

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales
autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray,
provincia Andahuaylas y región Apurímac - 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Kelvin Jack CARDENAS BERROCAL

ASESOR:

Msc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO - PERÚ

2025

RESUMEN

La presente investigación analizó la vulnerabilidad sísmica mediante el modelamiento numérico no lineal en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas, región Apurímac. El estudio evalúa el comportamiento estructural de seis viviendas representativas empleando el análisis no lineal estático pushover en el software DIANA FEA, contrastando los resultados con la metodología cualitativa de las fichas INDECI y determinando el nivel de desempeño sísmico según la filosofía SEAOC Vision 2000. Metodológicamente, se adoptó un enfoque cuantitativo con alcance explicativo y diseño no experimental, seleccionando seis viviendas de adobe de dos y tres niveles mediante muestreo no probabilístico por conveniencia. Los instrumentos principales incluyeron fichas de verificación INDECI (FV-001INDECI-2010.03.29), levantamiento arquitectónico con modelamiento previo en Autodesk Revit, y análisis numérico mediante el modelo constitutivo *Engineering Masonry Model* (EMM) en DIANA FEA, calibrado con el ensayo experimental MUENSR de la Pontificia Universidad Católica del Perú (error: 1.55 %). La bilinealización de las curvas de capacidad se realizó según la metodología ASCE 41-17 y la sectorización del desempeño sísmico según los criterios del SEAOC Vision 2000. Los resultados demuestran que las viviendas presentan comportamiento estructural frágil con ductilidades entre 2.35 y 11.25, mecanismos de falla por corte diagonal con anchos de grieta de hasta 90.50 mm, y derivas de fluencia entre 0.03 % y 0.37 %. Respecto a la vulnerabilidad según INDECI, cinco viviendas fueron clasificadas en el nivel MUY ALTO (25 a 39 puntos) y una en el nivel ALTO (24 puntos). Respecto al desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000, la Vivienda V-01 alcanza nivel *Funcional* en ambas direcciones, la Vivienda V-02 presenta nivel *Funcional* en dirección X y *Resguardo de vida* en dirección Y, y las Viviendas V-03 a V-06 presentan nivel *Resguardo de vida* en ambas direcciones. La investigación confirma que el modelamiento numérico no lineal con el modelo constitutivo EMM, complementado con la filosofía SEAOC Vision 2000, constituye una herramienta válida para superar las limitaciones de las metodologías cualitativas y fundamentar técnicamente las estrategias de mitigación del riesgo sísmico en construcciones de adobe.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, adobe, análisis pushover, DIANA FEA, INDECI, SEAOC Vision 2000, ASCE 41-17, Engineering Masonry Model.

ABSTRACT

The present research analyzed seismic vulnerability through nonlinear numerical modeling in self-built rural adobe dwellings in the district of Huancaray, Andahuaylas province, Apurímac region. The study evaluated the structural behavior of six representative dwellings using nonlinear static pushover analysis in DIANA FEA software, contrasting the results with the qualitative methodology of INDECI verification forms and determining the seismic performance level according to the SEAOC Vision 2000 philosophy. Methodologically, a quantitative approach with explanatory scope and non-experimental design was adopted, selecting six adobe dwellings of two and three stories through non-probabilistic convenience sampling. The main instruments included INDECI verification forms (FV-001INDECI-2010.03.29), architectural survey with prior modeling in Autodesk Revit, and numerical analysis using the *Engineering Masonry Model* (EMM) constitutive model in DIANA FEA, calibrated with the MUENSR experimental test from the Pontifical Catholic University of Peru (error: 1.55 %). The bilinearization of capacity curves was performed according to ASCE 41-17 methodology and the seismic performance sectorization according to SEAOC Vision 2000 criteria.

The results demonstrated that the dwellings exhibited fragile structural behavior with ductilities between 2.35 and 11.25, diagonal shear failure mechanisms with crack widths up to 90.50 mm, and yield drifts between 0.03 % and 0.37 %. Regarding vulnerability according to INDECI, five dwellings were classified at the VERY HIGH level (25 to 39 points) and one at the HIGH level (24 points). Regarding seismic performance according to SEAOC Vision 2000, Dwelling V-01 achieved the *Functional* level in both directions, Dwelling V-02 presented *Functional* in the X direction and *Life Safety* in the Y direction, and Dwellings V-03 to V-06 presented the *Life Safety* level in both directions. The research confirmed that nonlinear numerical modeling with the EMM constitutive model, complemented with the SEAOC Vision 2000 philosophy, constitutes a valid tool to overcome the limitations of qualitative methodologies and technically support seismic risk mitigation strategies in adobe constructions.

Keywords: Seismic vulnerability, adobe, pushover analysis, DIANA FEA, INDECI, SEAOC Vision 2000, ASCE 41-17, Engineering Masonry Model.

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones de adobe constituyen uno de los sistemas constructivos más extendidos a nivel mundial y, paradójicamente, uno de los más vulnerables frente a solicitaciones sísmicas. Se estima que aproximadamente un tercio de la población mundial habita en viviendas construidas con tierra cruda, proporción que supera el cincuenta por ciento en países en desarrollo. Esta realidad adquiere especial relevancia cuando se considera que gran parte de estas construcciones se localizan en regiones de alta y moderada sismicidad, donde el comportamiento frágil del adobe ante cargas horizontales ha ocasionado pérdidas humanas devastadoras a lo largo de la historia. Pese a los avances en técnicas de reforzamiento desarrollados en las últimas décadas, las edificaciones de adobe en Latinoamérica y otras regiones del mundo continúan expuestas a un riesgo elevado, situación que demanda una evaluación sistemática de su vulnerabilidad estructural.

El Perú representa un caso emblemático de esta problemática. El país se ubica en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las zonas de mayor actividad sísmica del planeta, donde la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana genera condiciones geodinámicas propicias para la ocurrencia de terremotos de gran magnitud. Simultáneamente, el adobe constituye un material de construcción profundamente arraigado en la cultura andina, empleado desde épocas prehispánicas y que aún hoy representa un porcentaje significativo del parque habitacional nacional. En departamentos de la sierra como Apurímac, Ayacucho, Cusco y Huancavelica, las condiciones económicas, la disponibilidad de materiales locales y la tradición constructiva favorecen la persistencia de este sistema, configurando un escenario donde millones de personas habitan estructuras potencialmente vulnerables ante eventos sísmicos.

El distrito de Huancaray, ubicado en la provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac, ejemplifica esta realidad. La localidad se encuentra clasificada dentro de la Zona Sísmica 2 según la normativa peruana vigente, lo cual implica un nivel de peligro sísmico moderado que históricamente ha sido subestimado. El parque habitacional del distrito está conformado mayoritariamente por viviendas de adobe edificadas sin asesoramiento técnico profesional, siguiendo prácticas constructivas transmitidas generacionalmente que, si bien responden a condiciones climáticas y culturales locales, frecuentemente presentan deficiencias estructurales significativas.

La motivación principal de este trabajo radica en que los pobladores de viviendas de adobe en áreas rurales andinas enfrentan un riesgo que frecuentemente permanece invisibilizado hasta que un evento catastrófico evidencia las consecuencias de la falta de prevención. Mediante la aplicación de herramientas de análisis estructural avanzado a casos representativos del distrito de Huancaray, esta investigación busca aportar conocimiento técnico que contribuya a reducir la brecha existente entre el desarrollo de metodologías de evaluación y su aplicación efectiva en los contextos donde más se necesitan.

A mi mamá, mi mayor fortaleza e inspiración. Gracias por tu amor incondicional, por tus palabras que curan todo. Esta investigación también nace de ti, porque fuiste mi refugio cuando flaqueé, impulso cuando el camino se volvió empinado y esperanza cuando dudé. Cada logro mío lleva tu huella.

A mi papá, pilar fundamental en mi vida y ejemplo silencioso de fortaleza. Gracias por enseñarme a luchar con humildad y disciplina, por caminar a mi lado incluso en silencio y por estar siempre con una palabra de aliento cuando más la necesité.

A mis hermanos (Anel y Fray), mis compañeros de vida. Gracias por su cariño infinito, por su paciencia y por ser refugio en los momentos difíciles, incluso cuando las palabras no alcanzaban y el dolor pesaba más que la fuerza.

AGRADECIMIENTOS

Alcanzar esta meta académica representa la culminación de años de esfuerzo, dedicación y aprendizaje continuo. Este logro no habría sido posible sin el aporte invaluable de personas e instituciones que, de diversas maneras, contribuyeron a mi formación profesional y al desarrollo de esta investigación. A todas ellas expreso mi más sincero reconocimiento.

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, institución que me acogió y se convirtió en mi segundo hogar durante estos años de formación universitaria. Dentro de sus aulas y laboratorios encontré el espacio propicio para cultivar conocimientos, forjar amistades y descubrir mi vocación por la ingeniería estructural. Los valores institucionales de compromiso social y excelencia académica quedaron grabados en mi formación y guiarán mi ejercicio profesional.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por dotarme de las herramientas teóricas, prácticas y metodológicas que hoy sustentan mi perfil como ingeniero. La formación recibida abarcó no solo aspectos técnicos del diseño y análisis estructural, sino también principios éticos y de responsabilidad social que considero fundamentales en el quehacer ingenieril. Los laboratorios, bibliotecas y espacios de estudio facilitaron el desarrollo de competencias que resultaron esenciales para esta investigación.

Expreso un agradecimiento especial al Ing. Edmundo Canchari Gutierrez, asesor de esta investigación, cuya guía resultó determinante para la consecución de los objetivos planteados. Su amplia trayectoria en el campo de la ingeniería estructural y su dominio de las técnicas de modelamiento numérico fueron pilares fundamentales en la orientación metodológica de este trabajo. Desde las primeras etapas de formulación del problema hasta la interpretación de resultados, su acompañamiento fue constante y enriquecedor. Agradezco su disposición para atender consultas, su paciencia ante mis inquietudes y su capacidad para señalar el camino cuando las dificultades parecían insuperables. Sus observaciones críticas y sugerencias oportunas elevaron sustancialmente la calidad técnica y científica de esta investigación, contribuyendo además a fortalecer mis habilidades como investigador.

Al Ing. Rocky Giban Ayala Bizarro y al Ing. Javier Francisco Taipe Carbajal, distinguidos profesionales que conformaron el jurado evaluador de esta tesis, les expreso mi gratitud por el tiempo y dedicación invertidos en la revisión minuciosa de este documento. Sus cuestionamientos técnicos, aportes metodológicos y recomendaciones permitieron identificar aspectos susceptibles de mejora y profundizar en elementos que inicialmente no habían sido considerados con suficiente detalle. La rigurosidad académica con que abordaron la evaluación evidencia su compromiso con la formación de profesionales competentes y su interés genuino por elevar los estándares de investigación en nuestra escuela profesional. Sus contribuciones enriquecieron notablemente el contenido, estructura y alcance de los resultados presentados.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	VII
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Descripción del problema	4
1.1.1 A nivel mundial	4
1.1.2 A nivel nacional	5
1.1.3 A nivel regional	5
1.2 Delimitación del problema	7
1.2.1 Espacial (geográfica)	7
1.2.2 Temporal	8
1.2.3 Temática y unidad de análisis	10
1.3 Formulación del problema	11
1.3.1 Problema general	11
1.3.2 Problemas específicos	11
1.4 Justificación e importancia	11
1.5 Limitaciones de la investigación	13
1.6 Objetivos de la investigación	14
1.6.1 Objetivo general	14
1.6.2 Objetivos específicos	14
2 MARCO TEÓRICO	15
2.1 Antecedentes	15
2.1.1 Investigaciones internacionales.	15
2.1.2 Investigaciones nacionales	23
2.2 Bases teóricas	31
2.2.1 Vulnerabilidad sísmica	31
2.2.2 Contexto tectónico y sismicidad histórica del Perú	33
2.2.3 Peligro sísmico y zonificación según la NTE E.030.	35
2.2.4 Métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica	36
2.2.5 Método del índice de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini	39
2.2.6 Construcciones de adobe	41
2.2.7 Vulnerabilidad sísmica en estructuras de adobe	44
2.2.8 Normativa peruana NTE E.080 para construcciones de tierra	46
2.2.9 Curvas de fragilidad y estados de daño.	48
2.3 Marco conceptual	50
2.3.1 Método de los elementos finitos (FEM).	50
2.3.2 Comportamiento no lineal de materiales	51
2.3.3 Estrategias de modelamiento para mampostería	52
2.3.4 Total Strain Crack Model (TSCM).	53
2.3.5 Análisis pushover (estático no lineal)	55

2.3.6	Indicadores de desempeño sísmico	57
2.3.7	Software DIANA FEA	58
2.3.8	Evaluación cualitativa de vulnerabilidad sísmica: Metodología INDECI	61
2.3.9	Filosofía de desempeño sísmico: SEAOC Vision 2000	62
3	MARCO METODOLÓGICO	66
3.1	Enfoque de la investigación	66
3.2	Alcance de la investigación	66
3.3	Diseño de la investigación	67
3.4	Población y muestra	67
3.4.1	Población	67
3.4.2	Muestra	68
3.4.3	Criterios de selección	68
3.4.4	Procedimiento de selección de la muestra	69
3.4.5	Justificación del tamaño muestral	69
3.5	Hipótesis	70
3.5.1	Hipótesis general	70
3.5.2	Hipótesis específicas	70
3.6	Operacionalización de variables	70
3.7	Variables	70
3.7.1	Definición conceptual de variables	70
3.7.2	Dimensiones	71
3.7.3	Indicadores	72
3.8	Técnicas e instrumentos	74
3.8.1	Técnicas de investigación	74
3.8.2	Instrumentos de recolección de datos	76
3.9	Validez y confiabilidad de instrumentos	78
3.9.1	Ficha de evaluación de vulnerabilidad sísmica INDECI	78
3.9.2	Ficha de levantamiento geométrico	79
3.9.3	Instrumentos de medición	79
3.9.4	Software DIANA FEA	80
3.9.5	Parámetros mecánicos del adobe	81
3.10	Desarrollo del trabajo de tesis	82
3.10.1	Caracterización del área de estudio	82
3.10.2	Selección de las viviendas de estudio	82
3.10.3	Levantamiento arquitectónico y estructural	86
3.10.4	Instrumentos de recolección de datos	86
3.10.5	Resultados de la evaluación INDECI	87
3.10.6	Modelamiento previo en Autodesk Revit	90
3.11	Modelamiento numérico en DIANA FEA	95
3.11.1	Generalidades del software DIANA FEA	95

3.11.2	Modelos constitutivos para mampostería en DIANA FEA	95
3.11.3	Total Strain Based Crack Model (TSCM)	95
3.11.4	Engineering Masonry Model (EMM)	95
3.12	Calibración del modelo numérico	96
3.12.1	Ensayo experimental de referencia	96
3.12.2	Procedimiento de modelamiento en DIANA FEA	97
3.12.3	Resultados de la calibración	105
3.12.4	Resumen de propiedades mecánicas calibradas	109
3.13	Modelamiento numérico de las viviendas de estudio	111
3.13.1	Consideraciones generales del modelamiento	111
3.13.2	Vivienda V-01	111
3.13.3	Vivienda V-02	125
3.13.4	Vivienda V-03	140
3.13.5	Vivienda V-04	147
3.13.6	Vivienda V-05	154
3.13.7	Vivienda V-06	161
3.13.8	Resumen general de resultados del análisis pushover.	168
4	RESULTADOS	171
4.1	Análisis de resultados	171
4.1.1	Comparación de capacidad resistente	171
4.1.2	Evaluación del nivel de desempeño sísmico.	171
4.1.3	Correlación con la evaluación INDECI	172
4.1.4	Mecanismos de falla identificados.	173
4.2	Contrastación de hipótesis	174
4.2.1	Contrastación de hipótesis específica 1.	174
4.2.2	Contrastación de hipótesis específica 2.	177
4.2.3	Contrastación de hipótesis específica 3.	179
4.2.4	Contrastación de hipótesis general	182
5	CONCLUSIONES	185
5.1	Conclusiones.	185
5.1.1	Conclusión del objetivo específico 1	185
5.1.2	Conclusión del objetivo específico 2	185
5.1.3	Conclusión del objetivo específico 3	186
5.1.4	Conclusión del objetivo general.	187
5.2	Recomendaciones	188
5.2.1	Recomendaciones para el modelamiento numérico.	188
5.2.2	Recomendaciones de reforzamiento estructural para viviendas de adobe	189
5.3	Trabajos futuros	192

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
6 ANEXOS	203
6.1 Panel fotográfico: Recolección de fotografías en campo	203
6.2 Matriz de consistencia y operacionalización	209
ANEXOS	209
Anexo 1: Matriz de consistencia	209
Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables	212

LISTA DE FIGURAS

1	Delimitación espacial de la zona de estudio	7
2	Delimitación espacial de la zona de estudio	7
3	Cronograma de actividades de la investigación	9
4	Evolución cronológica de investigaciones sobre análisis no lineal y vulnerabilidad sísmica en estructuras de mampostería y adobe	21
5	Evolución cronológica de investigaciones nacionales sobre vulnerabilidad sísmica en adobe	29
6	Iglesias de Adobe afectadas por sismos: (a) Iglesia de Ichupampa después del terremoto de Arequipa-Perú en 2016[3] y (b) Iglesia de Miska después del terremoto de Paruro-Peru	31
7	Contexto tectónico del Perú: subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana	33
8	Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras	37
9	Típica vivienda de adobe del Cusco.	41
10	Proceso tradicional de fabricación de adobes en el Perú	42
11	Construcción con refuerzo de caña en Perú: a) Colocación de refuerzo de caña, b) Refuerzo vertical y horizontal, c) Alambre de púas como refuerzo horizontal, y d) Vivienda reforzada con caña y pilastras.	42
12	Panorama general de la metodología para la evaluación sísmica realizada en la iglesia de Andahuaylillas-Cusco.	45
13	Normativa peruana NTE E.080 para construcciones de tierra.	46
14	Esquemas de refuerzo con caña para adobe.	47
15	Curvas de fragilidad típicas para estructuras	49
16	Método de elementos finitos en estructuras	50
17	Comportamiento no lineal de los materiales	52
18	Análisis no lineal adaptativo en estructuras	56
19	Modelado de elementos finitos de DIANA	59
20	Vivienda V-01: Edificación de adobe de tres niveles	83
21	Vivienda V-02: Edificación de adobe de dos niveles en zona urbana de Huancaray	83
22	Vivienda V-03: Edificación de adobe de dos niveles con cobertura de calamina	84
23	Vivienda V-04: Edificación de adobe de dos niveles con balcón de madera	84
24	Vivienda V-05: Edificación de adobe de dos niveles en esquina, zona urbana de Huancaray	85
25	Vivienda V-06: Edificación de adobe de dos niveles con configuración rectangular alargada, zona urbana de Huancaray	85
26	Modelo Revit de la Vivienda V-01	91
27	Modelo Revit de la Vivienda V-02	91
28	Modelo Revit de la Vivienda V-03	92
29	Modelo Revit de la Vivienda V-04	92
30	Modelo Revit de la Vivienda V-05	93

31	Modelo Revit de la Vivienda V-06	94
32	Elevación del muro de adobe sin refuerzo (MUENSR) utilizado para calibración .	96
33	Geometría del muro de adobe con vano de ventana elaborada en AutoCAD . . .	97
34	Proceso de carga del archivo de geometría en DIANA FEA	98
35	Geometría del muro importada en DIANA FEA como superficies planas	98
36	Extrusión de la geometría plana a elemento sólido tridimensional	99
37	Selección del modelo constitutivo Engineering Masonry Model en DIANA FEA . .	99
38	Modelo de falla por corte basado en fricción de Coulomb en DIANA FEA	101
39	Asignación del material 3DAdobe a los elementos sólidos del modelo	102
40	Definición de condiciones de empotramiento en la base del muro	102
41	Mallado de elementos finitos del muro de adobe con elementos sólidos	103
42	Definición de combinaciones de carga para análisis secuencial	103
43	Configuración del método iterativo Newton-Raphson y criterios de convergencia	104
44	Visualización de las cargas aplicadas al modelo de elementos finitos	104
45	Progreso de ejecución del análisis no lineal en DIANA FEA	105
46	Selección de pasos de carga para visualización de resultados	105
47	Campo de desplazamientos horizontales (TDtX) en el muro de adobe	106
48	Distribución de deformaciones por agrietamiento (Crack Strains Eknn)	106
49	Comparación del patrón de agrietamiento: Modelo numérico vs. ensayo experimental	107
50	Patrón de agrietamiento en etapa inicial del análisis pushover	107
51	Patrón de agrietamiento en carga máxima del análisis pushover	108
52	Patrón de agrietamiento en estado último del análisis pushover	108
53	Modelo geométrico tridimensional de la Vivienda V-01 importado en DIANA FEA	112
54	Vista frontal del modelo geométrico de la Vivienda V-01	112
55	Definición de propiedades del material de madera (Eucalipto) en DIANA FEA . .	114
56	Modelo de la Vivienda V-01 con materiales asignados	115
57	Casos de carga definidos para el análisis de la Vivienda V-01	116
58	Visualización de las cargas de techo aplicadas en el modelo	116
59	Mallado de elementos finitos de la Vivienda V-01	117
60	Primer modo de vibración de la Vivienda V-01 ($f = 3.2375$ Hz)	117
61	Campo de desplazamientos TDtX en el estado de colapso - Dirección X	118
62	Patrón de agrietamiento ponderado (Ekwnn) en la Vivienda V-01 - Dirección X .	118
63	Curva desplazamiento vs. factor de carga obtenida de DIANA FEA	119
64	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-01	119
65	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X	120
66	Sectorización de desempeño SEAOC - Dirección X - Vivienda V-01	121
67	Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-01	122
68	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-01	122
69	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y	123
70	Sectorización de desempeño SEAOC - Dirección Y - Vivienda V-01	124

71	Modelo geométrico tridimensional de la Vivienda V-02 con cobertura a dos aguas	126
72	Modelo mallado de la Vivienda V-02 en DIANA FEA	126
73	Asignación de materiales en el modelo de la Vivienda V-02	127
74	Detalle del mallado de elementos finitos de la Vivienda V-02	127
75	Definición de combinaciones de carga para la Vivienda V-02	128
76	Configuración de los pasos de carga para el análisis pushover	129
77	Configuración del control de longitud de arco (Arc-length control)	129
78	Campo de desplazamientos TDtX - Load-step 1 (inicio del análisis)	130
79	Campo de desplazamientos TDtX - Load-step 15	130
80	Campo de desplazamientos TDtX con vectores nodales - Load-step 15	130
81	Campo de desplazamientos TDtX en el estado de colapso - Dirección X	131
82	Curva desplazamiento vs. factor de carga - Nodo de control 1781	131
83	Deformaciones por fisuración Eknn - Load-step 4 (inicio de agrietamiento) . . .	132
84	Deformaciones por fisuración Eknn - Load-step 18 (agrietamiento desarrollado)	132
85	Ancho de grieta ponderado Ekwnn - Load-step 21	132
86	Ancho de grieta ponderado Ekwnn en el estado de colapso - Load-step 22 . . .	133
87	Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-02	133
88	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-02	134
89	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-01	135
90	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-02	136
91	Vista del modelo para análisis en dirección Y - Vivienda V-02	137
92	Campo de desplazamientos - Dirección Y - Load-step 10	137
93	Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-02	138
94	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-02	138
95	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-02	139
96	Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-03	141
97	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-03	141
98	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-03	142
99	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-03	143
100	Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-03	144
101	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-03	144
102	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-03	145
103	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-03	146
104	Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-04	148
105	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-04	148
106	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-04	149

107	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-04	150
108	Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-04	151
109	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-04	151
110	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-04	152
111	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-04	153
112	Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-05	155
113	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-05	155
114	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-05	156
115	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-05	157
116	Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-05	158
117	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-05	158
118	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-05	159
119	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-05	160
120	Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-06	162
121	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-06	162
122	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-06	163
123	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-06	164
124	Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-06	165
125	Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-06	165
126	Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-06	166
127	Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-06	167
128	Patrón de agrietamiento diagonal característico — Vivienda V-02, Dirección X	175
129	Fotografía panorámica del distrito de Huancaray	203
130	Detalle constructivo de muros de adobe y estado de conservación de la vivienda V-01	203
131	Vista frontal de la vivienda de adobe V-01 mostrando configuración estructural de dos niveles	204
132	Vista en esquina de la vivienda V-02 durante el levantamiento de campo	204
133	Vista de la vivienda V-02 mostrando fachada principal y estado de conservación de los muros de adobe	205
134	Vista lateral de la vivienda V-02 evidenciando configuración estructural y degradación del revestimiento exterior	205
135	Vista lateral de la vivienda V-03 mostrando el sistema constructivo de adobe y configuración estructural	206

136	Vista lateral de la vivienda V-04 evidenciando balcón de madera y configuración de dos niveles	206
137	Vista frontal de la vivienda V-04 mostrando fachada principal y vanos de puertas y ventanas	207
138	Vista en esquina de la vivienda V-05 durante el levantamiento de campo en el distrito de Huancaray	207
139	Levantamiento geométrico de la vivienda V-06 mediante medición con wincha en el distrito de Huancaray	208
140	Vista frontal completa de la vivienda V-06 mostrando configuración estructural y estado de conservación	208

LISTA DE CUADROS

1	Antecedentes internacionales sobre vulnerabilidad sísmica	20
2	Antecedentes nacionales sobre vulnerabilidad sísmica en adobe	28
3	Factores de vulnerabilidad sísmica	32
4	Principales sismos históricos del Perú	34
5	Zonificación sísmica del Perú	35
6	Perfiles de suelo según NTE E.030	36
7	Clasificación de métodos de evaluación de vulnerabilidad	37
8	Estados de daño según EMS-98	38
9	Parámetros del método Benedetti-Petrini	39
10	Parámetros de evaluación INDECI	40
11	Propiedades mecánicas del adobe	43
12	Modos de falla en estructuras de adobe	44
13	Umbral de daño para adobe según ensayos PUCP	45
14	Requisitos geométricos NTE E.080	47
15	Resistencias mínimas según NTE E.080	48
16	Estados límite para adobe según Tarque et al.	48
17	Matriz de probabilidad de daño para adobe	49
18	Tipos de elementos finitos para análisis estructural	51
19	Comparación de estrategias de modelamiento	53
20	Parámetros TSCM calibrados para adobe	55
21	Niveles de desempeño estructural según FEMA 356/ASCE 41	57
22	Límites de deriva para mampostería no reforzada	58
23	Tipos de análisis sísmico en DIANA FEA	60
24	Estudios de adobe con DIANA FEA	60
25	Parámetros de evaluación de vulnerabilidad sísmica según metodología INDECI	61
26	Niveles de vulnerabilidad sísmica según metodología INDECI	62
27	Niveles de desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000	63
28	Factores de sectorización para niveles de desempeño SEAOC Vision 2000	64
29	Comparación entre metodología INDECI y filosofía SEAOC Vision 2000	64
30	Resumen de resultados de evaluación INDECI de las seis viviendas de estudio	88
31	Características geométricas de las seis viviendas de estudio	94
32	Propiedades elásticas adoptadas para el modelo EMM en adobe	100
33	Parámetros de agrietamiento para el modelo EMM	100
34	Parámetros de aplastamiento para el modelo EMM en adobe	100
35	Parámetros de falla por corte para el modelo EMM en adobe	101
36	Comparación cuantitativa de resultados experimentales y numéricos – Calibración modelo EMM	109
37	Resumen de propiedades mecánicas del adobe para el modelo EMM en DIANA FEA	110
38	Propiedades elásticas del adobe para la Vivienda V-01	113
39	Parámetros no lineales del modelo EMM para la Vivienda V-01	113

40	Propiedades físicas y mecánicas de la madera de eucalipto	114
41	Cargas del sistema de techo para la Vivienda V-01	115
42	Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-01	120
43	Sectorización de niveles de desempeño - Dirección X - Vivienda V-01	121
44	Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-01	123
45	Sectorización de niveles de desempeño - Dirección Y - Vivienda V-01	124
46	Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-01	125
47	Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-02	134
48	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-01	135
49	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-02	136
50	Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-02	139
51	Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-02	140
52	Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-03	142
53	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-03	143
54	Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-03	145
55	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-03	146
56	Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-03	147
57	Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-04	149
58	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-04	150
59	Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-04	152
60	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-04	153
61	Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-04	154
62	Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-05	156
63	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-05	157
64	Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-05	159
65	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-05	160
66	Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-05	161
67	Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-06	163
68	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-06	164
69	Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-06	166
70	Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-06	167

71	Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-06	168
72	Resumen general de resultados del análisis pushover - Seis viviendas de estudio	169
73	Comparación de niveles de vulnerabilidad INDECI y desempeño SEAO Vision 2000	170
74	Comparación de parámetros de capacidad resistente entre las seis viviendas . .	171
75	Niveles de desempeño sísmico de las seis viviendas de estudio	171
76	Correlación entre evaluación INDECI y análisis numérico DIANA FEA	172
77	Indicadores de comportamiento frágil de las seis viviendas de adobe	174
78	Anchos de grieta ponderados máximos - Viviendas V-01 y V-02	176
79	Comparación de resultados entre evaluación INDECI y análisis DIANA FEA	177
80	Análisis cuantitativo de discrepancias entre metodologías INDECI y DIANA FEA .	178
81	Vulnerabilidades estructurales comunes identificadas en las seis viviendas de estudio	180
82	Correlación entre vulnerabilidades estructurales y mecanismos de falla	181
83	Matriz de vulnerabilidades y soluciones de reforzamiento propuestas	182
84	Síntesis de resultados del análisis de vulnerabilidad sísmica – Seis viviendas . .	183
85	Matriz de consistencia	211
86	Matriz de operacionalización de variables	212

GLOSARIO

Adobe	Bloque de construcción elaborado con tierra cruda, agua y fibras vegetales, secado al sol sin cocción, utilizado en construcciones tradicionales.
Análisis pushover	Técnica de análisis estructural que somete a la edificación a cargas laterales monotónicamente crecientes para obtener la curva de capacidad.
Capacidad resistente	Máxima fuerza o desplazamiento que una estructura puede soportar antes de alcanzar un estado límite de daño o colapso.
Colapso estructural	Pérdida total o parcial de la capacidad portante de una edificación, resultando en el derrumbe de elementos estructurales.
Curva de capacidad	Representación gráfica de la relación entre la fuerza cortante basal y el desplazamiento en el techo de una estructura.
Deriva de entrepiso	Desplazamiento lateral relativo entre dos niveles consecutivos de una edificación, dividido por la altura de entrepiso.
DIANA FEA	Software de elementos finitos especializado en análisis no lineal de estructuras de mampostería y materiales cuasi-frágiles.
Ductilidad	Capacidad de un material o estructura para deformarse más allá del rango elástico sin perder significativamente su resistencia.
Elementos finitos	Método numérico que discretiza una estructura en elementos pequeños interconectados para resolver ecuaciones de comportamiento estructural.
Ficha INDECI	Instrumento de evaluación cualitativa desarrollado por el Instituto Nacional de Defensa Civil para determinar la vulnerabilidad de edificaciones.
Fragilidad	Característica de materiales que fallan súbitamente sin deformación plástica significativa, típica del adobe y mampostería no reforzada.
Mampostería	Sistema constructivo basado en la unión de unidades (ladrillos, bloques, adobes) mediante mortero, conformando muros portantes.
Mecanismo de falla	Modo característico en que una estructura colapsa o pierde su capacidad resistente, como volteo o agrietamiento diagonal.
Modelamiento numérico	Representación matemática computacional de una estructura real para simular y predecir su comportamiento bajo cargas.
Muro portante	Elemento estructural vertical que transmite cargas gravitacionales y laterales desde los niveles superiores hacia la cimentación.
Norma E.030	Norma Técnica Peruana de Diseño Sismorresistente que establece requisitos mínimos para el diseño de edificaciones ante sismos.
Norma E.080	Norma Técnica Peruana de Diseño y Construcción con Tierra Reforzada que regula las edificaciones de adobe y tapial.
Peligro sísmico	Probabilidad de ocurrencia de un sismo de determinada intensidad en una zona geográfica durante un periodo de tiempo dado.
Punto de desempeño	Intersección entre la curva de capacidad de una estructura y la demanda sísmica representada en formato espectral.
Vulnerabilidad sísmica	Susceptibilidad de una edificación a sufrir daños ante un evento sísmico, determinada por sus características estructurales.
Zona sísmica	Clasificación territorial según el nivel de peligro sísmico, establecida en la Norma E.030 con factores Z de 0.10 a 0.45.

ACRÓNIMOS

ATC	Applied Technology Council, organización que desarrolla metodologías de evaluación sísmica y guías de diseño estructural.
CDP	Concrete Damaged Plasticity, modelo constitutivo para simular el comportamiento no lineal de materiales cuasi-frágiles como el adobe.
CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, entidad técnica del SINAGERD en Perú.
CISMID	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, institución de investigación en ingeniería sísmica.
FEA	Finite Element Analysis (Análisis por Elementos Finitos), método numérico para resolver problemas de comportamiento estructural.
FEM	Finite Element Method (Método de Elementos Finitos), técnica computacional para discretizar y analizar estructuras complejas.
FEMA	Federal Emergency Management Agency, agencia estadounidense que desarrolla metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica.
IGP	Instituto Geofísico del Perú, entidad encargada del monitoreo sísmico y estudios de peligro sísmico en el territorio nacional.
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil, organismo público responsable de la gestión del riesgo de desastres en Perú.
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática, entidad que provee datos censales sobre características de viviendas en Perú.
MDOF	Multi Degree of Freedom (Múltiples Grados de Libertad), sistema estructural con varios puntos de desplazamiento independiente.
MVCS	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, entidad que regula las normas técnicas de edificación en Perú.
NTP	Norma Técnica Peruana, documento normativo que establece requisitos técnicos para construcción y materiales en Perú.
PGA	Peak Ground Acceleration (Aceleración Máxima del Suelo), parámetro sísmico que caracteriza la intensidad del movimiento.
RNE	Reglamento Nacional de Edificaciones, marco normativo que contiene las normas técnicas de edificación vigentes en Perú.
SDOF	Single Degree of Freedom (Un Grado de Libertad), modelo simplificado de estructura con un punto de desplazamiento.
SINAGERD	Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, sistema interinstitucional para la gestión del riesgo en Perú.
TSCM	Total Strain Crack Model, modelo constitutivo basado en deformaciones totales para simular agrietamiento en mampostería.
ZS	Zona Sísmica, clasificación territorial del peligro sísmico establecida en la Norma E.030 del RNE.

LISTA DE SÍMBOLOS

Z	Factor de zona sísmica según la Norma E.030, que representa la aceleración máxima del suelo con probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años.
U	Factor de uso o importancia de la edificación según su categoría establecida en la Norma E.030.
S	Factor de amplificación del suelo que depende del tipo de perfil de suelo donde se ubica la estructura.
C	Factor de amplificación sísmica que depende del período fundamental de la estructura y las características del suelo.
R	Coefficiente de reducción de las fuerzas sísmicas que depende del sistema estructural empleado.
T	Período fundamental de vibración de la estructura, expresado en segundos.
T_P	Período que define la plataforma del espectro de diseño sísmico según el tipo de suelo.
T_L	Período que define el inicio de la zona del espectro con desplazamiento constante.
V	Fuerza cortante basal de diseño que actúa en la base de la estructura debido al sismo.
P	Peso sísmico de la edificación considerado para el análisis sísmico según la Norma E.030.
Δ	Desplazamiento lateral absoluto de un nivel de la estructura respecto a su posición original.
δ	Deriva o desplazamiento relativo de entrepiso, expresado como fracción de la altura de piso.
h_i	Altura del entrepiso i medida entre niveles consecutivos de la edificación.
f'_m	Resistencia característica a compresión axial de la mampostería de adobe (kg/cm ² o MPa).
v'_m	Resistencia característica al corte de la mampostería de adobe (kg/cm ² o MPa).
E_m	Módulo de elasticidad de la mampostería de adobe, relacionado con su rigidez.
G_m	Módulo de corte de la mampostería de adobe, que caracteriza su resistencia a deformaciones angulares.
γ	Peso específico del material de adobe, expresado en kN/m ³ o kg/m ³ .
ν	Coefficiente de Poisson del material, relación entre deformación transversal y longitudinal.
μ	Factor de ductilidad, relación entre desplazamiento último y desplazamiento de fluencia.
G_f	Energía de fractura del material, parámetro que caracteriza la propagación de grietas en el adobe.
f_t	Resistencia a tracción del adobe, generalmente muy baja comparada con la compresión.
S_a	Aceleración espectral, ordenada del espectro de respuesta para un período determinado.
S_d	Desplazamiento espectral, utilizado en el método del espectro de capacidad para hallar el punto de desempeño.

TESIS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. A nivel mundial

Las edificaciones de adobe constituyen uno de los sistemas constructivos más extendidos y, a la vez, más vulnerables frente a solicitaciones sísmicas. Según Minke, aproximadamente un tercio de la humanidad habita en viviendas de tierra cruda, proporción que supera el 50 % en países en desarrollo (Minke, [2021](#)). Esta realidad se torna crítica cuando se considera que gran parte de estas construcciones se localizan en regiones de alta sismicidad, donde el comportamiento frágil del adobe ante cargas horizontales ha ocasionado pérdidas humanas considerables a lo largo de la historia (Schroeder, [2016](#)). Brando et al. advierten que, pese a los avances en técnicas de reforzamiento, las edificaciones de adobe en Latinoamérica y otras regiones del mundo continúan expuestas a un riesgo elevado, situación que demanda una evaluación sistemática de su vulnerabilidad estructural (Brando et al., [2022](#)).

Investigaciones recientes sobre niveles de letalidad de edificaciones ante eventos sísmicos, desarrolladas por Xia et al. a partir del análisis estadístico de 52 terremotos históricos con más de 100 víctimas cada uno, demuestran que las estructuras de adobe presentan el índice de letalidad más alto entre todos los sistemas constructivos, con valores en el rango de 0.85 a 1.0 en una escala normalizada. En comparación, las estructuras de ladrillo-concreto presentan índices de 0.33–0.60, las estructuras de madera 0.20–0.35, y las estructuras de concreto armado 0.10–0.25 (Xia et al., [2023](#)). Estos resultados implican que, ante un sismo de intensidad suficiente, prácticamente la totalidad de los ocupantes de una vivienda de adobe colapsada resultarían víctimas fatales o con lesiones graves.

La evidencia empírica corrobora estas estadísticas de manera contundente. El terremoto de Bam, Irán, del 26 de diciembre de 2003 (Mw 6.6) causó la muerte de aproximadamente 26,000 a 31,000 personas, devastación atribuida directamente al colapso masivo de las viviendas de adobe que constituían cerca del 80 % del parque habitacional de la ciudad.

Recientemente, el terremoto de Turquía-Siria de febrero de 2023 (Mw 7.8) evidenció nuevamente la vulnerabilidad de las construcciones de mampostería no reforzada. Según Yu et al., este evento causó más de 44,000 víctimas fatales y el colapso parcial o total de más de 160,000 edificios, incluyendo 520,000 apartamentos solo en Turquía (Yu et al., [2024](#)). Las estructuras en zonas rurales muchas de ellas de mampostería de adobe o sistemas constructivos tradicionales fueron particularmente afectadas debido a deficiencias en la calidad constructiva, incumplimiento de códigos sísmicos y ausencia de diseño sismorresistente (Woo et al., [2024](#)). Este desastre constituye un recordatorio de que, a pesar de los avances en ingeniería sísmica, millones de personas continúan habitando estructuras altamente vulnerables.

Frente a esta problemática, la comunidad científica internacional ha desarrollado metodologías avanzadas de evaluación de vulnerabilidad sísmica basadas en modelamiento numérico no lineal. El análisis por elementos finitos, particularmente mediante técnicas de análisis pushover (estático no lineal), permite simular el comportamiento estructural de edificaciones de adobe bajo acciones sísmicas, identificando mecanismos de falla, estimando capacidad resistente y determinando puntos de desempeño (Tarque Ruíz, 2011). Estudios recientes han empleado modelos constitutivos especializados para caracterizar el comportamiento cuasi-frágil de la mampostería de adobe, obteniendo predicciones consistentes con observaciones experimentales (Ciocci et al., 2021). Estas herramientas numéricas, implementadas en software especializado como DIANA FEA, han demostrado su capacidad para predecir con precisión la respuesta sísmica de estructuras de mampostería histórica y vernácula (Brando et al., 2022).

1.1.2. A nivel nacional

El Perú se encuentra ubicado en el borde occidental de Sudamérica, sobre el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, donde la placa tectónica de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana a una velocidad aproximada de 6–7 cm/año (Tavera, 2014). Esta configuración geodinámica convierte al territorio peruano en una de las regiones de mayor actividad sísmica del planeta, con un historial de terremotos destructivos que han causado miles de víctimas y pérdidas económicas incalculables a lo largo de su historia.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha documentado la existencia de zonas de acoplamiento sísmico en la costa central y sur del país que acumulan energía tectónica durante períodos prolongados de “silencio sísmico”. La región de Lima no ha experimentado un sismo de gran magnitud desde el terremoto y tsunami de 1746, que causó aproximadamente 5,000 muertes y la destrucción casi total del puerto del Callao (Walker, 2008). Esta acumulación de más de 275 años de energía sísmica incrementa significativamente la probabilidad de ocurrencia de un terremoto de magnitud 8.5 o superior en cualquier momento (Tavera, 2025).

El terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007 (Mw 7.9) constituye el evento sísmico más reciente de gran magnitud en el Perú, con un saldo de 596 muertos, 1,300 heridos, 76,000 viviendas destruidas o inhabitables y más de 430,000 damnificados (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2007). La duración excepcional del proceso de ruptura (aproximadamente 210 segundos) y la intensidad alcanzada (VIII–IX en la escala de Mercalli Modificada) provocaron el colapso del 80 % de las viviendas en la ciudad de Pisco (Tavera et al., 2007). Significativamente, la mayoría de las viviendas colapsadas fueron de adobe y quincha, incluyendo estructuras patrimoniales como la Iglesia de San Clemente, donde una cuarta parte de los fallecidos se encontraba asistiendo a una ceremonia religiosa al momento del sismo.

1.1.3. A nivel regional

La región Apurímac, ubicada en la sierra sur del Perú, presenta una de las mayores concentraciones de viviendas de adobe del país. Según el Censo Nacional 2017, el 76.1 %

de las viviendas del departamento tienen como material predominante en sus paredes exteriores el adobe, ubicándose como el segundo departamento con mayor proporción de este sistema constructivo a nivel nacional, únicamente superado por Huancavelica (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018). Esta situación se agrava en las zonas rurales, donde la proporción supera el 85 %, y considerando que el 54.2 % de la población apurimeña reside en el área rural.

Desde la perspectiva del peligro sísmico, la región Apurímac se encuentra clasificada predominantemente en la Zona Sísmica 2 según la Norma Técnica E.030, con un factor de zona $Z = 0.25$, correspondiente a una aceleración máxima esperada en suelo rígido de $0.25g$ para el sismo de diseño con período de retorno de 475 años (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018). La sismicidad histórica de la región registra eventos significativos, y su proximidad a las zonas de subducción de la costa sur y a sistemas de fallas corticales activas en el interior del continente configura un escenario de peligro sísmico moderado a alto.

El distrito de Huancaray, perteneciente a la provincia de Andahuaylas en el departamento de Apurímac, ejemplifica la problemática descrita. Con una población predominantemente rural dedicada a actividades agropecuarias de subsistencia, el distrito presenta un parque habitacional caracterizado por viviendas autoconstruidas de adobe de uno y dos niveles, edificadas sin asesoría técnica y con materiales de fabricación artesanal local. Estas edificaciones presentan características tipológicas que incrementan su vulnerabilidad sísmica: Muros de adobe sin refuerzo, conexiones deficientes entre muros ortogonales, techos pesados de teja sobre estructura de madera, cimentaciones superficiales sin arriostramiento, y ausencia de elementos de confinamiento o refuerzo sísmico.

Actualmente, la evaluación de vulnerabilidad sísmica de viviendas en el distrito de Huancaray se realiza exclusivamente mediante métodos cualitativos, particularmente a través de las fichas de evaluación del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), que asignan niveles de vulnerabilidad (muy alto, alto, medio, bajo) en función de parámetros observables como material de construcción, estado de conservación, antigüedad, topografía y configuración estructural (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006). Si bien estas metodologías cualitativas proporcionan una aproximación útil para evaluaciones masivas y priorización de intervenciones, no permiten cuantificar con precisión la capacidad resistente de las estructuras, identificar mecanismos de falla específicos, ni estimar niveles de daño esperado para diferentes intensidades sísmicas.

La ausencia de estudios de vulnerabilidad sísmica basados en modelamiento numérico no lineal para las viviendas de adobe de Huancaray constituye una brecha de conocimiento significativa. En este contexto, la presente investigación busca contribuir al conocimiento del comportamiento sísmico de las viviendas de adobe en Huancaray, permitiendo analizar la vulnerabilidad sísmica con un enfoque cuantitativo que complemente y valide las evaluaciones cualitativas existentes, y proporcionando información técnica relevante para orientar futuras intervenciones de reforzamiento estructural en beneficio de la población.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial (geográfica)

El área de investigación se encuentra localizada en el distrito de Huancaray, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac, ubicado estratégicamente en la sierra sur del Perú. La zona de estudio comprende el casco urbano y las comunidades rurales del distrito.

Figura 1

Delimitación espacial de la zona de estudio



Nota. Ubicación y localización del distrito de Huancaray, obtenido por Google Earth.

Figura 2

Delimitación espacial de la zona de estudio



Nota. Fotografía panorámica del distrito de Huancaray

La selección del distrito de Huancaray como ámbito de estudio se fundamenta en los siguientes criterios técnicos:

- a) **Representatividad del sistema constructivo:** El distrito de Huancaray presenta una alta concentración de viviendas construidas con mampostería de adobe, sistema constructivo predominante en las zonas rurales de la sierra peruana que, según el INEI (2017), representa más del 30 % de las edificaciones en la región Apurímac, constituyendo una muestra representativa para el análisis de vulnerabilidad sísmica.
- b) **Contexto de peligro sísmico:** El departamento de Apurímac se ubica en la **Zona Sísmica 2** según la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, con un factor de zona $Z = 0,25$, correspondiente a una región de sismicidad media-alta asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en el Cinturón de Fuego del Pacífico.
- c) **Condiciones de autoconstrucción:** Las viviendas del distrito han sido edificadas predominantemente mediante procesos de autoconstrucción sin asistencia técnica profesional, sin cumplimiento de los lineamientos establecidos en la Norma Técnica E.080 “Diseño y Construcción con Tierra Reforzada”, lo que incrementa significativamente su vulnerabilidad estructural ante eventos sísmicos.
- d) **Accesibilidad para levantamiento de información:** El distrito cuenta con acceso vial mediante la red departamental AP-101 que conecta con la ciudad de Andahuaylas, facilitando el desarrollo de las actividades de campo para el levantamiento de fichas técnicas de evaluación, caracterización de materiales y recolección de datos geométricos de las viviendas seleccionadas.
- e) **Vacío de conocimiento regional:** No se identifican investigaciones previas que aborden específicamente la vulnerabilidad sísmica de viviendas de adobe en el distrito de Huancaray mediante técnicas de modelamiento numérico no lineal, lo que justifica la pertinencia y originalidad del presente estudio.

La georreferenciación del área de estudio se realizará mediante el sistema de coordenadas UTM Zona 18S, datum WGS84, permitiendo la ubicación precisa de las viviendas evaluadas y la correlación espacial de los niveles de vulnerabilidad sísmica determinados mediante el modelamiento numérico en DIANA FEA y la aplicación de las fichas técnicas de evaluación de INDECI.

1.2.2. Temporal

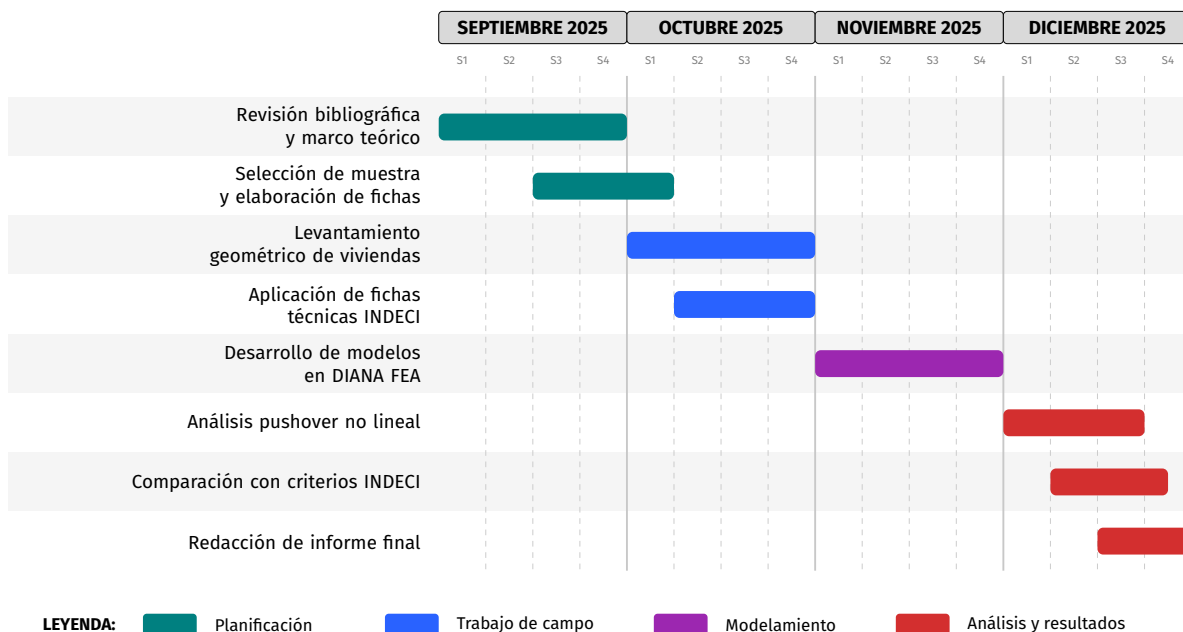
El horizonte temporal del estudio abarca un periodo de cuatro meses, desde septiembre de 2025 hasta diciembre de 2025, intervalo en el que se realizará el levantamiento de información de campo mediante fichas técnicas de evaluación, la caracterización mecánica de los materiales constituyentes del adobe local, el desarrollo de modelos numéricos mediante elementos finitos en el software DIANA FEA, así como la ejecución de análisis pushover no lineal y la comparación de resultados con los criterios de las fichas técnicas de INDECI.

Este periodo temporal se ha establecido considerando las siguientes etapas:

- **Septiembre 2025:** Revisión bibliográfica y consolidación del marco teórico sobre vulnerabilidad sísmica en estructuras de adobe. Selección de la muestra de viviendas representativas en el distrito de Huancaray. Elaboración y validación de instrumentos de recolección de datos (fichas de evaluación basadas en metodología INDECI).
- **Octubre 2025:** Trabajo de campo para el levantamiento geométrico de las viviendas seleccionadas mediante técnicas de medición directa. Aplicación de fichas técnicas de evaluación de vulnerabilidad sísmica según metodología INDECI.
- **Noviembre 2025:** Desarrollo de modelos numéricos 3D de las viviendas en el software DIANA FEA. Calibración de parámetros constitutivos del material mediante modelos de grieta distribuida. Configuración de condiciones de contorno y cargas gravitacionales.
- **Diciembre 2025:** Ejecución de análisis pushover estático no lineal en las direcciones principales (X e Y). Obtención de curvas de capacidad y determinación de puntos de desempeño estructural. Comparación de niveles de vulnerabilidad obtenidos mediante modelamiento numérico versus criterios de fichas técnicas INDECI. Análisis estadístico de resultados y elaboración de conclusiones. Redacción del informe final de investigación.

Figura 3

Cronograma de actividades de la investigación



Nota. Elaboración propia.

1.2.3. Temática y unidad de análisis

- **Temática:** La temática de esta investigación se circunscribe al campo de la ingeniería estructural con enfoque en vulnerabilidad sísmica de edificaciones de tierra. El estudio se centra en la aplicación de técnicas de modelamiento numérico mediante el método de elementos finitos, específicamente utilizando el software DIANA FEA con modelos constitutivos de grieta distribuida, para la evaluación del comportamiento no lineal de viviendas de adobe ante solicitaciones sísmicas.

La investigación integra conocimientos de mecánica de materiales, análisis estructural no lineal, ingeniería sísmica y normativa peruana (NTE E.030 y NTE E.080), orientados a contrastar los niveles de vulnerabilidad obtenidos mediante modelamiento numérico con los criterios establecidos en las fichas técnicas de evaluación de INDECI para viviendas del distrito de Huancaray, provincia de Andahuaylas, región Apurímac.

- **Unidad de análisis:** La unidad de análisis de esta investigación está constituida por las viviendas de adobe ubicadas en el distrito de Huancaray, provincia de Andahuaylas, región Apurímac. Cada vivienda evaluada comprende un conjunto estructurado de datos que incluye:
 - i) **Características geométricas:** Dimensiones en planta, altura de muros, espesor de muros, configuración de vanos (puertas y ventanas), distribución arquitectónica, tipo de cubierta y características del sistema de techado.
 - ii) **Indicadores de vulnerabilidad cualitativa:** Parámetros de evaluación según fichas técnicas INDECI, incluyendo estado de conservación, calidad de materiales, configuración estructural, antigüedad de la edificación, tipo de suelo de cimentación y presencia de patologías estructurales.
 - iii) **Resultados del análisis numérico:** Curvas de capacidad obtenidas del análisis pushover, desplazamientos máximos, derivas de entrepiso, patrón de agrietamiento, mecanismos de falla y puntos de desempeño estructural según metodologías de evaluación sísmica.
 - iv) **Datos de ubicación:** Coordenadas geográficas (latitud, longitud), ubicación catastral y características del entorno inmediato para la contextualización espacial de cada vivienda evaluada.

Cada vivienda representa una instancia de evaluación integral, donde la caracterización geométrica, mecánica y la aplicación del análisis pushover no lineal en DIANA FEA permiten determinar el nivel de vulnerabilidad sísmica y contrastarlo con la clasificación obtenida mediante las fichas técnicas de INDECI.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿De qué manera el modelamiento numérico no lineal permite analizar la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025, según los criterios establecidos por INDECI?

1.3.2. Problemas específicos

1. ¿Cuál es el comportamiento estructural determinado mediante el análisis no lineal estático pushover en DIANA FEA en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025?
2. ¿Cuál es la precisión de las tablas de la INDECI frente a los resultados estructurales obtenidos por modelamiento no lineal en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025?
3. ¿Cuáles son las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray y qué vulnerabilidades estructurales comunes presentan que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural?

1.4. Justificación e importancia

- **Conveniencia:** La investigación se justifica por conveniencia al proporcionar una metodología rigurosa para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe, material constructivo predominante en las zonas rurales de la sierra peruana. El modelamiento numérico mediante DIANA FEA permitirá a las entidades responsables (CENEPRED, INDECI, gobiernos locales) obtener evaluaciones cuantitativas del comportamiento estructural de estas edificaciones, complementando las metodologías cualitativas actualmente empleadas. La comparación entre los resultados del análisis pushover no lineal y los criterios de las fichas técnicas de INDECI proporcionará información valiosa sobre la precisión y aplicabilidad de ambos enfoques en el contexto de la sierra sur del Perú.
- **Relevancia social:** La investigación posee relevancia social significativa al contribuir directamente a la reducción del riesgo sísmico en el distrito de Huancaray, provincia de Andahuaylas, región Apurímac. Según el Instituto Nacional de Defensa Civil, las viviendas de adobe representan el tipo de edificación más vulnerable ante eventos sísmicos, y la región Apurímac, ubicada en la Zona Sísmica 2 ($Z=0.25$) según la NTE E.030. Los resultados de esta investigación beneficiarán a las familias que habitan viviendas de adobe al proporcionar información técnica que sustente programas de reforzamiento estructural, políticas de reubicación o mejoramiento habitacional, contribuyendo a preservar vidas humanas y reducir los costos sociales y económicos derivados de posibles eventos sísmicos.

- **Aplicaciones prácticas:** El estudio generará soluciones concretas mediante tres productos técnicos integrados: (1) un modelo numérico calibrado en DIANA FEA que represente el comportamiento no lineal de viviendas de adobe típicas de la zona, aplicable a evaluaciones futuras de edificaciones similares; (2) curvas de capacidad y fragilidad que permitan estimar probabilidades de daño para diferentes niveles de demanda sísmica, útiles para estudios de microzonificación y planificación territorial; y (3) una metodología comparativa que establezca correlaciones entre los niveles de vulnerabilidad obtenidos mediante modelamiento numérico y los criterios cualitativos de las fichas técnicas de INDECI. Los reportes técnicos generados proporcionarán información valiosa para sustentar proyectos de reducción del riesgo de desastres ante entidades financiadoras como el Fondo para Intervenciones ante la Ocurrencia de Desastres Naturales (FONDES) y organismos de cooperación internacional.
- **Utilidad metodológica:** La investigación aporta metodológicamente al integrar técnicas avanzadas de modelamiento numérico no lineal con metodologías de evaluación cualitativa, desarrollando un enfoque comparativo replicable para otras localidades de la sierra peruana con predominancia de construcciones de adobe. La calibración de parámetros constitutivos del modelo Total Strain Crack Model (TSCM) para adobe de la región Apurímac constituye una contribución metodológica significativa, dado que la mayoría de investigaciones previas han utilizado parámetros calibrados para mampostería europea o adobe de otras regiones. Se establecerá un protocolo de caracterización mecánica, modelamiento y análisis que podrá ser adoptado por instituciones académicas y organismos técnicos para la evaluación de vulnerabilidad sísmica en zonas rurales del Perú.
- **Valor teórico:** El valor teórico de la investigación radica en contribuir al conocimiento en la intersección de mecánica computacional, ingeniería sísmica y construcción tradicional. Ampliará el cuerpo teórico sobre aplicación del método de elementos finitos para el análisis de estructuras de tierra, material que presenta comportamiento altamente no lineal y frágil. Contribuirá a comprender las diferencias y complementariedades entre los enfoques cuantitativos (modelamiento numérico) y cualitativos (fichas de evaluación rápida) para la determinación de vulnerabilidad sísmica, estableciendo un marco de integración metodológica para la gestión del riesgo de desastres en edificaciones patrimoniales y vernáculas de la sierra peruana. Adicionalmente, los resultados permitirán validar o cuestionar los criterios de clasificación de vulnerabilidad establecidos en los instrumentos normativos de INDECI para el caso específico de viviendas de adobe autoconstruidas.

1.5. Limitaciones de la investigación

A pesar de que esta investigación está bien diseñada y utiliza metodologías avanzadas de modelamiento numérico, enfrenta ciertas limitaciones que deben ser reconocidas:

- **Tamaño de la muestra de viviendas:** La investigación trabaja con una muestra representativa de viviendas de adobe del distrito de Huancaray, seleccionadas mediante criterios de tipicidad constructiva y accesibilidad. Si bien la muestra cumple con los requerimientos metodológicos para un estudio de caso, representa un valor limitado comparado con el universo total de viviendas de adobe existentes en el distrito, lo cual restringe la generalización estadística de los resultados a toda la población edificada.
- **Variabilidad inherente del material adobe:** El adobe, como material artesanal de fabricación local, presenta alta variabilidad en sus propiedades mecánicas dependiendo de la composición del suelo, proporción de agua, técnica de fabricación, tiempo de curado y condiciones de almacenamiento. Esta heterogeneidad intrínseca dificulta la caracterización representativa del material mediante un número limitado de ensayos, pudiendo existir diferencias significativas entre los bloques de adobe de una misma vivienda o entre viviendas del mismo sector.
- **Condiciones de borde del análisis:** El análisis pushover estático no lineal, aunque ampliamente aceptado para la evaluación de vulnerabilidad sísmica, representa una simplificación del comportamiento dinámico real de las estructuras ante sismos. No se captura la interacción suelo-estructura, los efectos de la componente vertical del sismo, ni la degradación cíclica de rigidez y resistencia que ocurre durante eventos sísmicos reales. Análisis dinámicos no lineales (time-history) proporcionarían resultados más precisos pero exceden el alcance temporal y computacional de la presente investigación.
- **Subjetividad en las fichas técnicas de INDECI:** Las fichas técnicas de evaluación de vulnerabilidad empleadas por INDECI involucran criterios cualitativos cuya aplicación depende del juicio del evaluador. A pesar de seguir los lineamientos metodológicos establecidos, existe un componente subjetivo en la asignación de puntajes para parámetros como “estado de conservación”, “calidad de materiales” o “configuración estructural”, lo cual puede generar variabilidad en los resultados.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo general

Analizar la vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numerico no lineal en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025, según los criterios establecidos por INDECI.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar el análisis no lineal estático pushover mediante el modelamiento en DIANA FEA en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025.
2. Analizar la precisión de las tablas de la INDECI frente a los resultados estructurales obtenidos por modelamiento no lineal en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025.
3. Identificar las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray y determinar las vulnerabilidades estructurales comunes que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural específico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones internacionales

A continuación, se exponen las diferentes investigaciones internacionales que detallan cómo el análisis no lineal, modelamiento numérico mediante elementos finitos y evaluación de vulnerabilidad sísmica han sido aplicados en estudios orientados a edificaciones de mampostería y adobe, con énfasis en el desarrollo de curvas de fragilidad y métodos de evaluación del desempeño estructural. El Cuadro 1 presenta de manera sintética los hallazgos más representativos de esta selección.

Çelik et al. (2025) analizaron los mecanismos de falla de dos edificaciones patrimoniales otomanas afectadas por el terremoto de Erzincan de 1939 en Türkiye: el Baño Nafiz Pasha y la Mezquita Izzet Pasha. Emplearon técnicas avanzadas de elementos finitos con el elemento SOLID65 y el modelo de material Willam-Warnke para simular comportamiento no lineal de mampostería. Los análisis de historia temporal no lineal utilizaron 11 registros sísmicos reales escalados según el código TBEC-2018. Los resultados revelaron que la geometría simétrica y el efecto de caja protegieron el baño, mientras la mezquita colapsó por conexiones débiles columna-arco y deficientes mecanismos de transferencia de carga.

He et al. (2025) formularon un modelo de vulnerabilidad sísmica para edificaciones típicas en la Provincia de Sichuan, China, fundamentado en estadísticas empíricas de daño sísmico de 38 terremotos destructivos. Clasificaron los datos según la escala china de intensidad sísmica, desarrollando matrices de probabilidad de daño (DPM) para diversas tipologías constructivas incluyendo estructuras de suelo crudo, madera-piedra, madera-ladrillo, mampostería y pórticos de concreto reforzado. Establecieron modelos de predicción de vulnerabilidad mediante el modelo bifásico de Hill y curvas de fragilidad empíricas basadas en aceleración pico del terreno (PGA).

