo que conlleva a una reducción de su carga admisible en comparación con un muro continuo. Por otro lado, en vanos grandes las deformaciones en los dinteles que superen L/300 son propensos a sufrir un fallo inminente, siendo especialmente críticos los dinteles de madera no reforzados y los de adobe sin refuerzo. Estos problemas se agravan por factores como la erosión de las jambas, en donde cada centímetro perdido disminuye la resistencia al vuelco, o incluso, la falta de rigidización en dinteles con empotramientos insuficientes.</p>	<p>→ Concentración de tensiones por la redistribución de cargas.</p> <p>→ Cuando el empotramiento de los dinteles es insuficiente.</p> <p>→ Por la ausencia de refuerzos verticales.</p> <p>→ El uso de materiales inadecuados.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fisuras pequeñas en las esquinas superiores de los muros. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Propagación de las fisuras hacia el centro del muro.• Pandeo del muro visible.• Aparición de fisuras en el intradós.• Generación de flechas excesivas. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fenómeno de despegue del paño superior.• Fracturación horizontal a media altura.	<p>→ Posible infiltración por la fisuras generadas.</p> <p>→ Inestabilidad de los muros.</p> <p>→ Pérdida de apoyo para los forjados.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>PAÑO DE ADOBE DAÑADO POR LA EXCESIVA DEFORMACIÓN DEL DINTEL INFERIOR – PALENCIA.</p> 	<p>COLAPSO DE UN MURO INDUCIDO POR LA DEGRADACIÓN DE LAS JAMBAS DEL ACCESO – PALENCIA.</p> 	<p>FORMACIÓN DE UN ARCO DE DESCARGA SOBRE UN VANO EN UN MURO DE TAPIA.</p> 	<p>COLAPSO DE UN MURO DE ADOBE INDUCIDO POR LA DEGRADACIÓN DE LAS JAMBAS DE UN VANO.</p> 
LESIONES PRODUCIDAS POR EL GIRO DE ELEMENTOS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Un problema importante es el giro de muros de tierra puede originarse por mecanismos como el empuje de la cubierta o el deslizamiento de la base; para el primer caso, la falta de fijación adecuada de la estructura de cubierta genera un empuje horizontal en la coronación, provocando una rotación del muro hacia el exterior, a su vez, generan fisuras características que incluye fisuras verticales en los encuentros con muros transversales y en apertura en la esquina superior. Este problema se agrava en los muros con sistemas de tapia sin trabazón en esquinas o cuando existen testeros débiles, tales como los encuentros entre el adobe y el tapial.</p> <p>Por otro lado, en el segundo mecanismo, el giro por deslizamiento de base, ocurre por cimentaciones superficiales en terrenos inclinados o en excavaciones adyacentes que reducen el apoyo lateral, manifestándose con la aparición de fisuras verticales y/o diagonales desde la base y con asentamientos diferenciales en un extremo del muro. En conclusión, ambos fenómenos comprometen gravemente la estabilidad estructural y requieren de intervenciones diferenciadas según sea su origen.</p>	<p>→ Falta de arriostramiento en la estructura de cubierta.</p> <p>→ En las esquinas de la vivienda no existe trabazón.</p> <p>→ Terrenos inestables.</p> <p>→ Cuando se realizan excavaciones adyacentes sin contenciones.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aparición de fisuras verticales.• Aparición de fisuras basales de forma ascendente. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Generación de desplomes visibles.• Inclínación global del muro. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapsos parciales o totales de la fachada de la vivienda.• Vuelcos inminentes de muros.	<p>→ Posible infiltración por la fisuras generadas.</p> <p>→ Generación de fracturas en el forjado.</p> <p>→ Giros por empujes de cubierta.</p> <p>→ Deslizamientos de la base del muro.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>GIRO DE LA FACHADA POR EMPUJE DE LA</p> 	<p>GIRO DE UNA CONSTRUCCIÓN POR DESCALCE DE SU CIMENTACIÓN –</p> 	<p>FISURACIÓN POR EMPUJE DE LA CUBIERTA DE UN EDIFICIO DE ADOBE Y TAPIA.</p> 	<p>FISURACIÓN DE UN EDIFICIO DE ADOBE Y TA-</p> 

LESIONES POR ALTERACIONES EN EL ESQUEMA PORTANTE DEL EDIFICIO			