Guettiche et al. (2025) abordaron la vulnerabilidad sísmica crítica de estructuras de mampostería no reforzada (URM) en el distrito de Souika, Constantine, Algeria. Establecieron una metodología mecánica integrada combinando el framework europeo RISK-UE con el método N2, adaptada explícitamente al contexto patrimonial argelino mediante curvas de capacidad localizadas y parámetros específicos del sitio. Clasificaron 337 edificaciones en seis tipologías y generaron funciones de fragilidad bajo tres escenarios sísmicos, concluyendo que ninguna edificación evaluada cumple los requisitos de seguridad del código RPA 2024.

Cuadros-Rojas et al. (2024) propusieron una metodología de relevamiento costo-efectiva basada en fotogrametría estructura-desde-movimiento (SfM) para evaluación sísmica de estructuras históricas complejas de adobe, piedra y mampostería de ladrillo. Aplicaron el método al templo San Juan Bautista de Huaytará, Perú, desarrollando el modelo geométrico con error menor al 2 %. Ejecutaron análisis pushover estáticos no lineales en modelos FEM 3D, evaluando propiedades mecánicas mediante ensayos experimentales de laboratorio.

Las simulaciones demostraron que las áreas propensas a daño son las fachadas oeste y este, con agrietamiento en conexiones entre muros ortogonales.

Cocco et al. (2024) contribuyeron a la preservación de edificaciones de adobe estableciendo una metodología para evaluar vulnerabilidad sísmica a escala urbana mediante métodos analíticos y numéricos en el centro histórico de Cusco, Perú. Identificaron arquetipos representativos, expresando la capacidad estructural mediante curvas de capacidad para mecanismos fuera y dentro del plano. Compararon estas curvas con demandas sísmicas probables para evaluar probabilidades de alcanzar estados de daño pre-establecidos, recolectando las probabilidades en Matrices de Probabilidad de Daño (DPMs) y trazando curvas de fragilidad correspondientes.

Ademović et al. (2024) examinaron diversos procedimientos de modelamiento numérico de edificaciones de mampostería del siglo XIX en Sarajevo utilizando el software DIANA FEA. Investigaron sistemáticamente la respuesta sísmica de un edificio típico de la era Austro-Húngara con diversas tipologías de diafragma horizontal. Los análisis comparativos de Modelos de Grieta por Deformación Total (TSCMs) y el Modelo de Material de Ingeniería (EMM) clarificaron comportamientos distintos en capacidad de carga y ductilidad, determinando que el tipo de conexión de losa influye significativamente en rigidez, capacidad y ductilidad estructural.

Bellalem et al. (2024) evaluaron el riesgo sísmico del centro de la ciudad de Blida, Algeria, caracterizada por alta exposición sísmica, población densa y edificaciones envejecidas. Condujeron un estudio extensivo utilizando el software SELINA para evaluar riesgo sísmico y sus consecuencias bajo múltiples escenarios de terremotos. El análisis de sensibilidad demostró la importancia de la selección del método de cálculo del punto de desempeño (IDCM, MADRS y método N2) y la ecuación de predicción de movimiento del terreno. Estimaron ratios de daño medio de $52.6\% \pm 1.4\%$ para el escenario de Blida y Bounaïan (Mw7.1).

Canditane et al. (2023) investigaron mecanismos de falla y comportamiento de edificaciones de mampostería de adobe mediante un estudio de caso en Portugal. Propusieron una ley constitutiva no lineal para mampostería de adobe calibrada numéricamente con resultados experimentales, implementada en SAP2000. Emplearon un enfoque de macro-modelamiento basado en el modelo de grieta distribuida por deformación total, validando propiedades mecánicas mediante comparación con literatura. El modelo demostró buena concordancia con datos experimentales y fue aplicado para evaluar desempeño sísmico de un edificio representativo del patrimonio de Aveiro.

Riccio et al. (2023) estudiaron la falla estructural sísmica de la pirámide principal de Huaca de la Luna, Perú, construida con millones de ladrillos de adobe por la civilización Moche (200-850 D.C.). Introdujeron un modelo de elementos finitos no lineal 2D multiescala de macrobloques para evaluar la contribución de la arquitectura de pilares a la respuesta estructural. Utilizaron la evolución temporal de energías de deformación elástica y disipación plástica para rastrear cuantitativamente la falla estructural, extrayendo el

instante de colapso y capacidad lateral del punto donde estas energías coinciden.

Cosgun et al. (2023) documentaron todas las etapas de restauración de una escuela histórica de mampostería con losas de madera construida en 1912 en Bursa, Türkiye, incluyendo evaluación del desempeño sísmico y propuesta de retrofitting. El estudio comprendió seis etapas: investigación histórica, exámenes in-situ, ensayos de laboratorio, implementación de restauración, análisis numéricos lineales y no lineales, y propuesta de retrofitting. Las fuerzas cortantes y derivas fueron comparadas con valores límite del código sísmico aplicable para evaluar el desempeño estructural.

Acharya et al. (2023) validaron un modelo numérico de mampostería confinada (CM) con resultados experimentales, comparando su comportamiento bajo carga sísmica con construcción de concreto reforzado en el contexto de Nepal. Desarrollaron modelos de elementos finitos para muros de mampostería confinada validados con literatura existente, seguidos de modelos de edificaciones prototípicas de CM y RC utilizando propiedades de materiales locales. Ejecutaron análisis pushover y prepararon curvas de fragilidad, estableciendo que la construcción CM representa una práctica viable técnica y económicamente en zonas sísmicamente vulnerables.

Rajkumari et al. (2022) sintetizaron una revisión exhaustiva del estado del arte sobre análisis de fragilidad de estructuras sometidas a excitación sísmica. Categorizaron los estudios en diferentes clases: estructuras prefabricadas, con o sin influencia de interacción suelo-estructura, edificaciones en regiones montañosas, torres de transmisión y presas de enrocado con cara de concreto. Identificaron que los métodos de análisis adoptados incluyen análisis pushover estático no lineal, análisis de historia temporal dinámica y análisis dinámico incremental, proporcionando una idea colectiva del dominio e identificando áreas menos atendidas que requieren mayor prioridad investigativa.

Usta y Bozdağ (2022) examinaron el comportamiento sísmico de estructuras tradicionales turcas himis (sistema mixto de pórtico de madera con relleno de mampostería de adobe, ladrillo o piedra) bajo diferentes aceleraciones sísmicas. Modelaron las edificaciones mediante el enfoque de elementos finitos en SAP2000 V22, determinando características dinámicas y ejecutando análisis de historia temporal para obtener ratios de deriva. Definieron la demanda sísmica de los tipos de estructura himis y realizaron evaluación probabilística de riesgo sísmico y estimación de daños, derivando curvas de fragilidad para cada tipología constructiva.

Greco y Lourenço (2021) abordaron la evaluación sísmica de grandes edificaciones históricas vernáculas de adobe en la región andina del Perú, centrándose en Casa Arones en Cusco. Tras el terremoto de Pisco 2007, el Getty Conservation Institute inició un proyecto para comprender el desempeño sísmico de cuatro tipologías de edificaciones históricas de tierra. Utilizaron análisis numérico avanzado para evaluar comportamiento global, distribución de daños y mecanismos de falla, empleando además análisis de sensibilidad para comprender la influencia de pisos y techos en el comportamiento global.

Briceño et al. (2021) integraron técnicas no destructivas para análisis de desempeño sísmico de la Iglesia San Pedro Apóstol en Andahuaylillas, sur del Perú. Combinaron técnicas no destructivas para evaluación geométrica y de daños con modelamiento numérico no lineal y herramientas analíticas simplificadas. La metodología incluyó caracterización dinámica experimental, análisis estático no lineal para simulación del patrón de agrietamiento, y enfoques analíticos basados en análisis cinemático y método N2. Los resultados identificaron alta vulnerabilidad sísmica ante terremotos con período de retorno de 72 años debido a mecanismos de balanceo de fachada y volteo fuera del plano.

Kim et al. (2021) propusieron una estrategia para evaluar vulnerabilidad sísmica de columnas masivas de mampostería exentas utilizando el Método de Elementos Discretos 3D (DEM). Calibraron parámetros elásticos mediante datos de ensayos de vibración ambiental y desarrollaron curvas de fragilidad a partir de resultados de análisis de historia temporal. Verificaron el procedimiento para cuatro torres de agua seleccionadas en Pompeya, Italia, modelando las torres como bloques monolíticos rígidos. Las curvas de fragilidad desarrolladas revelaron probabilidades de volteo de las estructuras investigadas y permitieron conducir un estudio paramétrico de constantes de amortiguamiento de Rayleigh.

Jiménez et al. (2021) extendieron el Método de Índice de Vulnerabilidad (VIM) a la evaluación sísmica de edificaciones híbridas de madera-mampostería en Valparaíso, Chile. Ejecutaron un estudio numérico detallado para identificar clases y calibrar puntajes asignados a parámetros influyentes de vulnerabilidad mediante análisis pushover con variaciones realistas de parámetros estructurales. Analizaron el desempeño sísmico mediante el Método N2, proponiendo una nueva forma de índice de vulnerabilidad calibrado aplicado a 111 edificaciones del centro histórico de Valparaíso.

Aguilar et al. (2019) desarrollaron una metodología integrando herramientas de ingeniería inversa con métodos analíticos avanzados y simplificados para análisis predictivo del comportamiento estructural de edificaciones históricas de adobe bajo cargas sísmicas. Utilizaron escáner láser terrestre y fotogrametría para obtener modelos geométricos precisos, junto con medición in-situ de propiedades estructurales mediante ensayos modales experimentales. Validaron la metodología en la iglesia de San Juan Bautista de Huaro, Cusco, Perú, demostrando que los mecanismos de falla más probables serían balanceo global de fachada y colapso parcial del tímpano.

Mosoarca et al. (2019) investigaron la vulnerabilidad sísmica de 25 edificaciones de dos áreas históricas de Timisoara, Rumania, clasificándolas según características geométricas y estructurales. Determinaron vulnerabilidad sísmica para diferentes escenarios dependiendo de intensidad macrosísmica EMS-98, utilizando el Método de Índice de Vulnerabilidad y metodología mecánica basada en análisis pushover con software Tremuri. Por primera vez en Timisoara, trazaron curvas de vulnerabilidad y fragilidad, proponiendo además una metodología que considera la influencia del valor cultural en el proceso de evaluación.

Michiels et al. (2019) presentaron una metodología novedosa de búsqueda de forma para diseño sísmico conceptual de cascarones corrugados, asegurando que exista una trayectoria de carga en compresión para resistir aceleraciones sísmicas laterales. Derivaron geometrías de cascarones mediante estática gráfica a partir de polígonos funiculares para cargas gravitacionales y horizontales combinadas. Validaron la metodología mediante análisis pushover no lineal, demostrando que la capacidad lateral antes del agrietamiento en formas corrugadas es hasta 79 % mayor que cascarones de referencia sin corrugaciones considerando material idéntico.

Ortega et al. (2018) evaluaron la eficiencia de técnicas tradicionales sismorresistentes para arquitectura vernácula mediante análisis numérico detallado basado en modelamiento de elementos finitos y análisis pushover estático no lineal. Reconocieron que elementos arquitectónicos específicos sismorresistentes fueron desarrollados empíricamente por comunidades locales en regiones frecuentemente expuestas a terremotos. El objetivo principal fue evaluar numéricamente la eficiencia de medidas comunes adoptadas por comunidades locales para reparar y restaurar viviendas, proporcionando mejor comprensión de su rol estructural bajo cargas sísmicas.

Aguilar et al. (2018) presentaron resultados de una evaluación comprehensiva de ingeniería para comprender la condición actual de daño estructural de la pirámide principal de la cultura Moche de Huaca de la Luna, Perú, construida con mampostería de adobe entre 100 y 600 D.C. Un equipo interdisciplinario realizó diagnóstico de ingeniería involucrando levantamiento detallado, mapeo geométrico, caracterización multi-escala de componentes materiales, evaluación geotécnica de condiciones de fundación y modelamiento numérico predictivo avanzado. Los resultados indicaron que el origen del daño observado está asociado a espesores variables de capas de fundación y condiciones de alta presión de fundación.

Torres et al. (2017) se enfocaron en la calibración y ajuste de un modelo de elementos finitos para la Catedral Metropolitana de Santiago, Chile, basándose en propiedades modales y de materiales identificadas experimentalmente. Realizaron una campaña experimental in-situ para obtener respuesta estructural ante vibraciones ambientales, empleando seis acelerómetros triaxiales de alta sensibilidad. Aplicaron métodos de identificación de sistemas Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) y Stochastic Subspace Identification (SSI), mientras ensayos mecánicos fueron ejecutados en bloques de piedra de la Catedral para actualizar el modelo.

Asteris et al. (2014) presentaron una metodología para diseño o evaluación sismorresistente de sistemas estructurales de mampostería, ilustrada mediante estudios de caso de estructuras históricas en el área europea. Verificaron la aplicabilidad del método propuesto mediante análisis de edificaciones de mampostería existentes en tres países: Grecia, Portugal y Chipre, con diferentes niveles de sismicidad. Derivaron conclusiones útiles respecto a la efectividad de técnicas de intervención utilizadas para reducción de vulnerabilidad, mediante comparación de resultados obtenidos en las estructura.

Bakhshi y Asadi (2013) desarrollaron curvas de fragilidad para evaluar parámetros de diseño sísmico de pórticos de concreto reforzado (RC) considerando diversos parámetros probabilísticos incluyendo PGA, factor de importancia (I) y capacidad de ductilidad global (R). Demostraron que al incrementar la capacidad de ductilidad global, la probabilidad de excedencia de daño disminuye; sin embargo, un incremento en el factor de importancia para edificios hospitalarios versus edificios de oficinas no garantiza disminución en probabilidad de excedencia de daño. Los resultados de aleatoriedad del PGA revelaron que considerar incertidumbre del PGA no significa necesariamente incremento en probabilidad de excedencia de daño.

Cuadro 1

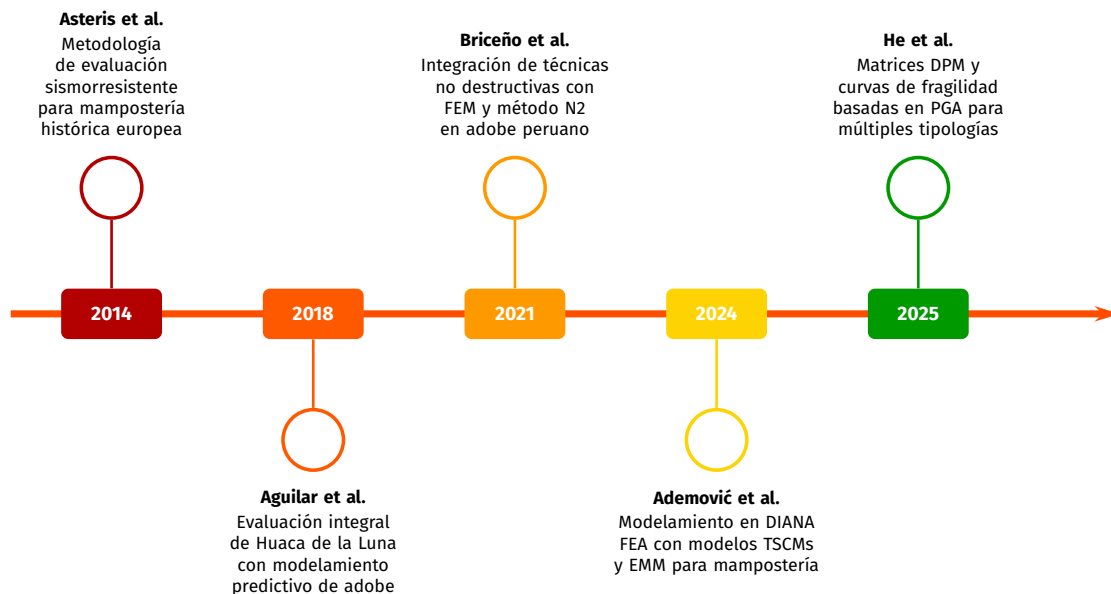
Comparación analítica de antecedentes internacionales sobre vulnerabilidad sísmica y análisis no lineal en estructuras de mampostería y adobe

Autor(es)	Año	Aporte principal	Brecha/Limitación identificada
Ademović et al.	2024	Modelamiento en DIANA FEA con modelos TSCMs y EMM para mampostería del siglo XIX en Sarajevo.	Aplicado a mampostería europea, sin validación para adobe sudamericano.
Cuadros-Rojas et al.	2024	Análisis pushover FEM 3D con fotogrametría SfM en templo de adobe en Huaytará, Perú.	Aplicado a patrimonio histórico, no a viviendas rurales autoconstruidas.
Cocco et al.	2024	Evaluación de vulnerabilidad a escala urbana en Cusco con curvas de capacidad y DPMs para adobe.	Metodología a escala urbana, sin modelamiento detallado individual.
Canditane et al.	2023	Ley constitutiva no lineal para adobe calibrada en SAP2000 con macro-modelamiento en Portugal.	Propiedades calibradas para adobe portugués, requiere adaptación local.
Acharya et al.	2023	Análisis pushover y curvas de fragilidad para mampostería confinada en Nepal.	Mampostería confinada diferente al adobe simple sin confinamiento.
Greco & Lourenço	2021	Evaluación sísmica de Casa Arones en Cusco con análisis numérico avanzado de adobe.	Edificación patrimonial de gran escala, sin aplicación a viviendas rurales.
Briceño et al.	2021	Integración de técnicas no destructivas con FEM y método N2 en Andahuaylillas, Perú.	Enfocado en patrimonio eclesiástico, requiere adaptación a viviendas.
Jiménez et al.	2021	Extensión del Método VIM calibrado con pushover para 111 edificaciones en Valparaíso.	Aplicado a estructuras híbridas madera-mampostería, no a adobe puro.
Aguilar et al.	2019	Ingeniería inversa con FEM para iglesia de adobe en Huaro, Cusco, identificando mecanismos de falla.	Metodología sofisticada para patrimonio, alto costo para aplicación rural.
Ortega et al.	2018	Evaluación numérica de técnicas sismorresistentes en arquitectura vernácula con pushover.	Sin comparación con criterios de evaluación tipo INDECI.

Nota. Elaboración propia basada en revisión sistemática de investigaciones internacionales (2018-2024).

Figura 4

Evolución cronológica de investigaciones sobre análisis no lineal y vulnerabilidad sísmica en estructuras de mampostería y adobe



Nota. Elaboración propia basada en revisión de literatura de investigaciones internacionales (2013-2025).

2.1.1.1 Síntesis de brechas identificadas en investigaciones internacionales

El análisis comparativo de los antecedentes internacionales revela patrones consistentes de limitaciones y oportunidades de mejora que justifican la presente investigación:

- Enfoque predominante en edificaciones patrimoniales monumentales:** La mayoría de investigaciones internacionales (Aguilar et al., 2018, 2019; Briceño et al., 2021; Cocco et al., 2024; Cuadros-Rojas et al., 2024; Greco & Lourenço, 2021) se centran en estructuras patrimoniales de gran escala como iglesias, templos, y edificaciones históricas protegidas, sin abordar específicamente viviendas rurales autoconstruidas de adobe que constituyen el stock habitacional vulnerable en zonas andinas del Perú y que presentan características constructivas, dimensiones y configuraciones estructurales sustancialmente diferentes.
- Aplicación de DIANA FEA limitada a mampostería europea:** Las investigaciones que implementan el software especializado DIANA FEA con modelos constitutivos TSCMs y EMM (Ademović et al., 2024) se han desarrollado predominantemente para mampostería de ladrillo y piedra del contexto europeo, sin validación sistemática de estos modelos constitutivos para adobe peruano con sus características mecánicas particulares de baja resistencia a tracción, comportamiento frágil y mecanismos de agrietamiento diferenciados.
- Propiedades mecánicas calibradas para contextos geográficos extranjeros:** Los estudios que proponen leyes constitutivas no lineales para adobe (Canditane et al., 2023; Usta & Bozdağ, 2022) calibran sus parámetros mecánicos con ensayos experimentales realizados en Portugal, Türkiye y otras regiones, cuyas características

de suelo, técnicas de fabricación artesanal, contenido de fibras y procesos de curado difieren sustancialmente del adobe tradicional peruano elaborado en la sierra andina, requiriendo adaptación y validación local.

- d) **Metodologías de alta complejidad y costo para contexto rural:** Las técnicas avanzadas empleadas internacionalmente como fotogrametría SfM, escáner láser terrestre, ensayos modales experimentales con acelerómetros triaxiales y caracterización multi-escala de materiales (Aguilar et al., 2019; Cuadros-Rojas et al., 2024; Torres et al., 2017) implican equipamiento especializado, software costoso y personal altamente calificado, limitando su aplicabilidad práctica para evaluación masiva de viviendas rurales en contextos de recursos limitados como el distrito de Huancaray.
- e) **Ausencia de comparación con criterios de evaluación simplificada tipo INDECI:** Ninguna investigación internacional contrasta sistemáticamente los resultados del modelamiento numérico no lineal con los criterios de evaluación simplificada empleados en fichas técnicas de INDECI u otras metodologías cualitativas de evaluación rápida, lo cual es fundamental para validar o cuestionar la precisión de estas herramientas ampliamente utilizadas en el contexto peruano para priorización de intervenciones y gestión del riesgo de desastres.
- f) **Curvas de fragilidad desarrolladas para tipologías constructivas diferentes:** Los estudios que generan curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño (Acharya et al., 2023; Bakhshi & Asadi, 2013; Guettiche et al., 2025; He et al., 2025) las desarrollan para tipologías como mampostería confinada, pórticos de concreto reforzado, estructuras híbridas madera-mampostería y sistemas constructivos asiáticos o europeos, sin establecer funciones de fragilidad específicas para viviendas de adobe de dos niveles con diafragmas flexibles características del contexto andino peruano.
- g) **Validación del modelo TSCM inexistente para adobe andino:** El modelo de Grieta por Deformación Total (*Total Strain Crack Model*) implementado en DIANA FEA ha sido validado para mampostería de ladrillo europeo (Ademović et al., 2024), pero no existen estudios que verifiquen su aplicabilidad, calibren sus parámetros constitutivos y validen sus predicciones para muros de adobe fabricados con técnicas tradicionales andinas, considerando la variabilidad inherente de este material artesanal no estandarizado.
- h) **Estudios en Perú concentrados en regiones diferentes a Apurímac:** Las investigaciones desarrolladas en territorio peruano (Aguilar et al., 2019; Briceño et al., 2021; Cocco et al., 2024; Cuadros-Rojas et al., 2024; Greco & Lourenço, 2021; Riccio et al., 2023) se localizan en regiones como Cusco, Huancavelica e Ica, sin abordar específicamente la región Apurímac que presenta características geotécnicas, prácticas constructivas tradicionales, condiciones climáticas y configuraciones arquitectónicas particulares que requieren evaluación diferenciada y generación de conocimiento localizado.

2.1.2. Investigaciones nacionales

En el contexto peruano, las investigaciones sobre vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe han experimentado un desarrollo significativo durante la última década, impulsadas por la necesidad de reducir el riesgo sísmico en poblaciones rurales donde predomina la construcción artesanal. Si bien la mayoría de estudios iniciales se enfocaron en metodologías cualitativas basadas en fichas de evaluación visual, emergen trabajos recientes que incorporan técnicas de análisis numérico mediante elementos finitos y métodos de desempeño sísmico. A continuación, se presentan las investigaciones nacionales más relevantes que constituyen antecedentes directos para el presente estudio.

García Llico (2025) analizó la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe del centro poblado de Cotaruse, provincia de Aymaraes, región Apurímac, aplicando el método multicriterio de Saaty para evaluar dimensiones de estabilidad de muros, configuración de vivienda, condición de materiales y suelo de cimentación conforme a la Norma Técnica E.080. La investigación de tipo aplicada y diseño no experimental-transversal evaluó 67 viviendas de adobe mediante fichas de observación y reporte, determinando que el 9 % presenta vulnerabilidad alta mientras que el 91 % exhibe vulnerabilidad media, sin registrarse casos de vulnerabilidad baja. Los resultados evidenciaron que la densidad de muros constituye el parámetro más incidente, observándose que el 9 % de viviendas presenta densidad menor al 8 % establecido por la norma.

Palomino Vega (2025) sintetizó la evaluación de vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe del Caserío Guadalupe, distrito de Bagua, región Amazonas, aplicando metodología cuantitativa, método hipotético-deductivo, tipo básico y diseño no experimental descriptivo. La investigación empleó una muestra de 30 viviendas utilizando cuestionarios y guías de observación para evaluar las condiciones constructivas. Los resultados evidenciaron que el 63.3 % de viviendas presentan vulnerabilidad física debido a antigüedad, topografía y suelos; además, 27 de las 30 viviendas carecen de junta sísmica y 21 tienen cimientos y sobrecimientos inadecuados. Se concluyó que el 70 % son vulnerables sísmicamente, el 7 % muy vulnerable y el 23 % poco vulnerable.

Baca Ramos y Valdez Chipa (2024) desarrollaron la evaluación de vulnerabilidad y comportamiento sísmico de viviendas autoconstruidas del distrito de Tamburco, provincia de Abancay, región Apurímac, empleando una metodología dual que integra el índice de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini con modelamiento estructural en software ETABS 2018. La investigación de enfoque cuantitativo y diseño no experimental consideró una población de 436 viviendas, seleccionando una muestra de 5 viviendas. Los resultados demostraron que tres viviendas presentan vulnerabilidad sísmica alta, con índices de 78.26, 91.29 y 78.26 dentro del rango $40 \leq I_{vn} < 100$. Respecto al comportamiento sísmico, las derivas en dirección X alcanzaron valores de 0.0077 y 0.0083, mientras que en dirección Y se obtuvieron 0.0082, superando el límite de 0.007 de la norma E.030.

García Chávez (2024) evaluó la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe del centro histórico de Chachapoyas mediante análisis estático no lineal y curvas

de fragilidad, constituyendo una de las investigaciones más completas en el ámbito nacional. El procedimiento metodológico consistió en modelar y calibrar una edificación típica utilizando elementos finitos en SAP2000, empleando elementos tipo *shell layered/nonlinear* para obtener la capacidad estructural ante cargas laterales. Mediante simulación Montecarlo se generaron 300 viviendas sometidas a 244 registros sísmicos para evaluar la probabilidad de excedencia de cuatro estados de daño. Las curvas de fragilidad obtenidas indican que para un PGA de 0.20g correspondiente a un sismo ocasional, el 49 % de las viviendas colapsarían, evidenciando la alta vulnerabilidad del patrimonio edificado.

Rozas Villasante y Condori Cusi (2024) determinaron el nivel de vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe de dos niveles en el centro poblado de Pucyura, provincia de Anta, Cusco, mediante dos tipos de análisis complementarios. Desarrollaron un análisis cualitativo aplicando la metodología de Benedetti-Petrini a 40 viviendas, y consolidaron un análisis cuantitativo mediante el método N2, determinando las demandas de desplazamiento y nivel de daño esperado para tres viviendas tipo. Los resultados cualitativos evidenciaron que el 55 % de viviendas tienen vulnerabilidad alta y el 45 % muy alta. El análisis cuantitativo determinó demandas de desplazamiento de 2.96 cm, 7.56 cm y 4.36 cm para las viviendas tipo, con nivel de daño esperado severo en todos los casos.

Albines Bruno (2024) examinó la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas del centro poblado San Miguel-Jorge Chávez, distrito de Tambogrande, región Piura, empleando enfoque cuantitativo y diseño no experimental. La investigación aplicó una ficha de observación con 12 preguntas cerradas para determinar la vulnerabilidad sísmica, evaluando una población de 39 viviendas. Los resultados indicaron que el 21% de las viviendas estaban construidas con adobe, de las cuales el 75 % presentaba vulnerabilidad alta y el 25 % vulnerabilidad bastante alta. El 79 % restante correspondía a albañilería confinada con distribución de 13 % vulnerabilidad baja, 23 % moderada, 61 % alta y 3 % bastante alta frente a un sismo de intensidad moderada a alta.

Orellana Minaya y Vasquez Palacios (2024) presentaron la utilidad de aplicar validación inelástica mediante análisis estático no lineal Pushover al diseño de viviendas multifamiliares de concreto armado en Villa el Salvador, Lima. Se propuso una vivienda de 5 pisos empleando criterios de predimensionamiento de Antonio Blanco Blasco. El diseño estructural aplicó criterios del RNE mediante ETABS, realizándose análisis Pushover según ASCE 41-17. La validación por desempeño sísmico siguió límites de FEMA 356 y Vision 2000 del SEAOC, demostrando cumplimiento de niveles de desempeño al alcanzar nivel totalmente operacional ante sismo severo o raro.

Salamanca Barja y Santiago Chavez (2023) propusieron un método integral multidimensional de estimación de vulnerabilidad sísmica en hogares rurales del anexo Santa Rosa de Canchacalla, construyendo una técnica valorativa mediante el método AHP. La metodología analizó calidad de construcción y condiciones de residentes como aspectos determinantes, incluyendo dimensiones físicas, sociales, ambientales, económicas e interculturales. Se empleó georreferenciación para mapear zonas susceptibles mediante

software GIS. La evaluación integral determinó que el 99 % de viviendas se encuentran en rango de vulnerabilidad alto y muy alto, respaldando la hipótesis y contribuyendo al conocimiento de vulnerabilidad sísmica rural.

Gutierrez Mendoza y Villacorta Olivares (2023) estimaron el comportamiento sísmico mediante análisis no lineal estático de una vivienda multifamiliar de 8 niveles en La Esperanza, Trujillo. La investigación aplicada y diseño no experimental descriptivo dividió la estructura en dos módulos. Los resultados encontraron punto de desempeño máximo en seguridad de vida para sismo con retorno de 72 años en eje X y funcional en eje Y; para sismos con retorno de 450 y 975 años se encontraron en estado de colapso en ambas direcciones. Los módulos no superaron resistencias de 656.32 tonf en X ni 1023.76 tonf en Y, generándose rótulas plásticas en vigas según ASCE 41-13 y FEMA 440.

Calle Huamán y Salazar Ildefonso (2023) evaluaron la vulnerabilidad y comportamiento sísmico de viviendas de albañilería confinada autoconstruidas en el pueblo joven Santa Rosa, distrito del Rímac, Lima, mediante dos procedimientos metodológicos. Primero, aplicaron la metodología Mosqueira-Tarque mediante fichas de encuesta y reporte para recopilar datos sobre procesos constructivos, estructuración y calidad de materiales, determinando vulnerabilidad basada en densidad de muros y estabilidad al volteo. Segundo, realizaron análisis del comportamiento sísmico mediante ETABS 2019, calculando fuerza cortante basal y desplazamientos relativos según el RNE y estudio de riesgo sísmico del CISMID, evidenciando alto nivel de vulnerabilidad frente a fenómenos sísmicos.

Mamani Poma (2022) investigó la magnitud de vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales de dos niveles autoconstruidas en adobe en la parcialidad de Japisse, centro poblado Mallco, región Puno, considerando la problemática de autoconstrucción sin marco normativo sismorresistente. La metodología descriptiva, no experimental y transaccional empleó fichas por recomendación del INDECI y datos para simulación en ETABS. De las 191 viviendas estudiadas se identificaron 4 tipologías de construcción, concluyéndose que el 70 % poseen vulnerabilidad alta y el 30 % vulnerabilidad muy alta, reflejando las deficientes condiciones constructivas de edificaciones de adobe en zonas altoandinas del Perú.

Nizama Flores y Yamunaque Ramos (2022) formularon el análisis de vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe del distrito de La Huaca, provincia de Paita, región Piura, con el objetivo de identificar deficiencias constructivas y determinar el rango de vulnerabilidad según la norma E.080. La investigación aplicada y diseño no experimental cuantitativo consideró una población de 481 viviendas, trabajando con muestra no probabilística de 30 viviendas de adobe. Se empleó observación directa con ficha de verificación INDECI. Los resultados indicaron que el 80 % presenta vulnerabilidad muy alta y el 20 % vulnerabilidad alta, atribuyéndose a humedad capilar de muros, ausencia de juntas sísmicas y deterioro de elementos estructurales.

Carhuanira Herrera (2021) determinó la vulnerabilidad sísmica de viviendas informales de albañilería confinada en el sector Aranjuez, Trujillo, zona 4 de sismicidad alta según norma E.030-2018. Se emplearon métodos cualitativos y cuantitativos descriptivos, recolectando

datos mediante entrevistas, observación y levantamiento de viviendas. El área delimitada cuenta con 572 viviendas informales como población, encuestándose 17 como muestra. Se emplearon fichas de encuesta para características arquitectónicas, estructurales y constructivas, y fichas de reporte para análisis sísmico, densidad de muros y estabilidad de tabiques, cercos y parapetos por volteo.

Arevalo Casas (2020) diagnosticó el riesgo y comportamiento sísmico en viviendas informales del asentamiento humano San José, San Martín de Porres, Lima, aplicando dos métodos diferenciados a 7 edificaciones de albañilería confinada. La metodología cualitativa mediante fichas de encuesta describió características estructurales, arquitectónicas y procesos constructivos, estimando vulnerabilidad, peligro y riesgo sísmico en función a densidad de muros y volteo. La metodología cuantitativa analizó comportamiento sísmico mediante ETABS 2016, calculando fuerza cortante basal, desplazamientos del centro de masa y desplazamientos relativos de entrepiso según el RNE, determinando el nivel de vulnerabilidad existente.

Acuña García (2020) propuso la evaluación de vulnerabilidad sísmica de viviendas autoconstruidas de una provincia peruana con riesgo sísmico, aplicando modelamiento estructural mediante SAP 2000. El objetivo se enmarcó en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con el derecho a vivienda digna. Se evaluó una vivienda encontrando que la estructura presenta distorsiones mayores en su eje X respecto a lo permitido por el RNE. Se determinó que la vivienda presenta diferencias constructivas y estructurales en ambos ejes, considerando necesario que los propietarios prioricen estudios geológicos para el correcto diseño de futuras infraestructuras.

Vega Fernández (2020) evaluó el desempeño sísmico mediante análisis estático no lineal de la vivienda-comercio Miura Grill en Chiclayo, aplicando FEMA 356 y ATC-40. Con ETABS se generó el modelo analítico definiendo propiedades no lineales, realizando análisis pushover para obtener curva de capacidad y formación de rótulas plásticas. El análisis de fuerzas estáticas equivalentes y dinámico modal espectral determinó que la estructura no cumple derivas permitidas por la norma E.030, demostrándose mediante análisis no lineal que la estructura colapsó para un sismo según el espectro normativo.

Flores Olortegui (2020) estableció el nivel de vulnerabilidad física de viviendas de adobe frente a eventos sísmicos en el distrito de Llama, provincia de Mariscal Luzuriaga, región Áncash. La metodología aplicada, descriptiva y diseño no experimental transversal empleó dos fichas de observación y una de encuesta a 35 viviendas de adobe. Los resultados demostraron que el 88 % tienen vulnerabilidad física alta y el 12 % muy alta; el 94 % fueron construidas sobre terreno natural con muros expuestos a lluvias, el 100 % poseen fisuramiento sin junta sísmica ni asesoramiento técnico, y el 65 % tienen fallas por tracción y 28 % por corte.

Santos Quispe (2019) consolidó el análisis de vulnerabilidad sísmica en viviendas autoconstruidas del distrito de Chilca, provincia de Huancayo, región Junín, considerando los antecedentes de daños sísmicos por la falla geológica del Huaytapallana en silencio

sísmico de 50 años. La investigación empleó tres metodologías complementarias: ATC-21, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica e INDECI, permitiendo evaluación integral de vulnerabilidad. Adicionalmente, se contrastaron límites de distorsión de entrepiso de una vivienda de albañilería mediante análisis estático sísmico y la resistencia última de muros de adobe, ambos contrastados con las normas E.030 y E.080.

Choque Sucasaca y Luque Solis (2019) desarrollaron la teoría y aplicación del diseño basado en desempeño sísmico de un edificio de 8 niveles en Arequipa, planteando dos modelos estructurales en concreto armado: pórticos y muros de corte, estudiando su comportamiento ante diferentes amenazas sísmicas. Los modelos se desarrollaron en ETABS según normativa vigente, validándose mediante análisis modal-espectral con método de rigideces. Se realizó Análisis Estático No Lineal Pushover según ASCE/SEI 41-13, obteniendo curvas de capacidad y mecanismos de rótulas plásticas. El punto de desempeño se determinó mediante Método del Espectro de Capacidad (ATC-40, FEMA 440) y Método de Coeficientes.

Valle Castro (2019) efectuó la evaluación experimental del comportamiento de muros de adobe reforzados con cuerdas sometidos a carga lateral cíclica en la Pontificia Universidad Católica del Perú, evaluando esta técnica de reforzamiento en viviendas de dos pisos. El programa experimental incluyó ensayos de cuatro pilas y cuatro muretes de mampostería, seis ensayos de tracción indirecta, tracción del refuerzo y ensayos cíclicos de cuatro muros a escala natural y reducida (1:2). Los resultados mostraron la eficacia del refuerzo con malla de cuerdas en términos de degradación de rigidez lateral, factor de amortiguamiento viscoso equivalente, energía disipada y ductilidad, superando los valores mínimos de la Norma E.080.

Salazar Huamán (2018) determinó el nivel de vulnerabilidad sísmica de 30 viviendas de albañilería confinada autoconstruidas en la ciudad de Jesús, Cajamarca, tomando como guía las recomendaciones de Kuroiwa (2012) y Mosqueira (2005) bajo método cualitativo. El trabajo de campo aplicó fichas de acopio de información sobre características de elementos de la vivienda, deficiencias estructurales, peligros potenciales naturales, estado actual, densidad de muros y estabilidad de tabiques al volteo. Los resultados muestran que el 47 % presentan vulnerabilidad sísmica alta, concluyéndose que solo algunas viviendas son vulnerables ante sismos de fuerte intensidad.

Velarde Abugattas (2014) estudió la estabilidad estructural de viviendas típicas de adobe de dos pisos en Canta, zona rural con peligro sísmico alto en Lima, diagnosticando su estado actual y planteando lineamientos de estabilización sísmica. La hipótesis estableció que las viviendas de adobe de dos o más pisos presentan características constructivas distintas a las tradicionales de un piso, habiendo soportado sismos leves y medianos pero estimándose vulnerables ante sismos severos. El desarrollo metodológico comprendió evaluación en campo para determinar tipología arquitectónica y características estructurales, levantamiento de daños comunes, y evaluación numérica para definir elementos vulnerables y alternativas de refuerzo.

Cuadro 2

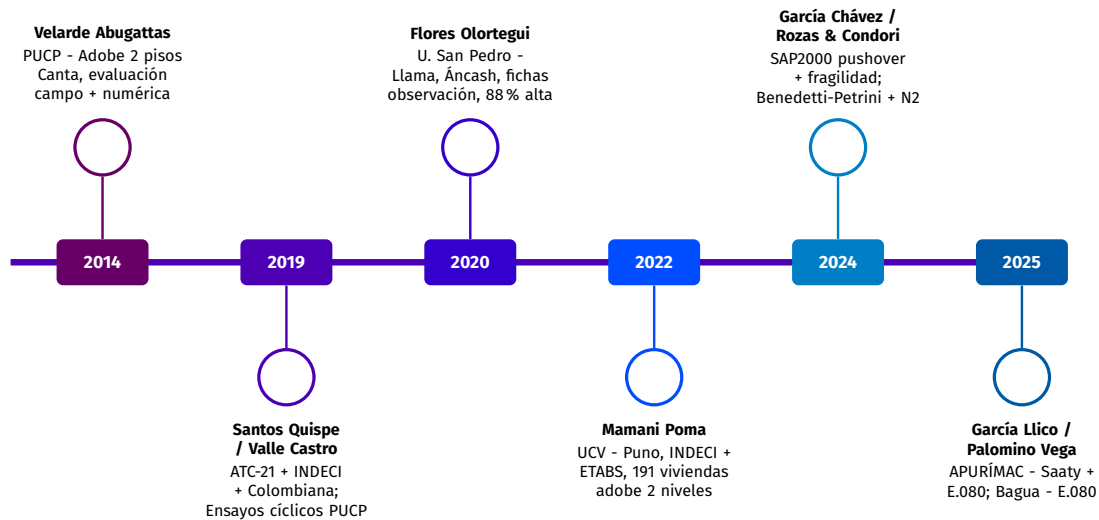
Comparación analítica de antecedentes nacionales sobre vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe y autoconstruidas

Autor(es)	Año	Aporte principal	Brecha/Limitación identificada
García Llico	2025	Método Saaty multicriterio en 67 viviendas de adobe en Cotaruse, Apurímac, según Norma E.080.	Solo método cualitativo, sin modelamiento numérico ni análisis pushover.
Baca & Valdez	2024	Benedetti-Petrini + ETABS 2018 en 5 viviendas de Tamburco, Apurímac, con derivas que superan E.030.	Muestra reducida; ETABS no especializado para mampostería de adobe.
García Chávez	2024	SAP2000 pushover + simulación Montecarlo + curvas de fragilidad en 300 viviendas adobe de Chachapoyas.	No incluye fichas cualitativas INDECI para validación comparativa.
Rozas & Condori	2024	Benedetti-Petrini + Método N2 en 40 viviendas adobe de 2 pisos en Pucyura, Cusco.	Sin uso de software FEM avanzado como DIANA con modelo TSCM.
Palomino Vega	2025	Evaluación E.080 en 30 viviendas adobe de Bagua, Amazonas, con 70 % de vulnerabilidad sísmica.	Sin análisis de comportamiento estructural ni modelamiento numérico.
Mamani Poma	2022	Ficha INDECI + ETABS en 191 viviendas adobe de 2 niveles en Japisse, Puno, con 70 % vulnerabilidad alta.	ETABS no especializado para comportamiento no lineal de mampostería adobe.
Nizama & Yamunaque	2022	Ficha INDECI + E.080 en 30 viviendas adobe de La Huaca, Piura, con 80 % vulnerabilidad muy alta.	Sin modelamiento estructural complementario para validación cuantitativa.
Flores Olortegui	2020	Fichas de observación en 35 viviendas adobe de Llama, Áncash, con 88 % vulnerabilidad alta.	Solo evaluación visual cualitativa, sin análisis numérico estructural.
Valle Castro	2019	Ensayos cíclicos de muros adobe reforzados con cuerdas en PUCP, evaluando ductilidad y energía disipada.	Experimental en laboratorio, sin aplicación directa a viviendas existentes.
Santos Quispe	2019	ATC-21 + Colombiana + INDECI en viviendas de Chilca, Huancayo, contrastando con E.030 y E.080.	Sin curvas de capacidad, análisis pushover ni modelamiento FEM.
Albines Bruno	2024	Ficha de 12 ítems en 39 viviendas rurales de Tambogrande, Piura, con 21 % adobe y 75 % vulnerabilidad alta.	Solo evaluación cualitativa observacional, sin análisis numérico.
Velarde Abugattas	2014	Evaluación campo + numérica en viviendas adobe de 2 pisos en Canta, Lima, con lineamientos de refuerzo.	Sin metodología sistemática de comparación cualitativa-cuantitativa.

Nota. Elaboración propia basada en revisión sistemática de investigaciones nacionales (2014–2025).

Figura 5

Evolución cronológica de investigaciones nacionales sobre vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe



Nota. Elaboración propia basada en la revisión de literatura de investigaciones nacionales (2014–2025).

2.1.2.1 Síntesis de brechas identificadas en investigaciones nacionales

El análisis comparativo de los antecedentes nacionales revela patrones consistentes de limitaciones y oportunidades de mejora que justifican la presente investigación:

- Predominio de metodologías cualitativas sin modelamiento numérico avanzado:** La mayoría de investigaciones nacionales (Albines Bruno, 2024; Flores Olortegui, 2020; Nizama Flores & Yamunaque Ramos, 2022; Palomino Vega, 2025) aplican exclusivamente fichas de evaluación visual basadas en metodologías INDECI, ATC-21 o Benedetti-Petrini, sin complementar los resultados cualitativos con análisis numérico que permita cuantificar la capacidad resistente, ductilidad y mecanismos de falla de las estructuras de adobe.
- Uso de software comercial no especializado para mampostería de adobe:** Las investigaciones que incorporan modelamiento estructural (Arevalo Casas, 2020; Baca Ramos & Valdez Chipa, 2024; Calle Huamán & Salazar Ildefonso, 2023; Mamani Poma, 2022) utilizan predominantemente ETABS, software diseñado para estructuras de concreto armado y acero, cuyas formulaciones constitutivas no representan adecuadamente el comportamiento frágil y los mecanismos de agrietamiento característicos de la mampostería de adobe.
- Ausencia del modelo constitutivo TSCM en software especializado:** Ninguna investigación nacional ha implementado el *Total Strain Crack Model* (TSCM) en software especializado de elementos finitos como DIANA FEA, modelo constitutivo ampliamente validado en la literatura internacional para representar el comportamiento no lineal de mampostería no reforzada sometida a cargas sísmicas.
- Falta de comparación sistemática entre métodos cualitativos y cuantitativos:** Los estudios que emplean metodología dual (Rozas Villasante & Condori Cusi, 2024;

Santos Quispe, 2019) no establecen correlaciones estadísticas rigurosas entre los niveles de vulnerabilidad obtenidos mediante fichas cualitativas y los indicadores de desempeño estructural derivados del análisis numérico, limitando la validación cruzada de ambos enfoques.

- e) **Concentración geográfica fuera de la región Apurímac:** La mayoría de estudios sobre vulnerabilidad sísmica en adobe se desarrollan en regiones como Lima (Velarde Abugattas, 2014), Cusco (Rozas Villasante & Condori Cusi, 2024), Puno (Mamani Poma, 2022), Piura (Albines Bruno, 2024; Nizama Flores & Yamunaque Ramos, 2022) y Amazonas (García Chávez, 2024; Palomino Vega, 2025), existiendo únicamente dos antecedentes en Apurímac (Baca Ramos & Valdez Chipa, 2024; García Llico, 2025) que no abordan el distrito de Huancaray ni emplean análisis pushover no lineal.
- f) **Limitada aplicación de curvas de fragilidad y análisis probabilístico:** Con excepción de García Chávez (2024) que desarrolló curvas de fragilidad mediante simulación Montecarlo para viviendas de adobe en Chachapoyas, ninguna investigación nacional incorpora análisis probabilístico que permita estimar probabilidades de excedencia de estados de daño para diferentes niveles de intensidad sísmica.
- g) **Fichas INDECI sin validación mediante análisis estructural:** Las investigaciones que aplican fichas técnicas de INDECI (Mamani Poma, 2022; Nizama Flores & Yamunaque Ramos, 2022; Santos Quispe, 2019) asumen la validez de los criterios cualitativos sin contrastar sistemáticamente los niveles de vulnerabilidad asignados con indicadores cuantitativos derivados de análisis estructural, tales como derivas de entrepiso, curvas de capacidad o índices de daño.
- h) **Desconexión entre investigación experimental y aplicación en viviendas reales:** El trabajo experimental de Valle Castro (2019) sobre muros de adobe reforzados con cuerdas proporciona valiosos parámetros mecánicos y curvas histeréticas, pero los resultados de laboratorio no han sido incorporados en modelos numéricos calibrados para evaluar viviendas existentes en condiciones reales de campo.

Estas brechas evidencian la necesidad de desarrollar una investigación que integre el análisis pushover no lineal mediante el modelo constitutivo en software especializado DIANA FEA con la evaluación cualitativa mediante fichas técnicas INDECI, aplicado específicamente a viviendas de adobe de dos niveles en el distrito de Huancaray, provincia de Andahuaylas, región Apurímac, permitiendo la validación cruzada de ambas metodologías y la generación de recomendaciones técnicas fundamentadas para la reducción del riesgo sísmico en la zona de estudio.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Vulnerabilidad sísmica

2.2.1.1 Definiciones y conceptos fundamentales

La vulnerabilidad sísmica representa la susceptibilidad intrínseca de una estructura a sufrir daños ante eventos sísmicos de determinada intensidad. Según Calvi et al. (2006), la vulnerabilidad permite evaluar el daño esperado de eventos sísmicos futuros, constituyendo un factor interno del elemento expuesto que corresponde a su predisposición intrínseca a ser afectado o susceptible al daño. Esta definición ha sido ampliamente adoptada en la comunidad científica internacional y constituye la base conceptual para el desarrollo de metodologías de evaluación.

Barbat et al. (2010) complementan esta visión definiendo la vulnerabilidad sísmica como “un factor interno de riesgo del elemento expuesto, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o susceptible al daño”. Esta conceptualización enfatiza que la vulnerabilidad es una propiedad inherente a la estructura, independiente de la ocurrencia del evento sísmico, pero que se manifiesta cuando dicho evento ocurre.

La diferenciación conceptual entre vulnerabilidad, fragilidad y riesgo sísmico resulta fundamental para la correcta aplicación de metodologías de evaluación. La vulnerabilidad expresa la razón de pérdida esperada dada una intensidad sísmica, mientras que la fragilidad representa la probabilidad de exceder un estado de daño específico para un nivel de intensidad dado. El riesgo sísmico, por su parte, integra el peligro sísmico, la vulnerabilidad y la exposición en una expresión probabilística de pérdidas esperadas (FEMA, 2020).

Figura 6

Iglesias de Adobe afectadas por sismos: (a) Iglesia de Ichupampa después del terremoto de Arequipa-Perú en 2016[3] y (b) Iglesia de Miska después del terremoto de Paruro-Peru



Nota. Adaptado de (Briceño et al., 2021)

2.2.1.2 Tipos de vulnerabilidad

La vulnerabilidad sísmica se clasifica en tres categorías fundamentales según los elementos afectados y las consecuencias del daño (Cardona, 2001):

- **Vulnerabilidad estructural:** Refiere la susceptibilidad de los elementos portantes del sistema resistente (columnas, muros, vigas, cimentaciones) a sufrir daños que comprometan la estabilidad global de la edificación. En estructuras de adobe, esta vulnerabilidad es particularmente crítica debido a la baja resistencia del material a esfuerzos de tracción y corte.
- **Vulnerabilidad no estructural:** Comprende los elementos arquitectónicos (tabiques, fachadas, cielos rasos), instalaciones (eléctricas, sanitarias, mecánicas) y contenidos que no forman parte del sistema resistente principal. Su falla puede generar pérdidas económicas significativas y riesgos para la vida de los ocupantes, representando típicamente el 70-80 % del valor de edificaciones no industriales.
- **Vulnerabilidad funcional:** Evalúa la capacidad de la edificación para mantener sus funciones operativas después de un evento sísmico. Esta dimensión es particularmente crítica en instalaciones esenciales como hospitales, estaciones de bomberos, centros de comunicación y edificaciones de respuesta a emergencias.

2.2.1.3 Factores que influyen en la vulnerabilidad sísmica

Cuadro 3

Factores que influyen en la vulnerabilidad sísmica de edificaciones

Categoría	Factores	Impacto en adobe
Configuración estructural	Regularidad en planta y elevación, densidad de muros, esbeltez, ubicación de vanos	Configuraciones irregulares inducen torsión y concentración de esfuerzos
Calidad de materiales	Resistencia del adobe, calidad del mortero, contenido de fibras, curado adecuado	Variabilidad alta (CV 20-40 %) afecta predicción de comportamiento
Proceso constructivo	Supervisión técnica, conexiones muro-muro, conexión muro-cubierta, arriostres	Autoconstrucción sin supervisión incrementa significativamente la vulnerabilidad
Estado de conservación	Patologías existentes, erosión, humedad, fisuras previas, mantenimiento	Deterioro progresivo reduce capacidad resistente disponible
Condiciones de sitio	Tipo de suelo, pendiente del terreno, nivel freático, amplificación local	Suelos blandos amplifican movimiento sísmico hasta 2-4 veces

Nota. Adaptado de Blondet et al. (2005) y Tarque Ruíz (2011).

2.2.2. Contexto tectónico y sismicidad histórica del Perú

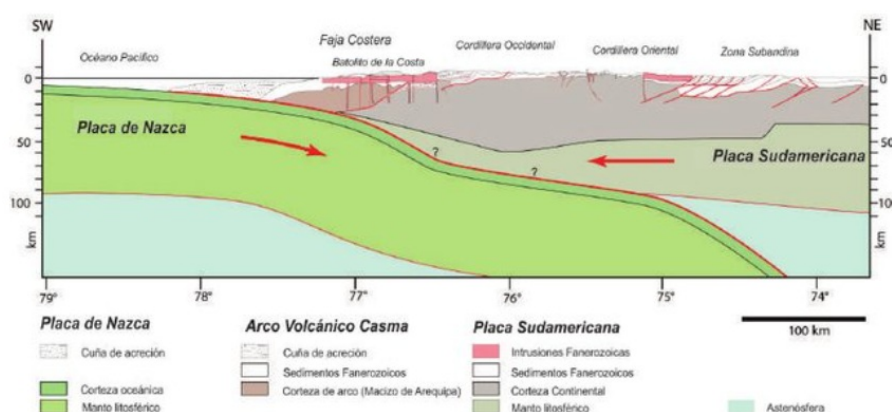
2.2.2.1 Marco tectónico regional

El territorio peruano se ubica sobre el borde occidental de la placa Sudamericana, en la zona de subducción con la placa de Nazca, configuración tectónica que genera una de las zonas sísmicamente más activas del planeta, parte del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Según Norabuena et al. (1998), la placa de Nazca converge hacia la placa Sudamericana a una velocidad de 61-78 mm/año en dirección aproximadamente perpendicular a la fosa Perú-Chile.

Barazangi y Isacks (1976) documentaron que la subducción presenta características diferenciadas a lo largo del territorio peruano. En el Perú central (9°-15°S) predomina una subducción de bajo ángulo (aproximadamente 10°), denominada “flat-slab” o subducción horizontal, mientras que en el sur peruano (15°-19°S) el ángulo de subducción es normal, aproximadamente 30°. Esta variación geométrica influye directamente en la distribución espacial de la sismicidad y en las características de los eventos sísmicos.

Figura 7

Contexto tectónico del Perú: subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana



Nota. Adaptado de Pfiffner & Gonzalez (2013).

2.2.2.2 Sismicidad histórica del Perú

El catálogo sísmico peruano documenta eventos destructivos desde el período prehispánico, con registros históricos sistemáticos desde 1471. Silgado Ferro (1978) compiló el catálogo más completo de la sismicidad histórica peruana, identificando más de 2,500 eventos significativos desde el siglo XVI.

El terremoto de Lima-Callao de 1746 (Mw 8.6-8.8) constituye el evento sísmico más destructivo registrado en el Perú central. Según Dorbath et al. (1990), este evento destruyó el 97% de las edificaciones de Lima en menos de cuatro minutos, causando aproximadamente 1,141 muertes directas en la ciudad. El tsunami subsecuente devastó completamente el puerto del Callao, dejando menos de 200 sobrevivientes de una población estimada en 5,000 habitantes.

Cuadro 4*Principales sismos históricos del Perú con impacto en construcciones de adobe*

Año	Ubicación	Mw	Impacto en construcciones de adobe
1746	Lima-Callao	8.6-8.8	Destrucción del 97 % de Lima; colapso masivo de adobe
1868	Arica	8.8-9.1	25,000 víctimas; destrucción total de Arica, Tacna, Moquegua
1970	Ancash	7.9	66,794-70,000 fallecidos; 40,000 muertes por colapso de adobe
2001	Arequipa	8.4	83 fallecidos; daño extenso en construcciones tradicionales
2007	Pisco	8.0	595 víctimas; 48,208 viviendas destruidas, mayoría de adobe

Nota. Adaptado de Silgado Ferro (1978), Tavera (2014) e Instituto Geofísico del Perú (2007).

El terremoto de Ancash del 31 de mayo de 1970 (Mw 7.9) representa el desastre sísmico más mortífero del hemisferio occidental en el siglo XX. Plafker et al. (1971) documentaron que el evento causó entre 66,794 y 70,000 fallecidos, con aproximadamente 200,000 edificaciones destruidas. Un hallazgo particularmente significativo fue que cerca de 40,000 muertes se atribuyeron directamente al colapso de estructuras de adobe, que fallaron después de apenas 15 segundos de movimiento fuerte. El 90 % de las viviendas en Huaraz fueron destruidas, mientras que en las ciudades costeras la destrucción de construcciones de adobe alcanzó el 80-90 %.

El terremoto de Pisco de 2007 (Mw 8.0) causó 595 víctimas fatales y destruyó 48,208 viviendas, afectando particularmente las construcciones de adobe que representaron la mayor proporción de estructuras colapsadas (Tavera, 2014). Las observaciones post-sismo documentadas por Blondet et al. (2008a) confirmaron que las viviendas de adobe reforzadas con malla de caña y vigas collar, construidas bajo el programa JICA-CISMID, presentaron únicamente agrietamientos menores, mientras que las construcciones tradicionales adyacentes colapsaron completamente.

2.2.2.3 Silencio sísmico y peligro actual

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha identificado que el segmento central de la costa peruana, frente a Lima, se encuentra en un período de silencio sísmico significativo. Considerando que han transcurrido más de 275 años desde el terremoto de 1746 y que el intervalo de recurrencia estimado es de 290-305±40 años, la probabilidad de un evento mayor en las próximas décadas es considerablemente alta (Tavera, 2014). Este escenario representa una amenaza crítica para Lima Metropolitana, donde residen más de 10 millones de habitantes y donde un porcentaje significativo de viviendas, particularmente en zonas periurbanas y asentamientos humanos, están construidas con adobe o materiales precarios sin supervisión técnica.

2.2.3. Peligro sísmico y zonificación según la NTE E.030

2.2.3.1 Definición de peligro sísmico

El peligro sísmico se define como la probabilidad de exceder diferentes niveles de un parámetro de severidad sísmica seleccionado en un lugar determinado y dentro de un período de tiempo dado, debido a la actividad sísmica esperada en la región (Cornell, 1968). Esta definición cuantitativa distingue claramente el peligro (fenómeno físico natural) del riesgo (probabilidad de pérdidas), donde el riesgo combina peligro, exposición y vulnerabilidad.

Kramer (1996) establecen que la caracterización del peligro sísmico requiere definir: (1) las fuentes sismogénicas potenciales, (2) la distribución de magnitudes esperadas, (3) las relaciones de atenuación del movimiento del suelo, y (4) los efectos de sitio locales. El resultado típico de un análisis de peligro sísmico probabilístico (PSHA) es una curva de peligro que relaciona niveles de intensidad sísmica con sus tasas anuales de excedencia.

2.2.3.2 Zonificación sísmica del Perú

La Norma Técnica de Edificación E.030 “Diseño Sismorresistente” (actualizada mediante D.S. N° 002-2018-VIVIENDA) establece la zonificación sísmica del Perú en cuatro zonas basadas en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación con la distancia epicentral (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Cuadro 5

Zonificación sísmica del Perú según NTE E.030

Zona	Factor Z	Ubicación geográfica	Interpretación
Zona 4	0.45	Costa peruana	Máximo peligro, PGA = 0.45g (10 % excedencia en 50 años)
Zona 3	0.35	Sierra occidental	Peligro alto
Zona 2	0.25	Sierra central y oriental	Peligro moderado
Zona 1	0.10	Selva amazónica	Peligro bajo

Nota. El factor Z representa la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años (período de retorno de 475 años). Adaptado de Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018).

El distrito de Huancaray, ubicado en la provincia de Andahuaylas, región Apurímac, se encuentra clasificado en la **Zona Sísmica 2** con un factor de zona Z = 0.25, correspondiente a un nivel de peligro sísmico moderado. Esta clasificación implica que el diseño sísmico debe considerar una aceleración máxima del suelo de 0.25g para el período de retorno normativo de 475 años.

2.2.3.3 Parámetros de sitio

Los parámetros de sitio amplifican o reducen el movimiento sísmico según las características del suelo de fundación. La NTE E.030 define cinco perfiles de suelo (S0 a S4) basados en la velocidad de propagación de ondas de corte ($\bar{V}_s$) y otros parámetros geotécnicos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018):

Cuadro 6

Clasificación de perfiles de suelo según NTE E.030

Perfil	Descripción	$\bar{V}_s$ (m/s)	T_P (s)	T_L (s)
S0	Roca dura	> 1500	0.30	3.00
S1	Roca o suelos muy rígidos	500 – 1500	0.40	2.50
S2	Suelos intermedios	180 – 500	0.60	2.00
S3	Suelos blandos	< 180	1.00	1.60
S4	Condiciones excepcionales	—	*	*

Nota. T_P = período que define la plataforma del espectro; T_L = período que define el inicio de la zona del espectro con desplazamiento constante. * Requiere estudio específico de sitio. Adaptado de Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018).

El factor de amplificación del suelo S varía según la zona sísmica y el perfil de suelo. Para suelos blandos (S3) en Zona 1, el factor alcanza 2.00, mientras que para roca dura (S0) en cualquier zona, el factor es 0.80. Esta variación refleja el fenómeno de amplificación sísmica por efectos de sitio, ampliamente documentado en eventos como el terremoto de México de 1985 (Seed et al., 1988).

2.2.4. Métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica

2.2.4.1 Clasificación general de métodos

Los métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica se clasifican en tres categorías principales según Calvi et al. (2006): métodos empíricos, métodos analíticos/mecánicos y métodos híbridos. Cada categoría presenta ventajas y limitaciones específicas que determinan su aplicabilidad según el contexto, la escala de análisis y la información disponible.

Cuadro 7*Clasificación de métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica*

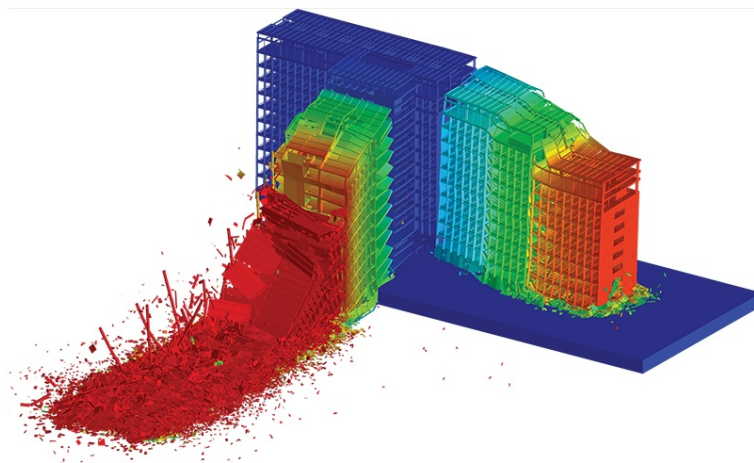
Método	Ventajas	Limitaciones
Empíricos	Basados en daño real observado; capturan todas las fuentes de incertidumbre; aplicación rápida a gran escala	Limitados a patrones de daño pasados; dependen de intensidad macrosísmica; requieren datos de calidad
Analíticos	Base física rigurosa; algoritmos transparentes; adaptables a nuevas tipologías; utilizan parámetros de ingeniería	Modelos pueden ser simplificados; mayor esfuerzo computacional; requieren expertise especializado
Híbridos	Combinan validación empírica con rigor analítico; cuantifican incertidumbre epistémica y aleatoria	Implementación más compleja; requieren ambos tipos de datos

Nota. Adaptado de Calvi et al. (2006) y Barbat et al. (2010).

2.2.4.2 Métodos empíricos basados en observación post-sismo

Los métodos empíricos derivan funciones de vulnerabilidad directamente de datos de daño observado en terremotos pasados. Las Matrices de Probabilidad de Daño (DPM), propuestas inicialmente por Whitman et al. (1973) tras el terremoto de San Fernando de 1971, expresan la probabilidad de que una edificación experimente un nivel particular de daño cuando se expone a una intensidad macrosísmica dada.

Braga et al. (1982) extendieron esta metodología tras el terremoto de Irpinia de 1980, analizando aproximadamente 38,000 edificaciones italianas y estableciendo correlaciones estadísticas entre intensidad, tipología constructiva y distribución de daños. Este trabajo sentó las bases para el desarrollo posterior de metodologías a escala europea.

Figura 8*Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras*

Nota. Adaptado de Barbat et al. (2010).

Cuadro 8*Estados de daño para mampostería según Escala*

Grado	Clasificación	Descripción del daño
D1	Leve	Grietas capilares en muy pocos muros; caída de pequeños trozos de enlucido
D2	Moderado	Grietas en muchos muros; caída de trozos mayores de enlucido; tejas deslizadas
D3	Severo	Grietas grandes y extensas en mayoría de muros; caída de chimeneas; falla de elementos no estructurales
D4	Muy severo	Falla seria de muros; falla parcial estructural de techos y pisos
D5	Destrucción	Colapso total o casi total de la estructura

Nota. Adaptado de Grünthal (1998).

2.2.4.3 Métodos analíticos basados en modelos numéricos

Los métodos analíticos utilizan modelos estructurales para predecir el comportamiento sísmico. El Método del Espectro de Capacidad (CSM), formalizado por Freeman (1998) y codificado en ATC-40, convierte la curva pushover (cortante basal vs. desplazamiento de techo) en espectro de capacidad (S_a vs. S_d), superponiendo el espectro de demanda para encontrar el punto de desempeño.

El análisis pushover, técnica fundamental para la evaluación de la capacidad sísmica de estructuras, aplica cargas laterales incrementales monotónicas para identificar la capacidad estructural y los mecanismos de falla (Krawinkler & Seneviratna, 1998). Las variantes más relevantes incluyen:

- **Modal Pushover Analysis (MPA):** Propuesto por Chopra y Goel (2002), considera la contribución de modos superiores mediante análisis pushover independientes para cada modo significativo.
- **Pushover Adaptativo:** Desarrollado por Antoniou y Pinho (2004), actualiza el patrón de cargas laterales durante el análisis para reflejar los cambios en las propiedades dinámicas de la estructura.
- **Método N2:** Propuesto por Fajfar (2000) e incorporado en el Eurocódigo 8, combina el análisis pushover con la representación espectral para estimar la respuesta sísmica inelástica.

La metodología HAZUS desarrollada por FEMA/NIBS define 36 tipologías de edificaciones con cuatro niveles de diseño sísmico y cuatro estados de daño, utilizando funciones de fragilidad lognormales (FEMA, 2020):

2.2.5. Método del índice de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini

2.2.5.1 Fundamentos y origen del método

La metodología del índice de vulnerabilidad fue propuesta originalmente por Benedetti y Petrini (1984) para la evaluación de edificios de mampostería en Italia. El método consistía en un formulario de 10 parámetros para estimar la vulnerabilidad, basándose en juicio experto para asignar pesos y puntajes calibrados con datos de daño observado en terremotos italianos.

El GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) desarrolló y calibró el enfoque, proponiendo formularios de 11 parámetros de evaluación (GNDT, 1994). Cada parámetro se califica en cuatro clases (A, B, C, D) con puntuaciones de 0, 5, 20 y 45-50 respectivamente, multiplicadas por pesos que reflejan su importancia relativa en el comportamiento sísmico global.

Cuadro 9

Parámetros de evaluación del método del índice de vulnerabilidad GNDT

Nº	Parámetro	Peso W_i	A	B	C	D
1	Tipo y organización del sistema resistente	1.00	0	5	20	45
2	Calidad del sistema resistente	0.25	0	5	25	45
3	Resistencia convencional	1.50	0	5	25	45
4	Ubicación del edificio y cimentación	0.75	0	5	25	45
5	Diafragmas horizontales	1.00	0	5	15	45
6	Configuración en planta	0.50	0	5	25	45
7	Configuración en elevación	1.00	0	5	25	45
8	Distancia máxima entre muros	0.25	0	5	25	45
9	Tipo de cubierta	1.00	0	15	25	45
10	Elementos no estructurales	0.25	0	0	25	45
11	Estado de conservación	1.00	0	5	25	45

Nota. Clases: A = óptimo, B = aceptable, C = deficiente, D = muy deficiente. Adaptado de GNDT (1994).

2.2.5.2 Cálculo del índice de vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad normalizado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_v = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n (W_i \times K_{i,max})} \times 100 \quad (1)$$

donde I_v es el índice de vulnerabilidad normalizado (0-100), K_i es la puntuación asignada al parámetro i según su clase, W_i es el peso del parámetro i , y $K_{i,max}$ es la puntuación máxima posible para el parámetro i (clase D).

2.2.5.3 Adaptación para el contexto peruano: Metodología INDECI

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) desarrolló una metodología de evaluación de vulnerabilidad adaptada al contexto peruano, basada en los principios del método Benedetti-Petrini pero considerando las particularidades de las prácticas constructivas locales, la prevalencia de autoconstrucción informal y los requisitos de la normativa nacional (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006). La ficha de evaluación INDECI considera 9 parámetros principales agrupados en categorías relacionadas con la configuración estructural, la calidad constructiva y las condiciones de sitio:

Cuadro 10

Parámetros de evaluación de vulnerabilidad según fichas técnicas INDECI

Nº	Parámetro	Aspectos evaluados
1	Organización del sistema resistente	Presencia de vigas, columnas, arriostres; conexiones muro-diafragma
2	Calidad del sistema resistente	Homogeneidad del material, trabazón, espesor de juntas
3	Resistencia convencional	Densidad de muros, área resistente en ambas direcciones
4	Posición del edificio y cimentación	Tipo de suelo, pendiente, nivel freático, cimentación
5	Diafragmas horizontales	Rigidez del entrepiso/techo, conexión con muros
6	Configuración en planta	Regularidad, relación largo/ancho, retranqueos
7	Configuración en elevación	Regularidad vertical, variación de masas y rigideces
8	Elementos no estructurales	Parapetos, cornisas, tanques, elementos susceptibles de caer
9	Estado de conservación	Fisuras, humedad, erosión, antigüedad, mantenimiento

Nota. Adaptado de Instituto Nacional de Defensa Civil (2006).

Estudios recientes aplicando la metodología INDECI en comunidades rurales del Perú han clasificado consistentemente a las viviendas de adobe tradicional en niveles de vulnerabilidad alta y muy alta. Mesta et al. (2019) reportaron que el 93.94 % de las viviendas de adobe evaluadas en Pucará, Cajamarca, presentaron vulnerabilidad “muy alta”, evidenciando la crítica situación del parque habitacional de tierra en zonas rurales andinas.

2.2.6. Construcciones de adobe

2.2.6.1 Historia y tradición constructiva

El adobe constituye una técnica constructiva con más de 5,100 años de historia documentada en el Perú. Mauricio et al. (2021) identificaron la arquitectura monumental de adobe más antigua de las Américas en el sitio arqueológico Los Morteros, ubicado en el valle de Chao, costa norte del Perú, con datación calibrada de 3100-2850 a.C.

Sitios precolombinos como Chan Chan (la ciudad de adobe más grande de América precolombina, aproximadamente 20 km²) y la Huaca del Sol (construida con aproximadamente 100 millones de adobes) demuestran el dominio técnico alcanzado por las culturas prehispánicas en el manejo de este material (Pozzi-Escot et al., 1989). Durante el período colonial y republicano, el adobe continuó siendo el material predominante para la construcción de viviendas, edificaciones públicas e iglesias en todo el territorio peruano.

Actualmente, según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), aproximadamente 2 millones de viviendas en el Perú están construidas con adobe o tapial, albergando a más de 9 millones de habitantes. Estas construcciones se concentran predominantemente en las regiones andinas y en zonas periurbanas de ciudades costeras, áreas que coinciden en gran medida con zonas de alta peligrosidad sísmica (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017).

Figura 9

Típica vivienda de adobe del Cusco.



a)



b)

Nota. Adaptado de Cocco et al. (2024).

2.2.6.2 Composición y fabricación del adobe

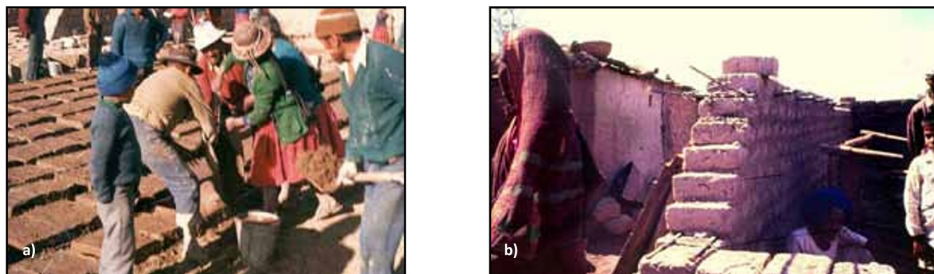
El adobe es un bloque de tierra cruda (no cocida) fabricado mediante el moldeo de una mezcla de suelo, agua y fibras vegetales, que posteriormente se seca al sol. La composición

óptima del adobe requiere un balance entre los componentes del suelo (Houben & Guillaud, 1994):

- **Arena (55-75 %):** Proporciona estabilidad dimensional y reduce el agrietamiento por contracción durante el secado.
- **Limo (10-30 %):** Actúa como material de relleno, mejorando la cohesión de la mezcla.
- **Arcilla (15-30 %):** Funciona como aglutinante natural, proporcionando cohesión y resistencia. El contenido no debe exceder el 30 % para prevenir agrietamiento excesivo por retracción.
- **Fibras vegetales (0.5-4 % en peso):** Típicamente paja de trigo, cebada o ichu. Controlan el microagrietamiento durante el secado y proporcionan refuerzo tensional distribuido.

Figura 10

Proceso tradicional de fabricación de adobes en el Perú



Nota. Adaptado de Blondet, Villa Garcia M. et al. (2011).

Figura 11

Construcción con refuerzo de caña en Perú: a) Colocación de refuerzo de caña, b) Refuerzo vertical y horizontal, c) Alambre de púas como refuerzo horizontal, y d) Vivienda reforzada con caña y pilastras.



Nota. Adaptado de Blondet, Villa Garcia M. et al. (2011).

El proceso tradicional de fabricación incluye: (1) selección del suelo apropiado, (2) “dormido” o reposo del barro (saturación del suelo en agua por 12-24 horas), (3) mezclado por pisado con adición de fibras, (4) moldeo en gaveras de madera o metal, (5) secado inicial en sombra (2-3 días), y (6) secado final al sol (3-4 semanas mínimo). Las dimensiones típicas en el Perú son $40 \times 40 \times 8$ cm según la NTE E.080, con pesos de 10-15 kg por unidad (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.2.6.3 Propiedades mecánicas del adobe

Las propiedades mecánicas del adobe presentan alta variabilidad (coeficiente de variación típico de 20-40 %) debido a la heterogeneidad inherente del material, las diferencias en los suelos locales, las técnicas de fabricación y las condiciones de curado (Varum et al., 2006).

Cuadro 11

Propiedades mecánicas típicas del adobe

Propiedad	Símbolo	Rango típico	Unidad	Notas
Resistencia a compresión (unidad)	f'_c	0.5 – 2.0	MPa	Adobe tradicional
Resistencia a compresión (mampostería)	f'_m	0.3 – 1.5	MPa	Prismas/pilas
Resistencia a tracción	f_t	0.05 – 0.40	MPa	$\approx 10\%$ de f'_c
Resistencia al corte diagonal	f_v	0.02 – 0.30	MPa	$\approx 10\text{-}20\%$ de f'_c
Módulo de elasticidad	E	100 – 1000	MPa	Típico: 200-500 MPa
Módulo de corte	G	40 – 400	MPa	$G \approx 0,4E$
Coefficiente de Poisson	ν	0.15 – 0.25	—	Diseño: 0.20
Densidad	ρ	1600 – 2000	kg/m ³	—

Nota. Adaptado de Varum et al. (2006), Tarque Ruíz (2011) y Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki (2011).

Varum et al. (2006) documentaron resistencias a compresión de 0.66-2.15 MPa para adobes de la región de Aveiro, Portugal, con módulos de elasticidad de 684-821 MPa. En el Perú, Vargas-Neumann (1993) reportaron valores de 0.8-2.0 MPa para adobe tradicional andino.

La relación entre las resistencias sigue aproximadamente: **Compresión : Tracción : Corte $\approx 1 : 0.1 : 0.2$** (Wu et al., 2013), evidenciando la extrema debilidad del material ante esfuerzos de tracción y corte, condición particularmente crítica bajo sollicitaciones sísmicas que inducen precisamente estos tipos de esfuerzos.

2.2.7. Vulnerabilidad sísmica en estructuras de adobe

2.2.7.1 Factores de vulnerabilidad específicos

Las estructuras de adobe presentan una combinación de factores que las hace extremadamente vulnerables ante eventos sísmicos (Blondet et al., 2005; Tarque Ruíz, 2011):

1. **Elevada masa:** La densidad del adobe ($1600\text{-}2000\text{ kg/m}^3$) y los espesores típicos de muro ($0.30\text{-}0.50\text{ m}$) generan fuerzas inerciales significativas durante el sismo, proporcionales a la masa según la segunda ley de Newton ($F = m \cdot a$).
2. **Baja resistencia a tracción y corte:** Con resistencias a tracción de apenas 5-10 % de la resistencia a compresión, el adobe falla prematuramente ante los esfuerzos de tracción diagonal generados por el cortante sísmico.
3. **Comportamiento frágil:** A diferencia de materiales dúctiles como el acero, el adobe no presenta capacidad de deformación post-agrietamiento, colapsando súbitamente una vez alcanzada su resistencia máxima.
4. **Conexiones inadecuadas:** Las uniones muro-muro y muro-cubierta en construcciones tradicionales carecen de elementos de amarre efectivos, impidiendo el comportamiento monolítico de la estructura.
5. **Ausencia de refuerzos:** Las construcciones tradicionales de adobe carecen de elementos que proporcionen ductilidad y capacidad de redistribución de esfuerzos.

2.2.7.2 Modos de falla característicos

Los modos de falla típicos observados en terremotos pasados y confirmados mediante ensayos experimentales incluyen (Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki, 2011; Tarque Ruíz, 2011):

Cuadro 12

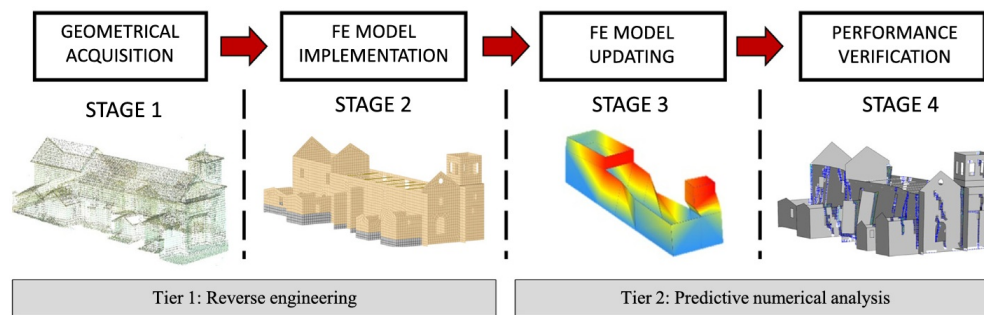
Modos de falla característicos en estructuras de adobe

Modo de falla	Descripción	Factor determinante
Agrietamiento diagonal por corte	Grietas en patrón X siguiendo juntas de mortero, originándose en esquinas de vanos	Fuerzas sísmicas en el plano exceden resistencia al corte
Volteo fuera del plano	Muros largos sin restricción perpendicular rotan sobre su base y colapsan	Esbeltez $H/t > 8$; falta de arriostres
Separación de esquinas	Grietas verticales en intersecciones de muros perpendiculares	Ausencia de conexiones muro-muro efectivas
Falla en conexión muro-cubierta	Vigas de cubierta se desplazan eliminando restricción lateral superior	Apoyo simple sin anclaje positivo
Colapso de hastiales	Triángulos de muro sobre viga collar voltean hacia el exterior	Falta de arriostramiento en zona de hastial

Nota. Adaptado de Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki (2011) y Tarque Ruíz (2011).

Figura 12

Panorama general de la metodología para la evaluación sísmica realizada en la iglesia de Andahuaylillas-Cusco.



Nota. Adaptado de Briceño et al. (2021).

2.2.7.3 Estudios experimentales de la PUCP

El programa de investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), liderado por los profesores Marcial Blondet, Julio Vargas-Neumann y colaboradores, constituye la referencia mundial más importante sobre comportamiento sísmico de estructuras de adobe. Este programa, iniciado en la década de 1970, ha desarrollado ensayos a diferentes escalas y con diversas configuraciones (Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki, 2011).

Los ensayos en plataforma inclinada (1972-1973) proporcionaron la primera cuantificación de la capacidad lateral del adobe peruano. Los ensayos en mesa vibradora .

Cuadro 13

Umbral de daño para muros de adobe según ensayos en mesa vibradora PUCP

Estado de daño	PGA (g)	Deriva (%)	Descripción
Agrietamiento inicial	0.28 – 0.32	0.08 – 0.10	Primeras grietas visibles en esquinas de vanos
Desarrollo de grietas	0.40 – 0.44	0.20 – 0.40	Patrón completo de agrietamiento diagonal
Resistencia máxima	0.45 – 0.50	0.37 – 0.80	Máxima capacidad de cortante basal
Post-agrietamiento	0.48 – 0.58	0.80 – 1.00	Grandes desplazamientos, pérdida de rigidez
Colapso	> 0.60	0.46 – 1.07	Falla estructural, volteo de muros

Nota. PGA = Aceleración pico del suelo. Valores para muros de adobe no reforzado. Adaptado de Blondet et al. (2008b) y Reyes et al. (2018).

Tarque Ruíz (2011) desarrolló su tesis doctoral en la Universidad de Pavia bajo la dirección del Prof. Paulo Lourenço, validando modelos numéricos de adobe mediante comparación con los resultados experimentales. Este trabajo estableció parámetros calibrados para el modelamiento numérico de estructuras de adobe con el software DIANA FEA.

2.2.8. Normativa peruana NTE E.080 para construcciones de tierra

2.2.8.1 Alcance y filosofía de diseño

La Norma Técnica de Edificación E.080 “Diseño y Construcción con Tierra Reforzada”, actualizada mediante R.M. N° 121-2017-VIVIENDA, establece los requisitos obligatorios para construcciones de adobe reforzado y tapial reforzado en el Perú (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017). La norma adopta una filosofía de diseño basada en el desempeño:

- **Ante sismos leves:** Se permite la formación de grietas menores en muros, sin afectación funcional.
- **Ante sismos moderados:** Se admiten grietas significativas pero controladas por el refuerzo, reparables a costo razonable.
- **Ante sismos severos:** Se aceptan daños estructurales considerables con deformaciones permanentes, pero sin fallas frágiles ni colapsos parciales o totales que pongan en riesgo la vida de los ocupantes.

Figura 13

Normativa peruana NTE E.080 para construcciones de tierra.



Nota. Adaptado de Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2020).

2.2.8.2 Requisitos de configuración estructural

La NTE E.080 establece limitaciones estrictas de altura según la zonificación sísmica: en las Zonas 3 y 4 (costa peruana, $Z = 0.35$ y 0.45) se permite únicamente un piso, mientras que en las Zonas 1 y 2 se permiten hasta dos pisos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017).

2.2.8.4 Requisitos de resistencia mínima

Los ensayos de laboratorio para control de calidad deben verificar las siguientes resistencias mínimas (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017):

Cuadro 15

Resistencias mínimas para adobe según NTE E.080

Ensayo	Resistencia mínima	Unidad	Norma de ensayo
Compresión de unidades	1.0	MPa	NTP 399.613
Tracción indirecta (brasileño)	0.08	MPa	NTP 399.613
Compresión de prismas	0.6	MPa	NTP 399.605
Compresión diagonal (corte)	0.025	MPa	NTP 399.621
Módulo de elasticidad	200	MPa	NTP 399.613

Nota. Adaptado de Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2017).

2.2.9. Curvas de fragilidad y estados de daño

2.2.9.1 Definición y formulación matemática

Las curvas de fragilidad constituyen funciones estadísticas que expresan la probabilidad condicional de alcanzar o exceder un estado de daño definido para un nivel dado de medida de intensidad sísmica. (Porter, 2007):

2.2.9.2 Curvas de fragilidad para adobe peruano

Tarque et al. (2012) desarrollaron curvas de fragilidad basadas en mecánica estructural para edificaciones de adobe en Cusco, Perú, publicadas en Earthquake Spectra. El estudio analizó mecanismos en el plano y fuera del plano, definiendo los siguientes estados límite:

Cuadro 16

Estados límite para estructuras de adobe según análisis de fragilidad

Estado límite	Clasificación	Deriva (%)	Descripción del daño
LS1	Leve	0.052	Edificio casi sin daño; grietas ≤ 0.3 mm
LS2	Moderado	0.10	Daño extenso pero reparable; grietas hasta 1.6 mm
LS3	Colapso	0.52	Colapso probable; grietas > 5 mm; pérdida de estabilidad

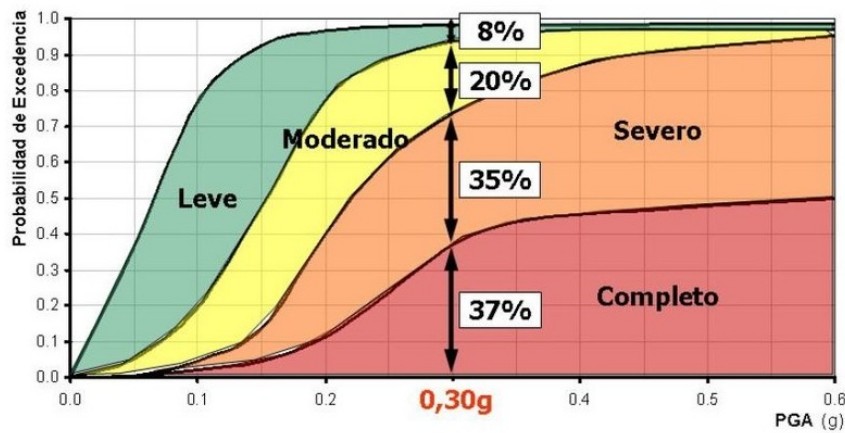
Nota. Adaptado de Tarque et al. (2012).

Sumerente et al. (2020) desarrollaron funciones de fragilidad combinando mecanismos en el plano y fuera del plano para mampostería de adobe en los Andes peruanos, utilizando simulación Monte Carlo para generar poblaciones sintéticas de edificaciones. Para edificaciones de adobe a PGA = 0.3g, los estudios estiman aproximadamente 30 % de

probabilidad de colapso para edificios de un piso y 60 % para edificios de dos pisos.

Figura 15

Curvas de fragilidad típicas para estructuras



Nota. Adaptado de Orozco Orozco (2019).

2.2.9.3 Matrices de probabilidad de daño

Las Matrices de Probabilidad de Daño (DPM) proporcionan valores discretos de probabilidad para cada estado de daño en niveles específicos de intensidad. La relación con las curvas de fragilidad se establece mediante el grado medio de daño (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006):

$$\mu_D = \sum_{i=0}^5 i \times P[D = d_i] \quad (2)$$

donde $P[D = d_i]$ es la probabilidad de experimentar el grado de daño d_i (en escala EMS-98, de 0 a 5).

Cuadro 17

Matriz de probabilidad de daño para estructuras de adobe (1 piso, Clase A)

Intensidad	D0	D1	D2	D3	D4	D5
VI	0.45	0.35	0.15	0.04	0.01	0.00
VII	0.15	0.30	0.30	0.18	0.05	0.02
VIII	0.03	0.12	0.25	0.30	0.20	0.10
IX	0.00	0.03	0.10	0.22	0.35	0.30
X	0.00	0.00	0.02	0.08	0.30	0.60

Nota. D0 = sin daño, D1-D5 = grados de daño según EMS-98. Intensidad en escala EMS-98. Adaptado de Lagomarsino & Giovinazzi (2006).

2.3. Marco conceptual

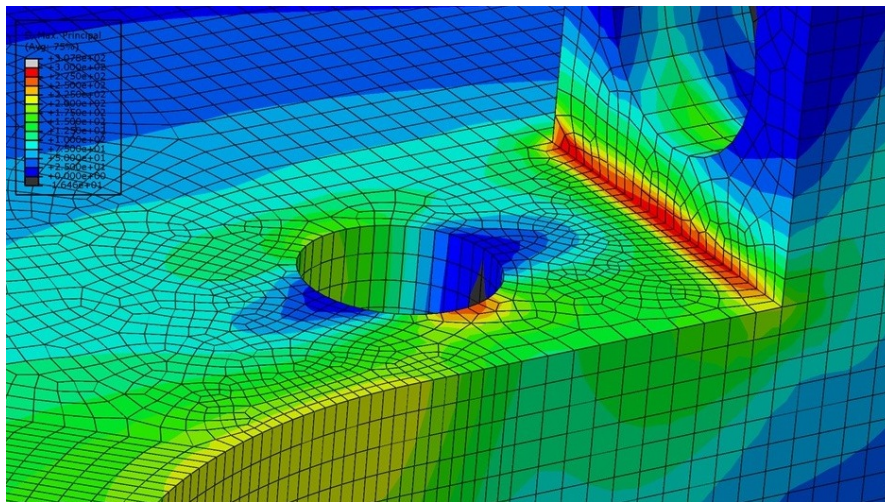
2.3.1. Método de los elementos finitos (FEM)

2.3.1.1 Fundamentos y origen del método

El Método de los Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) constituye una técnica numérica para obtener soluciones aproximadas a problemas de valores en la frontera descritos por ecuaciones diferenciales parciales. El método discretiza un dominio continuo en un número finito de subdominios denominados “elementos finitos”, conectados entre sí mediante puntos nodales, permitiendo transformar un problema continuo de infinitos grados de libertad en un sistema algebraico de ecuaciones con un número finito de incógnitas (Zienkiewicz et al., 2013).

Figura 16

Método de elementos finitos en estructuras



Nota. Adaptado de Prasad (2024).

Zienkiewicz et al. (2013) señalan que el método tiene sus orígenes en los trabajos pioneros de ingenieros estructurales en la década de 1950, particularmente en la industria aeronáutica. Turner, Clough, Martin y Topp publicaron en 1956 el trabajo seminal que formalizó el método para análisis estructural. El término “elemento finito” fue acuñado por Ray Clough en 1960, consolidando el marco conceptual que unificaba los desarrollos previos en análisis matricial de estructuras.

La formulación matemática del FEM se fundamenta en el principio de los trabajos virtuales o en la formulación variacional débil de las ecuaciones diferenciales gobernantes. Para un problema elástico lineal, la ecuación de equilibrio en forma débil se expresa como:

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{u} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} d\Gamma \quad (3)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones, $\boldsymbol{\varepsilon}$ es el tensor de deformaciones, $\mathbf{b}$ son las fuerzas de cuerpo, $\mathbf{t}$ son las tracciones en la frontera Γ_t , y $\delta \mathbf{u}$ representa el campo de desplazamientos virtuales admisibles.

2.3.1.2 Tipos de elementos finitos

Los elementos finitos se clasifican según su dimensionalidad y geometría. Para el análisis de estructuras de mampostería, los elementos más utilizados son (Zienkiewicz et al., 2013):

Cuadro 18

Tipos de elementos finitos para análisis estructural de mampostería

Tipo de elemento	Dimensión	Aplicaciones típicas
Triangular (T3, T6)	2D	Discretización de geometrías irregulares; análisis en plano
Cuadrilateral (Q4, Q8, Q9)	2D	Muros en tensión plana o deformación plana; mayor precisión
Tetraédrico (Tet4, Tet10)	3D	Geometrías complejas; mallado automático
Hexaédrico (Hex8, Hex20)	3D	Mayor precisión en geometrías regulares; muros gruesos
Shell (placas y láminas)	2.5D	Muros delgados; diafragmas; techos
Interfaz (espesor cero)	2D/3D	Juntas de mortero; discontinuidades; contacto

Nota. T = triangular, Q = cuadrilateral, Tet = tetraédrico, Hex = hexaédrico. El número indica los nodos del elemento. Adaptado de Zienkiewicz et al. (2013).

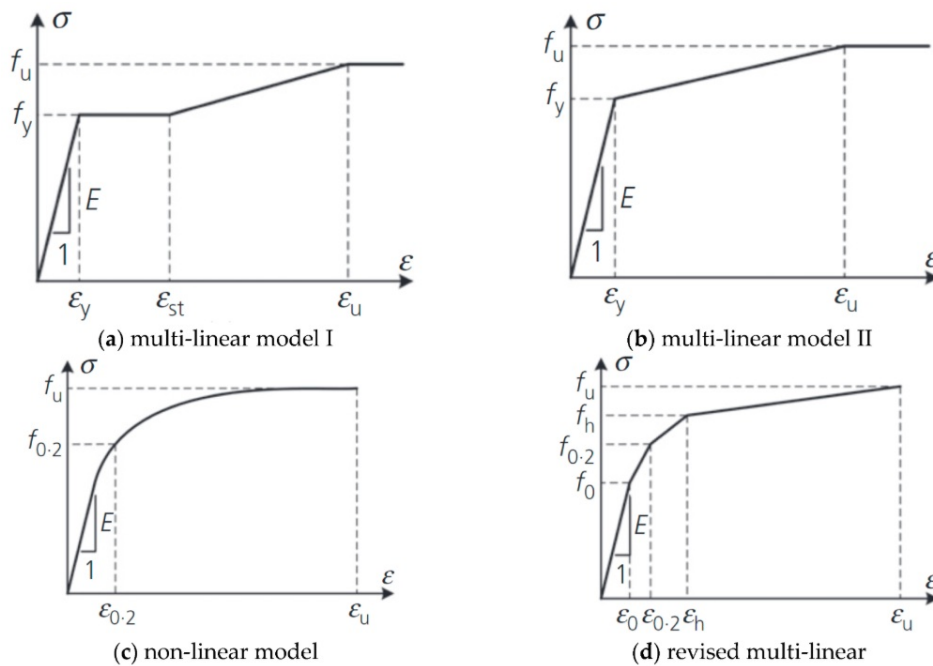
2.3.2. Comportamiento no lineal de materiales

2.3.2.1 Fuentes de no linealidad

El análisis no lineal de estructuras considera tres fuentes principales de no linealidad (Bathe, 2014):

- **No linealidad del material (constitutiva):** La relación tensión-deformación del material no es lineal. Incluye plasticidad, agrietamiento, aplastamiento, viscosidad y daño. Es la fuente dominante de no linealidad en estructuras de mampostería y concreto.
- **No linealidad geométrica:** Los desplazamientos son suficientemente grandes para que la geometría deformada difiera significativamente de la configuración inicial. Incluye grandes desplazamientos, grandes rotaciones y efectos $P-\Delta$.
- **No linealidad de condiciones de frontera:** Las condiciones de frontera cambian durante el análisis, como en problemas de contacto, fricción y seguimiento de cargas.

Para estructuras de adobe sometidas a acciones sísmicas, la no linealidad del material es predominante debido al comportamiento frágil del material, su baja resistencia a tracción y los fenómenos de agrietamiento progresivo que gobiernan la respuesta estructural.

Figura 17*Comportamiento no lineal de los materiales*

Nota. Adaptado de Zhang et al. (2023).

2.3.3. Estrategias de modelamiento para mampostería

2.3.3.1 Clasificación de estrategias según Lourenço

Lourenço (1996) clasificó las estrategias de modelamiento numérico para estructuras de mampostería en tres categorías fundamentales, según el nivel de detalle con que se representan los componentes del material compuesto:

- **Micro-modelamiento detallado:** Las unidades (adobes, ladrillos) y el mortero se modelan por separado como elementos continuos con sus propiedades constitutivas individuales. Las interfaces unidad-mortero se representan mediante elementos de interfaz de espesor cero. Esta estrategia captura con precisión los mecanismos de falla locales pero tiene alto costo computacional.
- **Micro-modelamiento simplificado:** Las unidades se expanden geométricamente hasta la mitad del espesor del mortero en cada lado. Las juntas de mortero y las interfaces unidad-mortero se condensan en elementos de interfaz de espesor cero con propiedades equivalentes. Reduce significativamente el número de elementos manteniendo capacidad de capturar mecanismos de falla.
- **Macro-modelamiento:** La mampostería se representa como un continuo homogéneo equivalente con propiedades anisotrópicas que reflejan el comportamiento global del material compuesto. No distingue entre unidades y mortero. Es computacionalmente eficiente para análisis de estructuras a gran escala.

Cuadro 19*Comparación de estrategias de modelamiento para mampostería*

Aspecto	Micro detallado	Micro simplificado	Macro
Costo computacional	Muy alto	Alto	Bajo a moderado
Precisión local	Muy alta	Alta	Moderada
Captura de mecanismos	Todos los modos	Principales modos	Comportamiento global
Calibración	Compleja (muchos parámetros)	Moderada	Relativamente simple
Aplicación típica	Elementos individuales, ensayos	Muros, paneles	Edificios completos

Nota. Adaptado de Lourenço (1996) y Roca et al. (2010).

Para el análisis de viviendas completas de adobe, el macro-modelamiento constituye la estrategia más práctica, permitiendo analizar el comportamiento global de la estructura con recursos computacionales razonables. Los parámetros del modelo continuo equivalente pueden calibrarse a partir de ensayos experimentales o de análisis de homogenización (Roca et al., 2010).

2.3.4. Total Strain Crack Model (TSCM)**2.3.4.1 Fundamentos del modelo**

El Total Strain Crack Model (TSCM) es un modelo constitutivo basado en deformación total, desarrollado siguiendo los lineamientos de la Teoría de Campo de Compresión Modificada (MCFT) propuesta originalmente por Vecchio y Collins (1986). El modelo describe el comportamiento del material mediante relaciones tensión-deformación no lineales tanto para el agrietamiento (tracción) como para el aplastamiento (compresión), utilizando un enfoque de fisuración distribuida (smeared cracking) (DIANA FEA BV, 2020).

En el TSCM, las tensiones se evalúan como función directa de las deformaciones totales, sin separar explícitamente las componentes elástica y plástica. Esta formulación, conocida como hipo-elasticidad, simplifica la implementación numérica y ha demostrado robustez y estabilidad en análisis de estructuras de concreto y mampostería con agrietamiento extenso (Rots, 1988).

2.3.4.2 Conceptos de fisura fija y rotante

El TSCM puede implementarse con dos enfoques respecto a la orientación de las fisuras (DIANA FEA BV, 2020):

- **Modelo de fisura rotante (Rotating Crack Model):** Las direcciones de las fisuras coinciden continuamente con las direcciones principales de deformación. Las relaciones tensión-deformación se evalúan en las direcciones principales del tensor

de deformaciones, que rotan a medida que cambia el estado de carga. No requiere modelar explícitamente la retención de cortante.

- **Modelo de fisura fija (Fixed Crack Model):** La orientación de la fisura se fija en el momento del agrietamiento inicial y permanece constante durante el análisis posterior. Requiere definir un modelo de retención de cortante para representar la transferencia de esfuerzos a través de la fisura.

El modelo de fisura rotante es más comúnmente utilizado por su simplicidad y estabilidad numérica, siendo particularmente apropiado para análisis de estructuras de mampostería donde el patrón de agrietamiento evoluciona con la carga.

2.3.4.3 Comportamiento en tracción

El comportamiento en tracción se caracteriza por una respuesta lineal elástica hasta alcanzar la resistencia a tracción f_t , seguida de un ablandamiento por deformación (strain softening) que representa la degradación progresiva de la capacidad de carga. Las curvas de ablandamiento más utilizadas incluyen (DIANA FEA BV, 2020):

- **Ablandamiento lineal:** Degradación lineal desde f_t hasta cero.
- **Ablandamiento exponencial:** Curva exponencial suave.
- **Ablandamiento de Hordijk:** Curva no lineal calibrada experimentalmente, recomendada para concreto y mampostería.

2.3.4.4 Comportamiento en compresión

El comportamiento en compresión se modela mediante curvas que capturan el endurecimiento inicial hasta alcanzar la resistencia máxima f_c , seguido de un ablandamiento post-pico. Las opciones incluyen curvas parabólicas, curvas basadas en el modelo de Thorenfeldt, y curvas definidas por el usuario (DIANA FEA BV, 2020).

Un aspecto importante es la reducción de la resistencia a compresión debido al agrietamiento lateral. Esta reducción, documentada experimentalmente por Vecchio y Collins (1986).

2.3.4.5 Parámetros del modelo para adobe

La aplicación del TSCM para estructuras de adobe requiere la calibración de parámetros específicos del material. Tarque Ruíz (2011) calibró parámetros para adobe peruano basándose en ensayos experimentales de la PUCP:

Cuadro 20*Parámetros del Total Strain Crack Model calibrados para adobe peruano*

Parámetro	Símbolo	Valor típico	Observaciones
Módulo de elasticidad	E	200 – 350 MPa	Según ensayos de prismas
Coefficiente de Poisson	ν	0.20	Valor asumido típico
Resistencia a compresión	f_c	0.45 – 0.80 MPa	Mampostería (prismas)
Resistencia a tracción	f_t	0.04 – 0.10 MPa	$\approx 10\%$ de f_c
Energía de fractura (tracción)	G_f^I	0.01 – 0.05 N/mm	Modo I (apertura)
Energía de fractura (compresión)	G_c	1.0 – 5.0 N/mm	Aplastamiento
Factor de retención de cortante	β_{sh}	0.01 – 0.10	Fisura fija

Nota. Valores calibrados para adobe peruano tradicional. Adaptado de Tarque Ruíz (2011).

2.3.5. Análisis pushover (estático no lineal)**2.3.5.1 Definición y objetivo**

El análisis pushover, también denominado análisis estático no lineal, es una técnica de evaluación sísmica que consiste en aplicar cargas laterales monotónicamente crecientes a un modelo estructural no lineal hasta alcanzar un desplazamiento objetivo o el colapso de la estructura (Krawinkler & Seneviratna, 1998). El resultado principal es la curva de capacidad, que relaciona el cortante basal V_b con el desplazamiento de un punto de control (típicamente el centro de masa del nivel superior).

Los objetivos del análisis pushover incluyen (Federal Emergency Management Agency, 2000):

1. Estimar la capacidad de resistencia y deformación de la estructura.
2. Identificar los mecanismos de falla y la secuencia de formación de rótulas plásticas.
3. Determinar las demandas de deformación en elementos críticos.
4. Evaluar el punto de desempeño mediante comparación con la demanda sísmica.
5. Identificar deficiencias estructurales y zonas que requieren reforzamiento.

2.3.5.2 Patrones de carga lateral

La distribución de las fuerzas laterales aplicadas influye significativamente en los resultados del análisis. Los patrones más utilizados son (European Committee for Standardization, 2004; Federal Emergency Management Agency, 2000):

- **Distribución uniforme:** Fuerzas proporcionales a la masa de cada nivel, independientes de la altura. Representa una respuesta dominada por cortante.

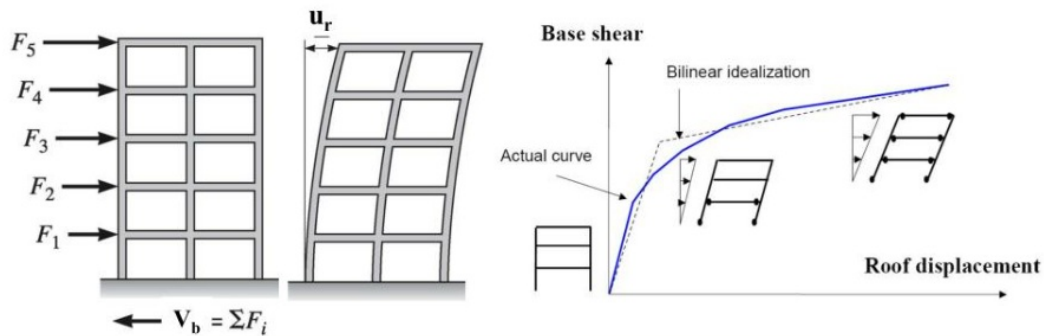
- **Distribución triangular invertida:** Fuerzas proporcionales al producto de la masa y la altura de cada nivel. Aproxima la distribución del primer modo de vibración.
- **Distribución modal:** Fuerzas proporcionales a la forma del primer modo de vibración multiplicada por la masa. Es la más representativa para estructuras regulares.
- **Distribución proporcional a la masa:** Similar a la modal pero utilizando distribución de masa. Recomendada por el Eurocódigo 8.

$$F_i = \frac{m_i \phi_i}{\sum_j m_j \phi_j} V_b \quad (4)$$

donde F_i es la fuerza lateral en el nivel i , m_i es la masa del nivel i , ϕ_i es el desplazamiento modal del nivel i , y V_b es el cortante basal total.

Figura 18

Análisis no lineal adaptativo en estructuras



Nota. Adaptado de NonlinearAnalysis (2020).

2.3.5.3 Curva de capacidad

La curva de capacidad (pushover curve) representa la relación entre el cortante basal y el desplazamiento del punto de control. Esta curva caracteriza el comportamiento global de la estructura, mostrando las diferentes fases de respuesta (Applied Technology Council, 1996):

- **Fase elástica:** Respuesta lineal hasta el primer agrietamiento significativo o primera plastificación.
- **Fase de agrietamiento/plastificación:** Reducción progresiva de rigidez debido a la formación de daño.
- **Fase de capacidad máxima:** Se alcanza el cortante basal máximo.
- **Fase de degradación:** Reducción de capacidad debido a fallas locales y redistribución de esfuerzos.

2.3.5.4 Limitaciones del análisis pushover

El análisis pushover presenta limitaciones inherentes que deben considerarse (Krawinkler & Seneviratna, 1998):

1. No captura la naturaleza dinámica de la respuesta sísmica ni los efectos de reversión de carga.

2. Asume que la respuesta está controlada por el primer modo de vibración, lo cual puede no ser válido para estructuras altas o irregulares.
3. No considera la degradación de resistencia y rigidez bajo carga cíclica.
4. Los resultados dependen del patrón de carga lateral seleccionado.
5. No captura adecuadamente los efectos de torsión en estructuras asimétricas.

Para estructuras de adobe de baja altura (1-2 pisos), el análisis pushover proporciona resultados razonablemente precisos, dado que la respuesta está dominada por el primer modo de vibración y los efectos de modos superiores son limitados.

2.3.6. Indicadores de desempeño sísmico

2.3.6.1 Niveles de desempeño estructural

Los documentos normativos estadounidenses FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency, 2000) y ASCE/SEI 41 (American Society of Civil Engineers, 2017) definen niveles de desempeño estructural que representan estados límite de daño, asociados a objetivos de protección específicos:

Cuadro 21

Niveles de desempeño estructural según FEMA 356 y ASCE 41

Nivel de desempeño	Descripción del estado de daño
Ocupación Inmediata (IO)	Daño estructural muy limitado. La estructura conserva su resistencia y rigidez. No hay riesgo para la vida. Los ocupantes pueden continuar utilizando el edificio.
Seguridad de Vida (LS)	Daño estructural significativo pero estabilidad global mantenida. Riesgo reducido de pérdida de vida. Puede requerirse reparación antes de reocupación.
Prevención de Colapso (CP)	Daño estructural severo. Estructura al borde del colapso parcial o total. Alto riesgo para la vida. Estructura no reparable económicamente.

Nota. IO = Immediate Occupancy, LS = Life Safety, CP = Collapse Prevention. Adaptado de Federal Emergency Management Agency (2000) y American Society of Civil Engineers (2017).

2.3.6.2 Límites de deriva de entrepiso

La deriva de entrepiso (inter-story drift) es el parámetro de demanda más utilizado para caracterizar la respuesta estructural y correlacionarla con niveles de daño. Se define como:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{h_i} \quad (5)$$

donde Δ_i y Δ_{i-1} son los desplazamientos laterales de los niveles i e $i - 1$, respectivamente, y h_i es la altura del entrepiso.

Los límites de deriva para mampostería no reforzada según FEMA 356 son:

Cuadro 22

Límites de deriva de entrepiso para mampostería no reforzada según FEMA 356

Tipo de mampostería	IO	LS	CP
Muros primarios	0.1 %	0.3 % – 0.4 %	0.4 % – 0.6 %
Muros secundarios	0.3 %	0.6 %	1.0 %

Nota. IO = Ocupación Inmediata, LS = Seguridad de Vida, CP = Prevención de Colapso. Valores indicativos; límites específicos dependen de configuración y materiales. Adaptado de Federal Emergency Management Agency (2000).

Para estructuras de adobe, Tarque et al. (2012) propusieron límites de deriva basados en análisis de fragilidad: 0.052 % para daño leve, 0.10 % para daño moderado y 0.52 % para colapso.

2.3.6.3 Ductilidad

La ductilidad cuantifica la capacidad de deformación inelástica de la estructura antes del colapso. Se define como la razón entre el desplazamiento último (o de demanda) y el desplazamiento de fluencia:

$$\mu = \frac{d_u}{d_y} \quad (6)$$

Las estructuras de adobe presentan ductilidad muy limitada ($\mu < 2$ típicamente), evidenciando su comportamiento frágil característico. Esto contrasta con estructuras de concreto armado o acero, donde ductilidades de 4-8 son comunes en diseño sismorresistente.

2.3.6.4 Índice de daño

Los índices de daño combinan parámetros de demanda con capacidad para cuantificar el nivel de deterioro estructural. El índice de daño de Park-Ang, ampliamente utilizado, combina deformación máxima y energía histerética disipada (Park & Ang, 1985):

$$D_{PA} = \frac{d_{max}}{d_u} + \beta \frac{E_h}{F_y d_u} \quad (7)$$

donde d_{max} es el desplazamiento máximo, d_u es el desplazamiento último, E_h es la energía histerética disipada, F_y es la fuerza de fluencia, y β es un parámetro de degradación (típicamente 0.05-0.20).

2.3.7. Software DIANA FEA**2.3.7.1 Descripción general**

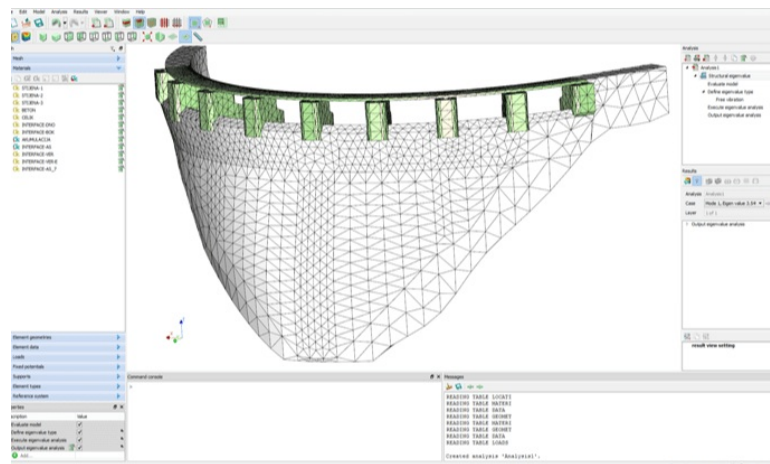
DIANA (Displacement ANALyzer) es un software de análisis por elementos finitos multipropósito desarrollado originalmente por TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) en 1972, actualmente mantenido por DIANA FEA BV (DIANA FEA BV, 2020). El software está especializado en el análisis no lineal de estructuras de concreto,

mampostería, roca y suelo, siendo reconocido internacionalmente por sus capacidades avanzadas en modelamiento de materiales frágiles y cuasifrágiles.

DIANA ha sido utilizado extensamente en proyectos de investigación y práctica profesional para el análisis de presas, túneles, estructuras históricas, puentes y edificaciones de mampostería. Sus capacidades incluyen análisis estático lineal y no lineal, análisis dinámico modal y transitorio, análisis de flujo de calor, análisis de flujo de agua subterránea, y análisis acoplados termomecánicos e hidromecánicos.

Figura 19

Modelado de elementos finitos de DIANA



Nota. Adaptado de van den Bos (2018).

2.3.7.2 Capacidades para análisis de mampostería

DIANA incorpora modelos constitutivos específicos para el análisis de estructuras de mampostería, incluyendo (DIANA FEA BV, 2020):

- **Total Strain Crack Model:** Modelo de fisuración distribuida con variantes de fisura fija y rotante, curvas de ablandamiento predefinidas y definidas por el usuario, reducción de resistencia a compresión por agrietamiento lateral.
- **Engineering Masonry Model:** Modelo específico para mampostería desarrollado en colaboración con la Universidad Tecnológica de Delft, que incluye criterios de falla para juntas de mortero, agrietamiento diagonal escalonado y comportamiento de descarga/recarga realista.
- **Elementos de interfaz:** Modelos constitutivos para juntas de mortero incluyendo fricción de Coulomb con cohesión, cap de compresión, y modos de falla combinados tensión-corte.
- **Macro-elementos:** Elementos de lámina y membrana con formulaciones ortotrópicas para representar mampostería como continuo equivalente.

2.3.7.3 Tipos de análisis disponibles

Para la evaluación sísmica de estructuras de mampostería, DIANA ofrece (DIANA FEA BV, 2020):

Cuadro 23*Tipos de análisis para evaluación sísmica disponibles en DIANA FEA*

Tipo de análisis	Descripción y aplicaciones
Análisis modal	Determinación de frecuencias naturales y modos de vibración; validación de modelos
Análisis estático no lineal (Pushover)	Curva de capacidad; identificación de mecanismos de falla; evaluación de desempeño
Análisis dinámico tiempo-historia	Respuesta a registros sísmicos; análisis con degradación cíclica
Análisis dinámico incremental (IDA)	Desarrollo de curvas de fragilidad; evaluación probabilística
Análisis en dominio frecuencia-tiempo (HFTD)	Eficiencia computacional para análisis dinámico de presas y estructuras masivas

Nota. Adaptado de DIANA FEA BV (2020).

2.3.7.4 Aplicaciones en estructuras de adobe

DIANA FEA ha sido utilizado exitosamente para el análisis sísmico de estructuras de adobe en diversos estudios de investigación. Tarque Ruíz (2011) calibró modelos constitutivos para adobe peruano en DIANA, validando los resultados numéricos con ensayos experimentales de la PUCP. Estudios posteriores han aplicado DIANA para la evaluación sísmica de iglesias coloniales de adobe en Perú (Cuadros-Rojas et al., 2024), análisis de vulnerabilidad del centro histórico de Cusco, y desarrollo de curvas de fragilidad para viviendas de adobe andinas.

Cuadro 24*Estudios de estructuras de adobe utilizando DIANA FEA*

Autor(es)	Estructura	Contribución principal
Tarque (2011)	Módulos de adobe PUCP	Calibración de parámetros constitutivos para adobe
Cuadros-Rojas et al. (2024)	Iglesia San Juan Bautista, Huaytará	Metodología fotogramétrica + análisis pushover con N2
Brando et al. (2024)	Centro histórico Cusco	Arquetipos representativos + evaluación de vulnerabilidad
Barontini & Lourenço (2018)	Hotel El Comercio, Lima	Evaluación sísmica edificación mixta madera-adobe

Nota. Adaptado de diversas fuentes.

2.3.8. Evaluación cualitativa de vulnerabilidad sísmica: Metodología INDECI

2.3.8.1 Marco institucional y normativo.

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) del Perú desarrolló la Ficha de Verificación FV-001INDECI-2010.03.29 como instrumento estandarizado para la evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en zonas urbanas y rurales. Esta metodología fue implementada en el marco del Proyecto INDECI-PNUD-ECHO “Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao”, con el objetivo de proveer a las autoridades de defensa civil una herramienta de tamizaje masivo que permita identificar edificaciones en riesgo ante eventos sísmicos (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

La ficha constituye un instrumento de evaluación **cualitativa**, basado en la observación visual directa de las edificaciones sin requerir instrumentación, ensayos de laboratorio ni análisis estructural detallado. Su aplicación está orientada a profesionales de defensa civil y técnicos municipales capacitados, permitiendo evaluar un número significativo de edificaciones en un tiempo reducido (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010).

2.3.8.2 Parámetros de evaluación.

La metodología INDECI evalúa doce parámetros agrupados en la Sección D de la ficha, cada uno con un valor numérico asignado según las características observadas. El Cuadro 25 presenta los parámetros evaluados y sus rangos de valoración.

Cuadro 25

Parámetros de evaluación de vulnerabilidad sísmica según metodología INDECI

Nº	Parámetro evaluado	Rango de valor
1	Material predominante de la edificación	1 – 4
2	Participación de ingeniero civil en diseño y/o construcción	1 – 4
3	Antigüedad de la edificación	1 – 4
4	Tipo de suelo	1 – 4
5	Topografía del terreno de la vivienda	1 – 4
6	Topografía del terreno colindante	1 – 4
7	Configuración geométrica en planta	1 – 4
8	Configuración geométrica en elevación	1 – 4
9	Juntas de dilatación sísmica	1 – 4
10	Concentración de masas en niveles	1 – 4
11	Estado de los elementos estructurales	1 – 4
12	Otros factores que inciden en la vulnerabilidad	Variable

Nota. Adaptado de la Ficha de Verificación Instituto Nacional de Defensa Civil (2010). El valor 1 corresponde a la condición más favorable y el valor 4 a la condición más desfavorable.

2.3.8.3 Clasificación del nivel de vulnerabilidad.

La sumatoria de los valores asignados a cada parámetro determina el nivel de vulnerabilidad sísmica de la edificación. El Cuadro 26 presenta la clasificación establecida por la metodología.

Cuadro 26

Niveles de vulnerabilidad sísmica según metodología INDECI

Nivel	Rango de puntaje	Implicancia para los ocupantes
BAJO	Hasta 14 puntos	Posible acceso a zona de seguridad interna
MODERADO	15 – 17 puntos	Requiere reforzamiento de zona de seguridad interna
ALTO	18 – 24 puntos	No es posible zona de seguridad; requiere cambios drásticos
MUY ALTO	Mayor a 24 puntos	La vivienda no debe ser habitada

Nota. Adaptado de Instituto Nacional de Defensa Civil (2010). El nivel MUY ALTO indica que en las condiciones actuales no es posible acceder a una zona de seguridad dentro de la edificación ante un sismo de gran magnitud.

2.3.8.4 Limitaciones de la metodología INDECI.

Si bien la ficha INDECI constituye una herramienta eficiente para el tamizaje masivo de vulnerabilidad, presenta limitaciones inherentes a su naturaleza cualitativa (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010):

1. No considera el comportamiento diferenciado de la estructura en las direcciones principales de análisis (X e Y).
2. No cuantifica parámetros estructurales como cortante basal, desplazamientos, ductilidad ni rigidez.
3. La ponderación uniforme de los parámetros (escala 1–4) no refleja necesariamente la influencia real de cada factor en el comportamiento sísmico.
4. Los cuatro niveles de clasificación representan rangos amplios que pueden incluir estructuras con comportamientos significativamente diferentes.
5. No permite predecir el mecanismo de falla específico ni el nivel de daño ante una demanda sísmica determinada.

Por estas razones, la metodología INDECI debe entenderse como un instrumento de identificación y priorización, no como una herramienta de evaluación cuantitativa del desempeño sísmico.

2.3.9. Filosofía de desempeño sísmico: SEAOC Vision 2000

2.3.9.1 Origen y fundamentos del diseño basado en desempeño.

La filosofía de diseño basado en desempeño sísmico (Performance-Based Seismic Engineering, PBSE) surge como respuesta a las limitaciones del diseño sísmico tradicional

basado exclusivamente en la resistencia de las estructuras. Tras los sismos de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994) en Estados Unidos, la comunidad de ingeniería sísmica reconoció que estructuras diseñadas conforme a los códigos vigentes podían sufrir daños severos que, aunque sin colapso, resultaban en pérdidas económicas inaceptables (Structural Engineers Association of California, 1995).

En respuesta a esta problemática, el Structural Engineers Association of California (SEAOC) publicó en 1995 el documento *Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings*, estableciendo el marco conceptual del diseño basado en desempeño mediante la definición explícita de objetivos de desempeño que relacionan niveles de movimiento sísmico con estados de daño aceptables (Structural Engineers Association of California, 1995).

2.3.9.2 Niveles de desempeño estructural.

SEAOC Vision 2000 define cuatro niveles de desempeño estructural que representan estados de daño discretos, caracterizados por el nivel de funcionalidad de la edificación después del evento sísmico (Structural Engineers Association of California, 1995). El Cuadro 27 presenta los niveles de desempeño y sus características.

Cuadro 27

Niveles de desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000

Nivel de desempeño	Estado de daño	Descripción operacional
Funcional (Operational)	Despreciable	Daño estructural y no estructural mínimo. Ocupación inmediata sin restricciones. Servicios esenciales operativos.
Resguardo de vida (Life Safety)	Moderado	Daño estructural moderado, sistemas no estructurales dañados. Ocupación restringida. Estructura reparable.
Cerca al colapso (Near Collapse)	Severo	Daño estructural severo, degradación significativa de rigidez y resistencia. Ocupación no permitida. Posibilidad de reparación limitada.
Colapso (Collapse)	Colapso parcial o total	Falla estructural generalizada. Pérdida de vidas probable. Estructura no reparable.

Nota. Adaptado de Structural Engineers Association of California (1995). Los niveles de desempeño se determinan a partir de la posición del punto de desempeño en la curva de capacidad bilinealizada, según la sectorización definida por los rangos de desplazamiento obtenidos mediante la metodología American Society of Civil Engineers (2017).

2.3.9.3 Sectorización del desempeño sísmico.

La determinación del nivel de desempeño se realiza mediante la sectorización de la curva de capacidad bilinealizada. A partir de los puntos de fluencia (d_y , V_y) y desempeño (d_u , V_u) obtenidos según la metodología ASCE 41-17, se definen los rangos de desplazamiento correspondientes a cada nivel de desempeño. El Cuadro 28 presenta los factores de sectorización empleados.

Cuadro 28*Factores de sectorización para niveles de desempeño SEAOC Vision 2000*

Nivel de desempeño	Límite inferior	Límite superior
Funcional	$1,3 \cdot d_y$	d_u
Resguardo de vida	d_u	$1,5 \cdot d_u$
Cerca al colapso	$1,5 \cdot d_u$	Δ_{max}
Colapso	Δ_{max}	Falla estructural

Nota. d_y : desplazamiento de fluencia; d_u : desplazamiento de desempeño; Δ_{max} : desplazamiento máximo de la curva de capacidad. Adaptado de Structural Engineers Association of California (1995) y American Society of Civil Engineers (2017).

2.3.9.4 Diferencias fundamentales entre la metodología INDECI y la filosofía SEAOC Vision 2000.

Es fundamental comprender que la metodología INDECI y la filosofía SEAOC Vision 2000 constituyen enfoques conceptualmente distintos y complementarios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. El Cuadro 29 sintetiza las diferencias fundamentales entre ambas aproximaciones.

Cuadro 29*Comparación entre metodología INDECI y filosofía SEAOC Vision 2000*

Aspecto	Metodología INDECI	Filosofía SEAOC Vision 2000
Naturaleza	Cualitativa	Cuantitativa
Instrumento	Ficha de verificación visual	Análisis pushover no lineal
Parámetros	Observación directa (12 ítems)	Cortante, desplazamiento, ductilidad
Resultado	Nivel de vulnerabilidad (BAJO a MUY ALTO)	Nivel de desempeño (Funcional a Colapso)
Análisis direccional	No considera	Diferencia direcciones X e Y
Mecanismo de falla	No identifica	Identifica y cuantifica
Tiempo de aplicación	15–30 min por edificación	Horas o días por edificación
Personal requerido	Técnicos capacitados	Ingenieros especializados
Aplicación principal	Tamizaje masivo – campo	Evaluación detallada – laboratorio/oficina
Base normativa	INDECI (Perú)	SEAOC (Estados Unidos)

Nota. Ambas metodologías son conceptualmente distintas y no equivalentes. La metodología INDECI evalúa la *vulnerabilidad* como predisposición al daño basada en características observables, mientras que SEAOC Vision 2000 evalúa el *desempeño sísmico* como la respuesta estructural cuantificada ante una demanda sísmica específica. Su uso complementario permite una caracterización integral del comportamiento sísmico de las edificaciones. Adaptado de Instituto Nacional de Defensa Civil (2010) y Structural Engineers Association of California (1995).

La distinción conceptual más importante radica en que la metodología **INDECI** evalúa la *vulnerabilidad* como una predisposición o susceptibilidad al daño, basándose en

características constructivas, geométricas y de emplazamiento observables sin necesidad de realizar análisis estructural. En contraste, la filosofía **SEAOC Vision 2000** evalúa el *desempeño sísmico* como la respuesta estructural cuantificada de la edificación ante una demanda sísmica específica, determinada a partir del análisis numérico no lineal. Mientras INDECI clasifica edificaciones según su potencial de vulnerabilidad, SEAOC Vision 2000 determina el comportamiento real esperado ante el sismo de diseño (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2010; Structural Engineers Association of California, 1995).

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de la investigación

La presente investigación se clasifica como **cuantitativa** porque se fundamenta en la medición objetiva y el análisis numérico de variables estructurales verificables. El estudio procesa datos geométricos de viviendas de adobe (dimensiones en planta, altura y espesor de muros, áreas de vanos), propiedades mecánicas del material (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, densidad, energía de fractura) y parámetros de respuesta estructural obtenidos mediante modelamiento numérico en el software DIANA FEA.

El comportamiento sísmico de las viviendas se evalúa mediante indicadores **cuantificables**: curvas de capacidad (cortante basal vs. desplazamiento), derivas de entrepiso, desplazamientos máximos en el punto de control, ductilidad disponible y estados de daño según umbrales normativos. La metodología emplea análisis pushover estático no lineal con modelos constitutivos de grieta distribuida, procesamiento computacional mediante el método de elementos finitos.