LESIONES PRODUCIDAS DEBIDO A SOLICITACIONES EXCESIVAS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>La longevidad característica de numerosas edificaciones vernáculas conduce frecuentemente a procesos de ampliación motivados ya sea por la evolución de las necesidades habitacionales o funcionales, y cuando estas modificaciones implican un desarrollo vertical mediante sobreelevaciones, es probable que se genere un aumento significativo de las cargas gravitatorias que deben ser absorbidas por los muros y posteriormente transmitidas a la cimentación. Junto a esto, es importante considerar el efecto del envejecimiento material y la exposición prolongada a factores ambientales puede ocasionar una merma progresiva de la capacidad portante original, que evidencian el estado de sobreesfuerzo mediante patrones de fisuración por compresión análogos a los descritos anteriormente.</p> <p>Por otro lado, cuando se suprimen algunos componentes estructurales primarios, tales como pilares o sectores de muro de carga, puede desencadenarse una redistribución forzada de los flujos tensionales dentro del sistema constructivo, generando frecuentemente estados de carga críticos en los elementos remanentes. En estos casos las condiciones de sobrecarga se materializan preferentemente a través de mecanismos de fallo diferenciados tales como el fenómeno de aplastamiento localizado en los muros sometidos a compresión excesiva, así como las manifestaciones de efectos de pandeo en los soportes verticales esbeltos.</p>	<p>→ Aumento de carga sobre la resistencia residual del muro.</p> <p>→ Eliminación de muros adyacentes sin reforzar los soportes.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fisuras verticales finas. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Abultamiento de los muros.• Deformaciones visibles.• Si existieran columnas circulares aparecerían fisuras en espiral. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapsos por agotamiento de la sección resistente.	<p>→ Posible infiltración por la fisuras</p> <p>→ Inestabilidad de los forjados y cubiertas.</p> <p>→ Fisuras de aplastamiento por sobre elevación.</p> <p>→ Pandeo de columnas por redistribución.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<div><div><p>GIRO DE LA FACHADA POR EMPUJE DE LA CUBIERTA – SALAMANCA CONSTRUCCIÓN DE PILARES DE LADRILLO PARA EVITAR EL APLASTAMIENTO DEL MURO EN LA</p></div><div><p>FISURACIÓN POR PANDEO DE UNA COLUMNA DE ADOBE SOBRECARGADA.</p></div></div>			
LESIONES EN EL ENTORNO DE LOS HUECOS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>La creación y modificación de vanos constituye una intervención recurrente en procesos de adaptación en la arquitectura de tierra a nuevas exigencias funcionales y de habitabilidad; no obstante, estas operaciones requieren especial precaución por su potencial para generar múltiples patologías estructurales, esto radica en que la ejecución de nuevos huecos en paños murales sometidos a elevadas solicitaciones puede provocar una redistribución crítica de tensiones hacia zonas debilitadas, lo que contribuye a acelerar los procesos de fisuración e incluso induciendo mecanismos de fallo progresivo que comprometan la estabilidad parcial de la edificación.</p> <p>Mientras que la apertura de vanos en áreas estructuralmente críticas acelera la degradación de los tramos afectados, también suele ocurrir por la acumulación progresiva de perforaciones en muros aparentemente estables generando una transferencia de cargas cada vez más concentrada en los sectores residuales portantes. Este tipo de acciones incrementa el estado tensional de estos paños remanentes, pudiendo conducir a situaciones de fatiga material, y dichas condiciones se ven agravadas por la pérdida concomitante de rigidez global en la sección modificada, predisponiendo a deformaciones diferenciales en los elementos superiores. Además, entre las intervenciones más habituales destaca la ampliación de vanos existentes para acomodar accesos vehiculares o mejorar condiciones lumínicas. Estas modificaciones introducen notables esfuerzos flectores en las fábricas superiores que frecuentemente exceden la capacidad resistente de los sistemas de dintelado tradicional.</p>	<p>→ Eliminación de sección resistente sin haberlo reforzado previamente.</p> <p>→ Hay una proximidad a los elementos cargados (vigas o esquinas).</p> <p>→ Distancias cortas entre la ubicación de los huecos, sobre todo en muros de espesores pequeños.</p> <p>→ Empelar luces de 1.5 veces a la luz original sin colocar refuerzos.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aparición de fisuras finas en el muro.• Aparición de fisuras horizontales entre los vanos. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Propagación de fisuras hacia la zona central del muro.• Pandeo de los paños intermedios. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Despegue del paño superior.• Flechas visibles.• Fisuras de tracción en el intradós del muro.	<p>→ Posible infiltración de agua por las fisuras.</p> <p>→ Inestabilidad de los forjados y cubiertas.</p> <p>→ Fisuración por apertura de huecos.</p> <p>→ Agotamiento por vanos múltiples.</p> <p>→ Falla en los dinteles ampliados.</p> <p>→ Caída de revoques superiores.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<div><div><p>FISURACIÓN DEL MURO DE ADOBE POR LA AMPLIACIÓN DE UN VANO – JAÉN.</p></div><div><p>FORMACIÓN DE UN ARCO DE DESCARGA SOBRE UN HUECO – CIUDAD REAL.</p></div><div><p>FISURACION DE UN MURO DE ADOBE DEBIDO A HUECO PUERTA – BURGOS.</p></div></div>			