Los resultados son reproducibles mediante la documentación de los parámetros del modelo numérico, propiedades mecánicas adoptadas y condiciones de análisis, permitiendo que cualquier investigador replique el procedimiento. Además, se establecen relaciones cuantificables entre las características estructurales de las viviendas y los niveles de vulnerabilidad sísmica obtenidos, posibilitando comparaciones objetivas con los criterios cualitativos de las fichas técnicas de INDECI.

3.2. Alcance de la investigación

La presente investigación se clasifica con un alcance **correlacional** porque establece y analiza la relación entre dos métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica: El modelamiento numérico mediante análisis pushover no lineal en DIANA FEA y la evaluación cualitativa mediante fichas técnicas de INDECI, aplicados a las mismas viviendas de adobe del distrito de Huancaray.

El componente **correlacional** se manifiesta en la determinación del grado de asociación entre los resultados cuantitativos del análisis numérico (desplazamientos máximos, derivas, cortante basal, índice de daño) y las categorías de vulnerabilidad asignadas mediante los criterios cualitativos de INDECI (vulnerabilidad baja, media, alta, muy alta). Se analiza si existe correspondencia entre ambas clasificaciones y en qué medida coinciden o divergen. Así mismo se evidencia en el contraste sistemático de los niveles de vulnerabilidad obtenidos por cada metodología, identificando coincidencias, discrepancias y posibles factores estructurales o metodológicos que expliquen las diferencias encontradas. Este alcance se justifica porque el objetivo principal no es manipular variables para observar efectos causales, sino contrastar dos aproximaciones metodológicas existentes aplicadas al mismo objeto de estudio, proporcionando información sobre su

complementariedad o divergencia en el contexto de construcciones rurales de adobe autoconstruido.

3.3. Diseño de la investigación

La presente investigación se clasifica con un diseño **no experimental de tipo transversal** porque no se manipulan deliberadamente las variables independientes, sino que se observan, registran y analizan las características estructurales de las viviendas de adobe tal como se presentan en su estado actual, sin intervención del investigador sobre las condiciones existentes.

El carácter **no experimental** se fundamenta en que las viviendas de adobe objeto de estudio fueron construidas previamente por los pobladores del distrito de Huancaray mediante técnicas tradicionales de autoconstrucción, sin participación ni control del investigador. Las características geométricas, propiedades de los materiales, configuración estructural y estado de conservación constituyen condiciones preexistentes que se documentan y analizan en su contexto real. Los modelos numéricos desarrollados en DIANA FEA reproducen fielmente las condiciones observadas en campo, sin introducir modificaciones hipotéticas ni escenarios experimentales controlados.

El carácter **transversal** se justifica porque la recolección de datos y evaluación de las viviendas se realiza en un único momento temporal durante el periodo de estudio, sin seguimiento longitudinal del comportamiento estructural. No se monitorea la evolución de las edificaciones ante eventos sísmicos reales ni se evalúan cambios en el tiempo. El estudio captura el estado de vulnerabilidad sísmica en un instante específico, enfoque característico de las evaluaciones de riesgo de desastres que buscan diagnosticar la condición actual del parque habitacional para fundamentar acciones de prevención y mitigación.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población de estudio está constituida por el total de viviendas de dos y tres niveles autoconstruidas con muros de adobe existentes en el distrito de Huancaray, provincia de Andahuaylas, región Apurímac, durante el año 2025.

Las viviendas que conforman la población comparten características constructivas comunes propias: muros portantes de adobe con espesores entre 0.30 y 0.50 m, cubiertas de teja andina o calamina sobre estructura de madera, cimentaciones de piedra asentada con barro, y configuraciones arquitectónicas típicas que responden a las necesidades funcionales y climáticas de la zona. La totalidad de estas edificaciones fueron construidas sin supervisión de profesionales de ingeniería civil o arquitectura, situación que incrementa su potencial vulnerabilidad ante solicitaciones sísmicas.

3.4.2. Muestra

La muestra está constituida por **6 viviendas** de adobe de dos y tres niveles, ubicadas en la zona urbana del distrito de Huancaray y el sector de Turpo. El tamaño muestral fue determinado considerando la alta demanda de recursos técnicos, temporales y computacionales que implica el modelamiento numérico detallado mediante el método de elementos finitos en DIANA FEA, así como la necesidad de representar la diversidad tipológica existente en la zona de estudio.

Cada vivienda evaluada requirió:

- Levantamiento geométrico exhaustivo en campo con medición de todos los elementos estructurales.
- Desarrollo de modelo tridimensional con discretización de malla de elementos finitos.
- Asignación y calibración de parámetros constitutivos del material según el modelo **Engineering Masonry Model (EMM)**.
- Configuración de condiciones de contorno y estados de carga.
- Ejecución de análisis pushover estático no lineal en dos direcciones ortogonales (X e Y).
- Procesamiento, interpretación y documentación de resultados (curvas de capacidad, patrones de agrietamiento, mecanismos de falla).
- Aplicación de ficha de verificación **INDECI FV-001INDECI-2010.03.29** para evaluación cualitativa.

3.4.3. Criterios de selección

3.4.3.1 Criterios de inclusión:

- Viviendas construidas con muros portantes de adobe en su totalidad.
- Edificaciones de dos o tres niveles.
- Viviendas con antigüedad mayor a 3 años (construcción consolidada).
- Edificaciones con accesibilidad para el levantamiento geométrico interior y exterior.
- Propietarios que otorguen consentimiento informado para la evaluación.
- Viviendas representativas de las tipologías constructivas predominantes en el distrito, incluyendo diferentes configuraciones en planta (rectangular, en L, con chaflán) y tipos de cobertura (teja artesanal, calamina).

3.4.3.2 Criterios de exclusión:

- Viviendas con sistemas estructurales mixtos (adobe combinado con concreto armado, albañilería o acero).
- Edificaciones en proceso de construcción, ampliación o demolición.
- Viviendas que hayan sido sometidas a intervenciones de reforzamiento estructural.
- Construcciones con modificaciones significativas respecto a su configuración original.
- Edificaciones con daños estructurales severos previos (colapso parcial, asentamientos diferenciales evidentes).

- Viviendas destinadas a uso no residencial (comercio, almacenes, establos).
- Edificaciones ubicadas en zonas de difícil acceso que impidan el levantamiento de información.

3.4.4. Procedimiento de selección de la muestra

La selección de las **6 viviendas** que conforman la muestra se realizó mediante el siguiente procedimiento:

1. **Reconocimiento preliminar:** Recorrido de campo por el distrito de Huancaray y el sector de Turpo para identificar viviendas de adobe de dos y tres niveles que cumplan con los criterios de inclusión establecidos.
2. **Clasificación tipológica:** Identificación de las tipologías constructivas predominantes según configuración en planta (rectangular, en L, con chaflán), tipo de cubierta (teja artesanal, calamina) y estado de conservación aparente (bueno, regular, malo).
3. **Selección por conveniencia:** Selección de 6 viviendas representativas que reflejen la diversidad tipológica existente en el distrito, priorizando aquellas con accesibilidad para el levantamiento y disposición de los propietarios para participar en el estudio. Las viviendas seleccionadas corresponden a dos ubicaciones: zona urbana del distrito de Huancaray (V-01, V-02, V-05 y V-06) y sector de Turpo (V-03 y V-04).
4. **Gestión de consentimiento:** Contacto con los propietarios de las viviendas seleccionadas para explicar los objetivos de la investigación y obtener el consentimiento informado para la evaluación.

3.4.5. Justificación del tamaño muestral

El tamaño muestral de **6 viviendas** se justifica considerando los siguientes aspectos técnicos y metodológicos:

1. **Complejidad del modelamiento numérico:** El desarrollo de modelos en DIANA FEA con análisis pushover no lineal demanda tiempos significativos por cada vivienda: aproximadamente 8–12 horas para el levantamiento geométrico detallado, 20–30 horas para la construcción del modelo 3D y calibración de propiedades del material, y 8–15 horas para la ejecución y post-procesamiento de cada análisis. Con dos direcciones de análisis por vivienda (X e Y), el esfuerzo total estimado supera las 60–80 horas por unidad muestral, lo que representa aproximadamente 360–480 horas de trabajo técnico para las 6 viviendas de la muestra.
2. **Restricciones temporales:** El periodo de investigación comprendido entre septiembre de 2025 y marzo de 2026 delimitó la cantidad de viviendas que pudieron ser evaluadas con el nivel de detalle y rigurosidad que exige el modelamiento mediante elementos finitos con comportamiento no lineal del material.
3. **Recursos computacionales:** Los análisis no lineales con el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)** requieren capacidad de procesamiento elevada y tiempos de cómputo prolongados, especialmente en las etapas cercanas al colapso

estructural donde se produce intensa propagación de fisuras y redistribución de esfuerzos.

4. **Representatividad tipológica:** Las 6 viviendas seleccionadas representan las principales tipologías constructivas del distrito, abarcando diferentes configuraciones en planta (rectangular simple, en L, con chaflán), tipos de cobertura (teja artesanal e inclinada de calamina), y rangos de vulnerabilidad según la metodología **INDECI** (nivel ALTO y MUY ALTO), lo que permite contrastar los resultados del modelamiento numérico en un espectro amplio de condiciones constructivas.

Las 6 viviendas fueron seleccionadas procurando representar diferentes condiciones de vulnerabilidad según la evaluación preliminar con fichas **INDECI**, lo que permitió contrastar los resultados del modelamiento numérico en el espectro de categorías de vulnerabilidad presente en el distrito. Los hallazgos constituyen un estudio de referencia para la evaluación de viviendas de adobe en la región Apurímac, pudiendo ser ampliado en investigaciones futuras con mayor disponibilidad de tiempo y recursos.

3.5. Hipótesis

3.5.1. Hipótesis general

El análisis de la vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal permite demostrar que las viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un nivel de vulnerabilidad alto según los criterios de INDECI.

3.5.2. Hipótesis específicas

- El análisis no lineal estático pushover mediante DIANA FEA demuestra que las viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un comportamiento estructural frágil, con capacidad de desplazamiento lateral limitada y mecanismos de falla predominantes por corte diagonal en muros.
- Las tablas de evaluación de vulnerabilidad sísmica de INDECI presentan limitaciones de precisión al ser contrastadas con los resultados obtenidos mediante modelamiento numérico no lineal.
- Las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan vulnerabilidades estructurales comunes que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural específico

3.6. Operacionalización de variables

3.7. Variables

3.7.1. Definición conceptual de variables

- **Variable independiente (X): Modelamiento numérico no lineal**

Según Lourenço (2000), el modelamiento numérico de estructuras de mampostería

mediante el método de elementos finitos permite simular el comportamiento no lineal de los materiales, considerando fenómenos como el agrietamiento, la degradación de rigidez y el colapso progresivo bajo acciones sísmicas. El análisis no lineal estático (pushover) constituye una herramienta fundamental para evaluar la capacidad resistente de estructuras existentes, permitiendo obtener la curva de capacidad que relaciona la fuerza lateral con el desplazamiento en el punto de control (Fajfar, 2000). En el contexto de esta investigación, el modelamiento numérico no lineal se define como la técnica de análisis computacional que considera el comportamiento no lineal de los materiales y estructuras para representar la respuesta ante acciones sísmicas, permitiendo simular el comportamiento real de los elementos estructurales cuando superan el límite elástico, implementado mediante el software DIANA FEA con el modelo constitutivo Total Strain Crack Model (TSCM).

■ **Variable dependiente (Y): Vulnerabilidad sísmica**

De acuerdo con Barbat et al. (2010), la vulnerabilidad sísmica se define como la predisposición intrínseca de una estructura a sufrir daño ante la ocurrencia de un evento sísmico de determinada intensidad, dependiendo de las características propias de su diseño y construcción. La evaluación de la vulnerabilidad puede realizarse mediante métodos cualitativos basados en la observación de parámetros estructurales, o mediante métodos cuantitativos que emplean análisis numéricos detallados (Calvi et al., 2006). En esta investigación, la vulnerabilidad sísmica se operacionaliza mediante dos enfoques complementarios: (1) el análisis numérico pushover en DIANA FEA que proporciona indicadores cuantitativos como derivas, ductilidad y curvas de capacidad, y (2) la evaluación cualitativa mediante fichas técnicas de INDECI que clasifican la vulnerabilidad según parámetros observables de configuración estructural, calidad constructiva y estado de conservación.

3.7.2. Dimensiones

Las dimensiones representan los componentes o aspectos específicos que conforman una variable compleja, permitiendo su análisis de manera más precisa y detallada (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.7.2.1 Variable independiente (X): Modelamiento numérico no lineal

- **Dimensión X1: Análisis no lineal estático pushover.** Procedimiento de análisis estructural que consiste en la aplicación monotónica e incremental de un patrón de cargas laterales hasta alcanzar el colapso o un nivel de daño predefinido. Permite obtener la curva de capacidad de la estructura, identificar mecanismos de falla, y determinar indicadores de desempeño sísmico como la resistencia lateral máxima, el desplazamiento último y la ductilidad disponible.
- **Dimensión X2: Modelamiento en DIANA FEA.** Desarrollo del modelo numérico tridimensional de las viviendas de adobe en el software de elementos finitos DIANA FEA, incluyendo la definición de la geometría estructural, la discretización mediante

elementos tipo shell, la asignación del modelo constitutivo TSCM (Total Strain Crack Model), y la configuración de parámetros de análisis no lineal para garantizar la convergencia numérica.

- **Dimensión X3: Propiedades del material.** Conjunto de parámetros mecánicos que caracterizan el comportamiento del adobe bajo cargas estáticas y dinámicas, incluyendo propiedades elásticas (módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson), propiedades de resistencia (compresión, tracción), propiedades físicas (densidad) y parámetros de fractura (energía de fractura, comportamiento post-pico).
- **Dimensión X4: Tipología estructural.** Características arquitectónicas y estructurales de las viviendas que influyen en su comportamiento sísmico, incluyendo el número de niveles, el tipo de cubierta, la distribución y densidad de muros portantes, y la presencia o ausencia de elementos de refuerzo o arriostramiento.

3.7.2.2 Variable dependiente (Y): Vulnerabilidad sísmica

- **Dimensión Y1: Configuración estructural.** Aspectos geométricos y de distribución de elementos resistentes que influyen en el comportamiento sísmico de la edificación, incluyendo la regularidad en planta y elevación, la relación entre altura y espesor de muros, la presencia de elementos de arriostramiento, y la continuidad de elementos verticales entre niveles.
- **Dimensión Y2: Índice de vulnerabilidad numérico.** Cuantificación del nivel de vulnerabilidad sísmica a partir de los resultados del análisis pushover en DIANA FEA, mediante la evaluación de indicadores como la deriva máxima de entrepiso, la ductilidad global, el índice de daño y la comparación con límites normativos establecidos en la NTE E.030.
- **Dimensión Y3: Calidad constructiva.** Evaluación de los aspectos relacionados con la calidad de los materiales y el proceso constructivo de las viviendas de adobe, incluyendo la composición y calidad de las unidades de adobe, el estado de conservación de los muros, la técnica de elaboración empleada, y la calidad del mortero en las juntas.
- **Dimensión Y4: Parámetros según INDECI.** Evaluación cualitativa de la vulnerabilidad sísmica mediante la aplicación de las fichas técnicas del Instituto Nacional de Defensa Civil, que consideran parámetros como la organización del sistema resistente, la configuración en planta y elevación, el tipo de cubierta, los elementos no estructurales, y el estado de conservación, permitiendo clasificar la vulnerabilidad en categorías (baja, media, alta, muy alta).

3.7.3. Indicadores

Los indicadores son elementos específicos y medibles que permiten cuantificar las dimensiones de las variables de estudio (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.7.3.1 Indicadores de la variable independiente (X):

1. Análisis no lineal estático pushover (X1)

- Curva de capacidad [kN vs mm (gráfico)]
- Punto de desempeño sísmico [kN, mm]
- Resistencia lateral máxima [kN]
- Cortante basal máximo [kN]
- Desplazamiento máximo [mm]
- Ductilidad global [adimensional]
- Deriva máxima de entrepiso [%]

2. Modelamiento en DIANA FEA (X2)

- Geometría estructural (dimensiones en planta y altura) [m]
- Discretización de elementos (tamaño de malla) [mm]
- Número de elementos finitos [número]
- Número de nodos [número]
- Patrón de agrietamiento [categórico (distribuido/localizado)]
- Convergencia del modelo [%]
- Número de iteraciones por paso de carga [número]
- Tolerancia de convergencia [adimensional]

3. Propiedades del material (X3)

- Resistencia a compresión (f'_b) [MPa]
- Resistencia a tracción (f_t) [MPa]
- Módulo de elasticidad (E) [MPa]
- Densidad del material (ρ) [kg/m³]
- Coeficiente de Poisson (ν) [adimensional]
- Energía de fractura a tracción (G_f^I) [N/m]
- Energía de fractura a compresión (G_c) [N/m]

4. Tipología estructural (X4)

- Número de pisos [número]
- Tipo de cubierta [categórico (liviana/pesada)]
- Área de muros en dirección X [m²]
- Área de muros en dirección Y [m²]
- Densidad de muros [%]
- Presencia de refuerzos [presencia/ausencia]
- Espesor de muros [m]

3.7.3.2 Indicadores de la variable dependiente (Y):

1. Configuración estructural (Y1)

- Regularidad en planta [categórico (regular/irregular)]
- Regularidad en elevación [categórico (regular/irregular)]
- Presencia de elementos de arriostre [presencia/ausencia]
- Relación altura/espesor de muro [adimensional]
- Longitud máxima entre arriostres [m]

- Excentricidad en planta [%]

2. Índice de vulnerabilidad numérico (Y2)

- Índice de daño según resultados de DIANA FEA [escala 0–1]
- Deriva máxima vs. deriva límite E.030 [%]
- Ductilidad demandada vs. ductilidad disponible [adimensional]
- Clasificación de vulnerabilidad numérica [baja/media/alta/muy alta]
- Factor de seguridad ante colapso [adimensional]

3. Calidad constructiva (Y3)

- Composición del adobe [categórico (tierra/paja/arena)]
- Estado de conservación de muros [bueno/regular/malo]
- Técnica de elaboración del adobe [categórico (artesanal/semi-industrial)]
- Calidad de mortero en juntas [bueno/regular/malo]
- Espesor de juntas [mm]
- Presencia de patologías [categórico (grietas/humedad/erosión)]

4. Parámetros según INDECI (Y4)

- Nivel de vulnerabilidad según fichas técnicas [baja/media/alta/muy alta]
- Índice de vulnerabilidad normalizado [escala 0–100]
- Categorización del peligro sísmico [bajo/medio/alto/muy alto]
- Factor de zona sísmica (Z) [adimensional]
- Tipo de suelo [categórico (S0/S1/S2/S3/S4)]
- Puntaje por parámetro INDECI [escala A–D]

El cuadro 86 presenta la operacionalización de las variables identificadas, donde se detallan las variables, dimensiones, indicadores y sus respectivas unidades de medida. Esta matriz permite establecer la relación sistemática entre los constructos teóricos y los elementos empíricamente observables, facilitando la medición rigurosa del modelamiento numérico no lineal y la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe evaluadas

3.8. Técnicas e instrumentos

3.8.1. Técnicas de investigación

Para el desarrollo de la investigación sobre vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe mediante análisis pushover no lineal y fichas técnicas INDECI, se emplearán las siguientes técnicas de investigación:

1. **Revisión bibliográfica y documental:** Consiste en la recopilación y análisis de literatura científica existente sobre vulnerabilidad sísmica de estructuras de adobe, modelamiento numérico mediante el método de elementos finitos, modelos constitutivos para materiales cuasifrágiles, análisis pushover estático no lineal, y metodologías de evaluación cualitativa de vulnerabilidad. Este proceso se realizará a través de bases de datos científicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect,

Google Scholar, repositorios institucionales de universidades peruanas (PUCP, UNI, universidades regionales), así como documentos normativos del Reglamento Nacional de Edificaciones (NTE E.030 Diseño Sismorresistente, NTE E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada), manuales de INDECI para evaluación de riesgo, publicaciones del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), y documentación técnica del software DIANA FEA.

2. **Observación directa estructurada:** Técnica de recolección de datos en campo que consiste en la inspección visual sistemática de las viviendas de adobe seleccionadas para identificar características estructurales, estado de conservación, patologías existentes (grietas, humedad, erosión, desplomes), configuración arquitectónica, calidad aparente de los materiales y elementos no estructurales. La observación se realizará siguiendo un protocolo estandarizado que garantice el registro completo y consistente de todas las variables relevantes para la evaluación de vulnerabilidad sísmica.
3. **Medición directa:** Levantamiento dimensional de las viviendas mediante instrumentos de medición (cinta métrica, distanciómetro) para obtener las dimensiones geométricas requeridas en el modelamiento numérico: Dimensiones en planta, altura de muros, espesor de muros, ubicación y dimensiones de vanos (puertas y ventanas), altura de antepechos, dimensiones de elementos de cubierta, y características de la cimentación cuando sea accesible. Las mediciones seguirán procedimientos estandarizados para minimizar errores de medición.
4. **Registro fotográfico:** Documentación visual sistemática de cada vivienda evaluada, incluyendo vistas generales exteriores (fachadas, esquinas), vistas interiores de ambientes principales, detalles constructivos relevantes (encuentros de muros, conexión muro-cubierta, cimentación), y registro detallado de patologías estructurales identificadas (grietas, fisuras, deformaciones, deterioro de materiales). El registro fotográfico servirá como respaldo documental y referencia para el desarrollo de los modelos numéricos.
5. **Aplicación de fichas técnicas de evaluación:** Implementación de las fichas de evaluación de vulnerabilidad sísmica basadas en la metodología de INDECI para viviendas de adobe. Se evaluarán parámetros cualitativos como: organización del sistema resistente, calidad del sistema resistente, posición del edificio y cimentación, configuración en planta, configuración en elevación, separación máxima entre muros, tipo de cubierta, elementos no estructurales, y estado de conservación. Cada parámetro será calificado según los criterios establecidos en la metodología para determinar el índice de vulnerabilidad cualitativo.
6. **Modelamiento numérico por elementos finitos:** Desarrollo de modelos tridimensionales de las viviendas de adobe en el software DIANA FEA, empleando elementos tipo shell para la discretización de los muros. Se asignarán propiedades mecánicas del material adobe según valores reportados en la literatura especializada y calibrados para las características locales: resistencia a compresión, módulo de

elasticidad, resistencia a tracción, energía de fractura, densidad y coeficiente de Poisson. Se implementará el modelo constitutivo Total Strain Crack Model (TSCM) para representar el comportamiento no lineal del material, incluyendo agrietamiento distribuido y degradación de rigidez.

7. **Análisis pushover estático no lineal:** Ejecución de análisis de empuje incremental (pushover) en las dos direcciones ortogonales principales (X e Y) de cada vivienda modelada. Se aplicará un patrón de carga lateral proporcional al primer modo de vibración, incrementando monotónicamente el desplazamiento del punto de control (generalmente en el nivel superior) hasta alcanzar el colapso estructural o un nivel de daño severo. Se obtendrán las curvas de capacidad (cortante basal vs. desplazamiento), identificando puntos característicos como fluencia, capacidad máxima y colapso.
8. **Análisis comparativo:** Contraste sistemático entre los niveles de vulnerabilidad sísmica obtenidos mediante el modelamiento numérico (basado en indicadores como deriva máxima, ductilidad, índice de daño) y las categorías de vulnerabilidad asignadas mediante las fichas técnicas de INDECI. Se identificarán coincidencias, discrepancias y posibles factores que expliquen las diferencias entre ambas metodologías.
9. **Análisis estadístico:** Aplicación de técnicas estadísticas descriptivas para caracterizar los resultados obtenidos de ambas metodologías. Se calcularán estadísticos descriptivos (media, desviación estándar, valores extremos) de los indicadores de vulnerabilidad, se elaborarán tablas de contingencia para analizar la concordancia entre métodos, y se aplicará el coeficiente Kappa de Cohen para evaluar el grado de acuerdo entre las clasificaciones de vulnerabilidad. Se utilizará software estadístico (Excel, SPSS o Python con librerías Pandas/SciPy) para el procesamiento de datos.

3.8.2. Instrumentos de recolección de datos

Para la implementación de las técnicas mencionadas, se utilizarán los siguientes instrumentos:

1. **Ficha de evaluación de vulnerabilidad sísmica INDECI:** Instrumento estandarizado basado en la metodología del Instituto Nacional de Defensa Civil para la evaluación cualitativa de viviendas de adobe.

Cada parámetro se califica en una escala de A (favorable) a D (desfavorable), obteniéndose un índice de vulnerabilidad normalizado que permite clasificar la vivienda en categorías de vulnerabilidad baja, media, alta o muy alta.
2. **Ficha de levantamiento geométrico:** Formato diseñado para el registro sistemático de las dimensiones de cada vivienda, incluyendo:
 - Datos de identificación (código, dirección, propietario, fecha)
 - Dimensiones en planta de cada ambiente
 - Espesor de muros

- Altura de muros por nivel
 - Ubicación, dimensiones y altura de vanos (puertas y ventanas)
 - Características de la cubierta (tipo, material, pendiente)
 - Características de la cimentación (tipo, profundidad estimada)
 - Croquis en planta y elevación
3. **Ficha de registro fotográfico:** Formato para la documentación visual sistematizada de cada vivienda, con campos para:
- Código de vivienda y fecha de registro
 - Fotografías de fachadas (mínimo 4 vistas)
 - Fotografías de interiores por ambiente
 - Fotografías de detalles constructivos
 - Fotografías de patologías identificadas
 - Descripción y ubicación de cada fotografía
4. **Ficha de identificación de patologías:** Instrumento para el registro detallado de daños y deterioros observados en cada vivienda:
- Tipo de patología (grietas, fisuras, humedad, erosión, desplome)
 - Ubicación en la estructura (muro, esquina, vano, cubierta)
 - Dimensiones aproximadas (longitud, ancho de grietas)
 - Orientación y patrón de agrietamiento
 - Posible causa (estructural, asentamiento, térmico, humedad)
 - Severidad (leve, moderada, severa)
 - Fotografía de referencia
5. **Instrumentos de medición:**
- **Cinta métrica (30 m):** Para medición de dimensiones en planta y longitudes mayores.
 - **Flexómetro (5 m):** Para medición de espesores de muros, dimensiones de vanos y alturas accesibles.
6. **Cámara fotográfica digital:** Dispositivo para captura de imágenes con resolución mínima de 12 megapíxeles, con capacidad de registro de metadatos (fecha, hora) y preferentemente con GPS integrado para georreferenciación de fotografías.
7. **Smartphone con GPS:** Dispositivo móvil para el registro de coordenadas geográficas de cada vivienda evaluada (latitud, longitud), captura de fotografías complementarias, y respaldo de información en campo.
8. **Software DIANA FEA:** Programa de análisis por elementos finitos desarrollado por DIANA FEA BV (Países Bajos), especializado en el análisis de estructuras de concreto, mampostería y geotecnia. Características técnicas relevantes:
- Elementos tipo shell para modelamiento de muros
 - Modelo constitutivo Total Strain Crack Model (TSCM)
 - Análisis no lineal estático (pushover)
 - Post-procesamiento de resultados (curvas de capacidad, patrones de

agrietamiento, distribución de esfuerzos)

- Licencia educativa disponible para instituciones académicas

3.9. Validez y confiabilidad de instrumentos

Se describen a continuación los criterios de validez y confiabilidad para cada instrumento utilizado en la investigación:

3.9.1. Ficha de evaluación de vulnerabilidad sísmica INDECI

Instrumento principal para la evaluación cualitativa de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe según la metodología establecida por el Instituto Nacional de Defensa Civil.

3.9.1.1 Validez del instrumento:

- a) **Validez de contenido:** La ficha está basada en la metodología oficial de INDECI para evaluación de vulnerabilidad sísmica de viviendas, desarrollada a partir del método del Índice de Vulnerabilidad de Benedetti-Petrini adaptado al contexto peruano. Los parámetros evaluados corresponden a factores reconocidos en la literatura internacional como determinantes de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería no reforzada.
- b) **Validez institucional:** El instrumento es utilizado oficialmente por INDECI y los gobiernos locales del Perú para la evaluación de riesgo de desastres, habiendo sido aplicado en múltiples estudios de vulnerabilidad a nivel nacional, lo que respalda su aplicabilidad al contexto peruano.
- c) **Validez de constructo:** Los parámetros evaluados (organización del sistema resistente, configuración en planta y elevación, calidad de materiales, estado de conservación, entre otros) corresponden a variables estructurales que la ingeniería sísmica reconoce como influyentes en el comportamiento de edificaciones ante sismos.

3.9.1.2 Confiabilidad del instrumento:

- a) **Capacitación del evaluador:** El investigador se capacitará en la aplicación de la metodología INDECI mediante revisión de manuales oficiales, guías de aplicación y estudios previos que hayan empleado el instrumento en viviendas de adobe.
- b) **Protocolo de evaluación estandarizado:** Se elaborará un protocolo detallado con criterios específicos para la asignación de calificaciones en cada parámetro, reduciendo la subjetividad inherente a la evaluación cualitativa.
- c) **Registro fotográfico de respaldo:** Cada calificación asignada estará respaldada por fotografías que documenten la condición observada, permitiendo revisión posterior y verificación de consistencia.
- d) **Doble verificación:** Las fichas completadas serán revisadas en gabinete contrastando con el registro fotográfico para detectar posibles inconsistencias o errores de registro.

3.9.2. Ficha de levantamiento geométrico

Instrumento diseñado para el registro sistemático de las dimensiones de las viviendas, información fundamental para el desarrollo de los modelos numéricos en DIANA FEA.

3.9.2.1 Validez del instrumento:

- a) **Validez de contenido:** Los campos de la ficha fueron definidos en correspondencia directa con los datos de entrada requeridos por el software DIANA FEA para la construcción de modelos geométricos: dimensiones en planta, alturas, espesores, ubicación de vanos y características de cubierta.
- b) **Validez de constructo:** Los parámetros geométricos incluidos corresponden a las variables que definen la configuración estructural de viviendas de adobe y que influyen en su comportamiento sísmico según la literatura especializada.
- c) **Validación por juicio de expertos:** La ficha será sometida a evaluación por un profesional con experiencia en modelamiento de estructuras de adobe para verificar la completitud de los campos requeridos.

3.9.2.2 Confiabilidad del instrumento:

- a) **Procedimiento estandarizado de medición:** Definición de un protocolo que especifique el punto de medición para cada dimensión (cara interior o exterior de muros, nivel de piso terminado, etc.) para garantizar consistencia.
- b) **Doble medición:** Las dimensiones críticas (espesores de muros, altura de entepiso, dimensiones de vanos) serán medidas dos veces para verificar consistencia, aceptando diferencias menores a 2 cm.
- c) **Verificación de cierre geométrico:** Las mediciones en planta serán verificadas mediante el cierre del perímetro, detectando errores de medición cuando la diferencia supere el 1% del perímetro total.
- d) **Croquis a escala:** Elaboración de croquis en campo que permitan verificar la coherencia de las mediciones registradas.

3.9.3. Instrumentos de medición

Conjunto de herramientas utilizadas para el levantamiento dimensional de las viviendas.

3.9.3.1 Validez de los instrumentos:

- a) **Cinta métrica y flexómetro:** Instrumentos de medición directa con graduación milimétrica, de uso estándar en levantamientos arquitectónicos y estructurales. Precisión nominal de ± 1 mm por metro.
- b) **Nivel de burbuja y plomada:** Instrumentos tradicionales de verificación de horizontalidad y verticalidad, ampliamente utilizados en la industria de la construcción con precisión adecuada para los fines del estudio.

3.9.3.2 Confiabilidad de los instrumentos:

- a) **Verificación previa:** Antes de cada sesión de campo, se verificará el correcto funcionamiento de los instrumentos mediante medición de una longitud conocida.
- b) **Calibración del distanciómetro:** Verificación de la precisión del distanciómetro láser comparando mediciones con cinta métrica en distancias controladas (5 m, 10 m).
- c) **Condiciones de uso:** Se seguirán las recomendaciones del fabricante para el uso del distanciómetro láser, evitando mediciones con superficies reflectantes o en condiciones de luz solar directa intensa.
- d) **Mantenimiento:** Las cintas métricas serán revisadas para detectar deformaciones, quiebres o borrado de graduaciones que afecten la precisión.

3.9.4. Software DIANA FEA

Programa de análisis por elementos finitos utilizado para el modelamiento numérico y análisis pushover de las viviendas de adobe.

3.9.4.1 Validez del software:

- a) **Validez técnica:** DIANA FEA es un software especializado en análisis no lineal de estructuras, desarrollado por DIANA FEA BV (Países Bajos) con más de 50 años de desarrollo. Es ampliamente utilizado en investigación académica y práctica profesional para el análisis de estructuras de mampostería, concreto y geotecnia.
- b) **Validez científica:** El software ha sido validado mediante comparación con resultados experimentales en múltiples publicaciones científicas indexadas. Investigadores reconocidos como Lourenço (2000), Tarque Ruíz (2011) y Ademović et al. (2024) han empleado DIANA FEA para el análisis de estructuras de mampostería y adobe, validando su capacidad para reproducir el comportamiento no lineal de estos materiales.
- c) **Validez del modelo constitutivo:** El Total Strain Crack Model (TSCM) implementado en DIANA FEA está basado en la teoría de mecánica de fractura y ha sido validado para materiales cuasifrágiles como el concreto, la mampostería y el adobe, siendo capaz de representar fenómenos como agrietamiento distribuido, ablandamiento por tracción y degradación de rigidez.
- d) **Documentación técnica:** DIANA FEA cuenta con extensa documentación técnica, manuales de usuario, guías de verificación y ejemplos de aplicación que respaldan la correcta implementación de los análisis.

3.9.4.2 Confiabilidad del software:

- a) **Verificación de modelos:** Antes de analizar las viviendas, se desarrollará un modelo de verificación reproduciendo un caso de estudio reportado en la literatura (ensayo de muro de adobe o módulo de vivienda) para validar la correcta configuración de parámetros y procedimientos de análisis.
- b) **Análisis de sensibilidad:** Se realizará un análisis de sensibilidad para evaluar la

influencia de los parámetros mecánicos del material (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, energía de fractura) en los resultados, identificando los parámetros más influyentes.

- c) **Convergencia de malla:** Se verificará la convergencia de resultados con diferentes tamaños de malla para garantizar que la discretización adoptada proporcione resultados estables.
- d) **Verificación de equilibrio:** Se verificará el equilibrio de fuerzas en los modelos (reacciones vs. cargas aplicadas) como control de calidad del análisis numérico.
- e) **Documentación de parámetros:** Todos los parámetros de entrada del modelo (propiedades mecánicas, condiciones de contorno, parámetros de análisis) serán documentados para garantizar reproducibilidad.

3.9.5. Parámetros mecánicos del adobe

Los parámetros mecánicos asignados al material adobe en los modelos numéricos constituyen datos de entrada críticos que influyen significativamente en los resultados del análisis.

3.9.5.1 Validez de los parámetros:

- a) **Fuentes bibliográficas:** Los valores de propiedades mecánicas serán adoptados de investigaciones previas realizadas en adobe peruano, priorizando estudios de la región sur del país. Se consultarán trabajos de Blondet, Vargas, Tarque y Iwaki (2011), Tarque Ruíz (2011), Varum et al. (2006) y otros investigadores reconocidos en el tema.
- b) **Rangos de valores:** Se establecerán rangos de valores típicos para cada propiedad según la literatura, verificando que los valores adoptados se encuentren dentro de rangos físicamente razonables:
 - Resistencia a compresión (f'_b): 0.8 - 2.0 MPa
 - Módulo de elasticidad (E): 200 - 500 MPa
 - Resistencia a tracción (f_t): 0.05 - 0.15 MPa
 - Densidad (ρ): 1600 - 1900 kg/m³
 - Coeficiente de Poisson (ν): 0.15 - 0.25
 - Energía de fractura (G_f): 5 - 20 N/m
- c) **Consistencia interna:** Se verificará la consistencia entre parámetros relacionados (por ejemplo, relación entre módulo de elasticidad y resistencia a compresión) según correlaciones empíricas reportadas en la literatura.

3.9.5.2 Confiabilidad de los parámetros:

- a) **Análisis paramétrico:** Se evaluará la sensibilidad de los resultados a variaciones en los parámetros mecánicos dentro de los rangos establecidos, reportando el impacto de la incertidumbre en las conclusiones.
- b) **Calibración con casos de referencia:** Los parámetros serán calibrados reproduciendo resultados experimentales reportados en la literatura para ensayos de muros.

3.10. Desarrollo del trabajo de tesis

3.10.1. Caracterización del área de estudio

El distrito de Huancaray se ubica en la provincia de Andahuaylas, región Apurímac, a una altitud promedio de 2,915 m.s.n.m., en la zona sísmica 2 según la Norma Técnica E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones, con un factor de zona $Z = 0.25$.

En el contexto constructivo local, predomina la edificación informal de viviendas caracterizada por la ausencia de asesoría técnica profesional y la carencia de documentación técnica correspondiente a las diversas especialidades de ingeniería, incluyendo arquitectura, estructuras, instalaciones sanitarias e instalaciones eléctricas. Esta situación responde a factores socioeconómicos, culturales y de accesibilidad geográfica que limitan la intervención de profesionales en el proceso constructivo, perpetuando prácticas tradicionales de autoconstrucción transmitidas generacionalmente.

Las viviendas de adobe en el distrito de Huancaray presentan características constructivas típicas de la arquitectura vernácula andina: Muros de adobe elaborados con tierra local, techos de estructura de madera con cobertura de teja artesanal o calamina, entresijos de viguetas de madera con entablado, y cimentaciones de piedra asentada con mortero de barro. La configuración arquitectónica predominante corresponde a viviendas de dos niveles con distribución funcional que destina el primer nivel a actividades productivas o de almacenamiento y el segundo nivel a uso residencial.

3.10.2. Selección de las viviendas de estudio

La selección de las edificaciones objeto de estudio se realizó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando los siguientes criterios de inclusión:

- a) **Tipología estructural:** Viviendas construidas íntegramente con muros portantes de adobe, sin elementos de confinamiento de concreto armado ni refuerzos estructurales adicionales.
- b) **Configuración vertical:** Edificaciones de dos niveles, representativas de la tipología de mayor vulnerabilidad sísmica según la literatura técnica especializada y los registros de daños post-sísmicos en la región.
- c) **Estado de ocupación:** Viviendas habitadas que permitan el acceso para la realización del levantamiento dimensional, aplicación de fichas de evaluación y registro fotográfico.
- d) **Representatividad tipológica:** Edificaciones que reflejen las características constructivas predominantes en el distrito, incluyendo materiales, técnicas constructivas y configuración arquitectónica típica.
- e) **Accesibilidad:** Disponibilidad de los propietarios para autorizar el ingreso y la realización de las actividades de campo requeridas por la investigación.

Figura 20

Vivienda V-01: Edificación de adobe de tres niveles



Nota. Imagen georeferenciada de la Vivienda V-01, distrito de Huancaray, Apurímac. Configuración de tres niveles con muros de adobe sin revestimiento y cobertura de calamina.

Figura 21

Vivienda V-02: Edificación de adobe de dos niveles en zona urbana de Huancaray



Nota. Imagen georeferenciada de la Vivienda V-02, distrito de Huancaray, Apurímac. Configuración de dos niveles con cobertura a dos aguas.

Figura 22

Vivienda V-03: Edificación de adobe de dos niveles con cobertura de calamina



Nota. Imagen georeferenciada de la Vivienda V-03, Apurímac (Lat. -13.770651° , Long. -73.486688°). Configuración de dos niveles con muros de adobe sin revestimiento y cobertura de calamina inclinada.

Figura 23

Vivienda V-04: Edificación de adobe de dos niveles con balcón de madera



Nota. Imagen georeferenciada de la Vivienda V-04, Apurímac (Lat. -13.770651° , Long. -73.486688°). Configuración de dos niveles con balcón de madera en segundo nivel y cobertura de calamina a dos aguas.

Figura 24

Vivienda V-05: Edificación de adobe de dos niveles en esquina, zona urbana de Huancaray



Nota. Imagen georeferenciada de la Vivienda V-05, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.757883° , Long. -73.528149°). Configuración de dos niveles con revestimiento de mortero de barro y cobertura de teja artesanal, ubicada en esquina de vías urbanas.

Figura 25

Vivienda V-06: Edificación de adobe de dos niveles con configuración rectangular alargada, zona urbana de Huancaray



Nota. Imagen georeferenciada de la Vivienda V-06, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.757373° , Long. -73.528798°). Configuración rectangular alargada de dos niveles con revestimiento de mortero deteriorado y cobertura de teja artesanal.

3.10.3. Levantamiento arquitectónico y estructural

El levantamiento arquitectónico y estructural de las viviendas seleccionadas constituyó una etapa fundamental previa al modelamiento numérico en DIANA FEA. Esta fase comprendió actividades de campo que permitieron obtener la información geométrica y estructural necesaria para la elaboración de los modelos tridimensionales.

3.10.3.1 Levantamiento dimensional.

Se realizaron mediciones in situ de las dimensiones geométricas de cada vivienda, registrando las dimensiones en planta de cada nivel (largo, ancho, áreas), altura de entrepisos y altura total de la edificación, espesor de muros de adobe en todos los ejes estructurales, dimensiones de vanos (puertas y ventanas) y su ubicación en los muros, longitud de muros en cada dirección principal (X e Y), así como las dimensiones de elementos de entrepiso y cubierta.

3.10.3.2 Identificación de la configuración estructural.

Se identificaron las características del sistema estructural de cada vivienda, documentando el tipo de cimentación, la configuración de muros portantes y su continuidad vertical, el sistema de entrepiso (viguetas de madera con entablado), el sistema de cobertura (estructura de madera con teja o calamina), la presencia o ausencia de elementos de arriostre (vigas collar, contrafuertes), el tipo de conexiones entre muros ortogonales, y la existencia de juntas sísmicas con edificaciones colindantes.

3.10.3.3 Registro de daños y patologías.

Se documentaron las manifestaciones de deterioro estructural y no estructural observadas en cada vivienda, incluyendo fisuras y grietas en muros (ubicación, orientación, longitud, abertura), desplomes y deformaciones de muros, deterioro por humedad (erosión de base de muros), estado de conservación de elementos de madera (vigas, viguetas, entablados), daños en conexiones muro-entrepiso y muro-cubierta, así como las modificaciones estructurales realizadas por los propietarios.

3.10.4. Instrumentos de recolección de datos

La recopilación de información de campo se realizó mediante instrumentos estandarizados que permitieron sistematizar la información obtenida.

3.10.4.1 Ficha de levantamiento arquitectónico.

Instrumento diseñado para registrar las dimensiones geométricas, distribución de ambientes, ubicación de vanos y configuración espacial de cada nivel de las viviendas evaluadas. La información recopilada permitió elaborar los planos de planta y elevaciones requeridos para el modelamiento numérico en DIANA FEA.

3.10.4.2 Ficha técnica de evaluación INDECI.

Se aplicó la Ficha de Verificación para la Determinación de la Vulnerabilidad de la Vivienda para Casos de Sismo (FV-001INDECI-2010.03.29), instrumento estandarizado del Instituto

Nacional de Defensa Civil. Esta ficha evalúa de manera sistemática los parámetros que inciden en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, considerando aspectos como el material predominante de la edificación, la participación de ingeniero civil en el diseño y/o construcción, la antigüedad de la edificación, el tipo de suelo, la topografía del terreno, la configuración geométrica en planta y elevación, la existencia de juntas de dilatación sísmica, la concentración de masas en niveles, el estado de los principales elementos estructurales, y otros factores que inciden en la vulnerabilidad.

La calificación del nivel de vulnerabilidad se determina mediante la sumatoria de valores asignados a cada parámetro de la Sección D de la ficha, clasificando las viviendas en cuatro niveles: **MUY ALTO** (mayor a 24 puntos), **ALTO** (entre 18 y 24 puntos), **MODERADO** (entre 15 y 17 puntos), y **BAJO** (hasta 14 puntos).

3.10.4.3 Ficha de registro fotográfico.

Instrumento para documentar sistemáticamente el estado actual de las viviendas mediante fotografías de fachadas, interiores, elementos estructurales, daños observados y detalles constructivos relevantes para la investigación.

3.10.5. Resultados de la evaluación INDECI

La aplicación de las fichas técnicas de evaluación INDECI a las seis viviendas de estudio permitió determinar su nivel de vulnerabilidad sísmica de manera cualitativa. El Cuadro 30 presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada vivienda evaluada.

Cuadro 30*Resumen de resultados de evaluación INDECI de las seis viviendas de estudio*

Parámetro evaluado	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Propietario	García Najarro Luz Milagros	Rodas Rodas Pablo	Huamani Matute Sonia	Nicolaza Berrocal Mendoza	Marcas Sauñe Edward	Cardenas Guerrero Julio
Ubicación	Jr. Comercio s/n, Huancaray	Jr. Comercio s/n, Huancaray	Carretera Huancaray-Turkey, C.P. Natividad	Jr. Comercio S/N, Huancaray	Jr. Comercio S/N, Huancaray	Jr. Comercio S/N, Huancaray
Número de pisos	03	02	02	02	02	02
Material predominante	Adobe (Val: 4)	Adobe (Val: 4)	Adobe (Val: 4)	Adobe (Val: 4)	Adobe (Val: 4)	Adobe (Val: 4)
Participación Ing. Civil	No (Val: 4)	No (Val: 4)	No (Val: 4)	No (Val: 4)	No (Val: 4)	No (Val: 4)
Antigüedad	20 a 49 años (Val: 3)	20 a 49 años (Val: 3)	3 a 19 años (Val: 2)	20 a 49 años (Val: 3)	3 a 19 años (Val: 2)	3 a 19 años (Val: 2)
Tipo de suelo	Arena gran espesor (Val: 3)	Arena gran espesor (Val: 3)	Granular fino y arcilloso (Val: 2)	Suelos rocosos (Val: 1)	Granular fino y arcilloso (Val: 2)	Granular fino y arcilloso (Val: 2)
Topografía del terreno	Entre 20 % a 10 % (Val: 2)	Entre 20 % a 10 % (Val: 2)	Entre 20 % a 10 % (Val: 2)	Hasta 10 % (Val: 1)	Entre 20 % a 10 % (Val: 2)	Entre 20 % a 10 % (Val: 2)
Configuración en planta	Irregular (Val: 4)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)
Configuración en elevación	Irregular (Val: 4)	Irregular (Val: 4)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)	Regular (Val: 1)
Juntas de dilatación sísmica	No existen (Val: 4)	No existen (Val: 4)	Sí existen (Val: 1)	No existen (Val: 4)	No existen (Val: 4)	No existen (Val: 4)
Concentración de masas	Superiores (Val: 4)	Superiores (Val: 4)	Inferiores (Val: 1)	Inferiores (Val: 1)	Inferiores (Val: 1)	Inferiores (Val: 1)
Estado muros portantes	Regular estado (Val: 2)	Regular estado (Val: 2)	Buen estado (Val: 1)	Deterioro y/o humedad (Val: 3)	Buen estado (Val: 1)	Buen estado (Val: 1)
Factores adicionales	Humedad, debilitamiento (Val: 8)	Humedad, debilitamiento (Val: 5)	Humedad (Val: 4)	Humedad (Val: 4)	Humedad (Val: 4)	Humedad (Val: 4)
Sumatoria total	39 pts	35 pts	24 pts	28 pts	25 pts	25 pts
Nivel de vulnerabilidad	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO

Nota. Cinco de las seis viviendas presentan un nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** según la metodología **INDECI** (puntaje > 24 puntos), lo que indica que en las condiciones actuales no es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación. La Vivienda V-03 presenta un nivel **ALTO** (puntaje = 24 puntos), requiriendo cambios drásticos en la estructura. Las fichas INDECI completas se presentan en la sección Anexos.

3.10.5.1 Vivienda V-01.

La evaluación arrojó una sumatoria de **39 puntos**, clasificándose en el nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** según la metodología **INDECI**. Los principales factores que contribuyen a esta calificación son: el material de construcción (adobe sin reforzamiento), la ausencia de participación profesional en el diseño, la configuración geométrica irregular tanto en planta como en elevación, la inexistencia de juntas de dilatación sísmica, la concentración de masas en niveles superiores (edificación de 3 pisos), y la presencia de humedad excesiva que debilita los elementos estructurales. La ficha recomienda el reforzamiento estructural de la vivienda.

3.10.5.2 Vivienda V-02.

La evaluación arrojó una sumatoria de **35 puntos**, clasificándose igualmente en el nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** según la metodología **INDECI**. Aunque presenta una configuración regular en planta (a diferencia de la V-01), los factores críticos que determinan su alta vulnerabilidad son similares: construcción en adobe sin diseño profesional, ausencia de juntas sísmicas, concentración de masas en niveles superiores, y presencia de humedad y debilitamiento por sobrecarga. La ficha también recomienda reforzamiento estructural.

3.10.5.3 Vivienda V-03.

La evaluación arrojó una sumatoria de **24 puntos**, clasificándose en el nivel de vulnerabilidad **ALTO** según la metodología **INDECI**. Esta vivienda, ubicada en el sector de Turpo (Centro Poblado de Natividad), presenta condiciones constructivas ligeramente más favorables respecto a las anteriores: antigüedad menor (3 a 19 años), suelo granular fino y arcilloso, configuración regular tanto en planta como en elevación, presencia de juntas de dilatación sísmicas y muros portantes en buen estado. Sin embargo, el factor predominante que eleva su puntuación es la humedad, junto con la ausencia de participación profesional en el diseño y la construcción en adobe sin refuerzo. La ficha recomienda evacuar la edificación en forma inmediata ante un evento sísmico.

3.10.5.4 Vivienda V-04.

La evaluación arrojó una sumatoria de **28 puntos**, clasificándose en el nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** según la metodología **INDECI**. Los factores determinantes incluyen: material de adobe sin reforzamiento, ausencia de participación de ingeniero civil, antigüedad entre 20 a 49 años, inexistencia de juntas de dilatación sísmica y deterioro por humedad observable en los muros portantes. A diferencia de las demás viviendas, V-04 se asienta sobre suelos rocosos y terreno de topografía plana o ligera, lo que podría representar condiciones de cimentación más estables; sin embargo, el estado de deterioro de sus elementos estructurales y la ausencia de juntas sísmicas elevan significativamente su nivel de vulnerabilidad según la metodología **INDECI**.

3.10.5.5 Vivienda V-05.

La evaluación arrojó una sumatoria de **25 puntos**, clasificándose en el nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** según la metodología **INDECI**. Ubicada en la zona urbana del distrito de Huancaray, esta vivienda presenta configuración regular en planta y elevación, y muros portantes en buen estado aparente; no obstante, la inexistencia de juntas de dilatación sísmica, la construcción en adobe sin asesoramiento profesional y la presencia de humedad determinan su clasificación como vivienda de vulnerabilidad muy alta. La ficha fue verificada por el Ing. Marcas Sauñe Edward en Huancaray, el 20 de marzo de 2026.

3.10.5.6 Vivienda V-06.

La evaluación arrojó una sumatoria de **25 puntos**, clasificándose igualmente en el nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** según la metodología **INDECI**. Al igual que la Vivienda V-05, presenta configuración regular y muros en buen estado aparente, pero comparte los factores de riesgo comunes a la tipología: adobe sin reforzamiento, ausencia de participación profesional, inexistencia de juntas sísmicas y presencia de humedad en los elementos estructurales. La ficha fue verificada por el Ing. Cardenas Guerrero Julio en Huancaray, el 29 de marzo de 2026.

Las seis viviendas fueron evaluadas durante los meses de octubre de 2025 y marzo de 2026 en los sectores de Huancaray y Turpo. Las fichas completas de verificación INDECI se presentan en la sección de Anexos.

3.10.6. Modelamiento previo en Autodesk Revit

Previo al modelamiento numérico en DIANA FEA, se elaboraron modelos tridimensionales de las seis viviendas de estudio empleando el software Autodesk Revit. Esta etapa intermedia permitió generar una representación geométrica detallada de las estructuras a partir de la información recopilada en el levantamiento de campo.

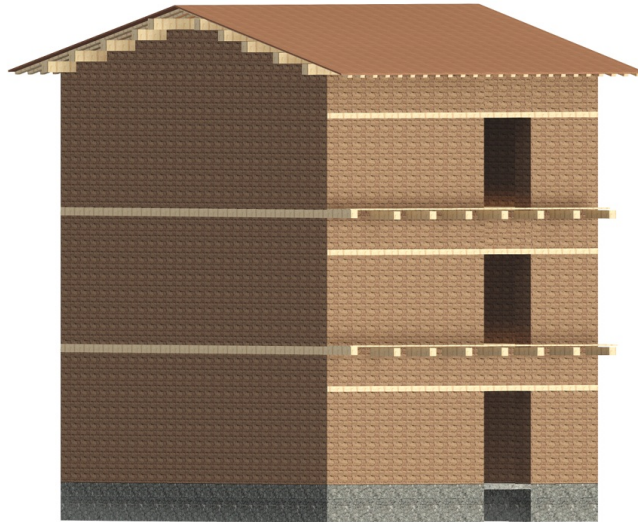
3.10.6.1 Proceso de modelamiento.

El modelamiento en Revit comprendió la elaboración de los siguientes elementos para cada vivienda:

- Cimentación corrida (representación tridimensional)
- Muros de adobe en todos los niveles con sus respectivos espesores
- Vanos de puertas y ventanas según dimensiones y ubicaciones reales
- Sistema de entepiso con viguetas de madera y entablado
- Sistema de cobertura (estructura de madera con cobertura inclinada)
- Elementos arquitectónicos complementarios

3.10.6.2 Vivienda V-01.

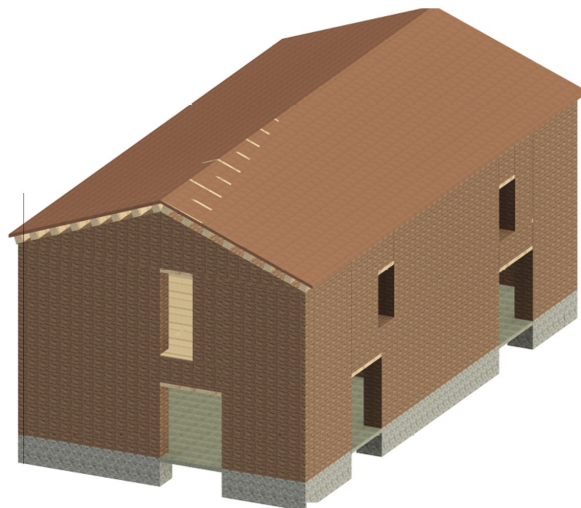
El modelo Revit de la Vivienda V-01 corresponde a una edificación de tres niveles con configuración rectangular. Las dimensiones principales en planta son aproximadamente 6.04 m × 8.50 m, con muros de adobe de 0.50 m de espesor. La Figura 26 presenta las vistas del modelo elaborado en Revit.

Figura 26*Modelo Revit de la Vivienda V-01*

Nota. Elaboración propia. Modelo tridimensional de la Vivienda V-01 elaborado en Autodesk Revit, configuración de tres niveles con cobertura inclinada.

3.10.6.3 Vivienda V-02.

El modelo Revit de la Vivienda V-02 corresponde a una edificación de dos niveles con cobertura a dos aguas. Las dimensiones principales en planta son aproximadamente 7.90 m × 15.30 m, con una configuración más alargada que la V-01. La Figura 27 presenta las vistas del modelo elaborado en Revit.

Figura 27*Modelo Revit de la Vivienda V-02*

Nota. Elaboración propia. Modelo tridimensional de la Vivienda V-02 elaborado en Autodesk Revit, configuración de dos niveles con cobertura a dos aguas.

3.10.6.4 Vivienda V-03.

El modelo Revit de la Vivienda V-03 corresponde a una edificación de dos niveles con configuración en L y cobertura a dos aguas. Las dimensiones son 7.38 m × 4.90 m, con un retranqueo en la esquina inferior izquierda que genera la configuración en L. Los muros son de adobe con espesor de 0.40 m. La Figura 28 presenta el modelo elaborado en Revit.

Figura 28

Modelo Revit de la Vivienda V-03



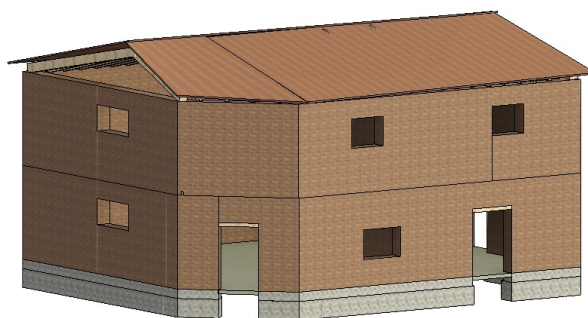
Nota. Elaboración propia. Modelo tridimensional de la Vivienda V-03 elaborado en Autodesk Revit. Configuración en L de dos niveles con cobertura a dos aguas y balcón de madera en segundo nivel.

3.10.6.5 Vivienda V-04.

El modelo Revit de la Vivienda V-04 corresponde a una edificación de dos niveles con configuración rectangular en la esquina inferior izquierda. Las dimensiones principales en planta son 11.33 m en la dirección X, con muros de adobe de 0.50 m de espesor y altura de entrepiso de 2.50 m. La cobertura es a dos aguas. La Figura 29 presenta el modelo elaborado en Revit.

Figura 29

Modelo Revit de la Vivienda V-04



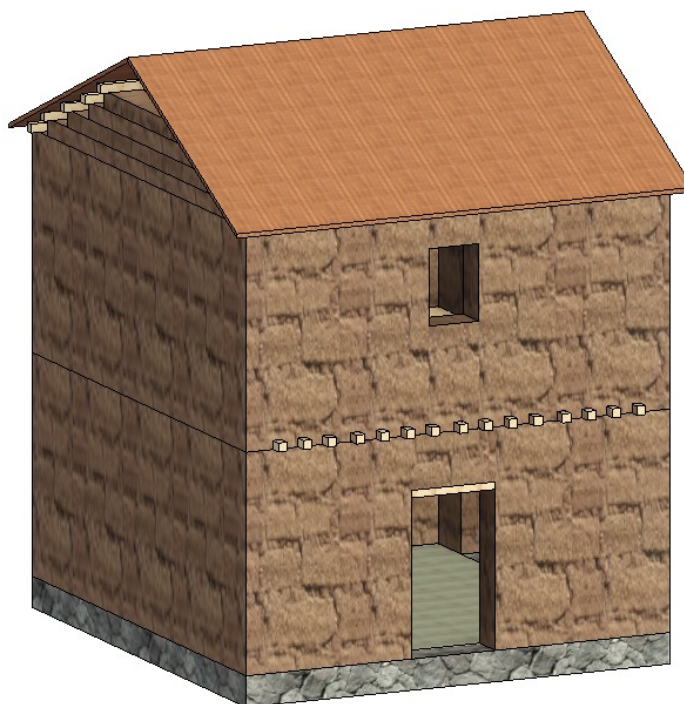
Nota. Elaboración propia. Modelo tridimensional de la Vivienda V-04 elaborado en Autodesk Revit. Configuración rectangular de dos niveles con cobertura a dos aguas.

3.10.6.6 Vivienda V-05.

El modelo Revit de la Vivienda V-05 corresponde a una edificación de dos niveles con configuración rectangular simple, la más regular del conjunto de viviendas estudiadas. La edificación presenta muros de adobe de 0.50 m de espesor, altura de entrepiso de 2.50 m y cobertura a dos aguas. La Figura 30 presenta el modelo elaborado en Revit.

Figura 30

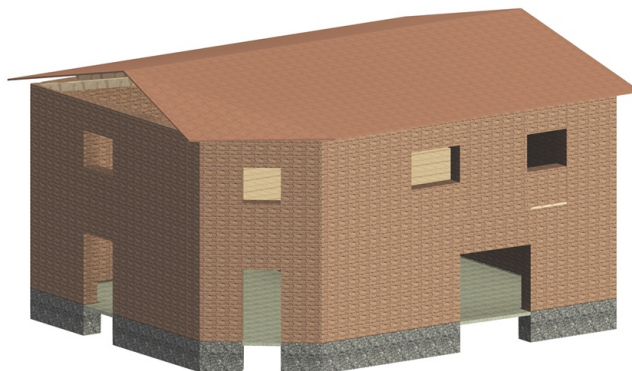
Modelo Revit de la Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Modelo tridimensional de la Vivienda V-05 elaborado en Autodesk Revit, distrito de Huancaray. Configuración rectangular simple de dos niveles con cobertura a dos aguas.

3.10.6.7 Vivienda V-06.

El modelo Revit de la Vivienda V-06 corresponde a una edificación de dos niveles con configuración rectangular y chaflán en la esquina inferior izquierda. Las dimensiones principales en planta son 10.54 m × 8.47 m, con muros de adobe de 0.50 m de espesor y altura de entrepiso de 2.50 m. La cobertura es inclinada asimétrica. La Figura 31 presenta el modelo elaborado en Revit.

Figura 31*Modelo Revit de la Vivienda V-06*

Nota. Elaboración propia. Modelo tridimensional de la Vivienda V-06 elaborado en Autodesk Revit, distrito de Huancaray. Configuración rectangular de dos niveles con cobertura inclinada y chaflán en esquina.

El Cuadro 31 presenta un resumen de las principales características geométricas de las seis viviendas modeladas.

Cuadro 31*Características geométricas de las seis viviendas de estudio*

Característica	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Número de niveles	3	2	2	2	2	2
Dimensión en X (m)	6.04	7.90	7.38	11.33	–	10.54
Dimensión en Y (m)	8.50	15.30	4.90	–	–	8.47
Espesor de muros (m)	0.50	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50
Altura de entrepiso (m)	–	2.50–3.15	2.50	2.50	2.50	2.50
Tipo de cobertura	Inclinada	Dos aguas	Dos aguas	Dos aguas	Dos aguas	Inclinada
Config. en planta	Rectangular	Rectangular	En L	Rect. con chaflán	Rectangular	Rect. con chaflán
Sistema de entrepiso	Viguetas madera	Viguetas madera	Viguetas madera	Viguetas madera	Viguetas madera	Viguetas madera

Nota. Dimensiones obtenidas del levantamiento de campo y verificadas en el modelamiento Revit. Los valores indicados con (–) corresponden a datos pendientes de confirmación en los modelos respectivos.