LESIONES PRODUCIDAS POR EL GIRO DE ELEMENTOS			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Las fisuras asociadas a la rotación de elementos constructivos son daños recurrentes y de gran severidad en las construcciones de tierra, los perjuicios relacionados con el desplazamiento del muro en su zona basal y con la presión ejercida por la cubierta en su extremo superior, también pueden originarse debido a modificaciones en la estructura a lo largo de su ciclo de vida. La edificación de nuevos espacios por debajo del nivel de sustentación de los muros o la remoción de terreno en lotes adyacentes para la ejecución de nuevas obras pueden inducir el deslizamiento de las fundaciones; además, las lesiones derivadas de estos desplazamientos pueden dar paso a la formación de grietas verticales en la intersección del elemento rotado con muros perpendiculares y el derrumbe parcial de la edificación; asimismo, las excavaciones en el entorno para el tendido de infraestructuras comunitarias o el mantenimiento de la red vial pueden generar efectos similares a estas lesiones.</p> <p>Otra situación recurrente es la variación en la presión ejercida por la cubierta inclinada sobre la parte superior de los muros que la soportan, ya que suele estar ligada al deterioro de la unión con la viga de cumbrera. Además de estos procesos, la ejecución de ampliaciones, añadidos verticales y reformas estructurales de envergadura puede ocasionar aumentos significativos en las cargas transmitidas por la cimentación al suelo en determinados sectores, y con este motivo, estas modificaciones pueden dar lugar a hundimientos desiguales, quienes se evidenciarán mediante la aparición de fisuras diagonales en los ángulos de la vivienda.</p>	<p>→ Errores de diseño.</p> <p>→ Cálculos insuficientes para la estabilidad de los muros.</p> <p>→ Debido a intervenciones realizadas posteriormente.</p> <p>→ Excavaciones adyacentes a la vivienda.</p> <p>→ Ampliaciones o sobrelevaciones no previstas en el proyecto original.</p> <p>→ Ampliaciones o sobrelevaciones</p> <p>→ Excavaciones circundantes, como en los mantenimientos de viarios.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aparición de microfisuras verticales en los encuentros entre los elementos.• Aparición de ligera deformación en los apoyos de la cubierta.• Primeros signos de deslizamientos en la base de los muros afectados. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Propagación de fisuras diagonales en las esquinas.• Pérdida de adherencia en los encuentros de los elementos.• Deformaciones visibles de los elementos. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapso parcial o total de elementos estructurales.• Formación de mecanismos articulados.• Inestabilidad global.	<p>→ Además de lesiones visibles, puede generarse problemas de infiltración de aguas.</p> <p>→ Fisuración en las esquinas o ángulos por asientos diferenciales.</p> <p>→ Inestabilidad global de la edificación.</p> <p>→ Deformaciones en los muros.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>CONSTRUCCIÓN DE ADOBE DESCALZADA POR LA AMPLIACIÓN DEL VIARIO – ZARAGOZA.</p> 	<p>SOBREELEVACIÓN DE UNA PARTE DE UNA CONSTRUCCIÓN – TERUEL.</p> 	<p>GIRO DE LA FACHADA POR EMPUJE DE LA CUBIERTA – CIUDAD REAL.</p> 	
LESIONES PRODUCIDAS POR PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD MATERIAL			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Al abordar las patologías estructurales ocasionadas por modificaciones en los sistemas de carga de la edificación, es importante no dejar de lado los perjuicios de la respuesta mecánica entre los componentes originales del inmueble heterogéneos y los materiales incorporados durante trabajos de rehabilitación en esta misma condición.</p> <p>La utilización de elementos con características de rigidez o coeficientes de dilatación térmica diferentes a los de la tierra puede generar fisuras en las zonas de transición, asociadas a movimientos por expansión térmica o deformaciones no uniformes; además, estas deficiencias suelen manifestarse con especial rapidez en intervenciones que incorporan materiales contemporáneos tales como hormigón o acero, en edificaciones con muros de tierra. Son por estas razones que es crucial que los materiales empleados en las restauraciones presenten propiedades mecánicas y térmicas compatibles con los elementos existentes, garantizando además una correcta conexión estructural entre ambos sistemas.</p>	<p>→ Uso de materiales heterogéneos en procesos constructivos.</p> <p>→ Uso inadecuado de uniones entre materiales nuevos y los existentes.</p> <p>→ Ausencia de juntas de dilatación o capas de transición.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aparición de microfisuras en las zonas próximas a los encuentros entre los elementos.• Desprendimiento de morteros.• Signos iniciales de tensiones diferenciales. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Propagación de las fisuras por las fibras más débiles del muro.• Pérdida de adherencia entre los materiales.• Se generan especies de cámaras de aire• Deformaciones térmicas. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Desprendimiento de material y fragmentos.• Pérdida de capacidad portante en las uniones.• Colapsos localizados por fatiga.	<p>→ Además de lesiones visibles, puede generarse problemas de infiltración de aguas.</p> <p>→ Si hay elementos metálicos, habrá corrosión.</p> <p>→ Colapsos locales en los muros.</p> <p>→ Pérdida de la autenticidad estética en restauraciones patrimoniales.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD ENTRE UN MURO DE TIERRA Y UN TRASDOSADO DE LADRILLO – TERUEL.</p> 	<p>PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD ENTRE UN MURO DE TIERRA Y UN ENFOSCADO – VALENCIA.</p> 		

LESIONES POR ACCIONES DEL ENTORNO DE LA EDIFICACION			
DESCRIPCION:	CAUSAS	EFFECTOS	DAÑOS RELACIONADOS
<p>Al margen de la intervención humana, factores como el envejecimiento natural o las condiciones ambientales del entorno donde se ubica un edificio pueden desencadenar procesos patológicos que deriven en fisuras y deformaciones estructurales, además, la fatiga material y el deterioro progresivo de los componentes constructivos durante la vida útil de la edificación reducen gradualmente su capacidad resistente, forzando así a que la estructura se adapte mediante deformaciones que redistribuyan las cargas hacia los elementos y sus configuraciones con mayor estabilidad; cabe señalar que este fenómeno afecta particularmente a los elementos sometidos a esfuerzos de tracción, pudiendo provocar deformaciones progresivas o incluso su fallo estructural.</p> <p>De manera análoga, la carga permanente ejercida por el edificio sobre el terreno induce un proceso de compactación gradual, generando asentamientos continuos en la cimentación, luego, cuando las cargas se transmiten de manera desigual al subsuelo o cuando este presenta estratigrafías heterogéneas con capas blandas de espesor irregular, pueden desarrollarse asentamientos diferenciales, y es en estas circunstancias en que la distorsión del terreno de apoyo introduce tensiones estructurales significativas, ocasionando graves fisuraciones y deformaciones en el edificio.</p>	<p>→ Pérdida de resistencia mecánica por envejecimiento de los materiales.</p> <p>→ Acción de agentes atmosféricos.</p> <p>→ Compactación natural de los suelos bajo cargas sostenidas.</p> <p>→ Un terreno heterogéneo.</p> <p>→ Si es un suelo arcilloso, cuando pierde humedad generando retracción.</p> <p>→ Humedad capilar ascendente en los muros de tierra.</p>	<p>→ Fase inicial:</p> <ul style="list-style-type: none">• Aparición de microfisuras en los elementos sometidos a tracción.• Deformaciones plásticas sutiles.• Si existen elementos metálicos, se observarán primeros indicios de oxidación.• Ligera inclinación de elementos verticales. <p>→ Fase intermedia:</p> <ul style="list-style-type: none">• Incremento de flechas (viga y losas).• Pérdida de sección efectiva.• Fisuración activa en zonas de tensiones máximas.• Atasco de puertas o ventanas.• Fisuración diagonales en las esquinas de los huecos. <p>→ Fase final:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colapso de elementos traccionados• Formación de rótulas plásticas.• Inestabilidad global del edificio.• Inclinaciones peligrosas.• Fracturas de elementos de cimentaciones.	<p>→ Inestabilidad de los muros portantes.</p> <p>→ Fallos estructurales en cimentaciones.</p> <p>→ Degradaciones progresivas.</p> <p>→ Elemento estructurales horizontales fallando o colapsados.</p> <p>→ Desplomes superiores a 1/500.</p>
REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LAS PATOLOGÍAS:			
<p>DEGRADACIÓN DE LA SUBESTRUCTURA DE MADERA DE UN ENTRAMADO – SALAMANCA.DE LADRILLO – TERUEL.</p> 	<p>SALIDA DE PLANO DE LA IMPRENTA DE MADERA EN UN MURO ENTRAMADO.</p> 	<p>INESTABILIDAD POR LA PÉRDIDA DE SECCIÓN</p> 	<p>INESTABILIDAD DE APOYO EN EL TERRENO – PALENCIA.</p> 