3.11. Modelamiento numérico en DIANA FEA

3.11.1. Generalidades del software DIANA FEA

A diferencia de software comercial como ETABS o SAP2000, diseñados principalmente para estructuras de concreto armado y acero con comportamiento lineal, DIANA FEA incorpora modelos constitutivos avanzados que permiten simular el comportamiento no lineal de materiales como el adobe, incluyendo fenómenos de agrietamiento distribuido, degradación de rigidez y plastificación en compresión (van den Bos, 2018).

Es importante destacar que ETABS no permite trabajar con elementos sólidos tridimensionales ni con modelos de plasticidad completa para mampostería. No existe en la literatura científica internacional ningún estudio de análisis no lineal de estructuras de adobe utilizando ETABS, lo cual evidencia las limitaciones de este software para la simulación del comportamiento sísmico de construcciones de tierra cruda. Por el contrario, DIANA FEA ha sido ampliamente validado en investigaciones internacionales para el análisis de estructuras históricas de mampostería y adobe (Ademović et al., 2024).

3.11.2. Modelos constitutivos para mampostería en DIANA FEA

DIANA FEA ofrece diversos modelos constitutivos para la simulación del comportamiento no lineal de mampostería. Para la presente investigación se evaluaron dos modelos principales:

3.11.3. Total Strain Based Crack Model (TSCM)

El modelo TSCM es el más utilizado tradicionalmente para mampostería. Sin embargo, presenta algunas limitaciones importantes:

- No considera la ortotropía del material de manera general, es decir, asume que las propiedades en las diferentes direcciones del material son similares.
- La carga de falla está bien descrita, pero el comportamiento cíclico es limitado.

3.11.4. Engineering Masonry Model (EMM)

Este modelo representa un avance significativo respecto al TSCM, ya que:

- Es un modelo basado en deformaciones totales que cubre los modos de falla por tracción, corte y compresión.
- Considera el sistema de juntas horizontal-vertical, característico de la mampostería.
- Incluye lazos de histéresis adecuados (secante, elástico y mixto) para los diferentes modos de falla.
- Incorpora ortotropía mediante el uso de diferentes propiedades de elasticidad, resistencia y ablandamiento para las dos direcciones principales.

El modelo EMM puede aplicarse en combinación con elementos de membrana y elementos de lámina curva para el modelamiento de muros de mampostería.

Para la presente investigación se empleó el modelo *Engineering Masonry Model* debido a su capacidad de representar el comportamiento ortotrópico del adobe y su mejor descripción

de los mecanismos de falla característicos de la mampostería.

3.12. Calibración del modelo numérico

La calibración del modelo numérico constituye una etapa fundamental para garantizar que los parámetros constitutivos adoptados reproduzcan adecuadamente el comportamiento experimental de muros de adobe sometidos a cargas laterales. Este proceso se realizó previo al modelamiento de las viviendas de estudio, permitiendo validar la capacidad predictiva del software antes de su aplicación a casos reales.

El estudio en DIANA FEA se dividió en cinco partes fundamentales:

1. Propiedades elásticas
2. Parámetros de agrietamiento
3. Parámetros de aplastamiento
4. Parámetros de falla por corte
5. Parámetros de ancho de grieta

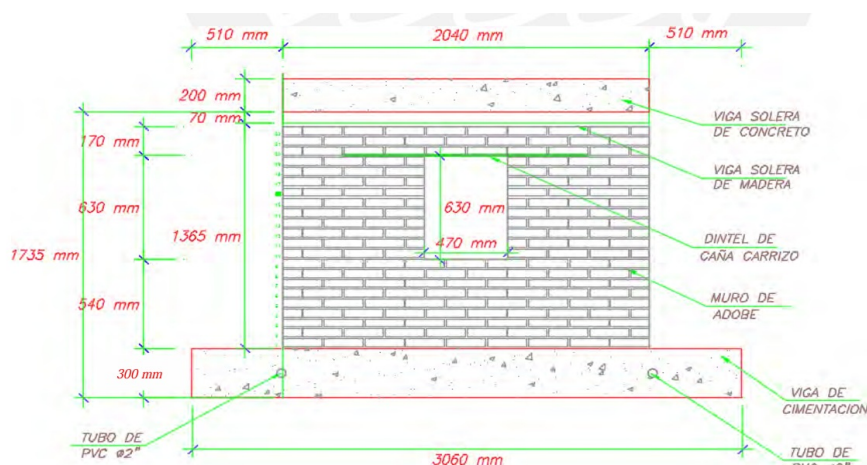
3.12.1. Ensayo experimental de referencia

Para la calibración del modelo numérico se seleccionó como referencia el ensayo experimental de muros de adobe con vano de ventana desarrollado en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). El espécimen denominado MUENSR corresponde a un muro de adobe sin refuerzo, sometido a carga lateral cíclica en su plano.

La Figura 32 presenta la elevación del muro de ensayo con sus características geométricas.

Figura 32

Elevación del muro de adobe sin refuerzo (MUENSR) utilizado para calibración



Nota. Adaptado de (Valle Castro, 2019) ensayos experimentales PUCP.

Las características geométricas del muro de ensayo son las siguientes:

- Longitud total: 3060 mm
- Altura del muro de adobe: 1735 mm

- Altura de la viga solera de concreto: 200 mm
- Altura de la viga solera de madera: 170 mm
- Vano de ventana: 1365 mm × 470 mm
- Espesor del muro: 300 mm
- Dintel de caña carrizo sobre el vano
- Altura de machones laterales: 630 mm
- Altura de base debajo del vano: 540 mm
- Viga de cimentación de concreto armado

La carga vertical aplicada fue de 10 kN mediante viga solera de concreto, mecanos y gata hidráulica, garantizando una distribución uniforme de la carga.

3.12.2. Procedimiento de modelamiento en DIANA FEA

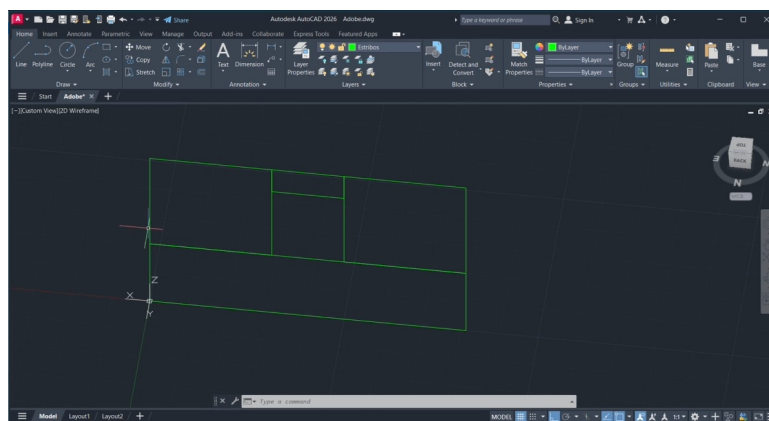
A continuación se describe el procedimiento sistemático de modelamiento numérico en DIANA FEA, documentando cada etapa mediante capturas de pantalla.

3.12.2.1 Paso 1: Elaboración de la geometría en AutoCAD.

La geometría del muro se elaboró inicialmente en AutoCAD, definiendo el contorno en planta del muro incluyendo el vano de ventana. Se dibujaron las líneas que definen los bordes del muro y la abertura, generando una geometría plana bidimensional que posteriormente será importada a DIANA FEA.

Figura 33

Geometría del muro de adobe con vano de ventana elaborada en AutoCAD



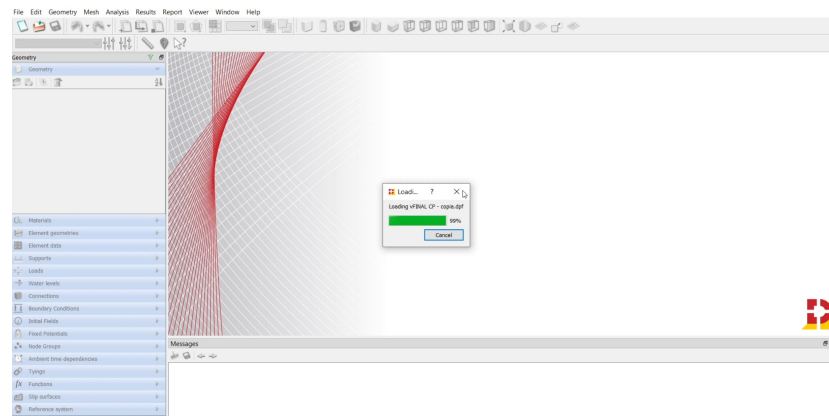
Nota. Elaboración propia realizado en AutoCAD.

3.12.2.2 Paso 2: Importación de geometría a DIANA FEA.

El archivo de AutoCAD se exportó en formato DWG y se importó a DIANA FEA mediante la opción *File > Import*. La geometría se carga como superficies planas (*shapes*) que representan el contorno del muro.

Figura 34

Proceso de carga del archivo de geometría en DIANA FEA

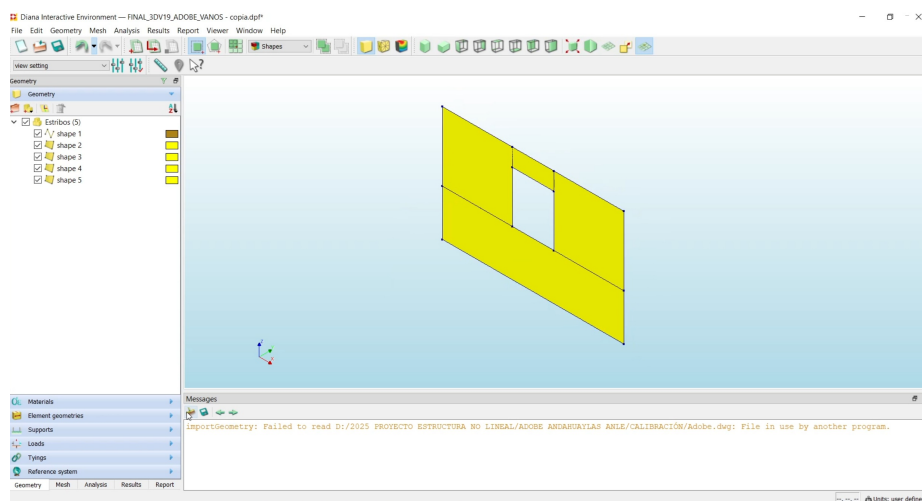


Nota. Elaboración propia.

Una vez importada la geometría, DIANA FEA genera automáticamente las superficies (*shapes*) correspondientes al contorno del muro. En el panel izquierdo se visualizan los elementos geométricos creados.

Figura 35

Geometría del muro importada en DIANA FEA como superficies planas



Nota. Elaboración propia.

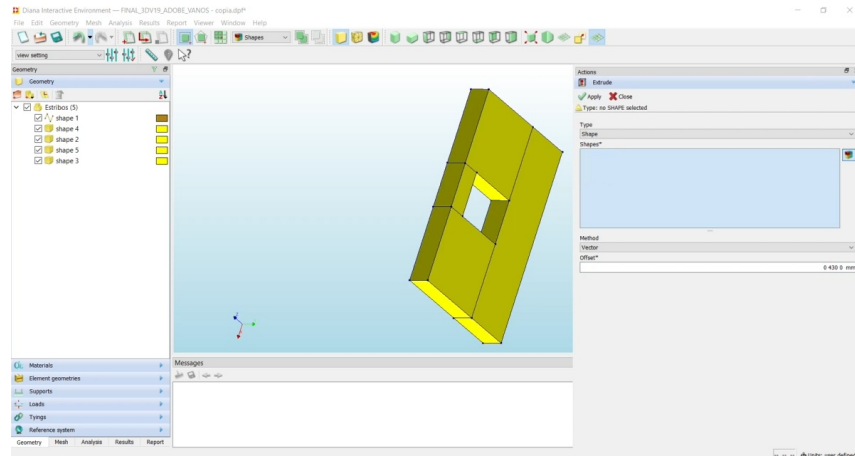
3.12.2.3 Paso 3: Extrusión a elemento sólido tridimensional.

Dado que las estructuras históricas de adobe requieren modelamiento tridimensional para capturar adecuadamente los efectos de espesor y el comportamiento fuera del plano, se procedió a extruir la geometría plana al espesor real del muro mediante la función *Geometry > Extrude* de DIANA FEA.

La extrusión genera elementos sólidos (*Structural Solids*) que permiten la discretización volumétrica del muro, considerando el espesor real de 430 mm correspondiente a las unidades de adobe.

Figura 36

Extrusión de la geometría plana a elemento sólido tridimensional



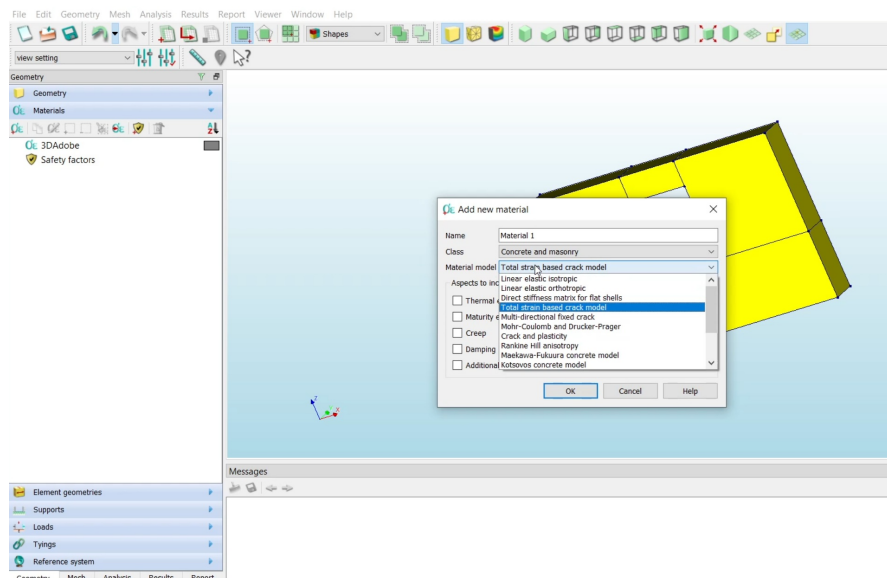
Nota. Elaboración propia. Offset de extrusión: 430 mm .

3.12.2.4 Paso 4: Definición del material - Engineering Masonry Model.

Se procedió a definir el material de adobe empleando el modelo *Engineering Masonry Model* disponible en DIANA FEA. Para ello se accede a *Materials >Add new material*, seleccionando la clase *Concrete and masonry* y el modelo *Engineering masonry model*.

Figura 37

Selección del modelo constitutivo Engineering Masonry Model en DIANA FEA



Nota. Elaboración propia.

3.12.2.5 Paso 5: Asignación de propiedades elásticas.

Las propiedades elásticas del adobe se asignaron considerando el comportamiento ortotrópico del material. Se definieron los módulos de elasticidad en las direcciones X e Y, el módulo de corte y la densidad de masa.

El Cuadro 32 presenta las propiedades elásticas adoptadas para el modelo.

Cuadro 32*Propiedades elásticas adoptadas para el modelo EMM en adobe*

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad E_x^*	1045	kg/cm ²
Módulo de elasticidad E_y^*	2090	kg/cm ²
Módulo de corte G_{xy}^*	938.14	kg/cm ²
Densidad de masa	1800	kg/m ³

Nota. $E_x = E_y/2$ para muros tipo chato. Relación $E_y/E_x = 2$ según literatura. Valores obtenidos de ensayos en pilas de adobe (E_m promedio = 205 MPa).

3.12.2.6 Paso 6: Asignación de parámetros de agrietamiento.

Los parámetros de agrietamiento definen el comportamiento del material en tracción y la propagación de fisuras. Se configuraron en la sección *Cracking parameters* del material.

El Cuadro 33 presenta los parámetros de agrietamiento adoptados.

Cuadro 33*Parámetros de agrietamiento para el modelo EMM*

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo de falla en junta de cabeza	No considerado	–
Resistencia a tracción junta de cama f_t	0.0215	N/mm ²
Energía de fractura en tracción G_f	0.0006235	N/mm
Resistencia residual a tracción f_{tr}	0.0086	N/mm ²

Nota. $f_{tr} = 0,4 \times f_t$ según recomendaciones de literatura.

3.12.2.7 Paso 7: Asignación de parámetros de aplastamiento.

Los parámetros de aplastamiento definen el comportamiento del material en compresión. Se configuraron en la sección *Crushing parameters* del material.

El Cuadro 34 presenta los parámetros de aplastamiento adoptados.

Cuadro 34*Parámetros de aplastamiento para el modelo EMM en adobe*

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia a compresión f_m	0.43	N/mm ²
Energía de fractura compresión G_c	0.688	N/mm
Factor de deformación n	1.01	–
Factor de descarga	1 (secante)	–

Nota. $f_m = 0,43$ N/mm² corresponde al esfuerzo admisible de compresión del adobe.

3.12.2.8 Paso 8: Asignación de parámetros de falla por corte.

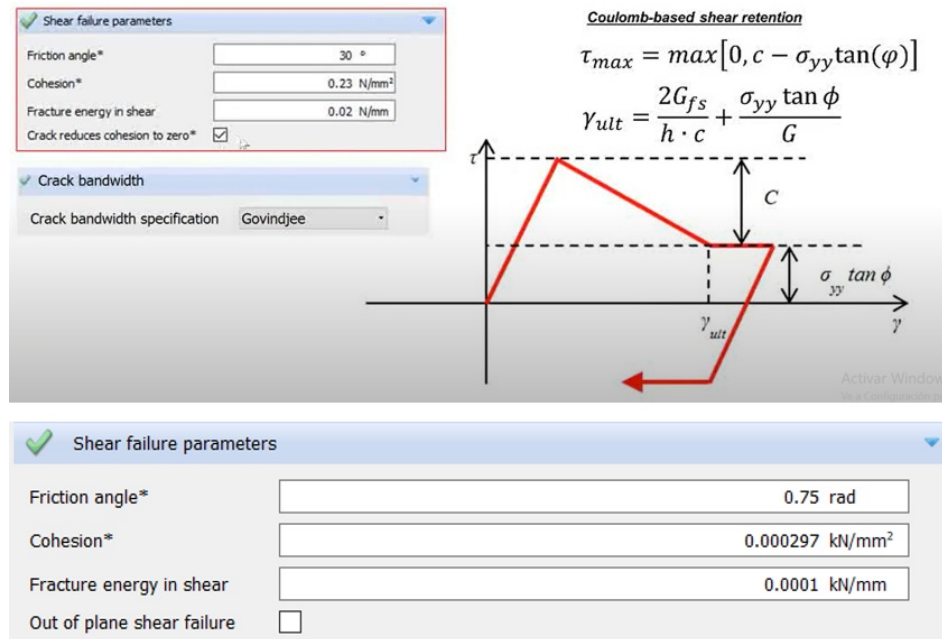
Los parámetros de falla por corte se basan en el modelo de fricción de Coulomb, donde la resistencia máxima al corte se expresa como:

$$\tau_{max} = \max[0, c - \sigma_{yy} \tan(\phi)] \quad (8)$$

Se configuraron en la sección *Shear failure parameters* del material.

Figura 38

Modelo de falla por corte basado en fricción de Coulomb en DIANA FEA



Nota. Elaboración propia. Ángulo de fricción.

El Cuadro 35 presenta los parámetros de falla por corte adoptados para el modelo de adobe.

Cuadro 35

Parámetros de falla por corte para el modelo EMM en adobe

Parámetro	Valor	Unidad
Ángulo de fricción ϕ	0.75	rad
Cohesión c	0.25	N/mm ²
Energía de fractura en corte G_{fs}	0.02325	N/mm
Falla por corte fuera del plano	No activado	–

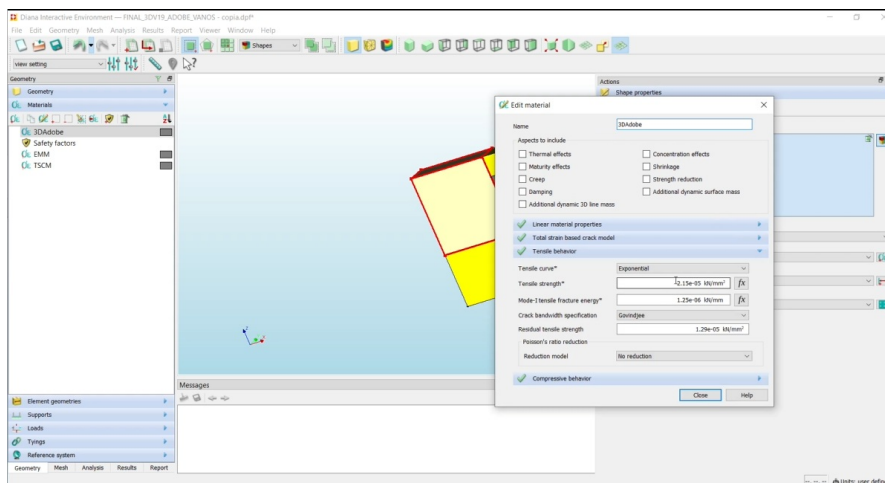
Nota. Valores según recomendaciones de van der Pluijm (1999) y Eurocode 6. El ángulo de fricción de 0.75 rad equivale a 42.97°.

3.12.2.9 Paso 9: Asignación de material a la geometría.

Una vez definidas todas las propiedades del material, se procedió a asignar el material 3DAdobe a los elementos sólidos del modelo mediante la opción *Shape properties*.

Figura 39

Asignación del material 3DAdobe a los elementos sólidos del modelo



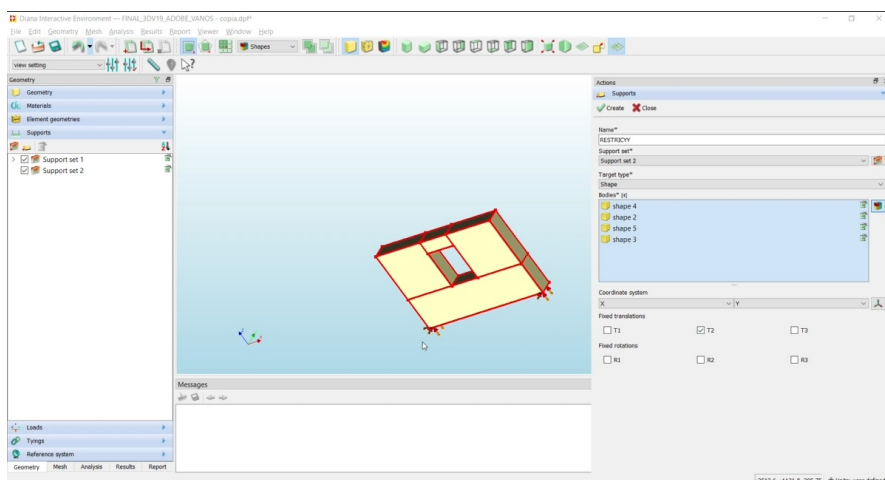
Nota. Elaboración propia. Element class: Structural Solids, Material: 3DAdobe.

3.12.2.10 Paso 10: Definición de condiciones de borde - Empotramiento.

Se estableció la condición de empotramiento en la base del muro, restringiendo los grados de libertad de traslación (T_1 , T_2 , T_3) y rotación (R_1 , R_2) en la cara inferior del modelo. Esta condición reproduce el efecto de la viga de cimentación de concreto armado empleada en el ensayo experimental.

Figura 40

Definición de condiciones de empotramiento en la base del muro



Nota. Elaboración propia.

3.12.2.11 Paso 11: Definición de casos de carga.

Se definieron dos casos de carga para el análisis pushover:

Load Case 1 - Peso propio (PP): Carga gravitacional aplicada mediante la función *Dead weight* considerando la densidad del material de adobe (1800 kg/m³).

Load Case 2 - Carga lateral: Aceleración equivalente aplicada en la dirección horizontal del muro. Para estructuras históricas de adobe con diafragmas flexibles, se emplea el método

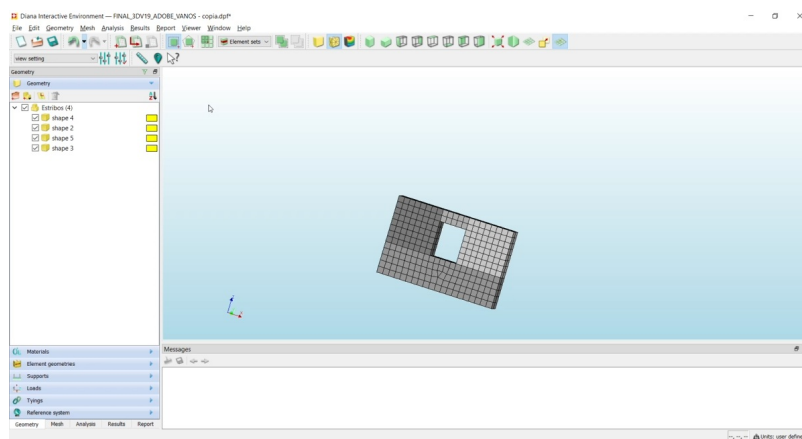
de aceleración equivalente en lugar de fuerzas puntuales, dado que cada punto del muro se desplaza proporcionalmente a su masa sin formación de diafragma rígido.

3.12.2.12 Paso 12: Generación del mallado de elementos finitos.

Se discretizó el modelo mediante elementos sólidos hexaédricos de 20 nodos (CHX60), con tamaño de elemento de 200 mm, generando una malla estructurada que permite capturar adecuadamente los gradientes de deformación y la propagación de agrietamiento en el muro.

Figura 41

Mallado de elementos finitos del muro de adobe con elementos sólidos



Nota. Elaboración propia. Tamaño de elemento: 200 mm.

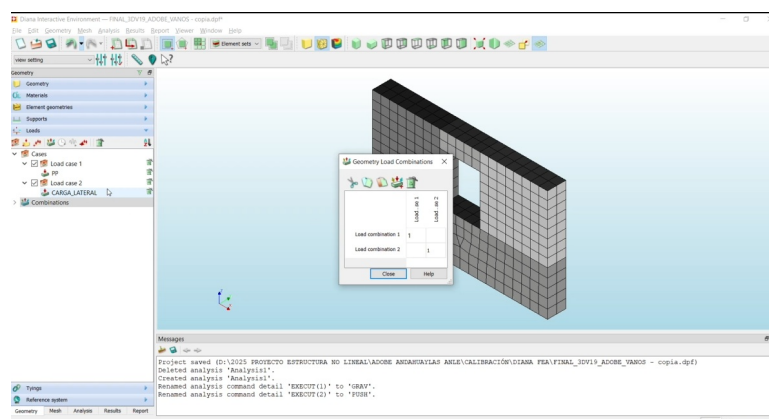
3.12.2.13 Paso 13: Definición de combinaciones de carga.

Se establecieron las combinaciones de carga para el análisis secuencial mediante la opción *Geometry Load Combinations*:

- **Load Combination 1 - GRAV:** Aplicación del peso propio como carga inicial.
- **Load Combination 2 - PUSH:** Aplicación incremental de la carga lateral para el análisis pushover.

Figura 42

Definición de combinaciones de carga para análisis secuencial



Nota. Elaboración propia. GRAV: peso propio, PUSH: carga lateral incremental.

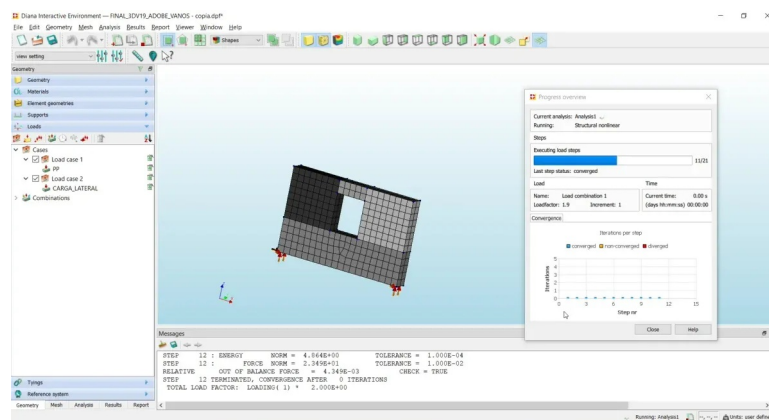
3.12.2.14 Paso 14: Configuración del análisis no lineal.

Se configuró el análisis estructural no lineal (*Structural nonlinear*) con los siguientes parámetros:

- **Método iterativo:** Newton-Raphson con matriz tangente
- **Máximo número de iteraciones:** 100
- **Control de longitud de arco:** Activado (*Arc-length control*) para capturar el comportamiento post-pico
- **Criterios de convergencia:** Energía, desplazamiento y fuerza
- **Tamaño de paso de carga:** 0.1 (20 pasos de carga)

Figura 43

Configuración del método iterativo Newton-Raphson y criterios de convergencia



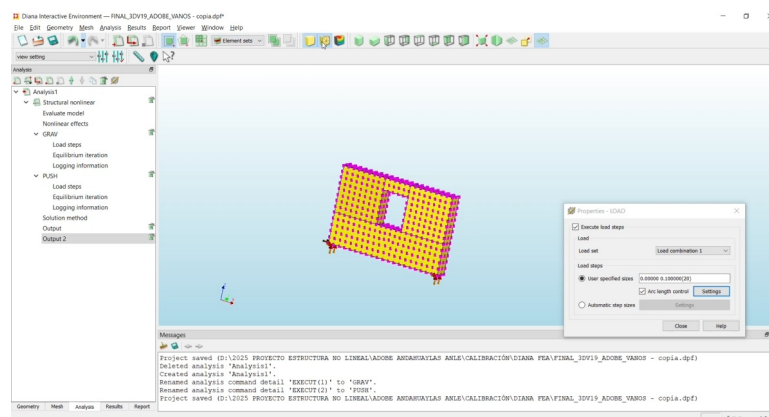
Nota. Elaboración propia. Arc-length control activado para captura de comportamiento post-pico.

3.12.2.15 Paso 15: Visualización de cargas aplicadas.

Antes de ejecutar el análisis, se verificó la correcta aplicación de las cargas mediante la visualización gráfica en DIANA FEA. Las flechas rojas indican las direcciones de las fuerzas aplicadas.

Figura 44

Visualización de las cargas aplicadas al modelo de elementos finitos



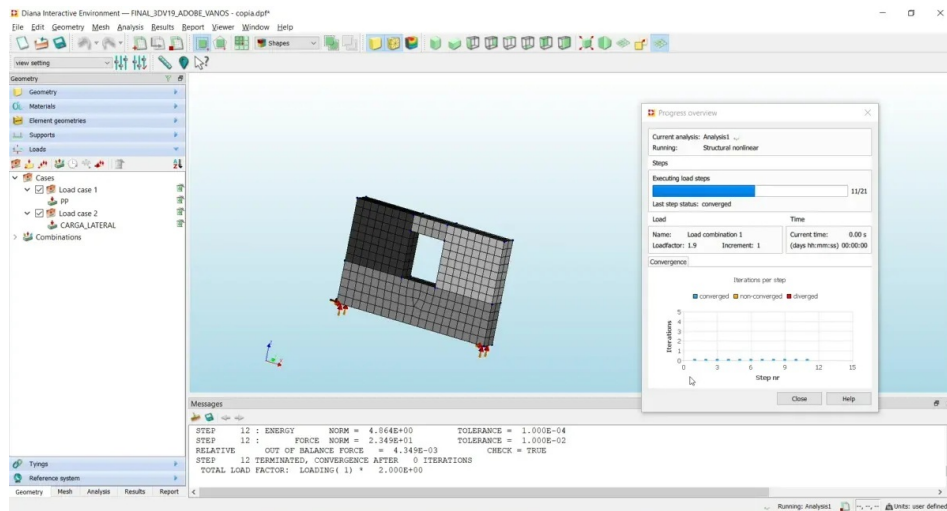
Nota. Elaboración propia. Flechas rojas: Dirección de cargas aplicadas.

3.12.2.16 Paso 16: Ejecución del análisis.

Se ejecutó el análisis no lineal mediante la opción *Analysis > Run*. El progreso del análisis se monitoreó mediante la ventana *Progress overview* que muestra el estado de convergencia de cada paso de carga.

Figura 45

Progreso de ejecución del análisis no lineal en DIANA FEA



Nota. Elaboración propia. Convergencia satisfactoria en todos los pasos de carga.

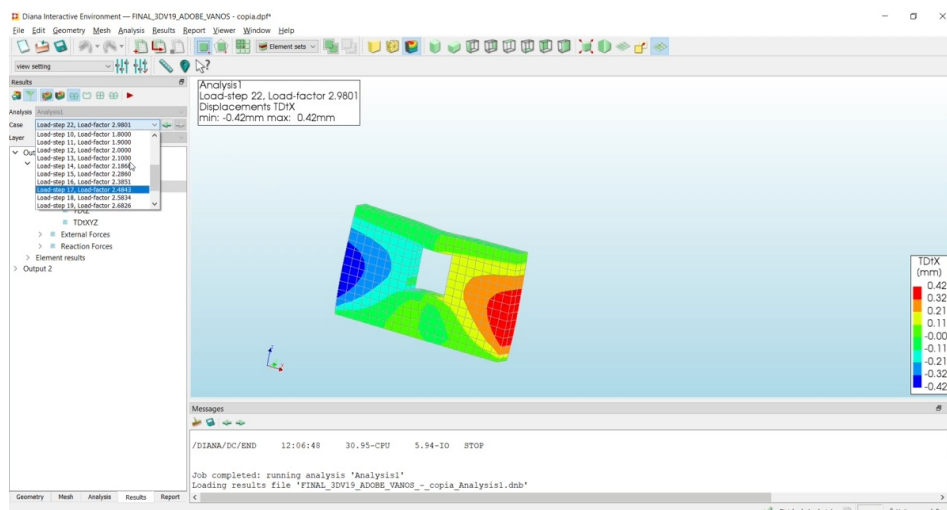
3.12.3. Resultados de la calibración

3.12.3.1 Campo de desplazamientos.

Los resultados del análisis muestran la distribución de desplazamientos horizontales (TDtX) en el muro para diferentes pasos de carga. Se observa un patrón coherente con el modo de deformación esperado: Desplazamientos máximos en la parte superior del muro y desplazamientos nulos en la base empotrada.

Figura 46

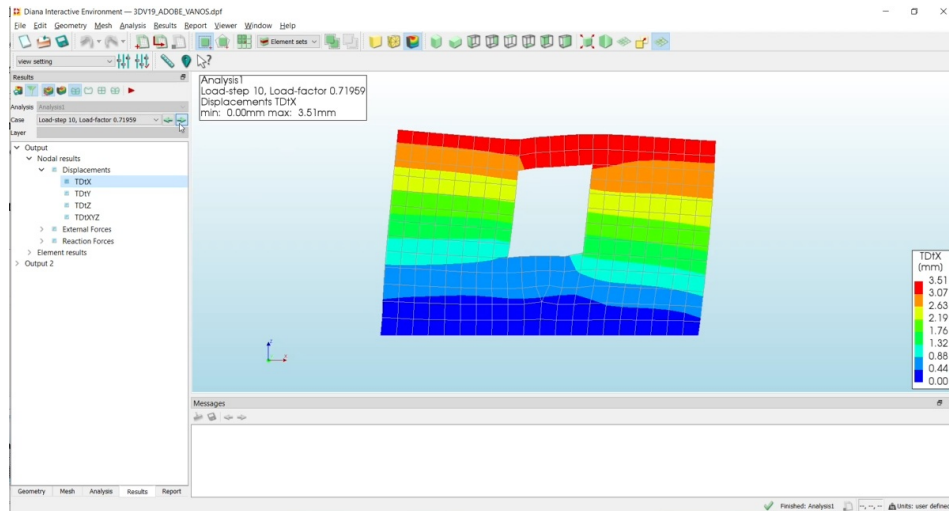
Selección de pasos de carga para visualización de resultados



Nota. Elaboración propia. Load-step 22, Load-factor 2.9801.

Figura 47

Campo de desplazamientos horizontales (TDtX) en el muro de adobe



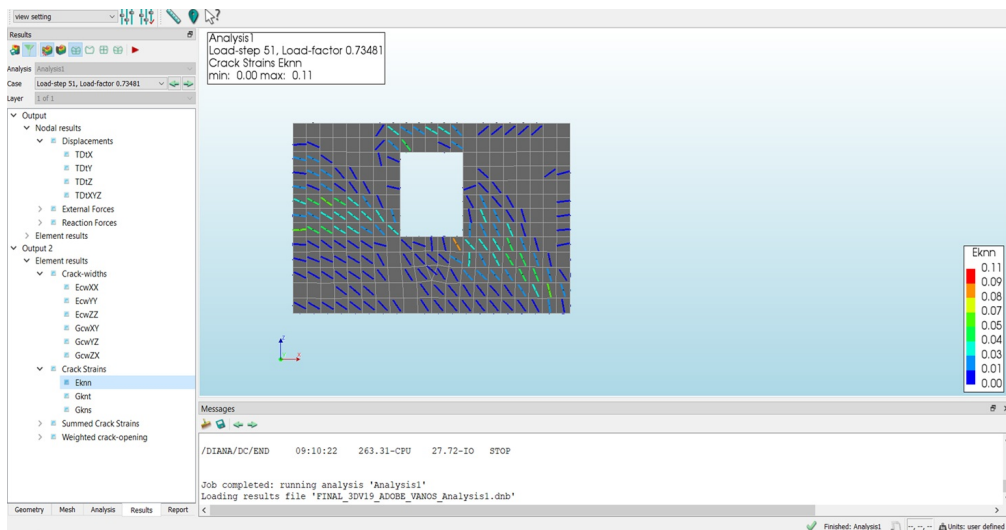
Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo: 3.51 mm para Load-factor 0.72.

3.12.3.2 Patrón de agrietamiento.

El modelo numérico reproduce adecuadamente el patrón de agrietamiento observado en el ensayo experimental. Las deformaciones por agrietamiento (*Crack Strains Eknn*) se concentran en las esquinas del vano de ventana, desarrollando grietas diagonales características del mecanismo de falla por corte en muros de adobe con aberturas.

Figura 48

*Distribución de deformaciones por agrietamiento (*Crack Strains Eknn*)*

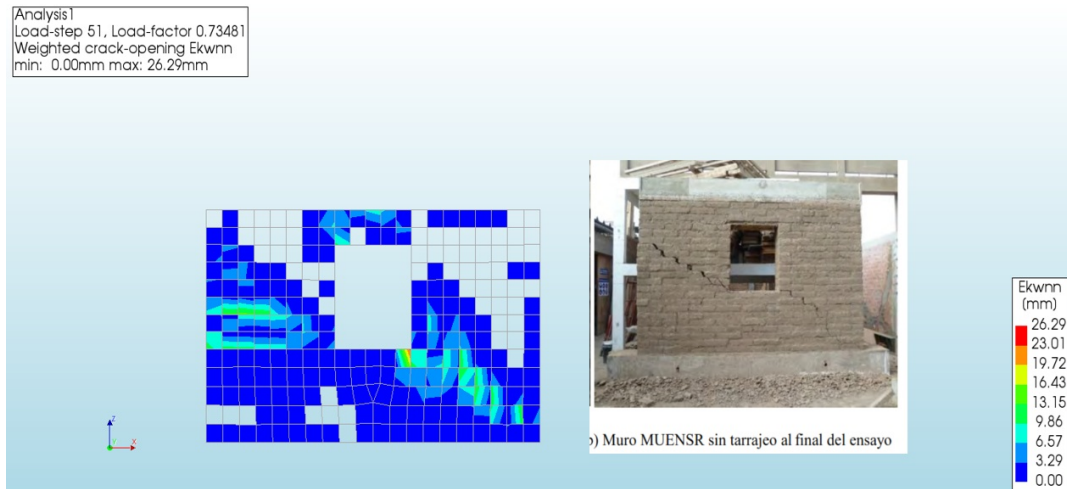


Nota. Elaboración propia. Vectores indican orientación de grietas principales.

La Figura 49 presenta la comparación visual entre el patrón de agrietamiento numérico (*Weighted crack-opening Ekwnn*) y el daño observado en el ensayo experimental del muro MUENSR al final del ensayo.

Figura 49

Comparación del patrón de agrietamiento: Modelo numérico vs. ensayo experimental



Nota. Adaptado de Valle Castro (2019), ensayo experimental muro MUENSR - PUCP.

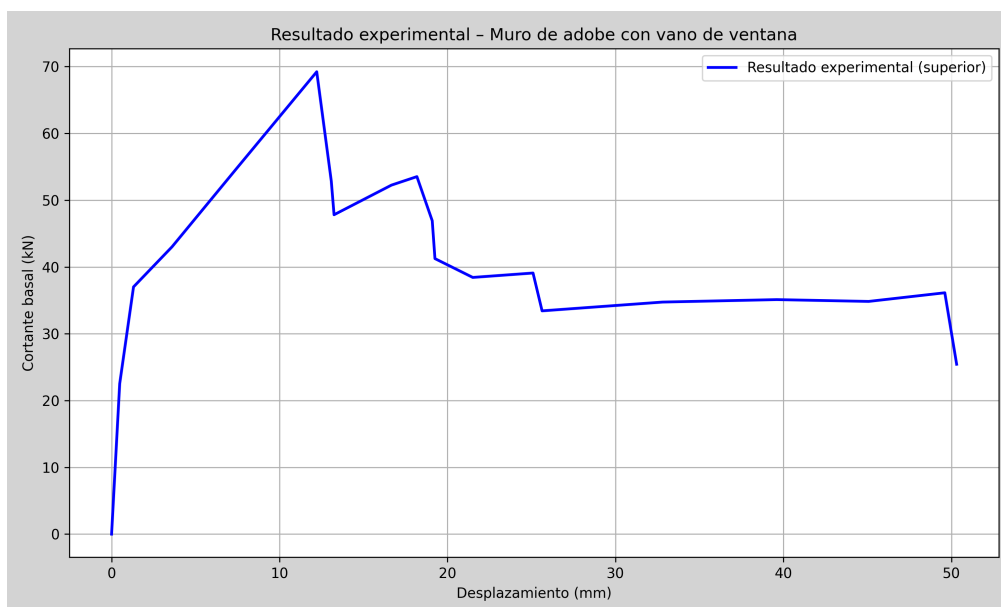
3.12.3.3 Curva de capacidad.

La curva de capacidad se obtuvo mediante la herramienta *Chart view* de DIANA FEA, graficando el desplazamiento del nodo de control (parte superior del muro) versus el factor de carga.

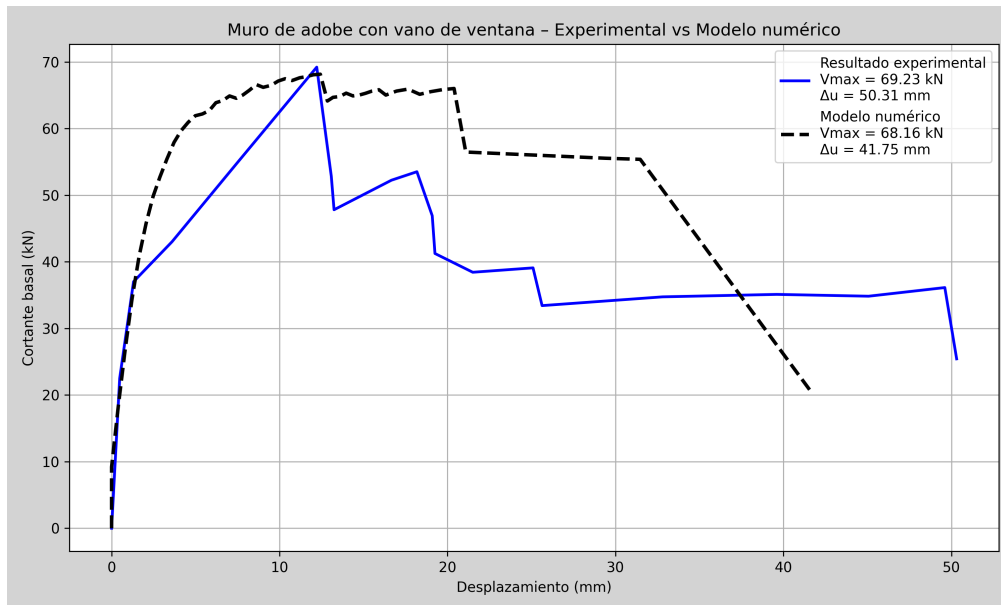
La Figura 50 presenta la comparación entre la curva de capacidad obtenida del modelo numérico y la envolvente experimental del ensayo cíclico del muro MUENSR.

Figura 50

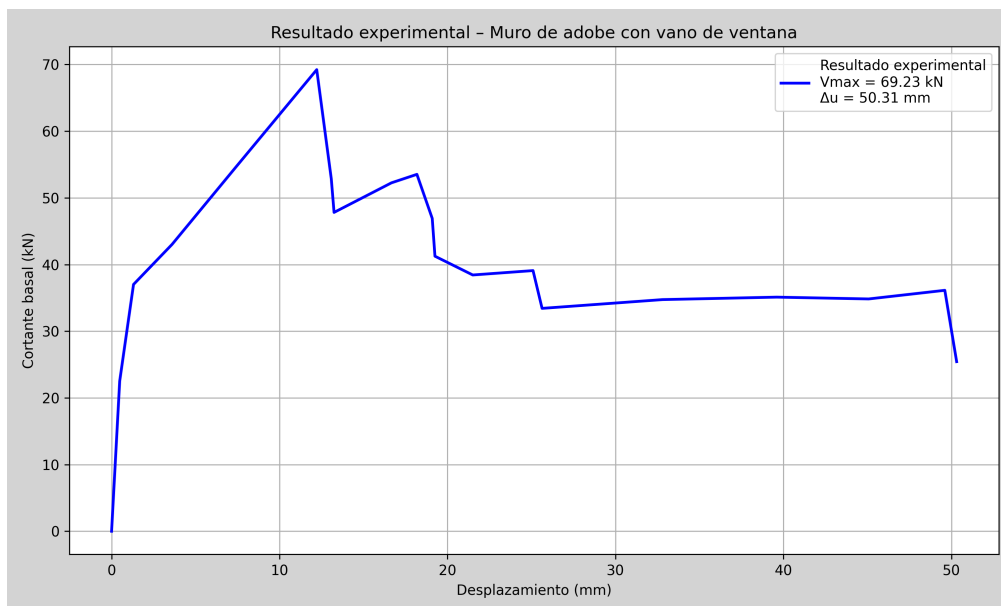
Patrón de agrietamiento en etapa inicial del análisis pushover



Nota. Elaboración propia. Primeras grietas en esquinas del vano de ventana.

Figura 51*Patrón de agrietamiento en carga máxima del análisis pushover*

Nota. Elaboración propia. Desarrollo de grietas diagonales características.

Figura 52*Patrón de agrietamiento en estado último del análisis pushover*

Nota. Elaboración propia. Mecanismo de falla completamente desarrollado.

El Cuadro 36 presenta la comparación cuantitativa entre los resultados experimentales y numéricos obtenidos del proceso de calibración del modelo EMM en DIANA FEA.

Cuadro 36

Comparación cuantitativa de resultados experimentales y numéricos – Calibración modelo EMM

Parámetro	Experimental	Numérico	Error (%)
Cortante basal máximo V_{max} (kN)	69.23	68.16	1.55
Desplazamiento último Δ_u (mm)	50.31	41.75	17.02
Rigidez inicial K_0 (kN/mm)	6.92	7.15	3.32

Nota. Error calculado como $|Exp - Num| / Exp \times 100 \%$. El modelo reproduce con alta precisión el cortante basal máximo (error: 1.55 %) y la rigidez inicial (error: 3.32 %), siendo estos los parámetros de validación primaria. El error en el desplazamiento último (17.02 %) es atribuible a la variabilidad inherente del comportamiento post-pico del adobe y se encuentra dentro de los rangos aceptables para modelos no lineales de mampostería sin refuerzo ($\leq 20 \%$) reportados en la literatura especializada.

Los resultados de la calibración evidencian que el modelo numérico con el *Engineering Masonry Model* (EMM) reproduce adecuadamente el comportamiento experimental del muro MUENSR. El error del 1.55 % en el cortante basal máximo confirma la validez del modelo para predecir la capacidad resistente de los muros de adobe, que constituye el parámetro estructural de mayor relevancia para el análisis de vulnerabilidad sísmica. El error del 3.32 % en la rigidez inicial indica que el modelo captura correctamente el comportamiento elástico pre-fisuración.

Respecto al error del 17.02 % en el desplazamiento último, es necesario precisar que este parámetro corresponde a la respuesta post-pico de la estructura, etapa en la que el comportamiento del adobe está gobernado por la propagación de grietas, la fricción entre bloques y la redistribución de esfuerzos, procesos de naturaleza altamente variable y difíciles de reproducir con precisión mediante cualquier modelo constitutivo. Esta diferencia no invalida el modelo, dado que: (1) el objetivo principal del análisis pushover es determinar la capacidad resistente máxima y el nivel de desempeño sísmico, no el desplazamiento exacto de colapso; (2) el error se encuentra por debajo del umbral del 20 % generalmente aceptado en la modelización numérica de mampostería no reforzada; y (3) la subestimación del desplazamiento último implica una posición conservadora en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

3.12.4. Resumen de propiedades mecánicas calibradas

El Cuadro 37 presenta el resumen completo de las propiedades mecánicas calibradas para el modelo numérico del adobe.

Cuadro 37*Resumen de propiedades mecánicas del adobe para el modelo EMM en DIANA FEA*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Propiedades elásticas			
Módulo de elasticidad dirección X	E_x	1045	kg/cm ²
Módulo de elasticidad dirección Y	E_y	2090	kg/cm ²
Módulo de corte	G_{xy}	938.14	kg/cm ²
Densidad	ρ	1800	kg/m ³
Parámetros de agrietamiento			
Resistencia a tracción	f_t	0.0215	N/mm ²
Energía de fractura tracción	G_f	0.0006235	N/mm
Resistencia residual tracción	f_{tr}	0.0086	N/mm ²
Parámetros de aplastamiento			
Resistencia a compresión	f_m	0.43	N/mm ²
Energía de fractura compresión	G_c	0.688	N/mm
Factor de forma	n	1.01	–
Factor de descarga	–	1 (secante)	–
Parámetros de corte			
Ángulo de fricción	ϕ	0.75	rad
Cohesión	c	0.25	N/mm ²
Energía de fractura corte	G_{fs}	0.02325	N/mm

Nota. Valores calibrados a partir de ensayos experimentales en adobe peruano y literatura técnica especializada.

3.13. Modelamiento numérico de las viviendas de estudio

Una vez calibrado y validado el modelo numérico mediante el ensayo experimental de referencia, se procedió al modelamiento de las tres viviendas de adobe de dos niveles seleccionadas en el distrito de Huancaray. El procedimiento de modelamiento siguió la misma metodología establecida en la calibración, empleando el modelo constitutivo *Engineering Masonry Model* (EMM) en DIANA FEA.

3.13.1. Consideraciones generales del modelamiento

El modelamiento de las viviendas de estudio se realizó considerando las siguientes premisas fundamentales:

3.13.1.1 Propiedades del material.

Se emplearon las propiedades mecánicas calibradas del adobe, con la única diferencia en el valor de la resistencia a compresión (f_m), la cual fue determinada mediante ensayos de laboratorio específicos para cada vivienda. Los parámetros de agrietamiento, aplastamiento y falla por corte se mantuvieron consistentes con los valores calibrados.

3.13.1.2 Comportamiento de losas y dinteles.

Las losas de entrepiso y los dinteles se modelaron con comportamiento elástico lineal, dado que estos elementos trabajan principalmente a gravedad y no aportan resistencia sísmica significativa. Los dinteles no fueron dibujados explícitamente en el modelo para evitar concentraciones de esfuerzos artificiales, considerando que su contribución estructural bajo cargas laterales es despreciable.

3.13.1.3 Simplificación del sistema de piso.

El sistema de piso conformado por viguetas de madera y entablado fue modelado mediante una losa de espesor equivalente. Esta simplificación se fundamenta en el cálculo de un espesor de losa maciza que reproduce el momento de inercia del sistema compuesto vigueta-tablero, manteniendo la masa y rigidez equivalentes del diafragma flexible.

3.13.1.4 Condiciones de borde.

La cimentación se modeló como empotramiento perfecto en la base de los muros, restringiendo todos los grados de libertad de traslación y rotación. Esta condición representa adecuadamente el comportamiento de las cimentaciones corridas de piedra y barro típicas de las viviendas de adobe en la zona de estudio.

3.13.2. Vivienda V-01

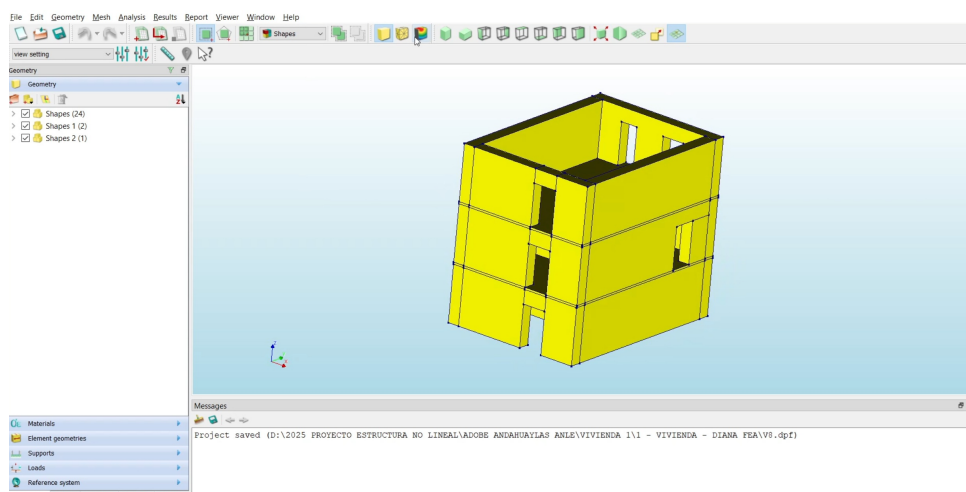
La Vivienda V-01 corresponde a una edificación de adobe de dos niveles ubicada en la zona urbana del distrito de Huancaray. A continuación se describe el procedimiento de modelamiento numérico desarrollado en DIANA FEA.

3.13.2.1 Geometría y configuración estructural.

La geometría de la vivienda fue elaborada inicialmente en Revit a partir del levantamiento arquitectónico realizado en campo. El modelo considera los muros de adobe en ambos niveles, incluyendo los vanos de puertas y ventanas según su ubicación y dimensiones reales.

Figura 53

Modelo geométrico tridimensional de la Vivienda V-01 importado en DIANA FEA

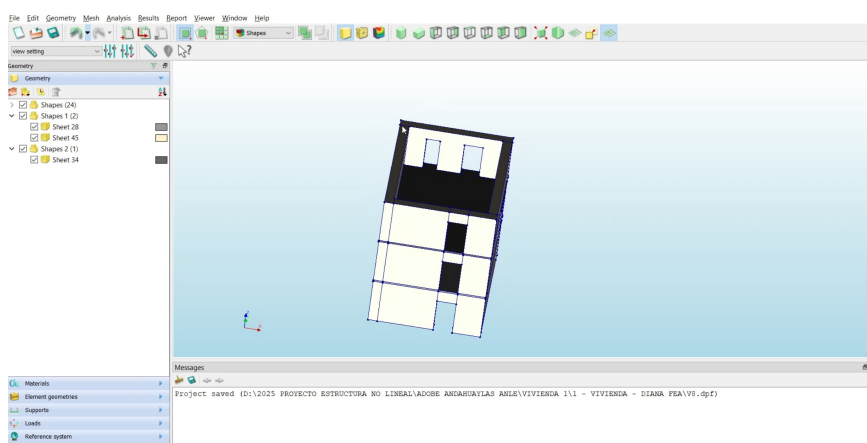


Nota. Elaboración propia. Vista isométrica del modelo con 24 shapes (superficies) importadas.

La geometría importada fue extruida al espesor correspondiente de los muros de adobe, generando elementos sólidos tridimensionales que permiten capturar adecuadamente el comportamiento fuera del plano de los muros.

Figura 54

Vista frontal del modelo geométrico de la Vivienda V-01



Nota. Elaboración propia. Se observan los vanos de puertas y ventanas en ambos niveles.

3.13.2.2 Propiedades mecánicas del adobe.

Las propiedades mecánicas del adobe para la Vivienda V-01 fueron determinadas considerando los resultados de ensayos de laboratorio y las relaciones establecidas en la calibración. El Cuadro 38 presenta las propiedades elásticas adoptadas.

Cuadro 38*Propiedades elásticas del adobe para la Vivienda V-01*

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad E_x	1805.5	kg/cm ²
Módulo de elasticidad E_y	3611	kg/cm ²
Módulo de corte G_{xy}	1444.4	kg/cm ²
Densidad de masa ρ	1800	kg/m ³

Nota. Relación $E_y/E_x = 2$ para muros tipo chato. E_y corresponde al módulo de elasticidad obtenido de ensayos en pilas.

Los parámetros de agrietamiento, aplastamiento y falla por corte se presentan en el Cuadro 39.

Cuadro 39*Parámetros no lineales del modelo EMM para la Vivienda V-01*

Parámetro	Valor	Unidad
Parámetros de agrietamiento		
Resistencia a tracción f_t	0.0215	N/mm ²
Energía de fractura en tracción G_f	0.0006235	N/mm
Resistencia residual a tracción f_{tr}	0.0086	N/mm ²
Parámetros de aplastamiento		
Resistencia a compresión f_m	0.743	N/mm ²
Energía de fractura en compresión G_c	0.688	N/mm
Factor de deformación n	1.01	–
Factor de descarga	1 (secante)	–
Parámetros de falla por corte		
Ángulo de fricción ϕ	0.75	rad
Cohesión c	0.25	N/mm ²
Energía de fractura en corte G_{fs}	0.02325	N/mm

Nota. $f_m = 7,5765 \text{ kg/cm}^2 = 0.743 \text{ N/mm}^2$ obtenido de ensayos en pilas de adobe. Los demás parámetros se mantienen según la calibración.

3.13.2.3 Modelamiento del sistema de piso.

El sistema de piso de la Vivienda V-01 está conformado por viguetas de madera de eucalipto y entablado. Para su modelamiento se calculó un espesor de losa equivalente que reproduce el momento de inercia de la sección compuesta.

El cálculo del espesor equivalente se realizó mediante el teorema de ejes paralelos (Steiner), considerando las siguientes características del sistema:

- Vigueta de eucalipto: sección de 13 cm × 13 cm

- Tablero: ancho tributario de 87 cm, espesor de 2.5 cm
- Inercia total de la sección compuesta: $I_{total} \approx 5114,65 \text{ cm}^4$

El espesor equivalente de losa maciza se determinó igualando el momento de inercia:

$$h_{eq} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{total}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \times 5114,65}{100}} \approx 8,50 \text{ cm} \quad (9)$$

Las propiedades mecánicas de la madera de eucalipto empleadas en el modelo se presentan en el Cuadro 40.

Cuadro 40

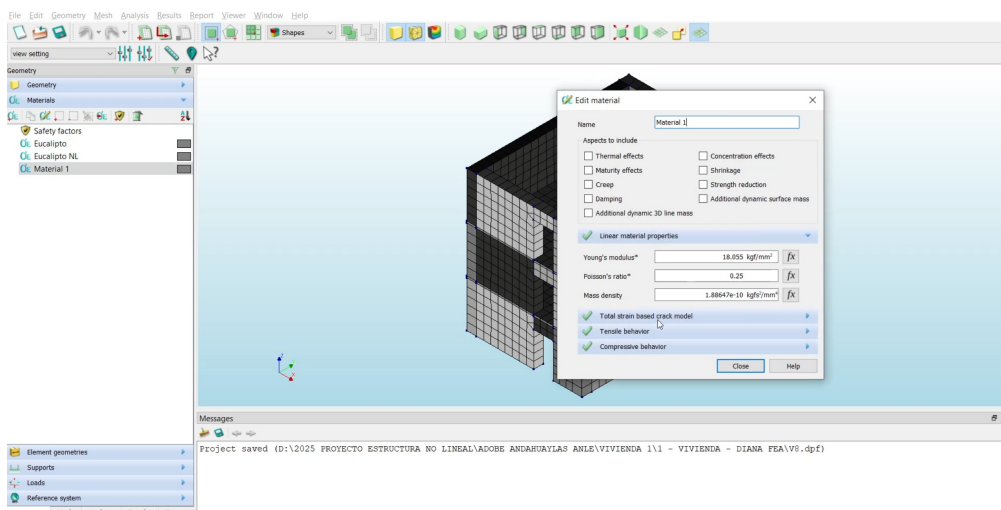
Propiedades físicas y mecánicas de la madera de eucalipto

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	0.55	g/cm ³
Módulo de elasticidad medio	13344.89	kg/cm ²
Módulo de elasticidad mínimo	93510.04	kg/cm ²
Esfuerzo medio en flexión	873.06	kg/cm ²
Esfuerzo mínimo en flexión	633.77	kg/cm ²

Nota. Valores según propiedades físicas y mecánicas del eucalipto para construcción.

Figura 55

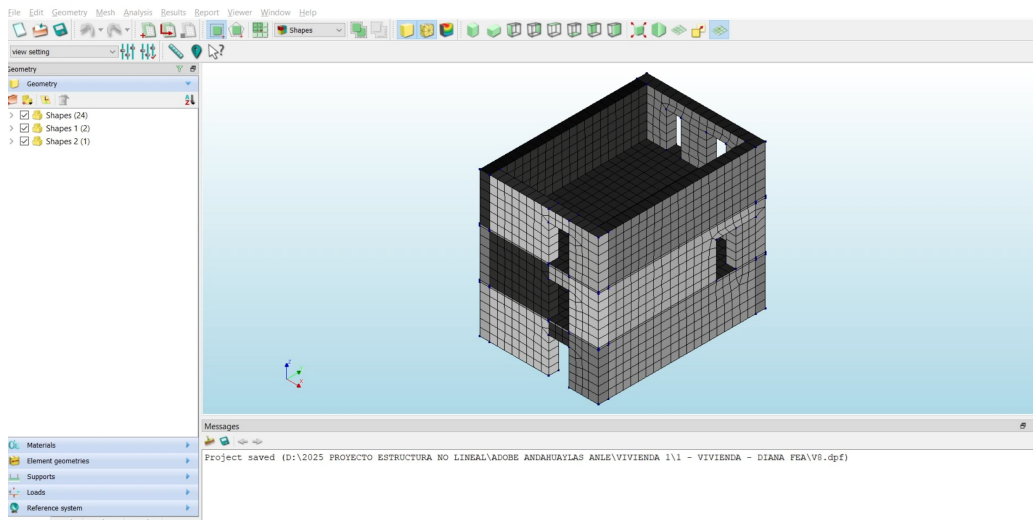
Definición de propiedades del material de madera (Eucalipto) en DIANA FEA



Nota. Elaboración propia. Material con modelo *Total Strain Based Crack Model* para comportamiento elástico.

3.13.2.4 Asignación de materiales.

Se asignaron los materiales correspondientes a cada elemento del modelo: adobe para los muros estructurales y eucalipto para las losas de entrepiso. La Figura 56 muestra la asignación de materiales en el modelo.

Figura 56*Modelo de la Vivienda V-01 con materiales asignados*

Nota. Elaboración propia. Color gris: muros de adobe, color oscuro: losas de entrepiso.

3.13.2.5 Definición de cargas.

Se definieron los siguientes casos de carga para el análisis:

- **GRAV:** Peso propio de los elementos estructurales (muros y losas).
- **LIVE:** Carga viva de 50 kg/m² aplicada sobre las losas.
- **Wtecho:** Carga muerta adicional del sistema de techo.
- **ANLE:** Carga lateral para análisis pushover (aceleración equivalente).

El Cuadro 41 presenta las cargas consideradas para el sistema de techo.

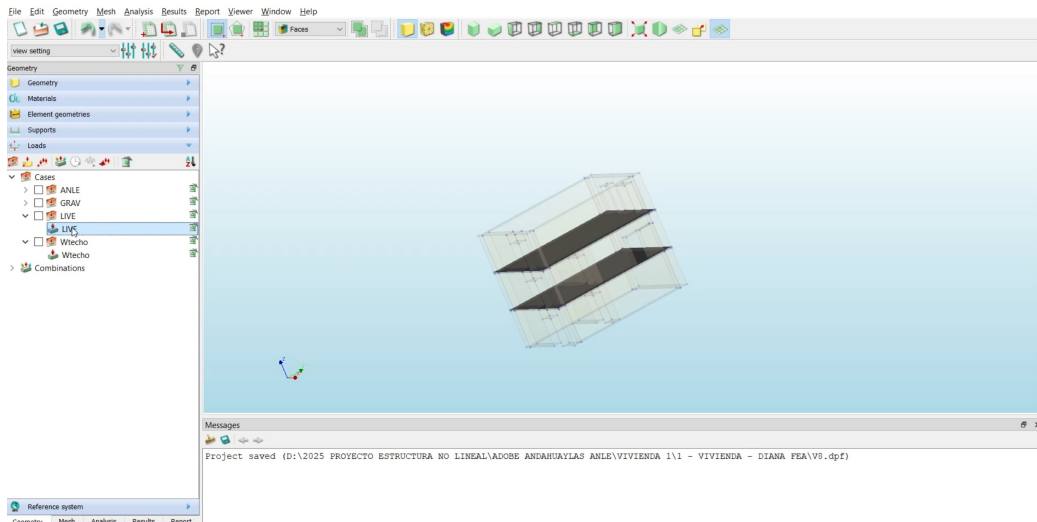
Cuadro 41*Cargas del sistema de techo para la Vivienda V-01*

Peso Propio	Cantidad	Unidad
Instalaciones	0.01	t/m ²
Teja de barro	0.05	t/m ²
Acabado Gypsum	0.02	t/m ²
Carga Muerta Total	0.08	t/m²

Nota. La carga de techo se aplicó como carga distribuida en los bordes superiores de los muros.

Figura 57

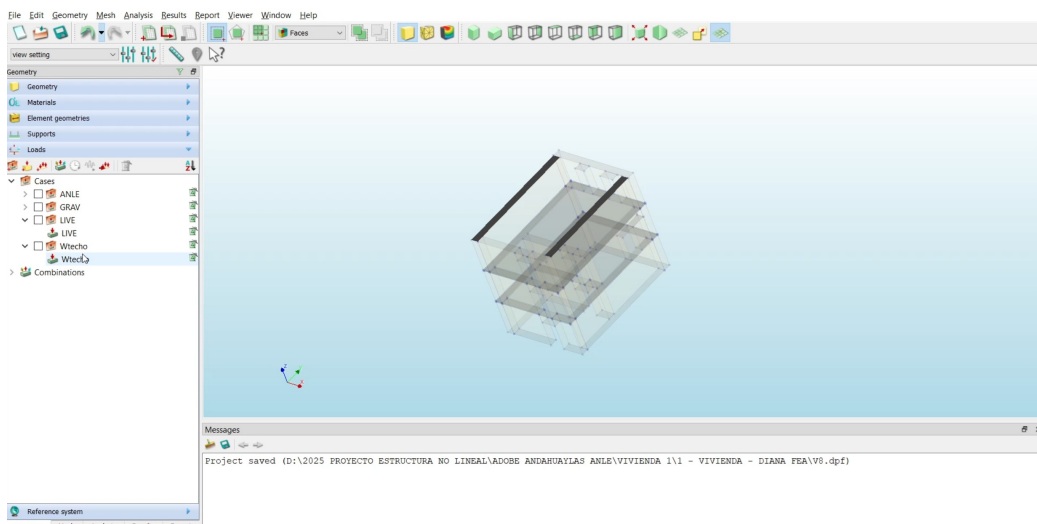
Casos de carga definidos para el análisis de la Vivienda V-01



Nota. Elaboración propia. Casos: ANLE (lateral), GRAV (peso propio), LIVE (carga viva), Wtecho (carga de techo).

Figura 58

Visualización de las cargas de techo aplicadas en el modelo

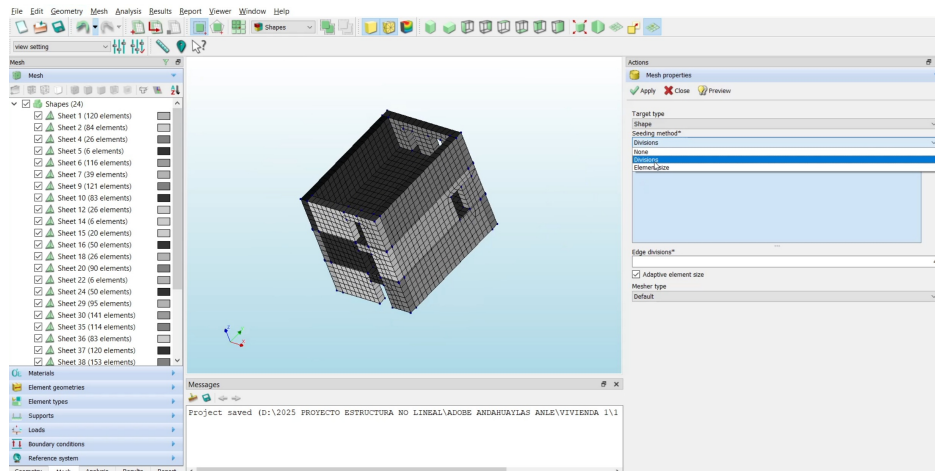


Nota. Elaboración propia. Cargas distribuidas en los bordes superiores de los muros.

3.13.2.6 Mallado de elementos finitos.

El modelo fue discretizado mediante elementos sólidos con un tamaño de malla de 40 cm, empleando el método de divisiones (*Divisions*) con 4 divisiones por borde. Esta configuración genera una malla estructurada que permite capturar adecuadamente la respuesta no lineal de la estructura.

Figura 59
Mallado de elementos finitos de la Vivienda V-01

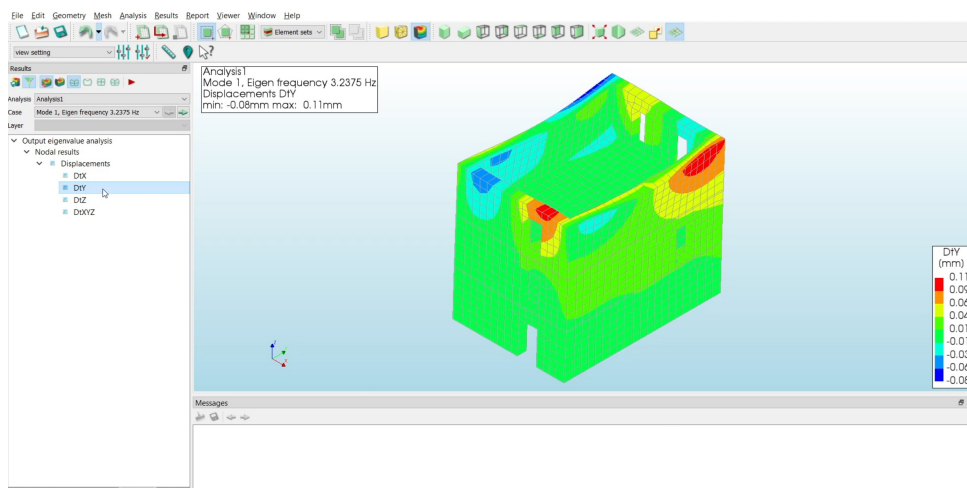


Nota. Elaboración propia. Método de mallado por divisiones, tamaño aproximado de elemento: 40 cm.

3.13.2.7 Análisis modal.

Previo al análisis pushover, se realizó un análisis modal para determinar las propiedades dinámicas de la estructura. El primer modo de vibración corresponde a un modo traslacional con una frecuencia natural de 3.2375 Hz.

Figura 60
Primer modo de vibración de la Vivienda V-01 ($f = 3.2375$ Hz)



Nota. Elaboración propia. Modo traslacional predominante en la dirección Y.

El período fundamental de la estructura se calcula como:

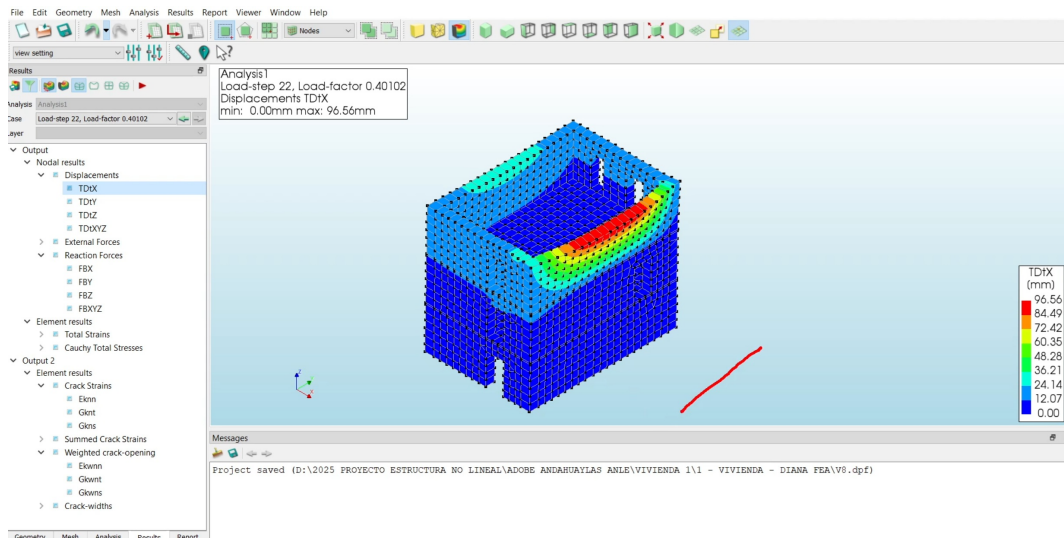
$$T_i = \frac{1}{f} = \frac{1}{3,2375} = 0,309 \text{ s} \quad (10)$$

3.13.2.8 Resultados del análisis pushover - Dirección X.

El análisis pushover en la dirección X se ejecutó aplicando incrementalmente la carga lateral hasta alcanzar el estado de colapso. La Figura 61 muestra el campo de desplazamientos en el último paso de carga.

Figura 61

Campo de desplazamientos TDtX en el estado de colapso - Dirección X

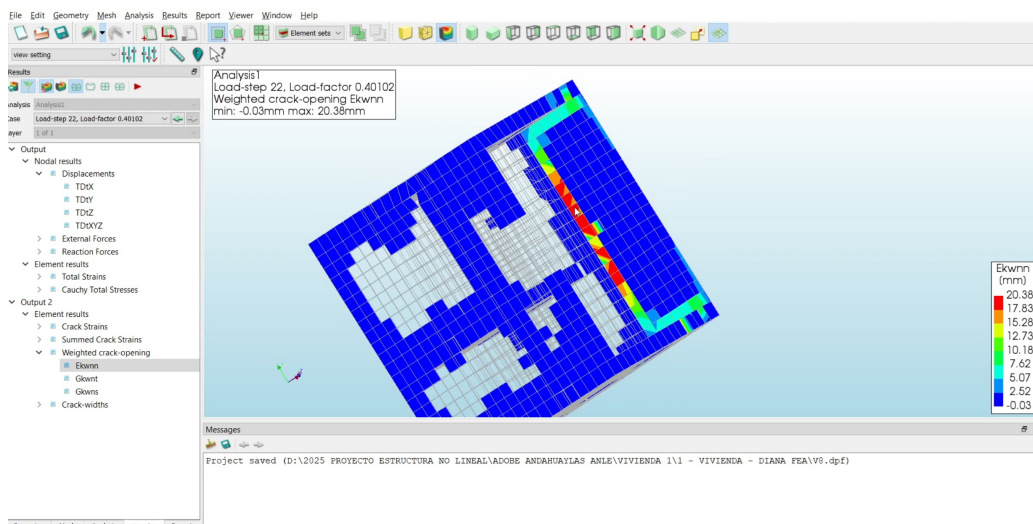


Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo: 96.56 mm (Load-step 22, Load-factor 0.40102).

El desplazamiento máximo alcanzado fue de 96.56 mm, correspondiente al estado de colapso definido por el ancho de grietas crítico. La estructura presenta un mecanismo de falla caracterizado por el volcamiento de los muros transversales.

Figura 62

Patrón de agrietamiento ponderado (Ekwnn) en la Vivienda V-01 - Dirección X

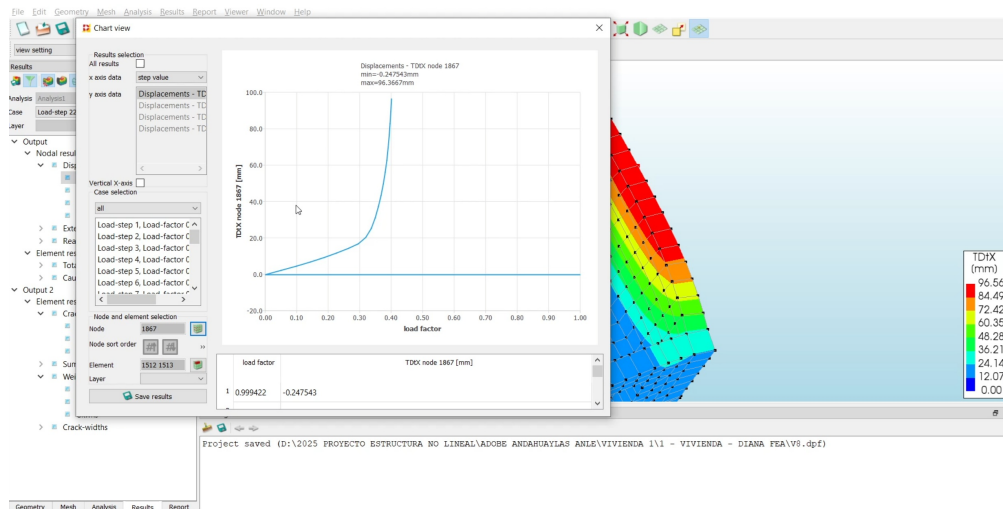


Nota. Elaboración propia. Vista en planta del ancho de grieta ponderado, máximo: 20.38 mm.

La curva de capacidad se obtuvo registrando la relación entre el cortante basal y el desplazamiento en el nodo de control. La Figura 63 muestra la curva de capacidad obtenida directamente de DIANA FEA.

Figura 63

Curva desplazamiento vs. factor de carga obtenida de DIANA FEA



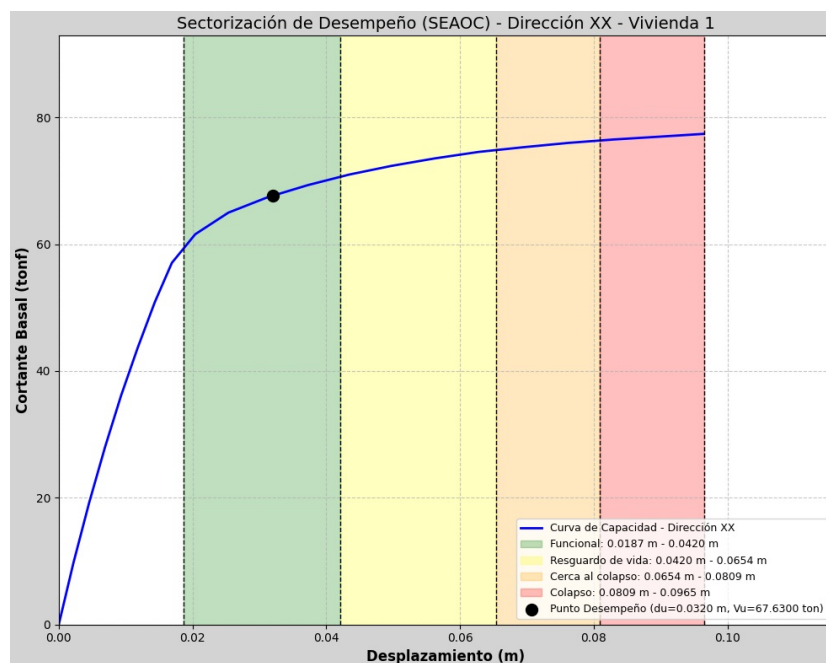
Nota. Elaboración propia. Nodo de control: 1867, desplazamiento máximo: 96.37 mm.

3.13.2.9 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X.

Para la evaluación del desempeño sísmico según la metodología ASCE 41, se realizó la bilinealización de la curva de capacidad. Este proceso permite determinar los puntos de fluencia y desempeño de la estructura.

Figura 64

Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-01



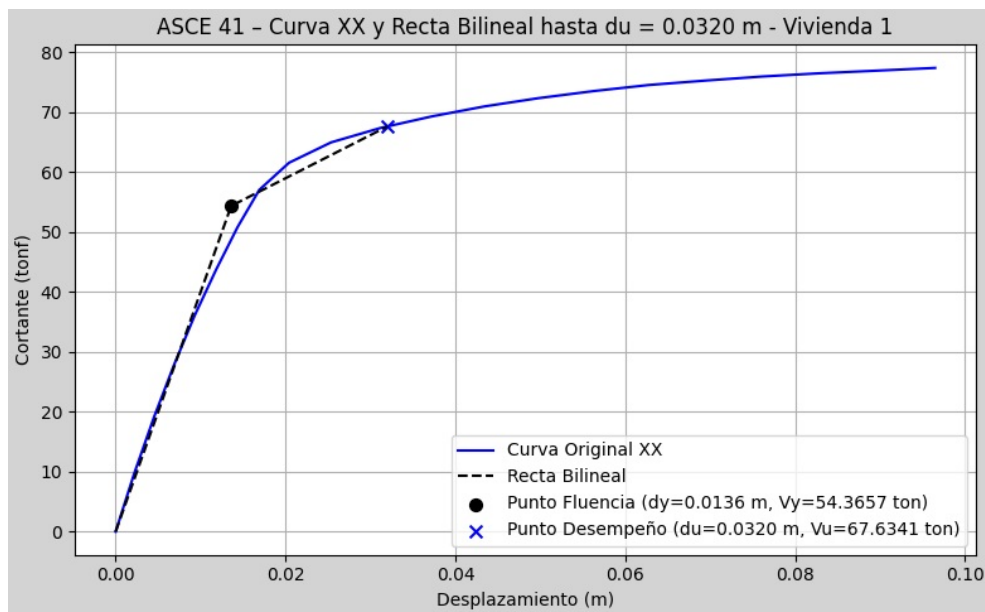
Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (azul) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

El Cuadro 42 presenta los parámetros obtenidos de la bilinealización según ASCE 41.

Cuadro 42*Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-01*

Parámetro	Valor	Unidad
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0136	m
Cortante de fluencia V_y	54.37	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0320	m
Cortante de desempeño V_u	67.63	tonf
Rigidez inicial K_i	3997.5	tonf/m
Rigidez efectiva K_e	4441.6	tonf/m
Período fundamental T_i	0.309	s

Nota. Parámetros calculados según metodología ASCE 41-17.

Figura 65*Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X*

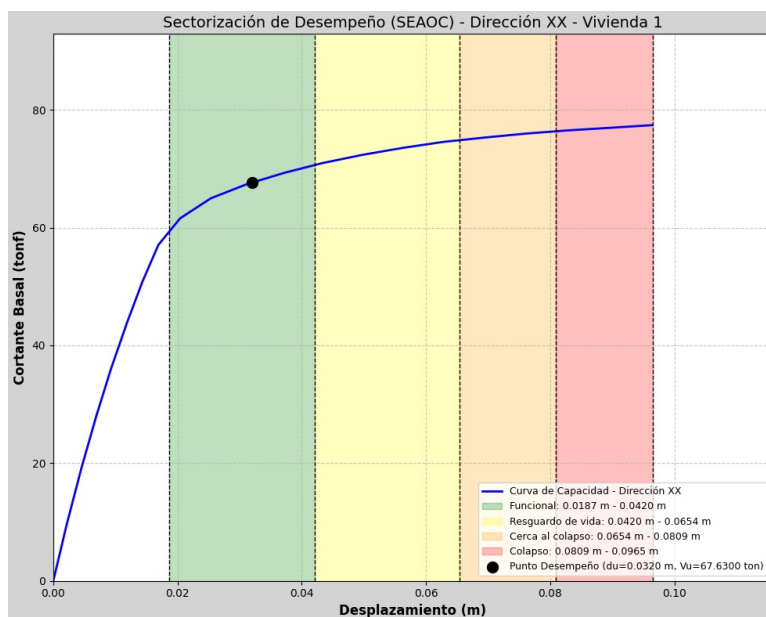
Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0136$ m, $V_y = 54.37$ ton. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0320$ m, $V_u = 67.63$ ton.

3.13.2.10 Sectorización del desempeño sísmico - Dirección X.

La sectorización del desempeño se realizó según los criterios del SEAOC Vision 2000, definiendo los rangos de desplazamiento para cada nivel de desempeño.

Figura 66

Sectorización de desempeño SEAOC - Dirección X - Vivienda V-01



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (amarillo), Colapso (rojo).

El Cuadro 48 presenta los rangos de desplazamiento para cada nivel de desempeño en la dirección X.

Cuadro 43

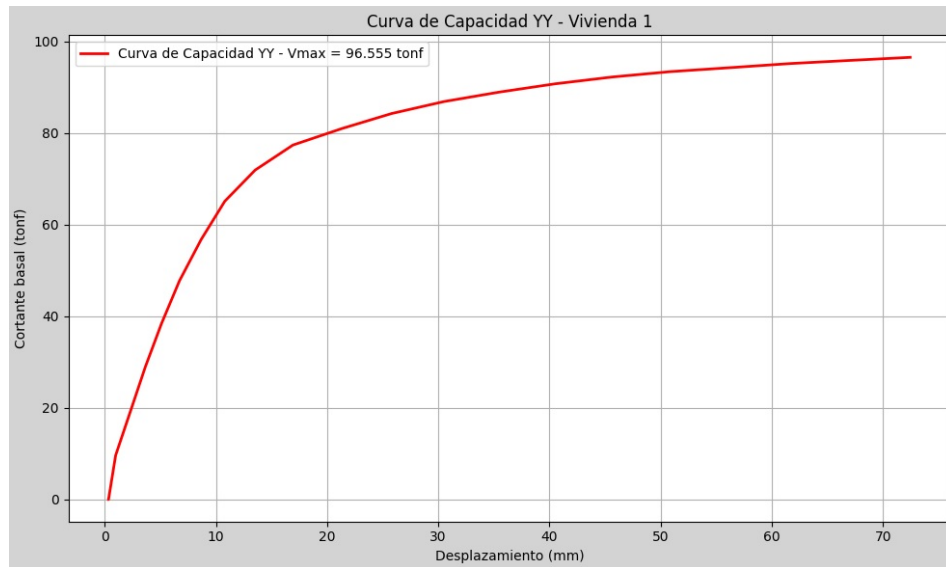
Sectorización de niveles de desempeño - Dirección X - Vivienda V-01

Nivel de desempeño	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0187	0.0420
Resguardo de vida	0.0420	0.0654
Cerca al colapso	0.0654	0.0809
Colapso	0.0809	0.0965

Nota. Punto de desempeño: $d_u = 0.0320$ m, $V_u = 67.63$ tonf. La estructura se encuentra en el nivel **Funcional**.

3.13.2.11 Resultados del análisis pushover - Dirección Y.

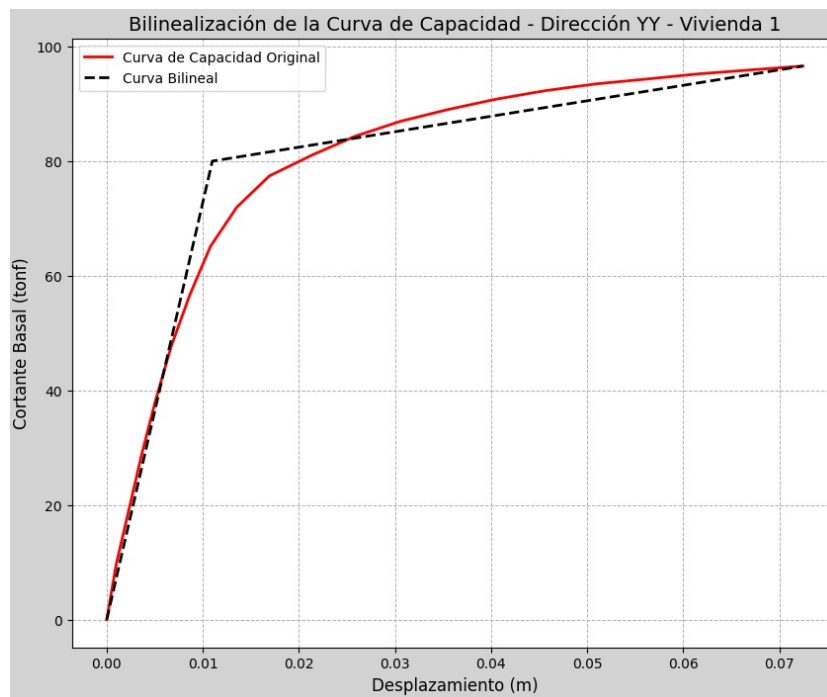
El análisis pushover en la dirección Y se ejecutó siguiendo el mismo procedimiento. La curva de capacidad obtenida se presenta en la Figura 67.

Figura 67*Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-01*

Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 96.555$ tonf.

La estructura presenta mayor capacidad resistente en la dirección Y debido a la mayor densidad de muros orientados en esta dirección. El cortante basal máximo alcanzado fue de 96.555 tonf.

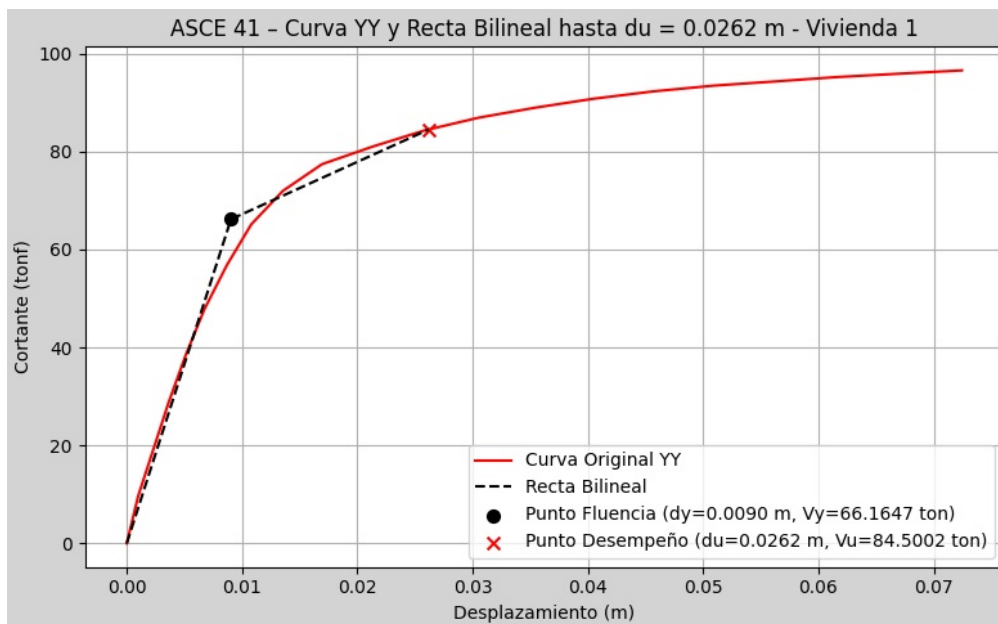
3.13.2.12 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 68*Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-01*

Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (rojo) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 69

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0090$ m, $V_y = 66.16$ ton. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0262$ m, $V_u = 84.50$ ton.

El Cuadro 44 presenta los parámetros obtenidos de la bilinealización en la dirección Y.

Cuadro 44

Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-01

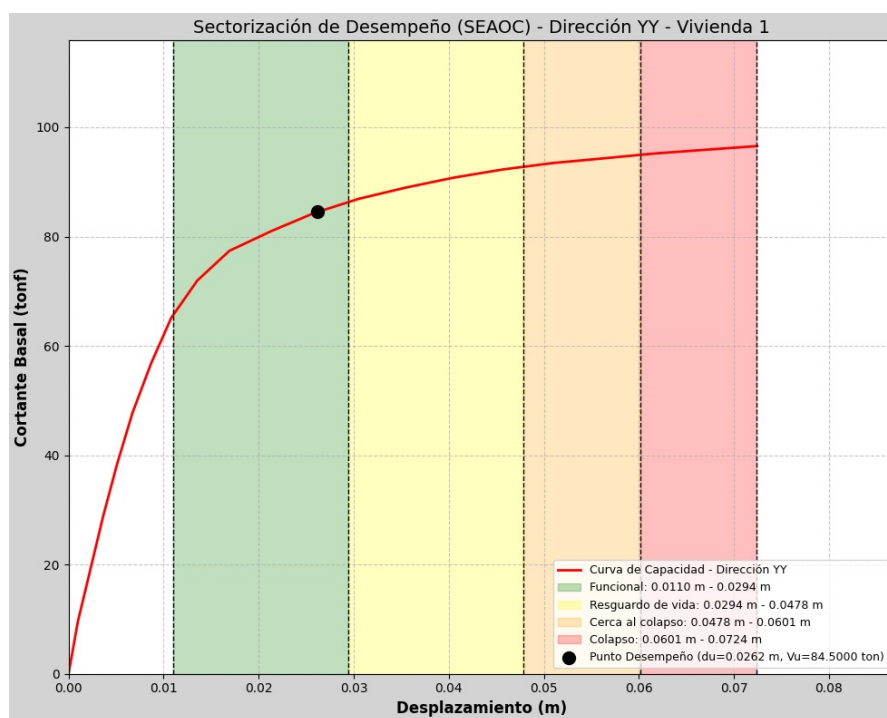
Parámetro	Valor	Unidad
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0090	m
Cortante de fluencia V_y	66.16	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0262	m
Cortante de desempeño V_u	84.50	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología ASCE 41-17.

3.13.2.13 Sectorización del desempeño sísmico - Dirección Y.

Figura 70

Sectorización de desempeño SEAOC - Dirección Y - Vivienda V-01



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (amarillo), Colapso (rojo).

El Cuadro 45 presenta los rangos de desplazamiento para cada nivel de desempeño en la dirección Y.

Cuadro 45

Sectorización de niveles de desempeño - Dirección Y - Vivienda V-01

Nivel de desempeño	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0110	0.0294
Resguardo de vida	0.0294	0.0478
Cerca al colapso	0.0478	0.0601
Colapso	0.0601	0.0724

Nota. Punto de desempeño: $d_u = 0.0262$ m, $V_u = 84.50$ tonf. La estructura se encuentra en el nivel **Funcional**.

3.13.2.14 Resumen de resultados - Vivienda V-01.

El Cuadro 46 presenta un resumen comparativo de los resultados del análisis pushover en ambas direcciones para la Vivienda V-01.

Cuadro 46*Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-01*

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Cortante de fluencia V_y (tonf)	54.37	66.16
Desplazamiento de fluencia d_y (m)	0.0136	0.0090
Cortante de desempeño V_u (tonf)	67.63	84.50
Desplazamiento de desempeño d_u (m)	0.0320	0.0262
Desplazamiento máximo (mm)	96.56	72.40
Nivel de desempeño	Funcional	Funcional

Nota. La Vivienda V-01 presenta un nivel de desempeño **Funcional** en ambas direcciones de análisis, indicando un comportamiento estructural adecuado ante la demanda sísmica de diseño.

Los resultados indican que la Vivienda V-01 presenta mayor capacidad resistente en la dirección Y ($V_u = 84.50$ tonf) comparada con la dirección X ($V_u = 67.63$ tonf), lo cual es consistente con la mayor densidad de muros orientados en dicha dirección. En ambos casos, el punto de desempeño se ubica dentro del rango **Funcional** según la sectorización SEAOC, lo que sugiere que la estructura mantendría su operatividad después de un evento sísmico de diseño.

3.13.3. Vivienda V-02

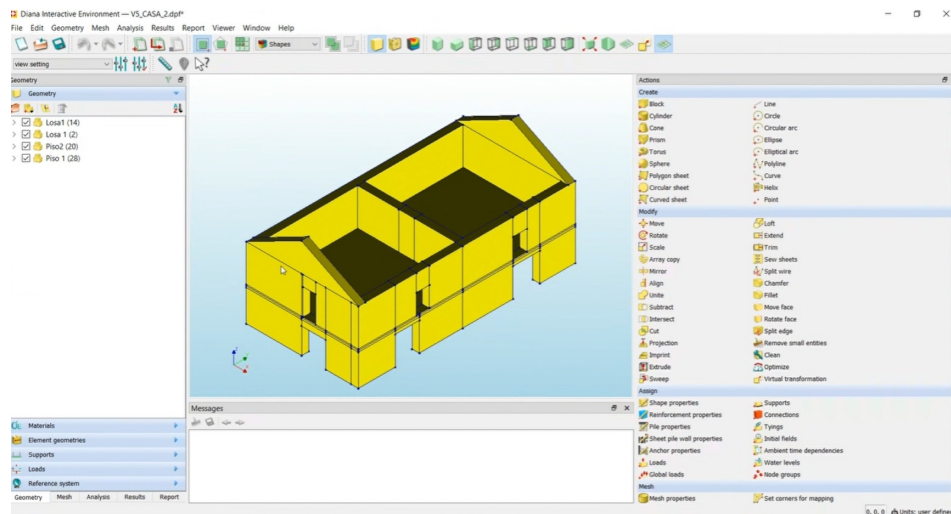
La Vivienda V-02 corresponde a una edificación de adobe de dos niveles con cobertura a dos aguas, ubicada en la zona urbana del distrito de Huancaray. Esta tipología constructiva es representativa de las viviendas tradicionales de la región, caracterizada por la presencia de un techo inclinado que modifica la distribución de cargas y el comportamiento estructural del sistema.

3.13.3.1 Geometría y configuración estructural.

La geometría de la vivienda fue elaborada en AutoCAD considerando la configuración a dos aguas del techo. El modelo incluye los muros de adobe en ambos niveles, las losas de entrepiso y la estructura del techo inclinado.

Figura 71

Modelo geométrico tridimensional de la Vivienda V-02 con cobertura a dos aguas

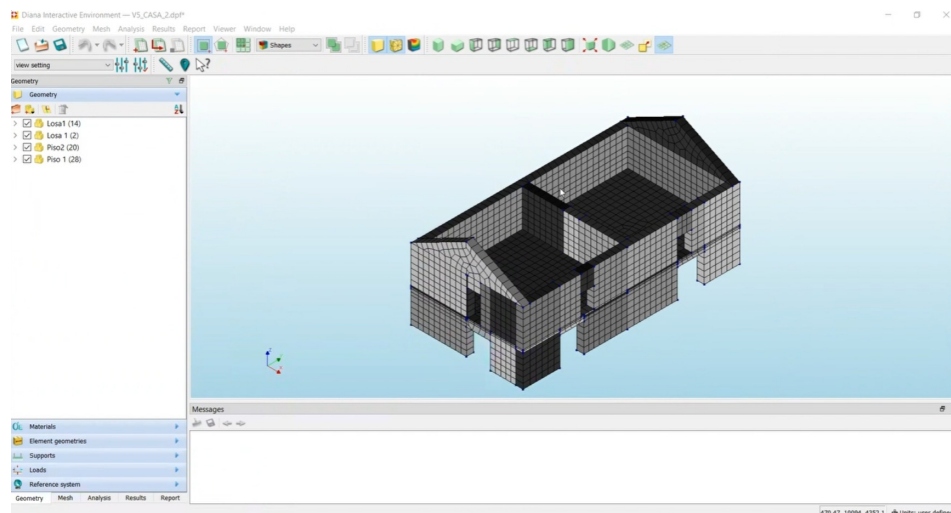


Nota. Elaboración propia. Geometría compuesta por: Losa1 (14 elementos), Losa 1 (2 elementos), Piso2 (20 elementos), Piso 1 (28 elementos).

La configuración a dos aguas genera una distribución asimétrica de masas en la parte superior de la estructura, lo cual influye en el comportamiento dinámico y la respuesta sísmica de la edificación.

Figura 72

Modelo mallado de la Vivienda V-02 en DIANA FEA



Nota. Elaboración propia. Discretización con elementos sólidos hexaédricos.

3.13.3.2 Propiedades mecánicas del adobe.

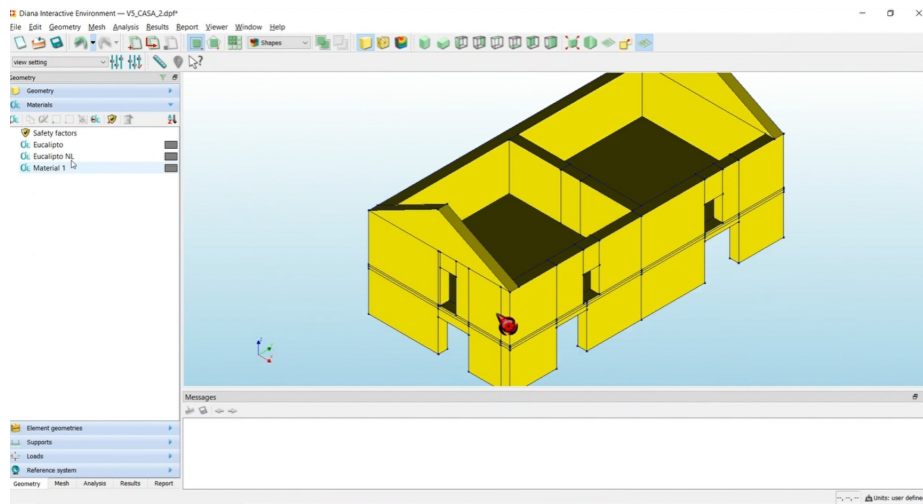
Las propiedades mecánicas del adobe para la Vivienda V-02 se determinaron siguiendo los mismos criterios de la calibración. Se emplearon las propiedades elásticas y los parámetros no lineales del modelo EMM validados previamente.

3.13.3.3 Modelamiento del sistema de piso.

El sistema de piso se modeló mediante el cálculo de espesor equivalente de losa, considerando el mismo procedimiento empleado en la Vivienda V-01. El espesor equivalente calculado fue de $h_{eq} \approx 8,50$ cm, el cual reproduce el momento de inercia de la sección compuesta vigueta-tablero.

Figura 73

Asignación de materiales en el modelo de la Vivienda V-02



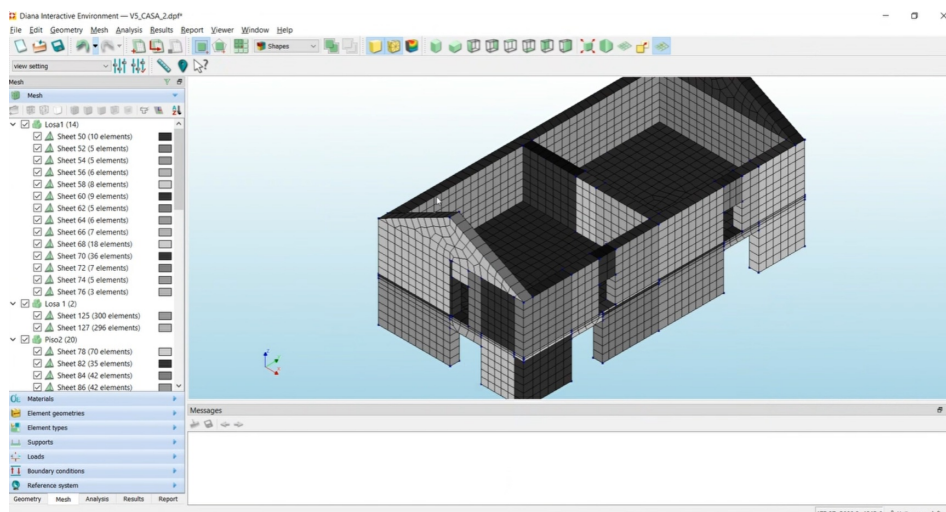
Nota. Elaboración propia. Materiales: Eucalipto, Eucalipto NL, Material 1 (adobe EMM).

3.13.3.4 Configuración del mallado.

El modelo fue discretizado mediante elementos finitos, generando una malla estructurada que permite capturar adecuadamente los gradientes de deformación y la propagación de agrietamiento en los muros de adobe.

Figura 74

Detalle del mallado de elementos finitos de la Vivienda V-02



Nota. Elaboración propia. Se observan los diferentes grupos de elementos: Losa1, Losa 1, Piso2, Piso 1.

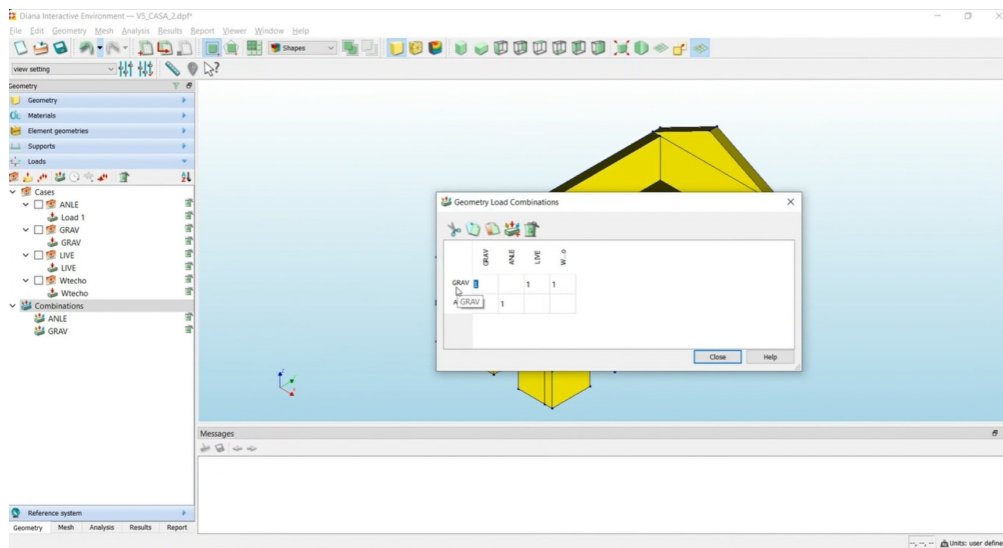
3.13.3.5 Definición de casos de carga.

Se definieron cuatro casos de carga para el análisis de la Vivienda V-02:

- **GRAV:** Peso propio de los elementos estructurales.
- **LIVE:** Carga viva de 50 kg/m² (considerando 25 % de la carga viva de 200 kg/m² para masa sísmica según norma E.030).
- **Wtecho:** Carga muerta adicional del sistema de techo a dos aguas.
- **ANLE:** Carga lateral mediante aceleración equivalente para análisis pushover.

Figura 75

Definición de combinaciones de carga para la Vivienda V-02



Nota. Elaboración propia. Combinaciones: GRAV (peso propio + carga viva + carga techo), ANLE (carga lateral).

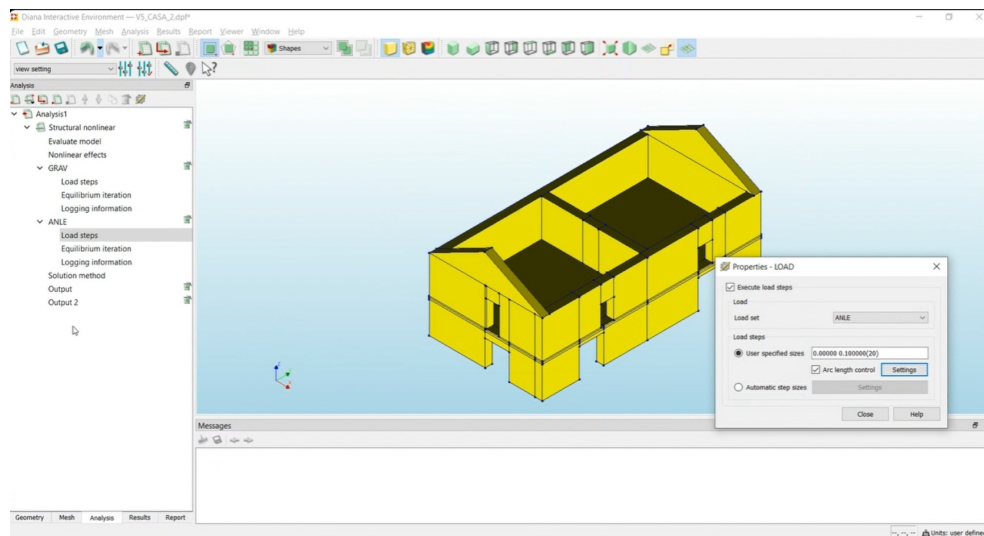
3.13.3.6 Configuración del análisis no lineal.

El análisis estructural no lineal se configuró con los siguientes parámetros:

- **Tipo de análisis:** Structural nonlinear
- **Método iterativo:** Newton-Raphson
- **Control de longitud de arco:** Activado para capturar el comportamiento post-pico
- **Tamaño de paso de carga:** 0.1 (20 pasos de carga)
- **Dirección de control:** Traslación en X (TRANSL, Direction X, Alpha = 1)

Figura 76

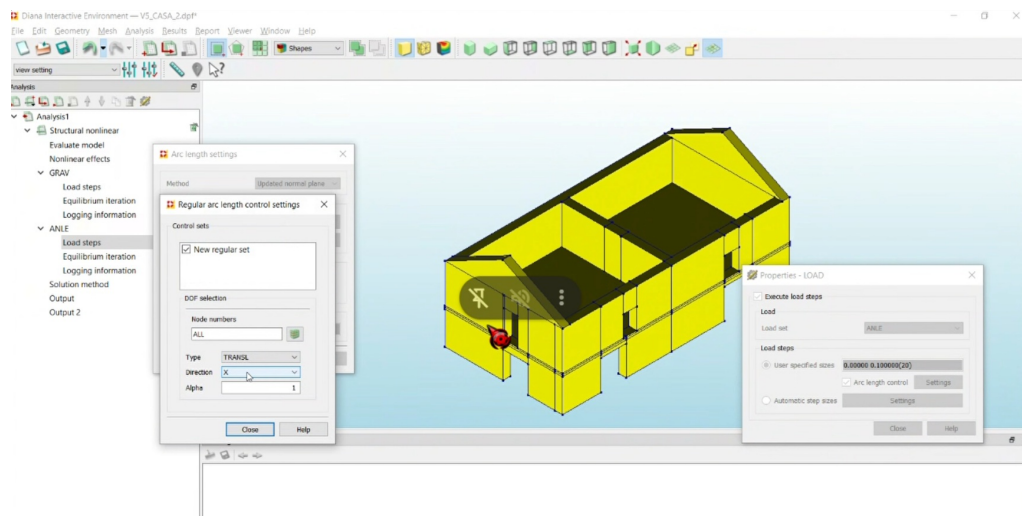
Configuración de los pasos de carga para el análisis pushover



Nota. Elaboración propia. User specified sizes: 0.00000 - 0.100000 (20 pasos), Arc length control activado.

Figura 77

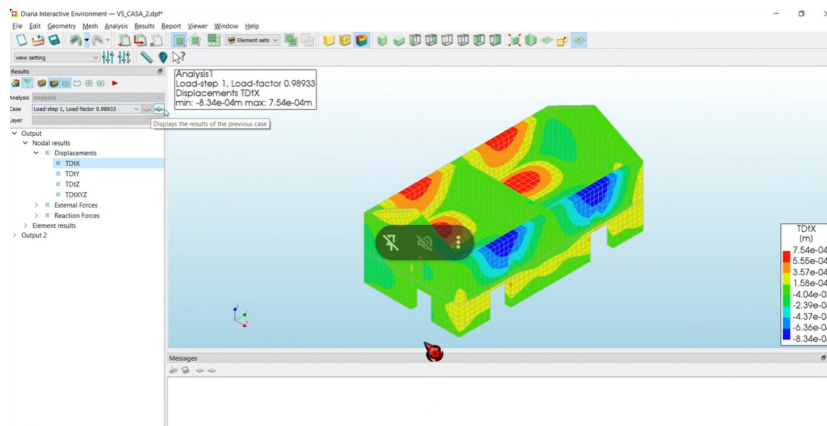
Configuración del control de longitud de arco (Arc-length control)



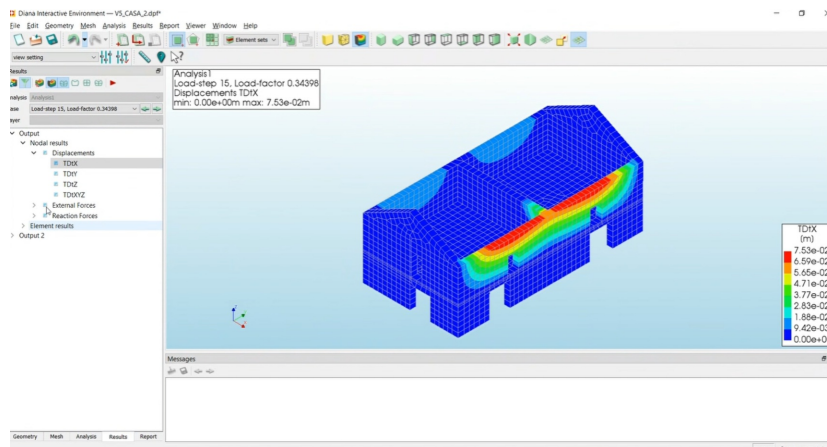
Nota. Elaboración propia. Método: Updated normal plane, Type: TRANSL, Direction: X.

3.13.3.7 Resultados del análisis pushover - Dirección X.

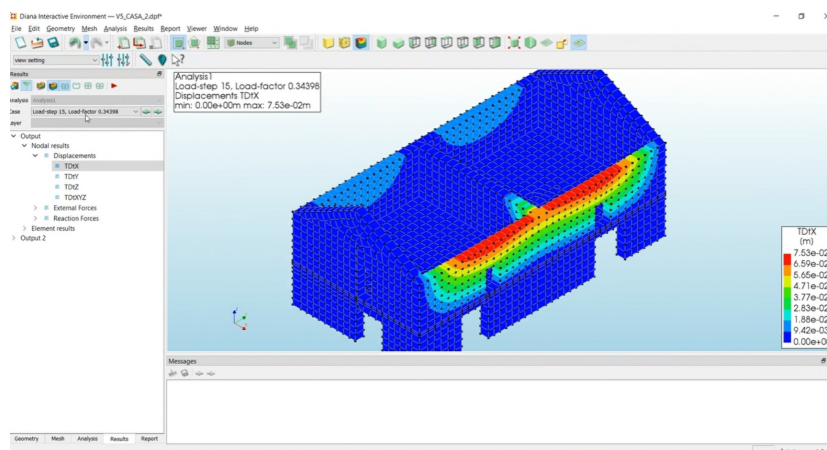
El análisis pushover en la dirección X se ejecutó aplicando incrementalmente la carga lateral. A continuación se presentan los campos de desplazamientos en diferentes pasos de carga, ilustrando la evolución del comportamiento estructural.

Figura 78*Campo de desplazamientos TDtX - Load-step 1 (inicio del análisis)*

Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo: 0.754 mm, Load-factor: 0.98933.

Figura 79*Campo de desplazamientos TDtX - Load-step 15*

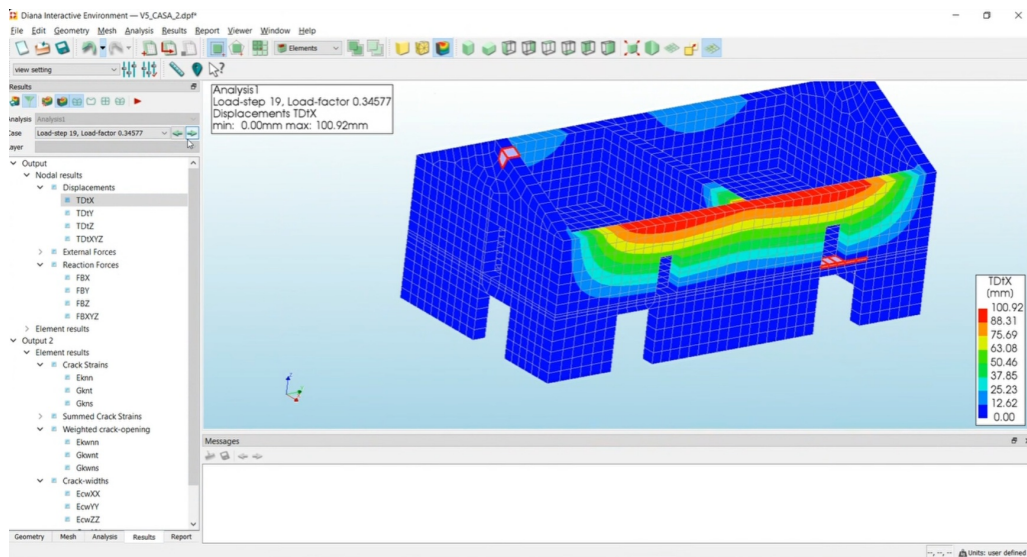
Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo: 75.3 mm, Load-factor: 0.34398.

Figura 80*Campo de desplazamientos TDtX con vectores nodales - Load-step 15*

Nota. Elaboración propia. Visualización de vectores de desplazamiento nodal.

Figura 81

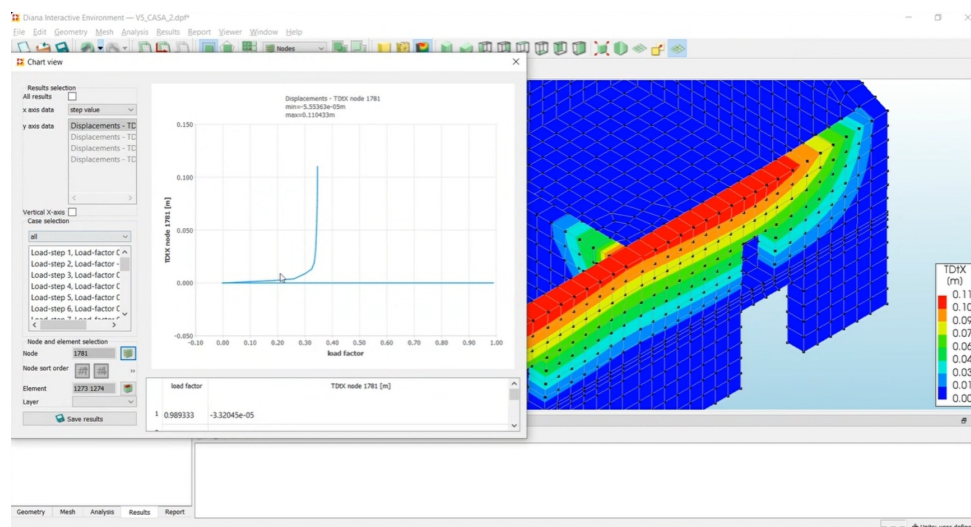
Campo de desplazamientos TDtX en el estado de colapso - Dirección X



Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo: 100.92 mm (Load-step 19, Load-factor 0.34577). La curva desplazamiento vs. factor de carga obtenida de DIANA FEA se presenta en la Figura 82.

Figura 82

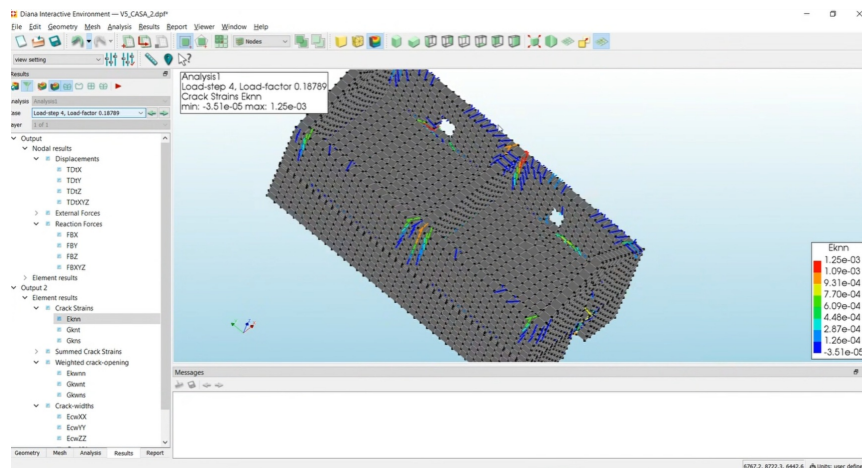
Curva desplazamiento vs. factor de carga - Nodo de control 1781



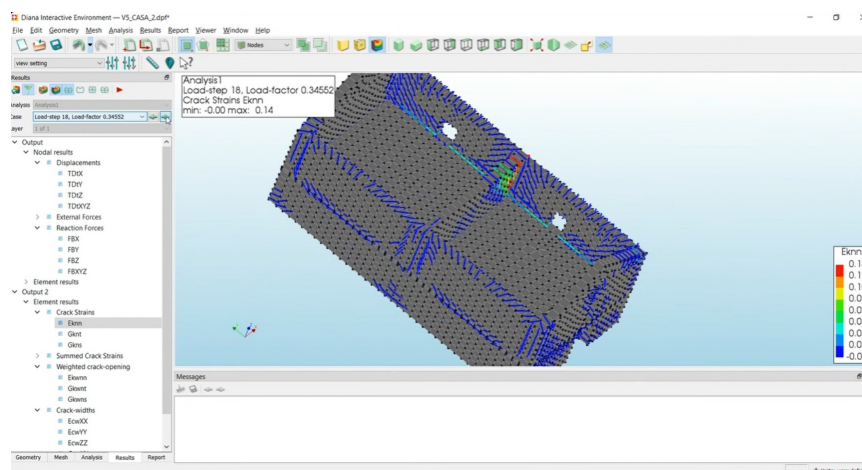
Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo del nodo de control: 110.43 mm.

3.13.3.8 Patrón de agrietamiento - Dirección X.

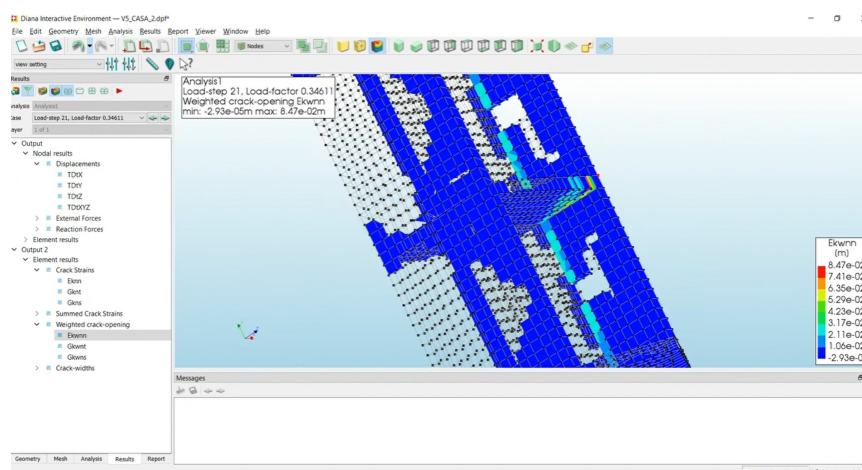
El patrón de agrietamiento se analizó mediante los resultados de deformaciones por fisuración (Crack Strains Eknn) y el ancho de grieta ponderado (Weighted crack-opening Ekwnn).

Figura 83*Deformaciones por fisuración Eknn - Load-step 4 (inicio de agrietamiento)*

Nota. Elaboración propia. Eknn máximo: 1.25e-03, inicio de formación de grietas.

Figura 84*Deformaciones por fisuración Eknn - Load-step 18 (agrietamiento desarrollado)*

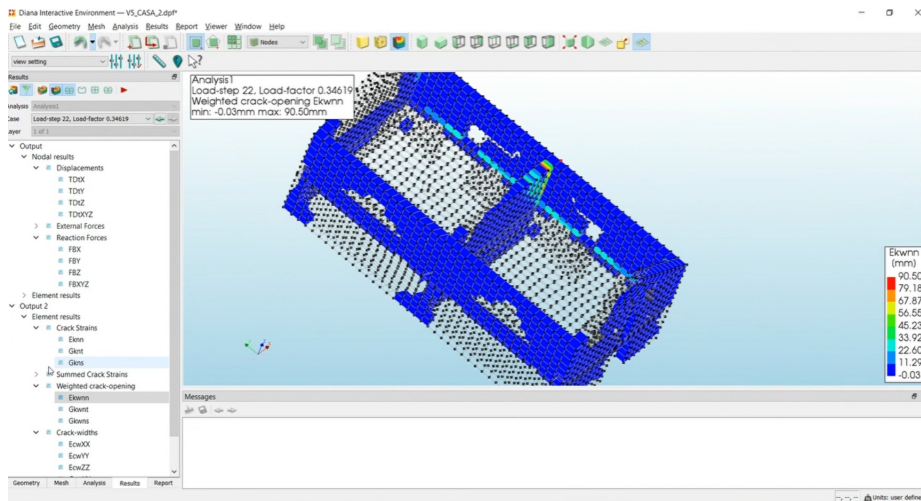
Nota. Elaboración propia. Eknn máximo: 0.14, propagación de grietas en muros transversales.

Figura 85*Ancho de grieta ponderado Ekwnn - Load-step 21*

Nota. Elaboración propia. Ekwnn máximo: 84.7 mm, concentración de daño en losa de entrepiso.

Figura 86

Ancho de grieta ponderado Ekwmm en el estado de colapso - Load-step 22



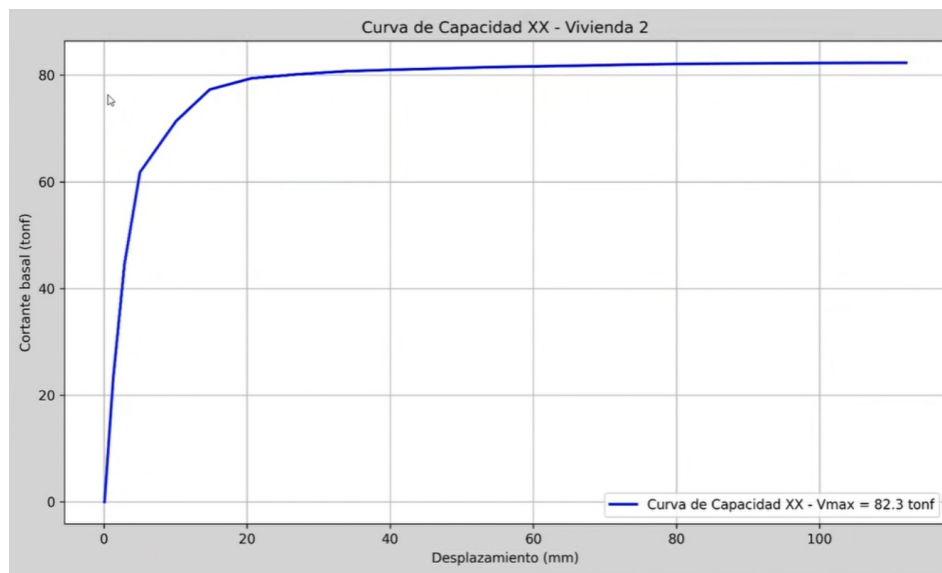
Nota. Elaboración propia. Ekwmm máximo: 90.50 mm, mecanismo de falla por volcadura de muros.

3.13.3.9 Curva de capacidad - Dirección X.

La curva de capacidad relaciona el cortante basal con el desplazamiento en el punto de control. La Figura 87 presenta la curva obtenida del análisis pushover en la dirección X.

Figura 87

Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-02



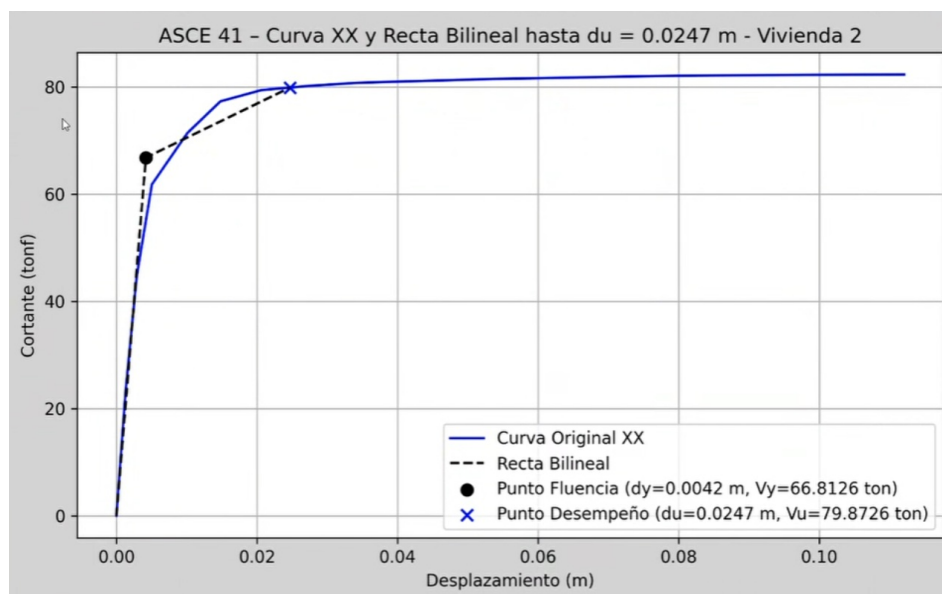
Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 82.3$ tonf.

3.13.3.10 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X.

La bilinealización de la curva de capacidad se realizó según la metodología ASCE 41-17, determinando los puntos de fluencia y desempeño de la estructura.

Figura 88

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-02



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●):

El Cuadro 47 presenta los parámetros de la bilinealización en la dirección X.

Cuadro 47

Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-02

Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	82.30	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0042	m
Cortante de fluencia V_y	66.81	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0247	m
Cortante de desempeño V_u	79.87	tonf

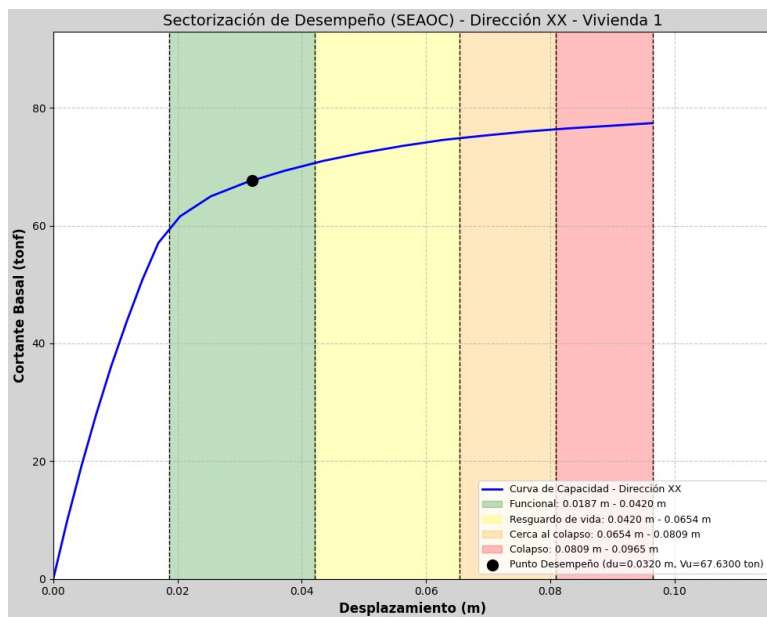
Nota. Parámetros calculados según metodología ASCE 41-17.

3.13.3.11 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección X.

La sectorización del desempeño se realizó según los criterios de la filosofía SEAOC Vision 2000, que define cuatro niveles de desempeño estructural: Funcional, Resguardo de vida, Cerca al colapso y Colapso. Los rangos de desplazamiento para cada nivel fueron determinados a partir de la curva de capacidad bilinealizada según la metodología ASCE 41-17.

Figura 89

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-01



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (amarillo), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0320$ m, $V_u = 67.63$ tonf.

Cuadro 48

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-01

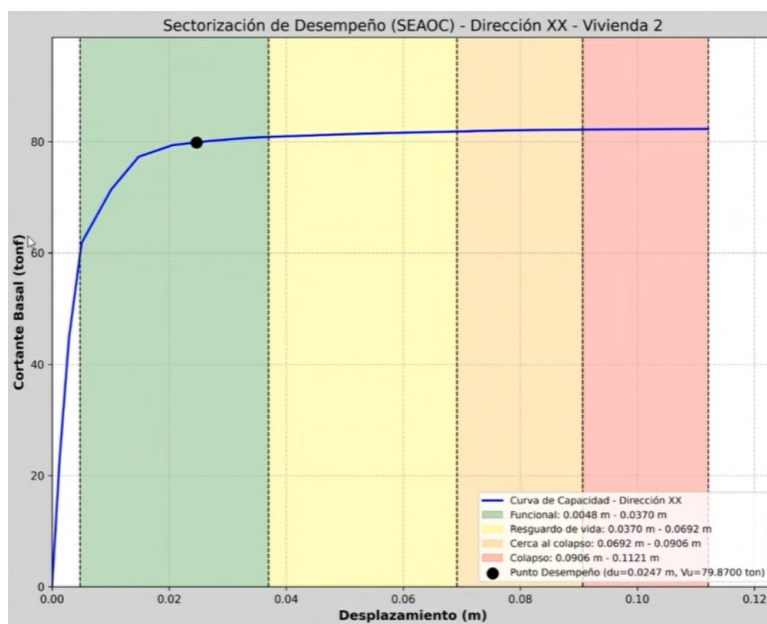
Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0187	0.0420
Resguardo de vida	0.0420	0.0654
Cerca al colapso	0.0654	0.0809
Colapso	0.0809	0.0965

Nota. Sectorización según filosofía SEAOC Vision 2000. El punto de desempeño ($d_u = 0.0320$ m) se ubica dentro del rango 0.0187–0.0420 m, correspondiente al nivel **Funcional**. Este nivel indica que la estructura mantendría su funcionalidad después del sismo de diseño, con daños menores que no afectarían la ocupación inmediata.

El resultado indica que la Vivienda V-01 en la dirección X alcanza un nivel de desempeño **Funcional** según la filosofía SEAOC Vision 2000, lo cual significa que ante un sismo de diseño correspondiente a la zona sísmica 2 ($Z = 0.25$), la estructura mantendría su operatividad con daños menores que no comprometerían la seguridad de los ocupantes ni requerirían evacuación inmediata.

Figura 90

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-02



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (amarillo), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0247$ m, $V_u = 79.87$ tonf.

Cuadro 49

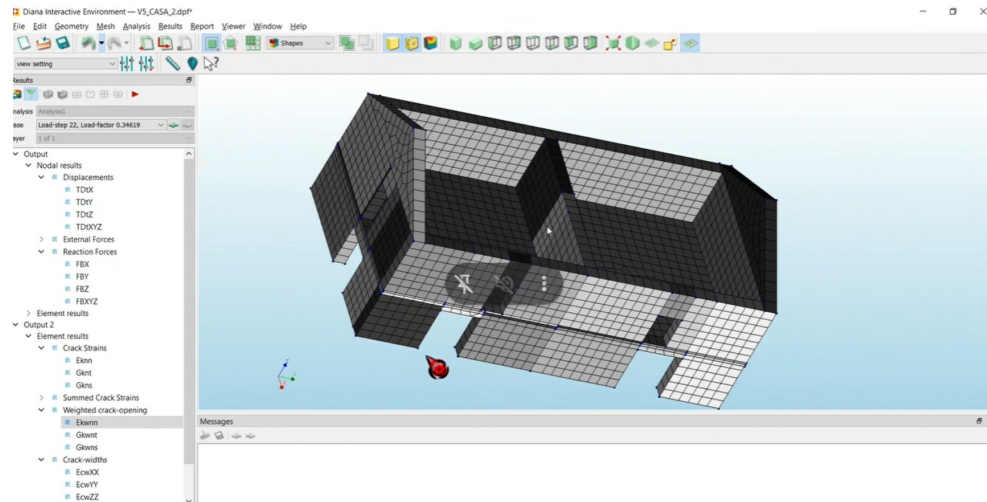
Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-02

Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0048	0.0370
Resguardo de vida	0.0370	0.0692
Cerca al colapso	0.0692	0.0906
Colapso	0.0906	0.1121

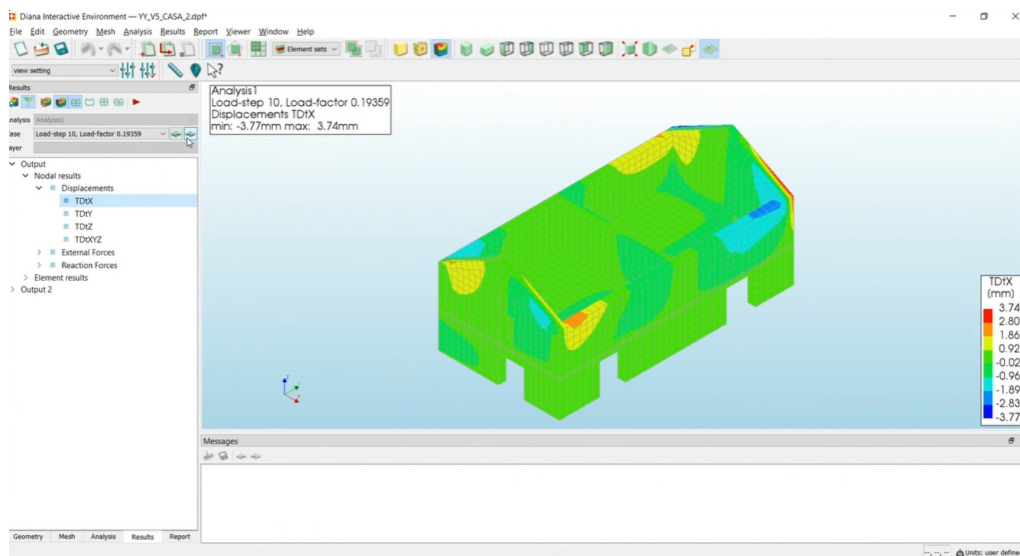
Nota. Sectorización según filosofía SEAOC Vision 2000. El punto de desempeño ($d_u = 0.0247$ m) se ubica dentro del rango 0.0048–0.0370 m, correspondiente al nivel **Funcional**. Este nivel indica que la estructura mantendría su funcionalidad después del sismo de diseño.

3.13.3.12 Resultados del análisis pushover - Dirección Y.

El análisis pushover en la dirección Y se ejecutó siguiendo el mismo procedimiento, aplicando la carga lateral perpendicular a la dirección principal de los muros longitudinales.

Figura 91*Vista del modelo para análisis en dirección Y - Vivienda V-02*

Nota. Elaboración propia. Archivo: YY_V5_CASA_2.dpf, Load-step 22.

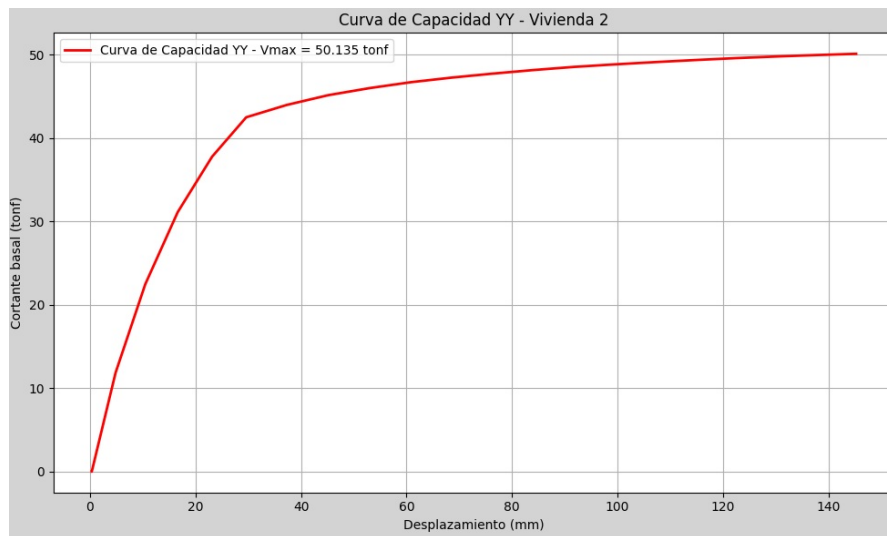
Figura 92*Campo de desplazamientos - Dirección Y - Load-step 10*

Nota. Elaboración propia. Desplazamiento máximo: 3.74 mm, Load-factor: 0.19359.

3.13.3.13 Curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 93

Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-02



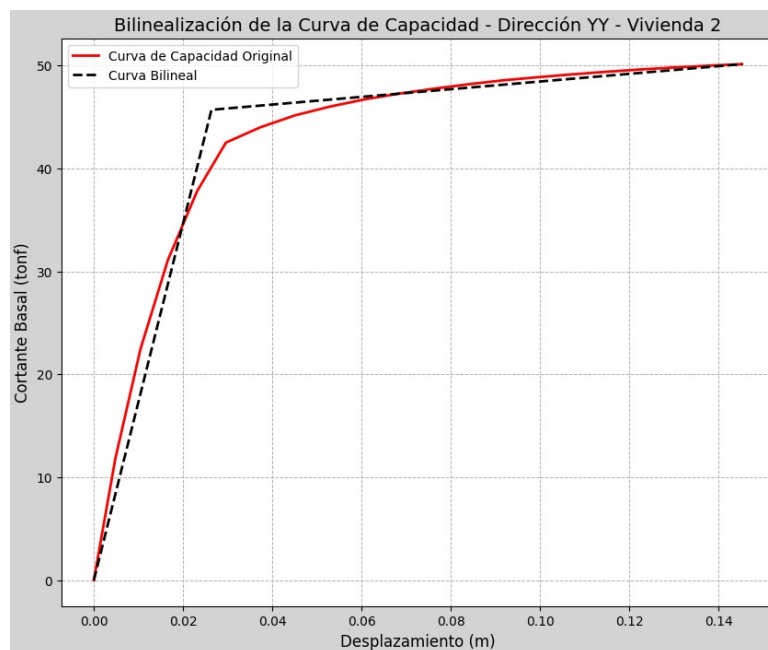
Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 50.135$ tonf.

La estructura presenta una capacidad resistente significativamente menor en la dirección Y ($V_{max} = 50.135$ tonf) comparada con la dirección X ($V_{max} = 82.3$ tonf), lo cual indica una mayor vulnerabilidad en esta dirección debido a la menor densidad de muros resistentes.

3.13.3.14 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 94

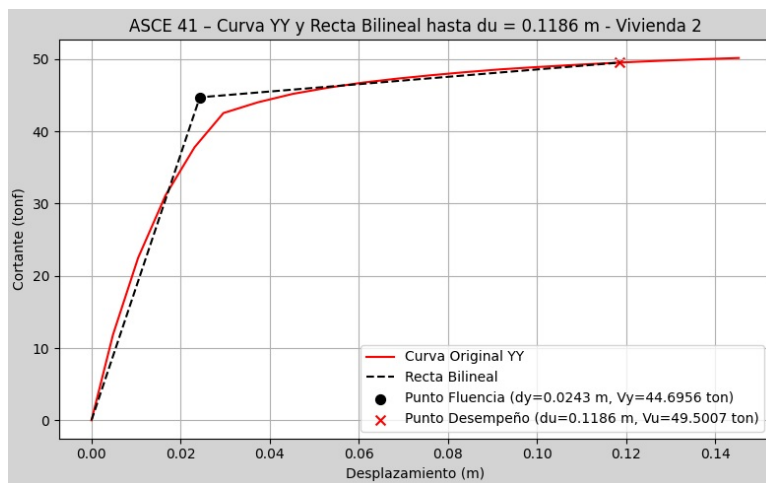
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-02



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (rojo) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 95

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-02



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0243$ m, $V_y = 44.70$ ton. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.1186$ m, $V_u = 49.50$ ton.

El Cuadro 50 presenta los parámetros obtenidos de la bilinealización en la dirección Y.

Cuadro 50

Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-02

Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	50.14	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0243	m
Cortante de fluencia V_y	44.70	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.1186	m
Cortante de desempeño V_u	49.50	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología ASCE 41-17. Se observa un desplazamiento de desempeño elevado ($d_u = 0.1186$ m), indicando mayor vulnerabilidad en esta dirección.

3.13.3.15 Resumen de resultados - Vivienda V-02.

El Cuadro 51 presenta un resumen comparativo de los resultados del análisis pushover en ambas direcciones para la Vivienda V-02.

Cuadro 51*Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-02*

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Cortante basal máximo V_{max} (tonf)	82.30	50.14
Cortante de fluencia V_y (tonf)	66.81	44.70
Desplazamiento de fluencia d_y (m)	0.0042	0.0243
Cortante de desempeño V_u (tonf)	79.87	49.50
Desplazamiento de desempeño d_u (m)	0.0247	0.1186
Desplazamiento máximo (mm)	100.92	140+
Nivel de desempeño	Funcional	Vulnerable

Nota. La Vivienda V-02 presenta un comportamiento diferenciado según la dirección de análisis. En la dirección X alcanza un nivel de desempeño **Funcional**, mientras que en la dirección Y presenta una **condición más vulnerable** debido a la menor densidad de muros resistentes y el mayor desplazamiento de desempeño requerido.

Los resultados evidencian que la Vivienda V-02 con cobertura a dos aguas presenta una respuesta estructural asimétrica. La dirección X, con mayor densidad de muros, exhibe un cortante basal máximo de 82.30 tonf y un comportamiento dentro del rango funcional. Por el contrario, la dirección Y presenta una capacidad resistente reducida ($V_{max} = 50.14$ tonf) y un desplazamiento de desempeño significativamente mayor ($d_u = 0.1186$ m), lo cual indica una condición de mayor vulnerabilidad sísmica en esta dirección.

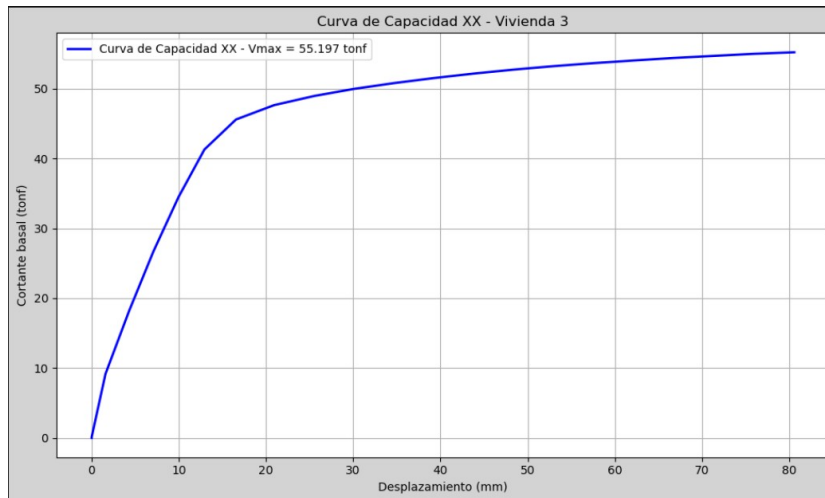
Esta diferencia en el comportamiento direccional es característica de las viviendas de adobe con configuración rectangular alargada, donde los muros longitudinales (dirección X) aportan mayor rigidez y resistencia que los muros transversales.

3.13.4. Vivienda V-03

La Vivienda V-03 corresponde a una edificación de adobe de dos niveles con configuración en L, ubicada en el distrito de Huancaray. El modelamiento numérico en DIANA FEA siguió el mismo procedimiento descrito detalladamente para las Viviendas V-01 y V-02, empleando el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)** con los parámetros obtenidos de la calibración, el método iterativo Newton-Raphson con control de longitud de arco (*Arc-length control*) y mallado de elementos sólidos hexaédricos. A continuación se presentan los resultados del análisis pushover en ambas direcciones.

3.13.4.1 Curva de capacidad - Dirección X.

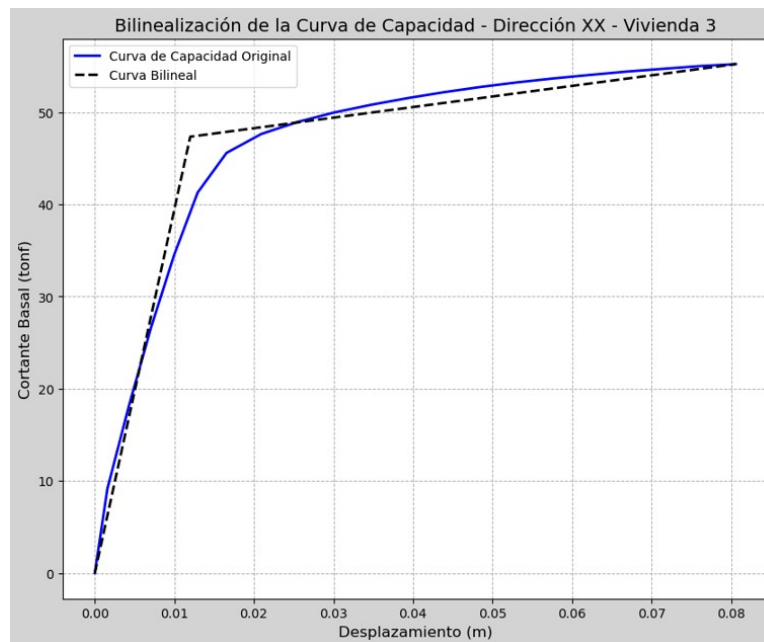
La curva de capacidad en la dirección X relaciona el cortante basal con el desplazamiento en el nodo de control. La Figura 96 presenta la curva obtenida del análisis pushover.

Figura 96*Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-03*

Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 55.197$ tonf. Desplazamiento máximo: 80 mm.

3.13.4.2 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X.

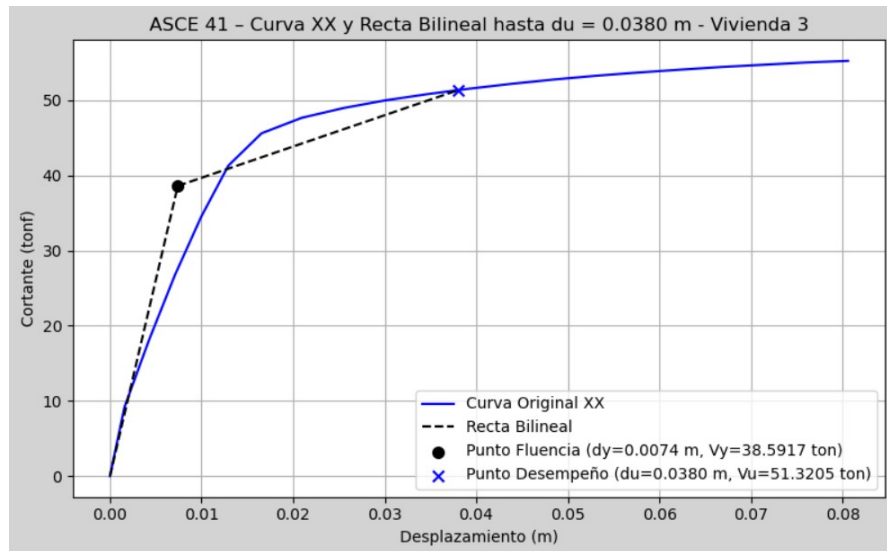
La bilinealización se realizó según la metodología **ASCE 41-17**, determinando los puntos de fluencia y desempeño de la estructura.

Figura 97*Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-03*

Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (azul) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 98

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-03



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0074$ m, $V_y = 38.5917$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0380$ m, $V_u = 51.3205$ tonf.

El Cuadro 52 presenta los parámetros de la bilinealización en la dirección X.

Cuadro 52

Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-03

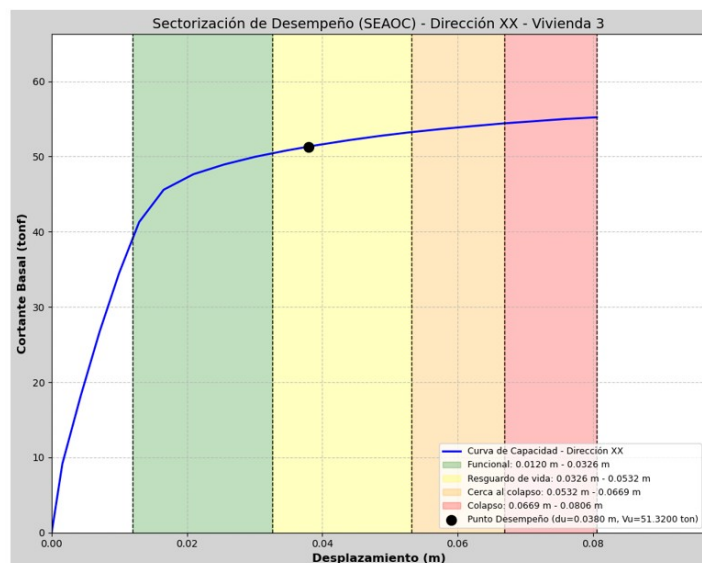
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	55.197	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0074	m
Cortante de fluencia V_y	38.5917	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0380	m
Cortante de desempeño V_u	51.3205	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología ASCE 41-17.

3.13.4.3 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección X.

Figura 99

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-03



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0380$ m, $V_u = 51.3200$ tonf.

Cuadro 53

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-03

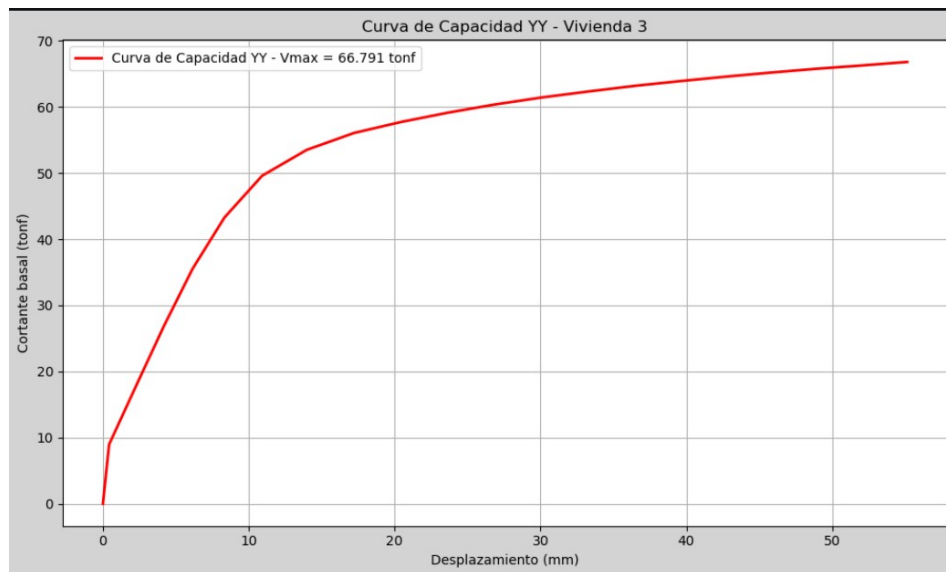
Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0120	0.0326
Resguardo de vida	0.0326	0.0532
Cerca al colapso	0.0532	0.0669
Colapso	0.0669	0.0806

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0380$ m) se ubica dentro del rango 0.0326–0.0532 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**. Este nivel indica que la estructura sufriría daño moderado ante el sismo de diseño, siendo posible la ocupación restringida tras reparaciones.

3.13.4.4 Curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 100

Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-03

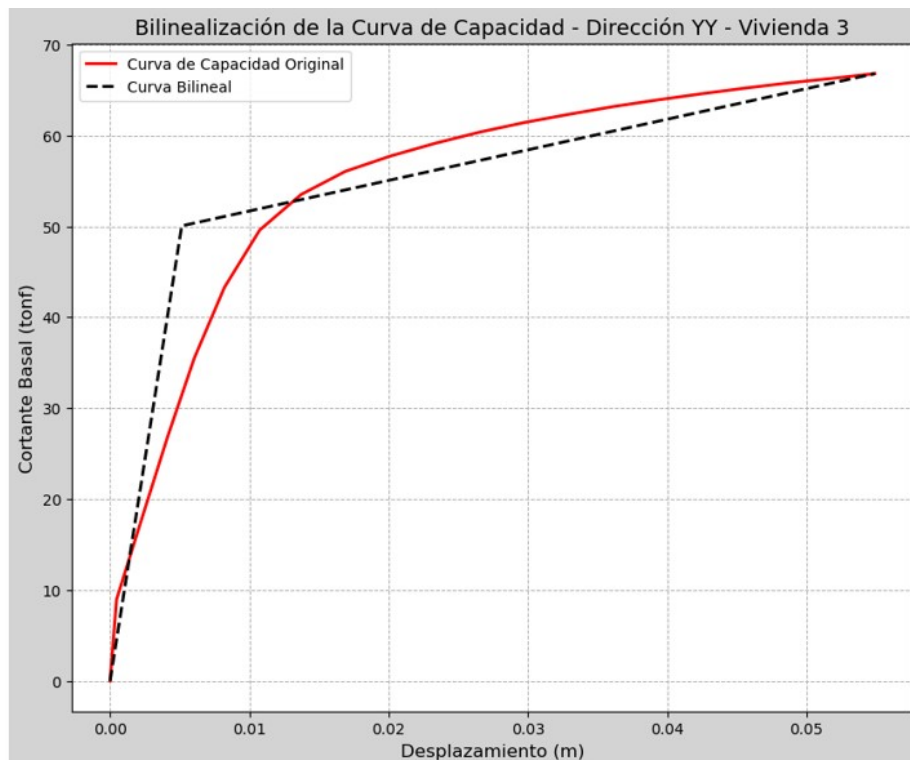


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 66.791$ tonf. Desplazamiento máximo: 55 mm.

3.13.4.5 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 101

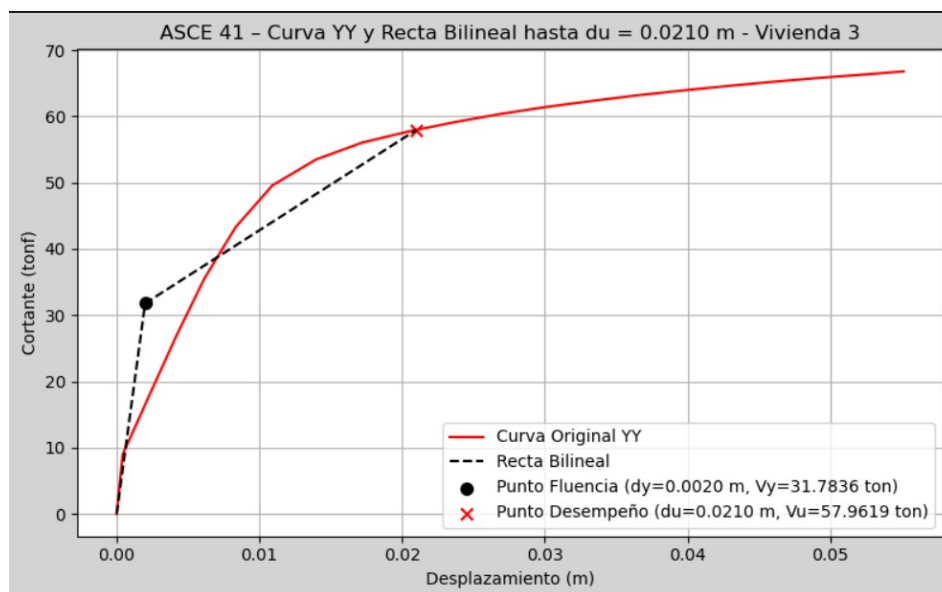
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-03



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (rojo) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 102

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-03



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0020$ m, $V_y = 31.7836$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0210$ m, $V_u = 57.9619$ tonf.

Cuadro 54

Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-03

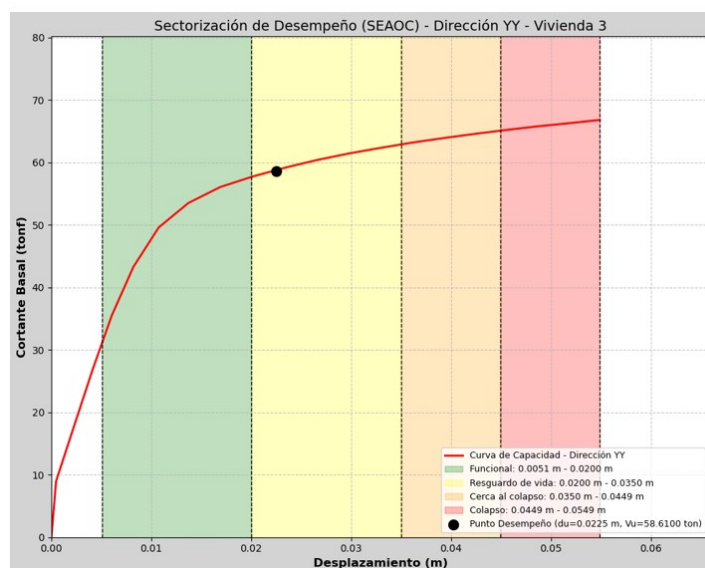
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	66.791	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0020	m
Cortante de fluencia V_y	31.7836	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0225	m
Cortante de desempeño V_u	58.6100	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**. La ductilidad $\mu = d_u/d_y = 0.0225/0.0020 = 11.25$, indicando un comportamiento de alta deformabilidad en esta dirección.

3.13.4.6 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y.

Figura 103

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-03



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0225$ m, $V_u = 58.6100$ tonf.

Cuadro 55

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-03

Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0051	0.0200
Resguardo de vida	0.0200	0.0350
Cerca al colapso	0.0350	0.0449
Colapso	0.0449	0.0549

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0225$ m) se ubica dentro del rango 0.0200–0.0350 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**. Este nivel indica daño moderado con posibilidad de ocupación restringida tras las reparaciones pertinentes.

3.13.4.7 Resumen de resultados - Vivienda V-03.

El Cuadro 56 presenta un resumen comparativo de los resultados del análisis pushover en ambas direcciones para la Vivienda V-03.

Cuadro 56*Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-03*

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Cortante basal máximo V_{max} (tonf)	55.197	66.791
Cortante de fluencia V_y (tonf)	38.5917	31.7836
Desplazamiento de fluencia d_y (m)	0.0074	0.0020
Cortante de desempeño V_u (tonf)	51.3205	58.6100
Desplazamiento de desempeño d_u (m)	0.0380	0.0225
Ductilidad $\mu = d_u/d_y$	5.14	11.25
Nivel de desempeño (SEAO)	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. La Vivienda V-03 presenta un nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según la filosofía **SEAO Vision 2000**, indicando que ante el sismo de diseño la estructura experimentaría daño moderado con posibilidad de ocupación restringida. La dirección Y presenta mayor capacidad resistente ($V_{max} = 66.791$ tonf) pero menor rigidez inicial, evidenciada por el menor desplazamiento de fluencia ($d_y = 0.0020$ m).

Los resultados de la Vivienda V-03 muestran un comportamiento diferenciado respecto a las Viviendas V-01 y V-02. Mientras que V-01 y V-02 alcanzaron el nivel **Funcional** en la dirección X según **SEAO Vision 2000**, la V-03 presenta un nivel de **Resguardo de vida** en ambas direcciones, lo cual puede atribuirse a su menor área en planta (configuración en L, ≈ 32.94 m²) y la consecuente menor densidad de muros resistentes respecto a las dimensiones totales de la edificación.

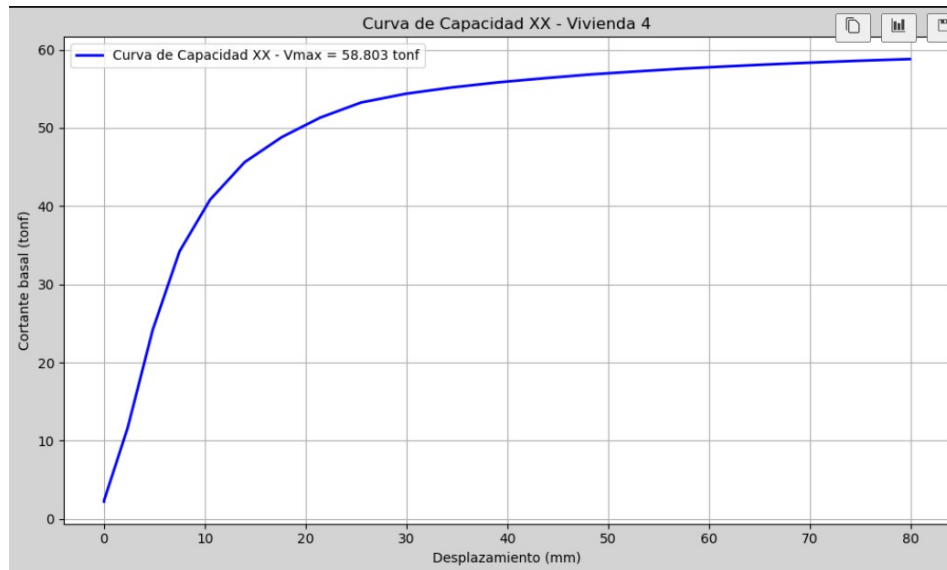
3.13.5. Vivienda V-04

La Vivienda V-04 corresponde a una edificación de adobe de dos niveles con configuración rectangular y chaflán en la esquina inferior izquierda, ubicada en el distrito de Huancaray. El modelamiento numérico en DIANA FEA siguió el mismo procedimiento descrito para las Viviendas V-01 y V-02, empleando el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)**, el método iterativo Newton-Raphson con control de longitud de arco y mallado de elementos sólidos hexaédricos. A continuación se presentan los resultados del análisis pushover en ambas direcciones.

3.13.5.1 Curva de capacidad - Dirección X.

Figura 104

Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-04

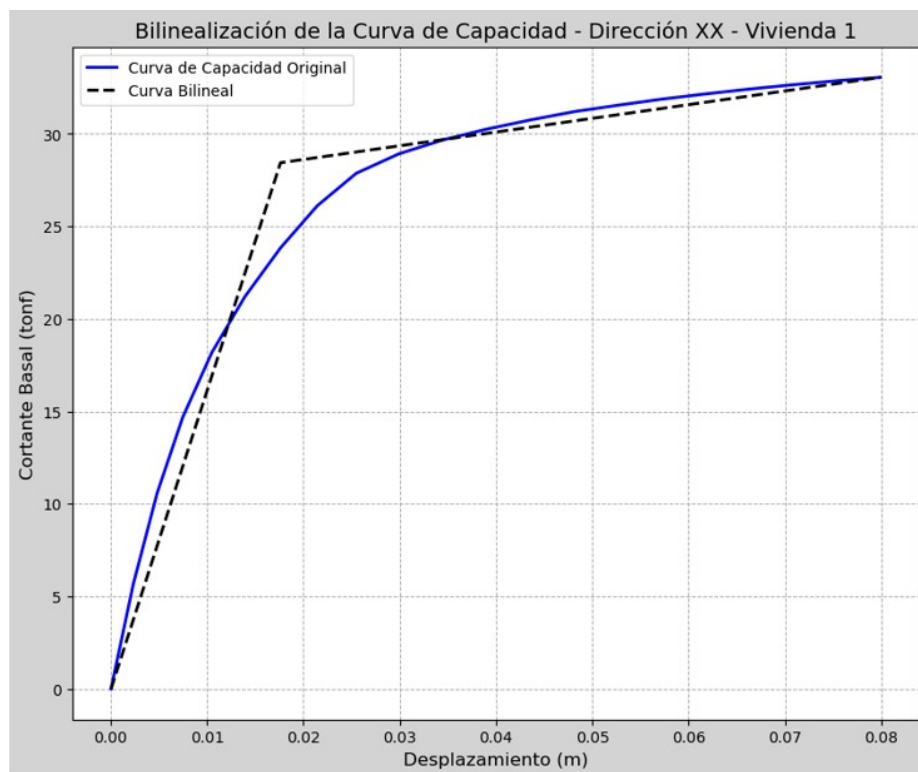


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 58.803$ tonf. Desplazamiento máximo: 80 mm.

3.13.5.2 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X.

Figura 105

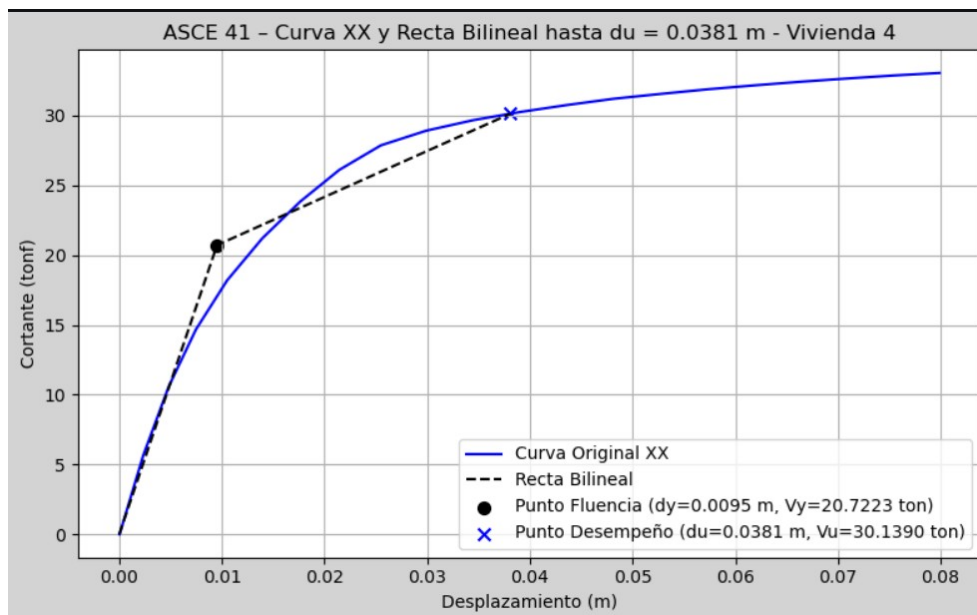
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-04



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (azul) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 106

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-04



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0095$ m, $V_y = 20.7223$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0381$ m, $V_u = 30.1390$ tonf.

Cuadro 57

Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-04

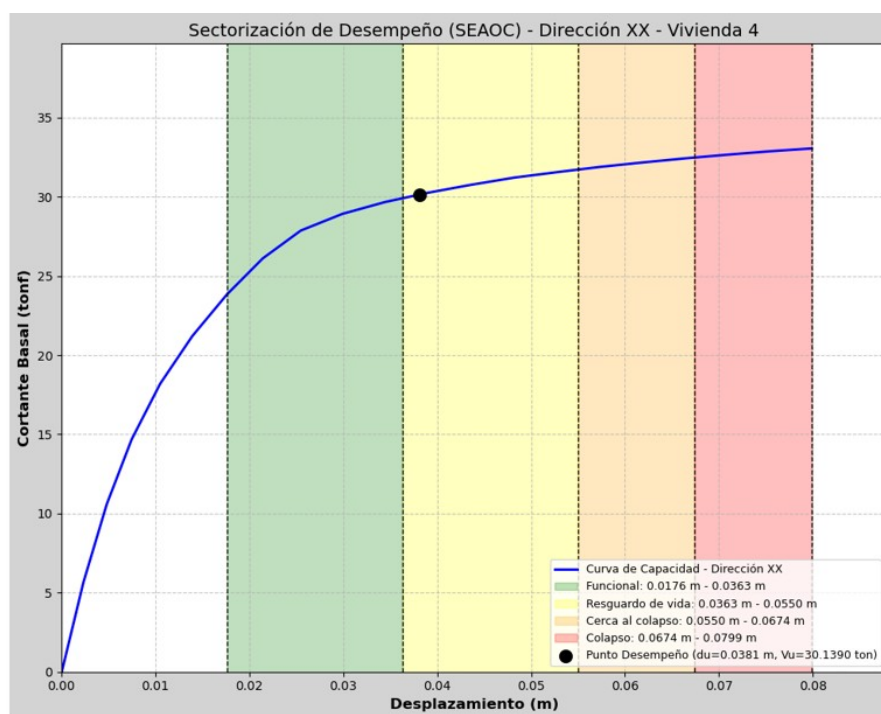
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	58.803	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0095	m
Cortante de fluencia V_y	20.7223	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0381	m
Cortante de desempeño V_u	30.1390	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**.

3.13.5.3 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección X.

Figura 107

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-04



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0381$ m, $V_u = 30.1390$ tonf.

Cuadro 58

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-04

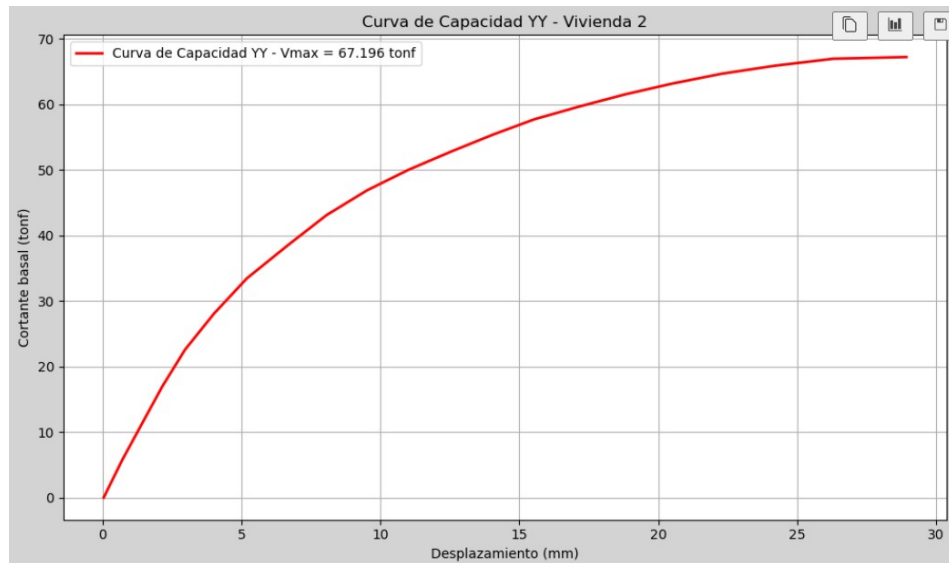
Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0176	0.0363
Resguardo de vida	0.0363	0.0550
Cerca al colapso	0.0550	0.0674
Colapso	0.0674	0.0799

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0381$ m) se ubica dentro del rango 0.0363–0.0550 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**. Este nivel indica daño moderado con posibilidad de ocupación restringida tras las reparaciones pertinentes.

3.13.5.4 Curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 108

Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-04

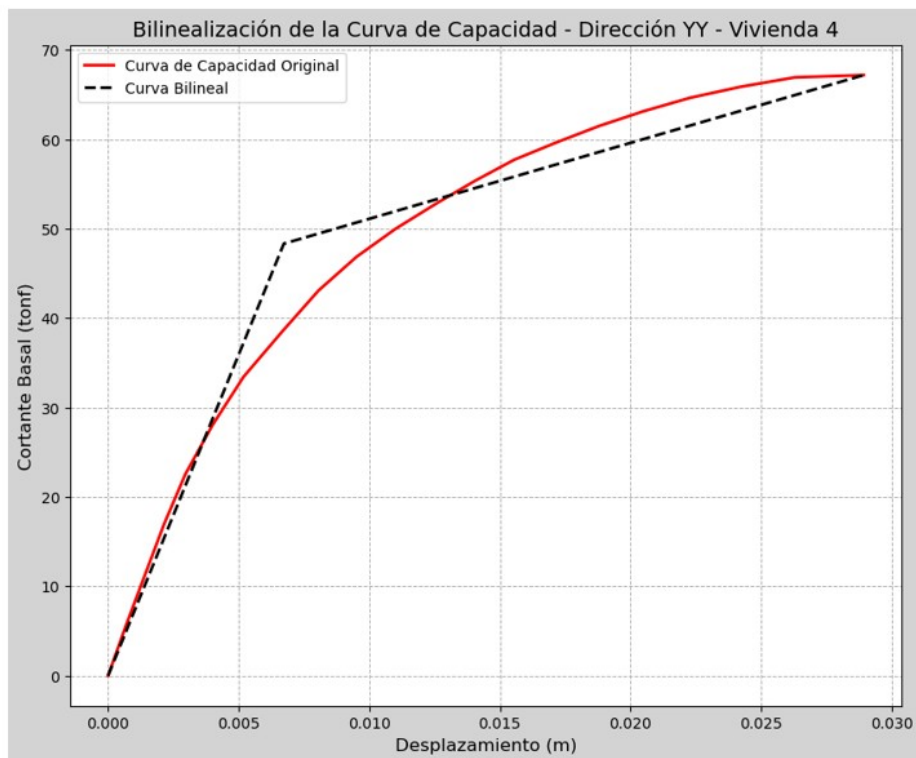


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 67.196$ tonf. Desplazamiento máximo: 30 mm.

3.13.5.5 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 109

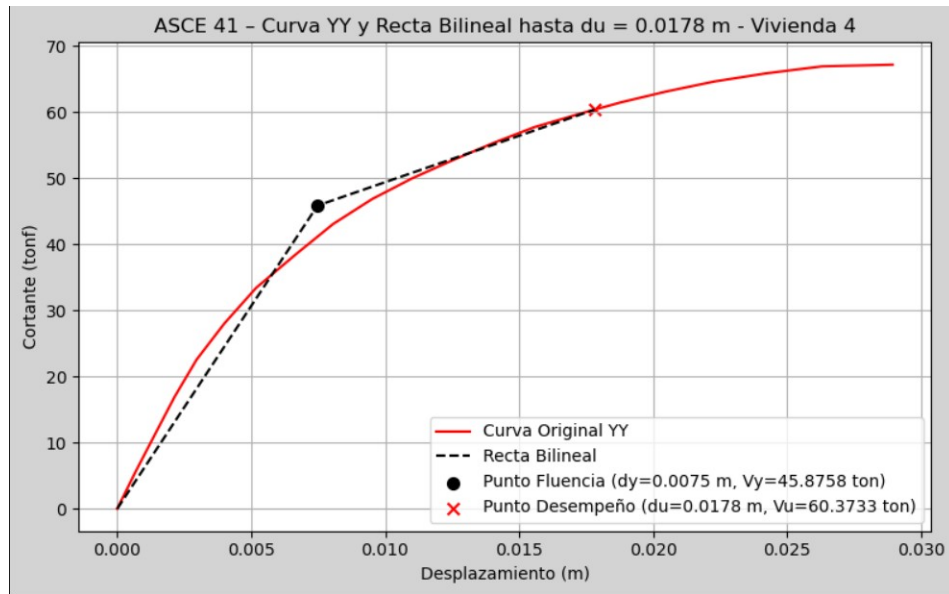
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-04



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (rojo) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 110

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-04



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0075$ m, $V_y = 45.8758$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0178$ m, $V_u = 60.3733$ tonf.

Cuadro 59

Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-04

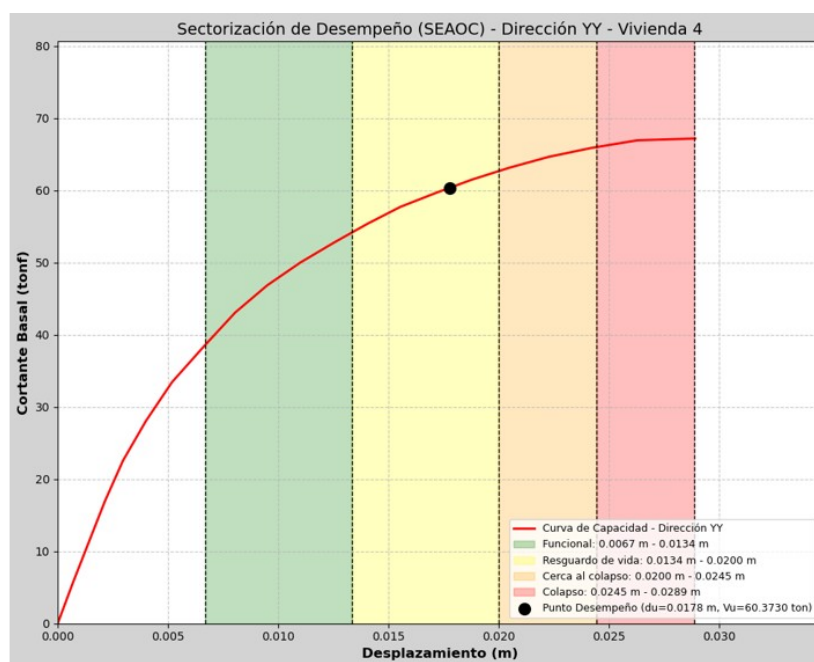
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	67.196	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0075	m
Cortante de fluencia V_y	45.8758	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0178	m
Cortante de desempeño V_u	60.3733	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**.

3.13.5.6 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y.

Figura 111

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-04



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0178$ m, $V_u = 60.3733$ tonf.

Cuadro 60

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-04

Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0067	0.0134
Resguardo de vida	0.0134	0.0200
Cerca al colapso	0.0200	0.0245
Colapso	0.0245	0.0289

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0178$ m) se ubica dentro del rango 0.0134–0.0200 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**.

3.13.5.7 Resumen de resultados - Vivienda V-04.

Cuadro 61

Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-04

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Cortante basal máximo V_{max} (tonf)	58.803	67.196
Cortante de fluencia V_y (tonf)	20.7223	45.8758
Desplazamiento de fluencia d_y (m)	0.0095	0.0075
Cortante de desempeño V_u (tonf)	30.1390	60.3733
Desplazamiento de desempeño d_u (m)	0.0381	0.0178
Ductilidad $\mu = d_u/d_y$	4.01	2.37
Nivel de desempeño (SEAOC)	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. La Vivienda V-04 presenta un nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según la filosofía **SEAOC Vision 2000**. La dirección Y exhibe mayor capacidad resistente ($V_{max} = 67.196$ tonf) y menor desplazamiento de desempeño ($d_u = 0.0178$ m), mientras que la dirección X presenta mayor deformabilidad ($d_u = 0.0381$ m) con menor capacidad resistente ($V_u = 30.1390$ tonf).

Los resultados de la Vivienda V-04 confirman el nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según **SEAOC Vision 2000**, consistente con los resultados obtenidos para la Vivienda V-03. La dirección X presenta una capacidad resistente notablemente inferior ($V_{max} = 58.803$ tonf frente a 67.196 tonf en Y), lo cual es atribuible a la menor densidad de muros en esa dirección.

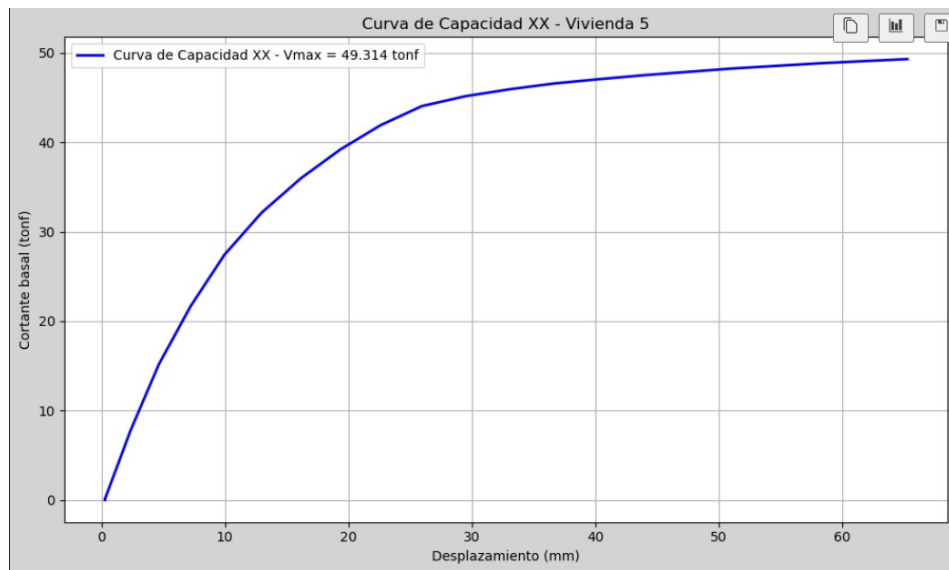
3.13.6. Vivienda V-05

La Vivienda V-05 corresponde a una edificación de adobe de dos niveles con configuración rectangular simple, ubicada en la zona urbana del distrito de Huancaray. El modelamiento numérico en DIANA FEA siguió el mismo procedimiento descrito para las Viviendas V-01 y V-02, empleando el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)**, el método iterativo Newton-Raphson con control de longitud de arco y mallado de elementos sólidos hexaédricos. A continuación se presentan los resultados del análisis pushover en ambas direcciones.

3.13.6.1 Curva de capacidad - Dirección X.

Figura 112

Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-05

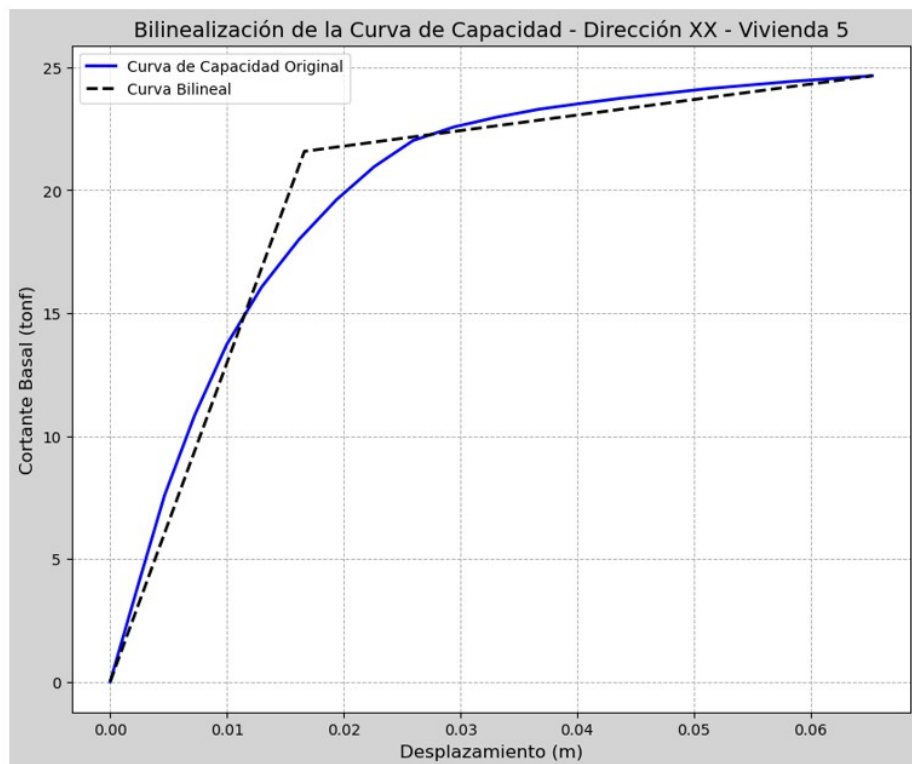


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 49.314$ tonf. Desplazamiento máximo: 65 mm.

3.13.6.2 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X.

Figura 113

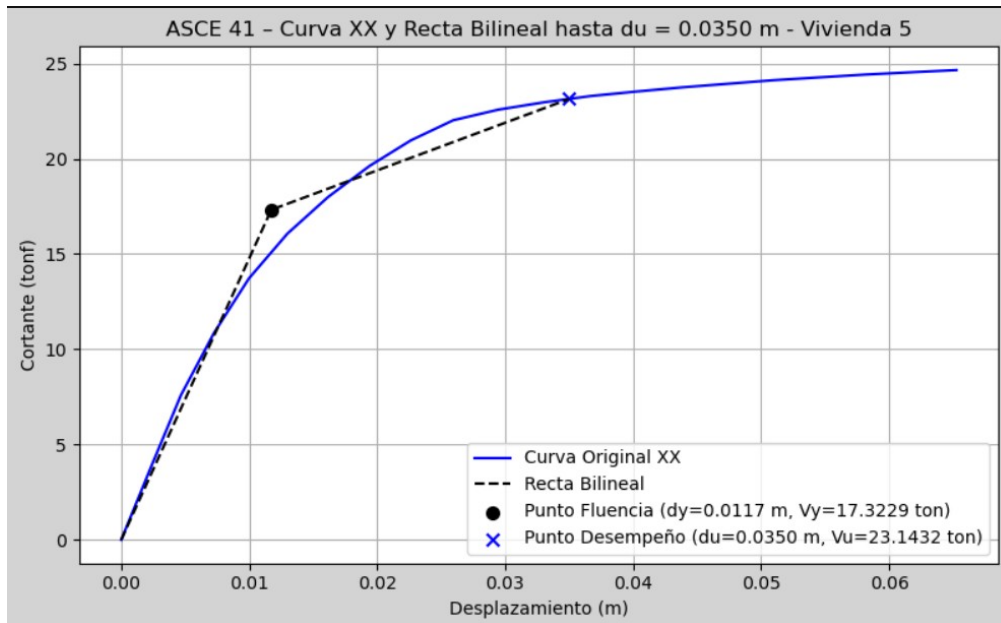
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (azul) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 114

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0117$ m, $V_y = 17.3229$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0350$ m, $V_u = 23.1432$ tonf.

Cuadro 62

Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-05

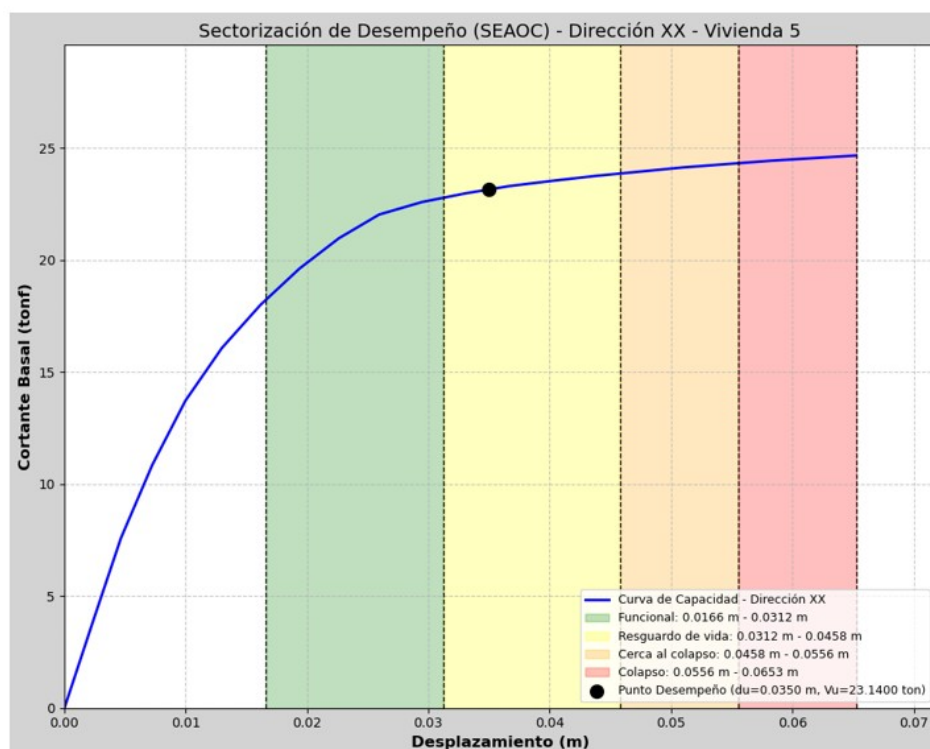
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	49.314	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0117	m
Cortante de fluencia V_y	17.3229	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0350	m
Cortante de desempeño V_u	23.1432	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**.

3.13.6.3 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección X.

Figura 115

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0350$ m, $V_u = 23.1400$ tonf.

Cuadro 63

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-05

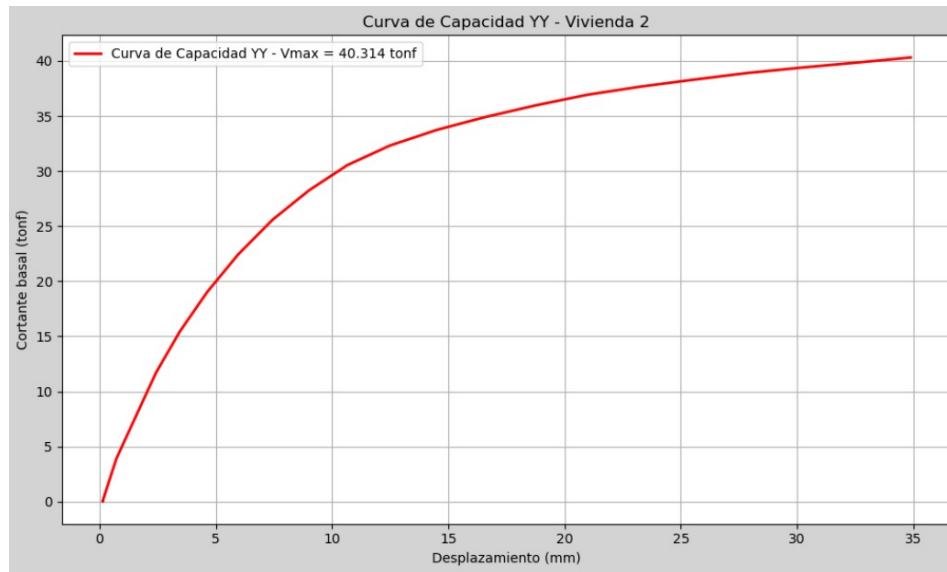
Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0166	0.0312
Resguardo de vida	0.0312	0.0458
Cerca al colapso	0.0458	0.0556
Colapso	0.0556	0.0653

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0350$ m) se ubica dentro del rango 0.0312–0.0458 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**. Este nivel indica daño moderado con posibilidad de ocupación restringida tras las reparaciones pertinentes.

3.13.6.4 Curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 116

Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-05

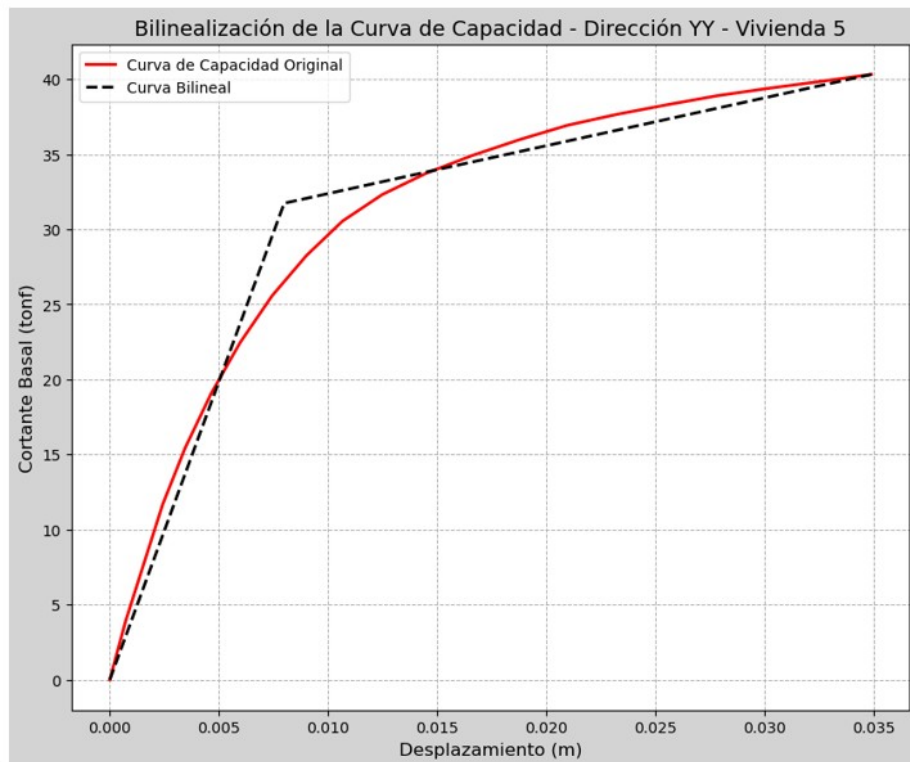


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 40.314$ tonf. Desplazamiento máximo: 35 mm.

3.13.6.5 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 117

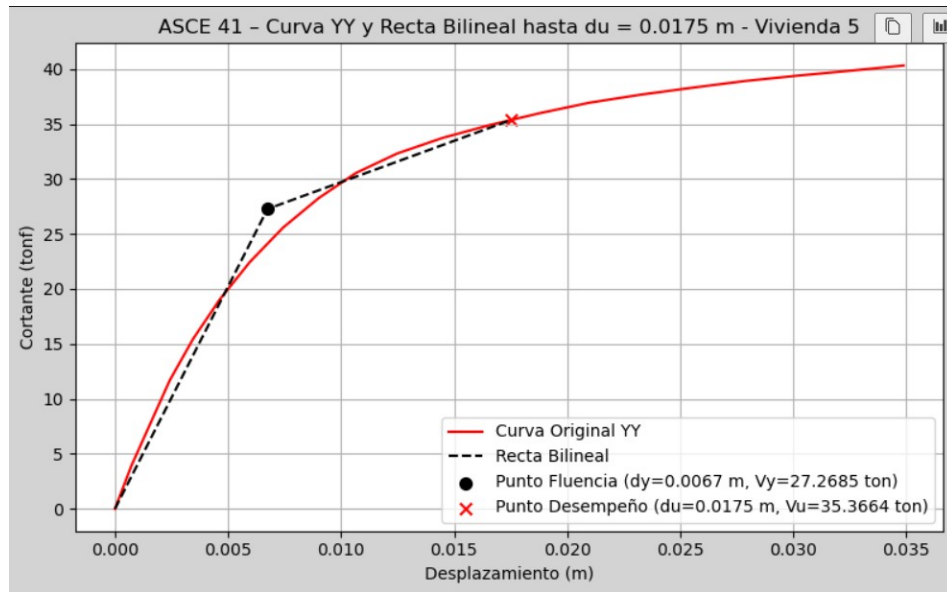
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (rojo) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 118

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0067$ m, $V_y = 27.2685$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0175$ m, $V_u = 35.3664$ tonf.

Cuadro 64

Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-05

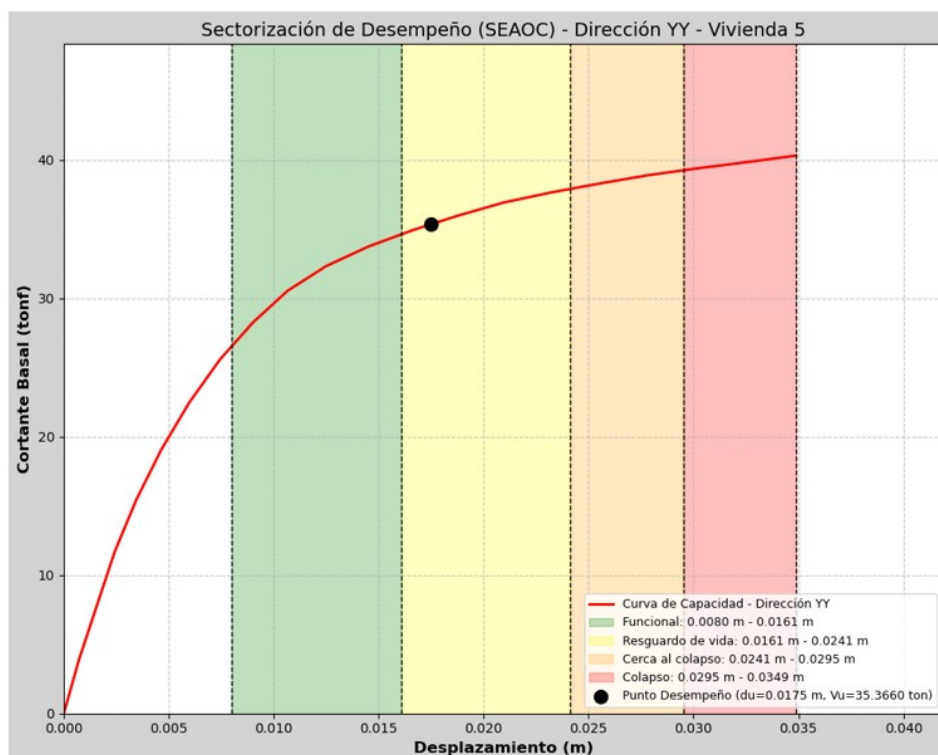
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	40.314	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0067	m
Cortante de fluencia V_y	27.2685	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0175	m
Cortante de desempeño V_u	35.3664	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**.

3.13.6.6 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y.

Figura 119

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-05



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0175$ m, $V_u = 35.3660$ tonf.

Cuadro 65

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-05

Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0080	0.0161
Resguardo de vida	0.0161	0.0241
Cerca al colapso	0.0241	0.0295
Colapso	0.0295	0.0349

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0175$ m) se ubica dentro del rango 0.0161–0.0241 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**.

3.13.6.7 Resumen de resultados - Vivienda V-05.

Cuadro 66

Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-05

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Cortante basal máximo V_{max} (tonf)	49.314	40.314
Cortante de fluencia V_y (tonf)	17.3229	27.2685
Desplazamiento de fluencia d_y (m)	0.0117	0.0067
Cortante de desempeño V_u (tonf)	23.1432	35.3664
Desplazamiento de desempeño d_u (m)	0.0350	0.0175
Ductilidad $\mu = d_u/d_y$	2.99	2.61
Nivel de desempeño (SEAOC)	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. La Vivienda V-05 presenta un nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según la filosofía **SEAOC Vision 2000**. La dirección X exhibe mayor capacidad resistente ($V_{max} = 49.314$ tonf) y mayor deformabilidad ($d_u = 0.0350$ m), mientras que la dirección Y presenta menor capacidad resistente ($V_{max} = 40.314$ tonf) y menor desplazamiento de desempeño ($d_u = 0.0175$ m), reflejando la diferencia en densidad de muros entre ambas direcciones.

Los resultados de la Vivienda V-05 confirman el nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según **SEAOC Vision 2000**, en concordancia con los resultados de las Viviendas V-03 y V-04. Destaca que la V-05 presenta los valores más bajos de cortante basal máximo en la dirección Y ($V_{max} = 40.314$ tonf) entre las seis viviendas analizadas, lo cual puede atribuirse a su configuración rectangular simple con menor densidad de muros en esa dirección.

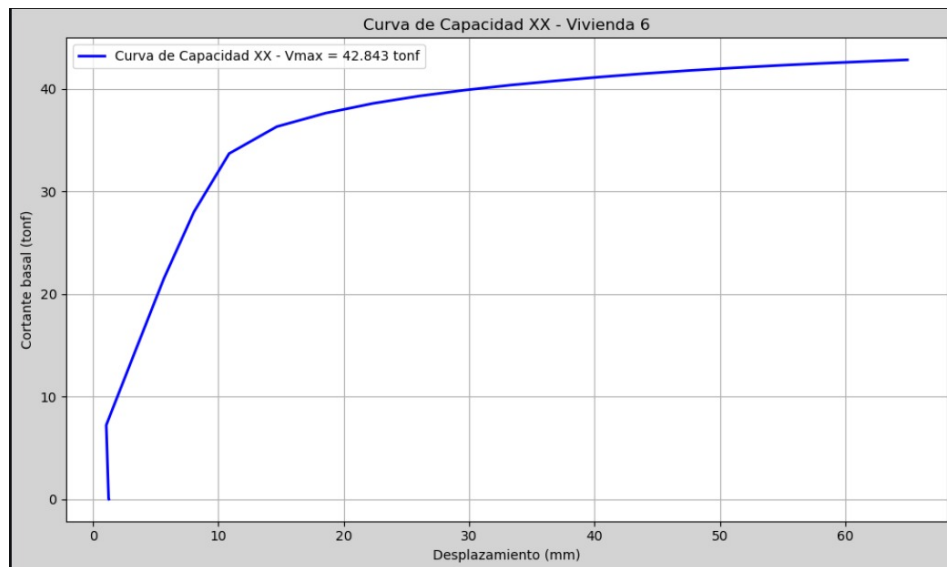
3.13.7. Vivienda V-06

La Vivienda V-06 corresponde a una edificación de adobe de dos niveles con configuración rectangular y chaflán en la esquina inferior izquierda, ubicada en la zona urbana del distrito de Huancaray. El modelamiento numérico en DIANA FEA siguió el mismo procedimiento descrito para las Viviendas V-01 y V-02, empleando el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)**, el método iterativo Newton-Raphson con control de longitud de arco y mallado de elementos sólidos hexaédricos. A continuación se presentan los resultados del análisis pushover en ambas direcciones.

3.13.7.1 Curva de capacidad - Dirección X.

Figura 120

Curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-06

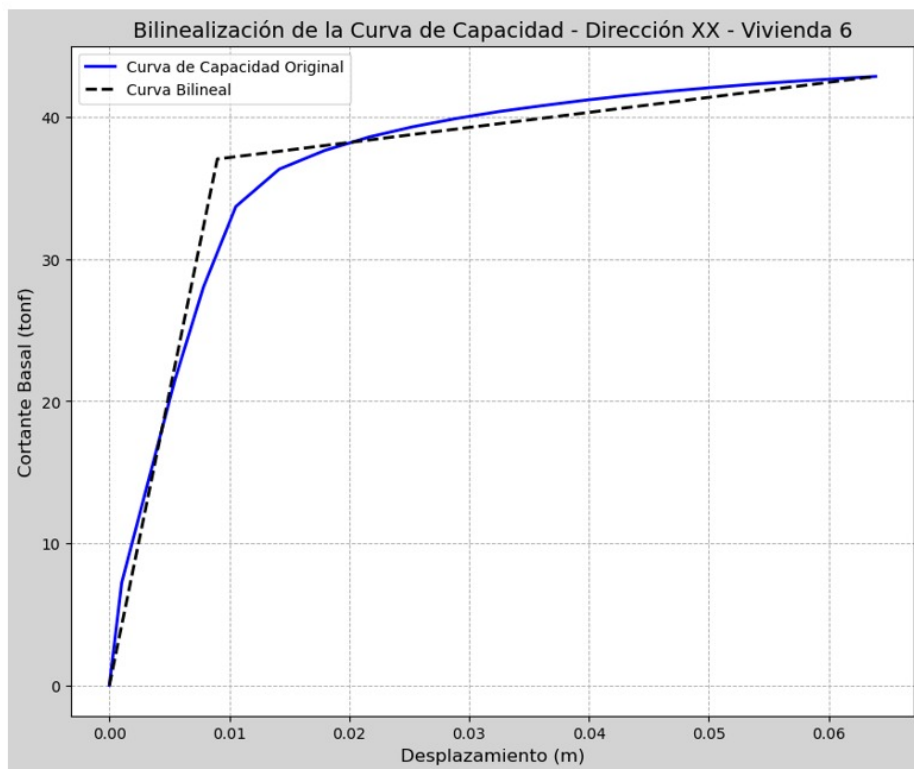


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 42.843$ tonf. Desplazamiento máximo: 65 mm.

3.13.7.2 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X.

Figura 121

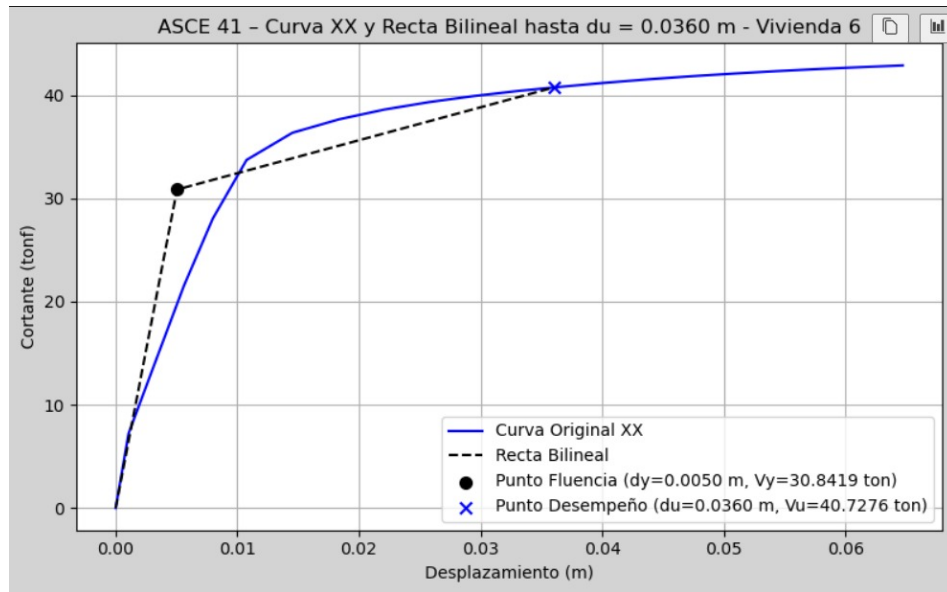
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección X - Vivienda V-06



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (azul) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 122

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección X - Vivienda V-06



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0050$ m, $V_y = 30.8419$ tonf. Punto de desempeño (x): $d_u = 0.0360$ m, $V_u = 40.7276$ tonf.

Cuadro 67

Parámetros de la curva bilineal - Dirección X - Vivienda V-06

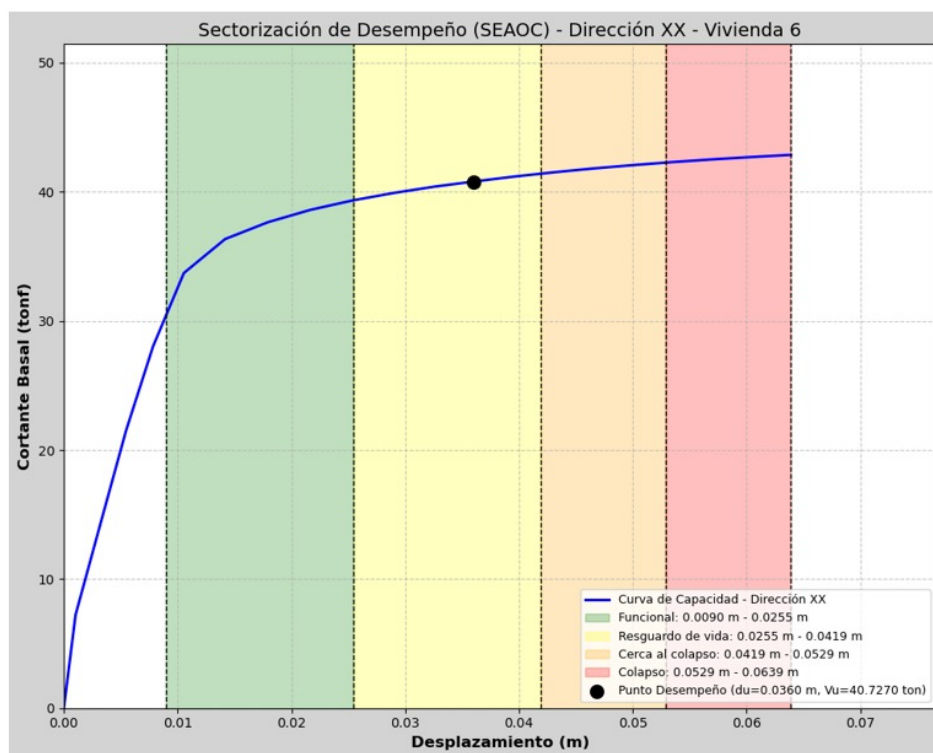
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	42.843	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0050	m
Cortante de fluencia V_y	30.8419	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0360	m
Cortante de desempeño V_u	40.7276	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**.

3.13.7.3 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección X.

Figura 123

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-06



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0360$ m, $V_u = 40.7270$ tonf.

Cuadro 68

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección X - Vivienda V-06

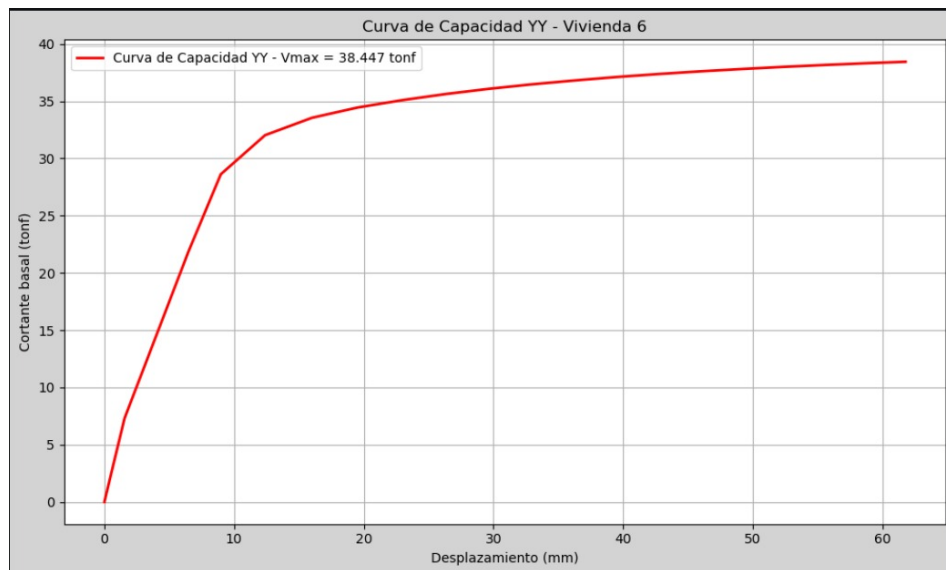
Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0090	0.0255
Resguardo de vida	0.0255	0.0419
Cerca al colapso	0.0419	0.0529
Colapso	0.0529	0.0639

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0360$ m) se ubica dentro del rango 0.0255–0.0419 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**. Este nivel indica daño moderado con posibilidad de ocupación restringida tras las reparaciones pertinentes.

3.13.7.4 Curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 124

Curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-06

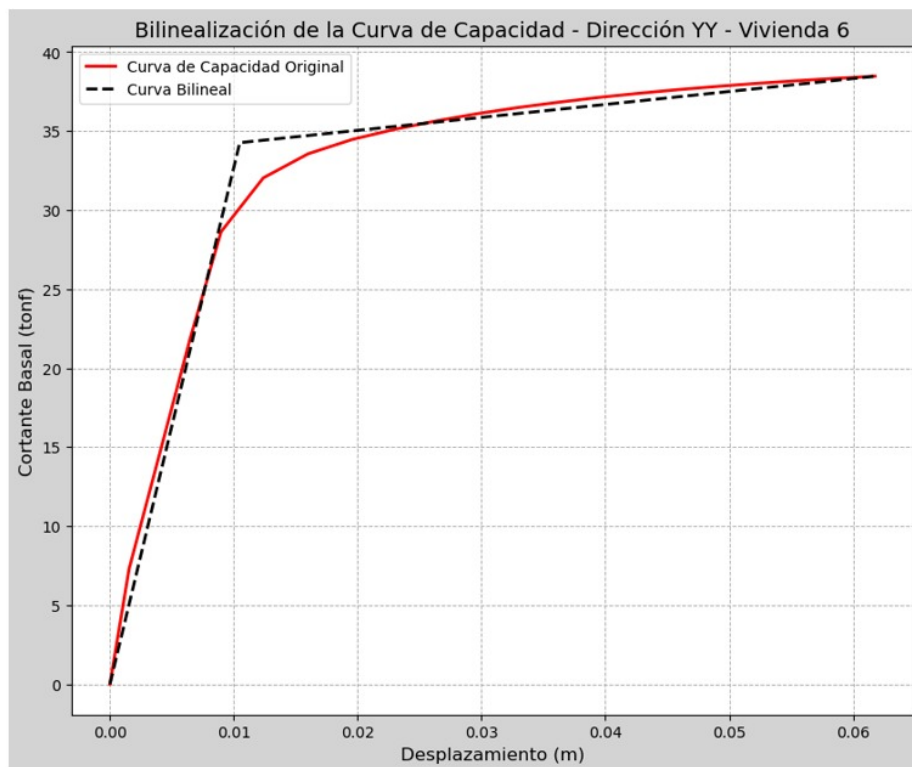


Nota. Elaboración propia. Cortante basal máximo: $V_{max} = 38.447$ tonf. Desplazamiento máximo: 62 mm.

3.13.7.5 Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y.

Figura 125

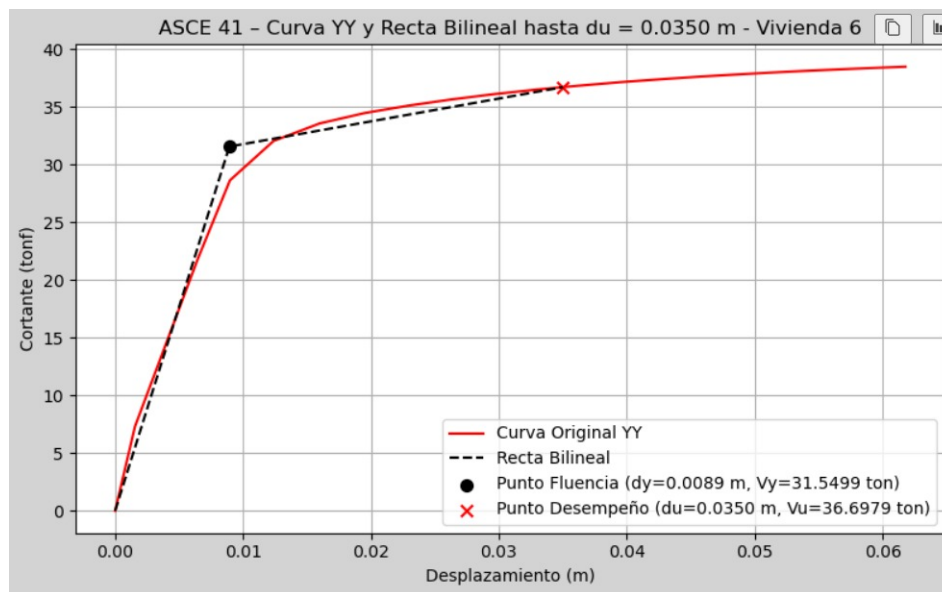
Bilinealización de la curva de capacidad - Dirección Y - Vivienda V-06



Nota. Elaboración propia. Curva de capacidad original (rojo) y aproximación bilineal (negro discontinuo).

Figura 126

Curva ASCE 41 con puntos de fluencia y desempeño - Dirección Y - Vivienda V-06



Nota. Elaboración propia. Punto de fluencia (●): $d_y = 0.0089$ m, $V_y = 31.5499$ tonf. Punto de desempeño (×): $d_u = 0.0350$ m, $V_u = 36.6979$ tonf.

Cuadro 69

Parámetros de la curva bilineal - Dirección Y - Vivienda V-06

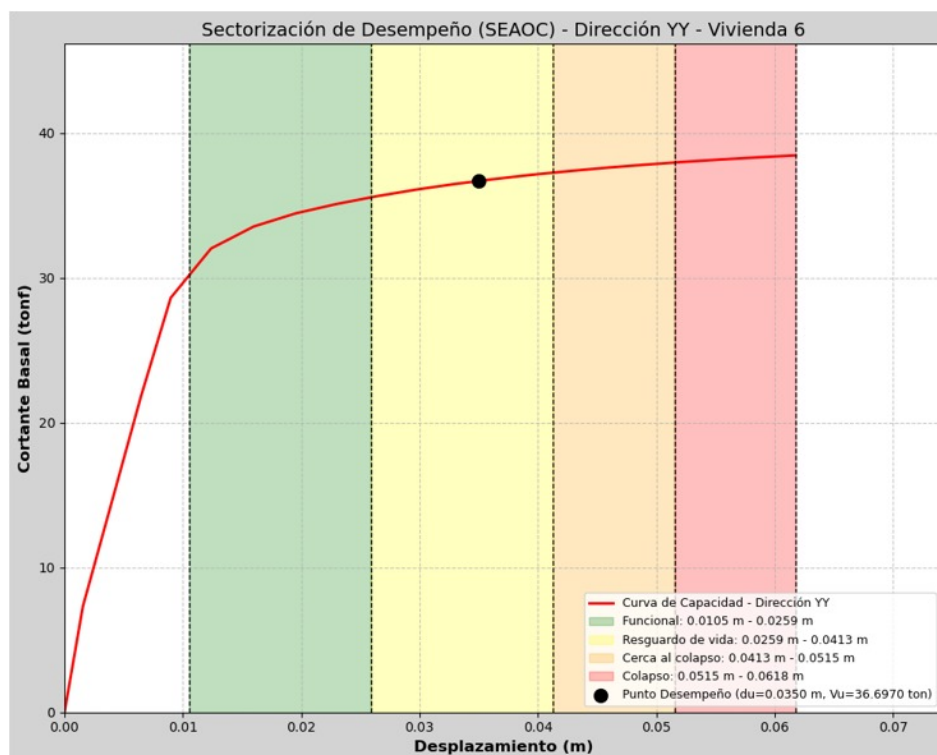
Parámetro	Valor	Unidad
Cortante basal máximo V_{max}	38.447	tonf
Desplazamiento de fluencia d_y	0.0089	m
Cortante de fluencia V_y	31.5499	tonf
Desplazamiento de desempeño d_u	0.0350	m
Cortante de desempeño V_u	36.6979	tonf

Nota. Parámetros calculados según metodología **ASCE 41-17**.

3.13.7.6 Sectorización del desempeño sísmico según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y.

Figura 127

Sectorización de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-06



Nota. Elaboración propia. Niveles de desempeño según **SEAOC Vision 2000**: Funcional (verde), Resguardo de vida (amarillo claro), Cerca al colapso (naranja), Colapso (rojo). Punto de desempeño: $d_u = 0.0350$ m, $V_u = 36.6970$ tonf.

Cuadro 70

Sectorización de niveles de desempeño según SEAOC Vision 2000 - Dirección Y - Vivienda V-06

Nivel de desempeño (SEAOC)	Rango inferior (m)	Rango superior (m)
Funcional	0.0105	0.0259
Resguardo de vida	0.0259	0.0413
Cerca al colapso	0.0413	0.0515
Colapso	0.0515	0.0618

Nota. Sectorización según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El punto de desempeño ($d_u = 0.0350$ m) se ubica dentro del rango 0.0259–0.0413 m, correspondiente al nivel **Resguardo de vida**.

3.13.7 Resumen de resultados - Vivienda V-06.

Cuadro 71

Resumen de resultados del análisis pushover - Vivienda V-06

Parámetro	Dirección X	Dirección Y
Cortante basal máximo V_{max} (tonf)	42.843	38.447
Cortante de fluencia V_y (tonf)	30.8419	31.5499
Desplazamiento de fluencia d_y (m)	0.0050	0.0089
Cortante de desempeño V_u (tonf)	40.7276	36.6979
Desplazamiento de desempeño d_u (m)	0.0360	0.0350
Ductilidad $\mu = d_u/d_y$	7.20	3.93
Nivel de desempeño (SEAO)	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. La Vivienda V-06 presenta un nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según la filosofía **SEAO Vision 2000**. La dirección X exhibe mayor capacidad resistente ($V_{max} = 42.843$ tonf) y mayor ductilidad ($\mu = 7.20$), mientras que la dirección Y presenta menor capacidad resistente ($V_{max} = 38.447$ tonf) con valores de fluencia y desempeño más cercanos entre sí.

Los resultados de la Vivienda V-06 confirman el nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones según **SEAO Vision 2000**, en concordancia con los resultados obtenidos para las Viviendas V-03, V-04 y V-05. La V-06 presenta los valores más bajos de cortante basal máximo entre las viviendas de dos niveles analizadas en la dirección Y ($V_{max} = 38.447$ tonf), lo cual refleja la menor densidad de muros resistentes en esa dirección respecto a su configuración en planta.

3.13.8. Resumen general de resultados del análisis pushover

El Cuadro 72 presenta una síntesis comparativa de los parámetros más relevantes obtenidos del análisis pushover no lineal para las seis viviendas de estudio en ambas direcciones de análisis.

Cuadro 72*Resumen general de resultados del análisis pushover - Seis viviendas de estudio*

Vivienda	Dir.	V_{max} (tonf)	V_y (tonf)	d_y (m)	d_u (m)	μ	Nivel desempeño (SEAOC)
V-01	X	67.63	54.37	0.0136	0.0320	2.35	Funcional
	Y	96.56	66.16	0.0090	0.0262	2.91	Funcional
V-02	X	82.30	66.81	0.0042	0.0247	5.88	Funcional
	Y	50.14	44.70	0.0243	0.1186	4.88	Resguardo de vida
V-03	X	55.197	38.5917	0.0074	0.0380	5.14	Resguardo de vida
	Y	66.791	31.7836	0.0020	0.0225	11.25	Resguardo de vida
V-04	X	58.803	20.7223	0.0095	0.0381	4.01	Resguardo de vida
	Y	67.196	45.8758	0.0075	0.0178	2.37	Resguardo de vida
V-05	X	49.314	17.3229	0.0117	0.0350	2.99	Resguardo de vida
	Y	40.314	27.2685	0.0067	0.0175	2.61	Resguardo de vida
V-06	X	42.843	30.8419	0.0050	0.0360	7.20	Resguardo de vida
	Y	38.447	31.5499	0.0089	0.0350	3.93	Resguardo de vida

Nota. V_{max} : cortante basal máximo; V_y : cortante de fluencia; d_y : desplazamiento de fluencia; d_u : desplazamiento de desempeño; $\mu = d_u/d_y$: ductilidad. Los niveles de desempeño corresponden a la clasificación según la filosofía **SEAOC Vision 2000**. La bilinealización de las curvas de capacidad fue realizada según la metodología **ASCE 41-17**.

3.13.8.1 Análisis comparativo de los resultados.

Los resultados del análisis pushover no lineal permiten establecer las siguientes observaciones comparativas entre las seis viviendas evaluadas:

Respecto a la capacidad resistente: La Vivienda V-01 presenta la mayor capacidad resistente en la dirección Y ($V_{max} = 96.56$ tonf), lo cual es atribuible a su mayor número de niveles (3 pisos) que incrementa la masa y la rigidez del sistema. En el extremo opuesto, la Vivienda V-06 presenta el menor cortante basal en la dirección Y ($V_{max} = 38.447$ tonf), reflejando la menor densidad de muros resistentes en esa dirección. En términos generales, las Viviendas V-01 y V-02 exhiben mayores capacidades resistentes que las Viviendas V-03 a V-06, lo cual puede atribuirse a sus mayores dimensiones en planta y mayor área de muros portantes.

Respecto a la ductilidad: Los valores de ductilidad obtenidos oscilan entre $\mu = 2.35$ (V-01, dirección X) y $\mu = 11.25$ (V-03, dirección Y), evidenciando un comportamiento predominantemente frágil a semiductil, característico de las construcciones de adobe sin reforzamiento. Los valores más elevados de ductilidad no implican necesariamente mejor

desempeño sísmico, sino que en algunos casos reflejan una fluencia temprana seguida de una degradación gradual de rigidez.

Respecto al nivel de desempeño según SEAOC Vision 2000: Las Viviendas V-01 y V-02 (dirección X) alcanzan el nivel **Funcional**, indicando que ante el sismo de diseño la estructura mantendría su operatividad con daños menores. Las Viviendas V-03, V-04, V-05 y V-06 presentan el nivel **Resguardo de vida** en ambas direcciones, lo que implica daño moderado con posibilidad de ocupación restringida tras reparaciones. La Vivienda V-02 en la dirección Y presenta el nivel de desempeño más desfavorable, con un desplazamiento de desempeño de $d_u = 0.1186$ m que supera ampliamente el rango Funcional.

Respecto al comportamiento direccional: Todas las viviendas presentan un comportamiento asimétrico entre las direcciones X e Y, lo cual es consistente con la diferente densidad de muros resistentes en cada dirección. Este comportamiento es una característica inherente a las viviendas de adobe con configuración rectangular, donde los muros longitudinales y transversales no presentan la misma densidad ni distribución.

El Cuadro 73 presenta la comparación entre los niveles de vulnerabilidad obtenidos mediante la metodología cualitativa **INDECI** y los niveles de desempeño determinados mediante el análisis numérico con la filosofía **SEAOC Vision 2000**.

Cuadro 73

Comparación de niveles de vulnerabilidad INDECI y desempeño SEAOC Vision 2000

Vivienda	Puntaje INDECI	Nivel INDECI	Nivel SEAOC Dir. X	Nivel SEAOC Dir. Y
V-01	39 pts	MUY ALTO	Funcional	Funcional
V-02	35 pts	MUY ALTO	Funcional	Resguardo de vida
V-03	24 pts	ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-04	28 pts	MUY ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-05	25 pts	MUY ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-06	25 pts	MUY ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. La vulnerabilidad según **INDECI** corresponde a una evaluación cualitativa mediante la Ficha FV-001INDECI-2010.03.29. El nivel de desempeño según **SEAOC Vision 2000** fue determinado a partir de la bilinealización de las curvas de capacidad según **ASCE 41-17**. Ambas metodologías constituyen enfoques complementarios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas de adobe.

La comparación entre ambas metodologías evidencia que la evaluación cualitativa **INDECI** clasifica a cinco de las seis viviendas con nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** (puntaje > 24 puntos), mientras que el análisis numérico con **SEAOC Vision 2000** diferencia entre los niveles **Funcional** (V-01 y V-02 en dirección X) y **Resguardo de vida** (V-03 a V-06 en ambas direcciones). Esta diferencia refleja la mayor capacidad discriminadora del modelamiento numérico no lineal para identificar el comportamiento estructural específico de cada edificación, aspecto que la evaluación cualitativa no puede capturar al no considerar las características geométricas particulares ni la respuesta dinámica de la estructura.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Comparación de capacidad resistente

El Cuadro 74 presenta la comparación de los parámetros de capacidad resistente de las seis viviendas analizadas en ambas direcciones principales.

Cuadro 74

Comparación de parámetros de capacidad resistente entre las seis viviendas

Parámetro	V-01 (X)	V-01 (Y)	V-02 (X)	V-02 (Y)	V-03 (X)	V-03 (Y)	V-04 (X)	V-04 (Y)	V-05 (X)	V-05 (Y)	V-06 (X)	V-06 (Y)
V_{max} (tonf)	67.63	96.56	82.30	50.14	55.197	66.791	58.803	67.196	49.314	40.314	42.843	38.447
V_y (tonf)	54.37	66.16	66.81	44.70	38.59	31.78	20.72	45.88	17.32	27.27	30.84	31.55
d_y (m)	0.0136	0.0090	0.0042	0.0243	0.0074	0.0020	0.0095	0.0075	0.0117	0.0067	0.0050	0.0089
d_u (m)	0.0320	0.0262	0.0247	0.1186	0.0380	0.0225	0.0381	0.0178	0.0350	0.0175	0.0360	0.0350
Ductilidad μ	2.35	2.91	5.88	4.88	5.14	11.25	4.01	2.37	2.99	2.61	7.20	3.93

Nota. V-01: 3 niveles, cobertura inclinada. V-02 a V-06: 2 niveles. V_{max} : cortante basal máximo; V_y : cortante de fluencia; d_y : desplazamiento de fluencia; d_u : desplazamiento de desempeño; μ : ductilidad.

Los resultados evidencian que la Vivienda V-01 presenta la mayor capacidad resistente en la dirección Y ($V_{max} = 96.56$ tonf), atribuible a su configuración de tres niveles que incrementa la masa y rigidez del sistema, así como a la mayor densidad de muros en dicha dirección. La Vivienda V-06 presenta los valores más bajos de cortante máximo en ambas direcciones ($V_{max} = 42.843$ tonf en X y 38.447 tonf en Y), reflejando la menor densidad de muros resistentes. La configuración geométrica y la distribución de muros son determinantes en la respuesta direccional de cada estructura.

4.1.2. Evaluación del nivel de desempeño sísmico

El Cuadro 75 resume los niveles de desempeño sísmico alcanzados por cada vivienda según la filosofía **SEAOC Vision 2000**.

Cuadro 75

Niveles de desempeño sísmico de las seis viviendas de estudio

Vivienda	Dirección X	Dirección Y	Nivel crítico
V-01 (3 niveles)	Funcional	Funcional	Funcional
V-02 (2 niveles)	Funcional	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-03 (2 niveles)	Resguardo de vida	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-04 (2 niveles)	Resguardo de vida	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-05 (2 niveles)	Resguardo de vida	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-06 (2 niveles)	Resguardo de vida	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. Niveles de desempeño según filosofía **SEAOC Vision 2000**. El nivel crítico corresponde al desempeño más desfavorable entre ambas direcciones de análisis.

La Vivienda V-01, a pesar de tener tres niveles, alcanza el nivel de desempeño **Funcional** en ambas direcciones según **SEAOC Vision 2000**, lo cual indica que mantendría su operatividad después de un sismo de diseño con daños menores que no comprometerían la seguridad estructural. La Vivienda V-02 presenta el nivel **Funcional** en la dirección X, pero alcanza el nivel **Resguardo de vida** en la dirección Y, evidenciando la influencia crítica de la configuración geométrica alargada y la menor densidad de muros transversales. Las Viviendas V-03 a V-06 presentan el nivel **Resguardo de vida** en ambas direcciones, indicando que ante el sismo de diseño experimentarían daño moderado con posibilidad de ocupación restringida tras las reparaciones correspondientes.

4.1.3. Correlación con la evaluación INDECI

El Cuadro 76 presenta la correlación entre los resultados de la evaluación cualitativa **INDECI** y el análisis numérico en DIANA FEA para las seis viviendas de estudio.

Cuadro 76

Correlación entre evaluación INDECI y análisis numérico DIANA FEA

Vivienda	Puntaje INDECI	Nivel INDECI	Nivel SEAOC Dir. X	Nivel SEAOC Dir. Y
V-01	39 pts	MUY ALTO	Funcional	Funcional
V-02	35 pts	MUY ALTO	Funcional	Resguardo de vida
V-03	24 pts	ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-04	28 pts	MUY ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-05	25 pts	MUY ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida
V-06	25 pts	MUY ALTO	Resguardo de vida	Resguardo de vida

Nota. La evaluación **INDECI** corresponde a la Ficha FV-001INDECI-2010.03.29. El nivel de desempeño **SEAOC Vision 2000** fue determinado mediante la bilinealización **ASCE 41-17** de las curvas de capacidad obtenidas del análisis pushover en DIANA FEA.

Se observa que la metodología **INDECI**, siendo un instrumento de evaluación rápida basado en parámetros cualitativos, clasifica cinco de las seis viviendas con nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** (puntaje > 24 puntos) y una con nivel **ALTO** (V-03, 24 puntos). Sin embargo, el análisis numérico detallado mediante el modelo **EMM** en DIANA FEA permite diferenciar el comportamiento estructural real de cada edificación, identificando que las Viviendas V-01 y V-02 (dirección X) presentan un desempeño **Funcional** según **SEAOC Vision 2000**, mientras que las Viviendas V-03 a V-06 alcanzan el nivel **Resguardo de vida**.

Resulta particularmente relevante que la Vivienda V-03, que obtuvo el menor puntaje **INDECI** (24 puntos, nivel ALTO), presenta no obstante el mismo nivel de desempeño **SEAOC** que las Viviendas V-04, V-05 y V-06 (nivel MUY ALTO según **INDECI**). Este hallazgo evidencia una limitación importante de la evaluación cualitativa: su incapacidad para capturar las características mecánicas específicas del material, la geometría estructural particular y la respuesta dinámica real de cada edificación, aspectos que sí son considerados en el modelamiento numérico no lineal.

4.1.4. Mecanismos de falla identificados

El análisis de los patrones de agrietamiento obtenidos del modelamiento numérico permitió identificar los mecanismos de falla predominantes en cada vivienda.

4.1.4.1 Vivienda V-01.

El mecanismo de falla principal corresponde al volcamiento de muros transversales, con concentración de grietas diagonales en las esquinas de los vanos de puertas y ventanas. El patrón de agrietamiento ponderado (Ekwnn) alcanzó un valor máximo de 20.38 mm en la dirección X, evidenciando un daño moderado localizado en los elementos de mayor esbeltez.

4.1.4.2 Vivienda V-02.

Se observó un mecanismo de falla por corte en los muros longitudinales (dirección X) y volcamiento pronunciado en los muros transversales (dirección Y). El ancho de grieta ponderado máximo fue de 90.50 mm, concentrado en la zona de conexión entre el muro y la losa de entrepiso. La configuración a dos aguas del techo contribuyó a la concentración de esfuerzos en los extremos de los muros de mayor altura.

4.1.4.3 Viviendas V-03 a V-06.

Las viviendas de dos niveles con configuraciones en L, rectangular simple y rectangular presentan mecanismos de falla caracterizados por la combinación de corte diagonal en muros y separación en las uniones muro–muro. La menor área en planta de estas viviendas, en comparación con V-01 y V-02, determina una menor capacidad de disipación de energía y una mayor susceptibilidad al agrietamiento ante desplazamientos laterales moderados. El nivel de desempeño **Resguardo de vida** obtenido en ambas direcciones es consistente con la presencia de daño moderado distribuido en los muros portantes, sin llegar al colapso estructural ante la demanda sísmica de diseño correspondiente a la Zona Sísmica 2 ($Z = 0.25$).

En todas las viviendas analizadas se confirma la ausencia de viga collar, conexión deficiente muro–techo y falta de arriostramiento lateral como factores que agravan los mecanismos de falla identificados, constituyendo vulnerabilidades estructurales comunes susceptibles de ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento específico.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de hipótesis específica 1

- **Hipótesis específica 01:** El análisis no lineal estático pushover mediante DIANA FEA demuestra que las viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un comportamiento estructural frágil, con capacidad de desplazamiento lateral limitada y mecanismos de falla predominantes por corte diagonal en muros.

4.2.1.1 Evidencia del comportamiento estructural frágil.

Los resultados del análisis pushover no lineal en las seis viviendas de estudio evidencian el comportamiento estructural frágil característico de las construcciones de adobe sin reforzamiento. El Cuadro 77 presenta los indicadores de fragilidad obtenidos del análisis numérico para cada vivienda y dirección de análisis.

Cuadro 77

Indicadores de comportamiento frágil de las seis viviendas de adobe

Indicador	V-01 X	V-01 Y	V-02 X	V-02 Y	V-03 X	V-03 Y	V-04 X	V-04 Y	V-05 X	V-05 Y	V-06 X	V-06 Y
Ductilidad μ	2.35	2.91	5.88	4.88	5.14	11.25	4.01	2.37	2.99	2.61	7.20	3.93
Deriva fluencia (%)	0.16	0.11	0.06	0.37	0.11	0.03	0.14	0.11	0.17	0.10	0.07	0.13
d_u máximo (mm)	32.0	26.2	24.7	118.6	38.0	22.5	38.1	17.8	35.0	17.5	36.0	35.0

Nota. La ductilidad inferior a 3.0 indica comportamiento frágil según criterios de **ASCE 41-17**. La deriva de fluencia se calculó como d_y/H_{total} , donde H_{total} corresponde a la altura total de la edificación. Los valores de ductilidad entre 2.35 y 11.25 evidencian el rango de comportamiento frágil a semiductil de las construcciones de adobe evaluadas.

Las curvas de capacidad obtenidas muestran una rama ascendente pronunciada seguida de una meseta con degradación gradual, característica del comportamiento cuasi-frágil del adobe. Los valores de ductilidad oscilan entre $\mu = 2.35$ (V-01, dirección X) y $\mu = 11.25$ (V-03, dirección Y). Los valores de ductilidad inferiores a 3.0 — presentes en V-01 (X), V-04 (Y), V-05 (X e Y) — corresponden al comportamiento frágil definido por **ASCE 41-17**, mientras que los valores mayores reflejan una fluencia temprana con degradación progresiva, no una alta capacidad de deformación plástica.

4.2.1.2 Capacidad de desplazamiento lateral limitada.

Los desplazamientos de fluencia obtenidos demuestran la limitada capacidad de deformación lateral de las estructuras de adobe antes de iniciar el daño estructural. Las derivas de fluencia calculadas para las seis viviendas se ubican en el rango de 0.03 % a 0.37 %, significativamente menores a los valores típicos de estructuras de concreto armado o albañilería confinada donde las derivas de fluencia superan el 0.5 %.

- **Vivienda V-01:** $d_y = 9.0\text{--}13.6$ mm (deriva de fluencia: 0.11 %–0.16 %)
- **Vivienda V-02:** $d_y = 4.2\text{--}24.3$ mm (deriva de fluencia: 0.06 %–0.37 %)
- **Vivienda V-03:** $d_y = 2.0\text{--}7.4$ mm (deriva de fluencia: 0.03 %–0.11 %)
- **Vivienda V-04:** $d_y = 7.5\text{--}9.5$ mm (deriva de fluencia: 0.11 %–0.14 %)
- **Vivienda V-05:** $d_y = 6.7\text{--}11.7$ mm (deriva de fluencia: 0.10 %–0.17 %)
- **Vivienda V-06:** $d_y = 5.0\text{--}8.9$ mm (deriva de fluencia: 0.07 %–0.13 %)

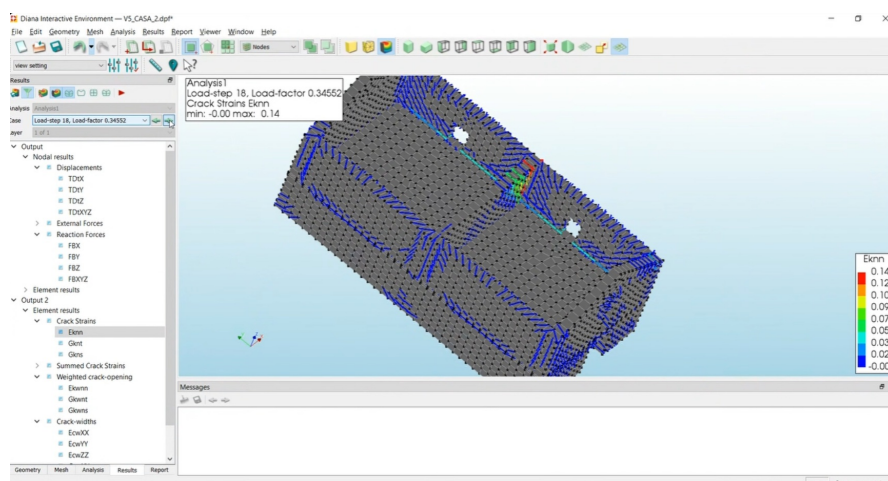
La rigidez inicial elevada de los muros de adobe limita la capacidad de absorción de energía mediante deformación elástica. Una vez superado el umbral de fluencia, la degradación de rigidez es rápida, lo cual determina que los desplazamientos de desempeño (d_u) se alcancen con incrementos relativamente pequeños de deformación adicional respecto al punto de fluencia, exceptuando la Vivienda V-02 en dirección Y donde $d_u = 118.6$ mm refleja una marcada flexibilidad en esa dirección.

4.2.1.3 Mecanismos de falla por corte diagonal.

El análisis de los patrones de agrietamiento (Crack Strains Eknn y Weighted crack-opening Ekwnn) obtenidos del modelamiento numérico en DIANA FEA confirma la predominancia de mecanismos de falla por corte diagonal en las seis viviendas evaluadas. Los patrones observados son consistentes con los reportados en la literatura para muros de adobe sin reforzamiento sometidos a cargas laterales cíclicas o monótonas.

Figura 128

Patrón de agrietamiento diagonal característico — Vivienda V-02, Dirección X



Nota. Elaboración propia. Deformaciones por fisuración Eknn mostrando grietas diagonales en muros con concentración en esquinas de vanos. Load-step 18, Eknn máximo: 0.14.

Los mecanismos de falla identificados en las seis viviendas incluyen:

1. **Agrietamiento diagonal por corte:** Grietas inclinadas a aproximadamente 45° que se originan en las esquinas de los vanos y se propagan hacia los apoyos, siguiendo las trayectorias de esfuerzos principales de tracción. Este mecanismo es predominante en los muros con vanos de puertas y ventanas de grandes dimensiones relativas.
2. **Agrietamiento en esquinas de vanos:** Concentración de daño en las zonas de

discontinuidad geométrica (puertas y ventanas), donde los esfuerzos cortantes son máximos. Este patrón es consistente con los daños observados en viviendas de adobe afectadas por sismos reales en la región andina.

3. **Volcamiento de muros transversales:** Especialmente pronunciado en la dirección débil de cada vivienda, donde la menor densidad de muros resistentes genera mecanismos de falla fuera del plano, con separación progresiva en las uniones muro–muro y muro–losa.
4. **Concentración en la conexión muro–losa:** Particularmente crítica en las Viviendas V-01 y V-02, donde la losa de entrepiso de viguetas de madera genera una discontinuidad en la distribución de esfuerzos que favorece la formación de grietas horizontales en la zona de apoyo.

El Cuadro 78 presenta los anchos de grieta máximos registrados en las Viviendas V-01 y V-02, que cuentan con registro detallado de los patrones de agrietamiento, los cuales exceden ampliamente los límites admisibles para estructuras en servicio.

Cuadro 78

Anchos de grieta ponderados máximos - Viviendas V-01 y V-02

Vivienda	Dirección	Ekwnn máx. (mm)	Ubicación predominante
V-01	X	20.38	Esquinas de vanos
V-01	Y	18.52	Base de muros transversales
V-02	X	90.50	Conexión muro–losa
V-02	Y	84.70	Muros transversales

Nota. Ekwnn: Weighted crack-opening (ancho de grieta ponderado). Valores registrados en el estado de colapso definido por el análisis pushover en DIANA FEA.

En base a las evidencias presentadas — ductilidades entre 2.35 y 11.25 con valores predominantemente frágiles, derivas de fluencia entre 0.03 % y 0.37 %, anchos de grieta que superan los 20 mm en el estado de colapso, y mecanismos de falla por corte diagonal confirmados por los patrones de agrietamiento — la **hipótesis específica 01 se acepta**. El análisis no lineal estático pushover mediante DIANA FEA con el modelo constitutivo **EMM** demuestra que las seis viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un comportamiento estructural frágil, con capacidad de desplazamiento lateral limitada y mecanismos de falla predominantes por corte diagonal en muros, confirmando lo establecido en la hipótesis planteada.

4.2.2. Contratación de hipótesis específica 2

- **Hipótesis específica 02:** Las tablas de evaluación de vulnerabilidad sísmica de INDECI presentan limitaciones de precisión al ser contrastadas con los resultados obtenidos mediante modelamiento numérico no lineal.

4.2.2.1 Comparación de resultados INDECI vs. DIANA FEA.

La evaluación mediante fichas **INDECI** clasificó cinco de las seis viviendas en el nivel de vulnerabilidad **MUY ALTO** y una en el nivel **ALTO** (V-03, 24 puntos). Por su parte, el análisis numérico no lineal en DIANA FEA con el modelo constitutivo **EMM** permitió diferenciar el comportamiento real de cada estructura en ambas direcciones de análisis. El Cuadro 79 presenta la comparación detallada de resultados para las seis viviendas.

Cuadro 79

Comparación de resultados entre evaluación INDECI y análisis DIANA FEA

Parámetro	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Evaluación INDECI						
Puntaje total	39 pts	35 pts	24 pts	28 pts	25 pts	25 pts
Nivel vulnerabilidad	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
Análisis direccional	No considera					
Análisis DIANA FEA – SEAOC Vision 2000						
Desempeño Dir. X	Funcional	Funcional	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida
Desempeño Dir. Y	Funcional	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida
Nivel crítico	Funcional	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida
Discrepancia						
Coincidencia diagnóstico	NO	PARCIAL	NO	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL

Nota. **INDECI** clasifica sin diferenciar direcciones de análisis. **DIANA FEA** identifica comportamiento direccional diferenciado. La coincidencia “PARCIAL” indica que ambas metodologías señalan vulnerabilidad, pero con distinto nivel de detalle y precisión.

4.2.2.2 Limitaciones identificadas en la metodología INDECI.

El análisis comparativo con las seis viviendas permite identificar las siguientes limitaciones de precisión en las fichas de evaluación **INDECI**:

1. **Ausencia de análisis direccional:** La ficha **INDECI** evalúa la vulnerabilidad de manera global, sin considerar el comportamiento diferenciado en las direcciones principales (X e Y). Como se demostró en la Vivienda V-02, una estructura puede presentar desempeño **Funcional** en la dirección X y **Resguardo de vida** en la dirección Y, diferencia que la metodología cualitativa no puede capturar.
2. **Ponderación uniforme de parámetros:** Los valores asignados a cada parámetro (1–4 puntos) no reflejan la influencia real de cada factor en el comportamiento

sísmico. El número de niveles, la densidad de muros y la configuración geométrica tienen impactos cuantitativamente diferentes según la tipología específica de cada edificación.

3. **No cuantifica parámetros de desempeño:** La metodología **INDECI** no proporciona valores de cortante basal, desplazamientos de fluencia ni ductilidad, los cuales son parámetros fundamentales para evaluar el desempeño sísmico según filosofías como **SEAOC Vision 2000** y **ASCE 41-17**.
4. **Clasificación por rangos amplios:** Los cuatro niveles de vulnerabilidad (BAJO, MODERADO, ALTO, MUY ALTO) representan rangos amplios que no permiten diferenciar estructuras con comportamientos significativamente distintos dentro del mismo nivel. Las Viviendas V-04, V-05 y V-06 tienen puntajes **INDECI** diferentes (28, 25 y 25 puntos respectivamente), pero el análisis numérico confirma el mismo nivel de desempeño **SEAOC** en ambas direcciones para las tres.
5. **No considera la configuración geométrica en planta:** La forma en planta (rectangular simple, en L, con chaflán) influye significativamente en la distribución de rigideces y la respuesta sísmica, aspecto que la ficha **INDECI** solo evalúa cualitativamente como “regular” o “irregular”, sin cuantificar su efecto en el comportamiento estructural real.

4.2.2.3 Análisis cuantitativo de las discrepancias.

El Cuadro 80 presenta el análisis cuantitativo de las discrepancias entre las metodologías **INDECI** y **DIANA FEA** para las seis viviendas.

Cuadro 80

Análisis cuantitativo de discrepancias entre metodologías INDECI y DIANA FEA

Aspecto evaluado	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Puntaje INDECI	39	35	24	28	25	25
Nivel INDECI	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
Nivel SEAOC crítico	Funcional	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida
Predicción INDECI	Más vulnerable	–	Menos vulnerable	–	–	–
Resultado DIANA FEA	Mejor desempeño	–	Igual desempeño	–	–	–
Inversión predicción	SÍ	–	SÍ	–	–	–

Nota. Se identifican dos casos de inversión de predicción: V-01 obtuvo el mayor puntaje **INDECI** (39 pts) pero el mejor desempeño numérico (Funcional); V-03 obtuvo el menor puntaje **INDECI** (24 pts, nivel ALTO) pero el mismo nivel de desempeño **SEAOC** que las viviendas con mayor puntaje (V-04, V-05 y V-06).

Se evidencian **dos casos de inversión de predicción** que demuestran las limitaciones de la metodología cualitativa:

El **primer caso** corresponde a la Vivienda V-01: la ficha **INDECI** le asignó el mayor puntaje (39 puntos), prediciendo la mayor vulnerabilidad del conjunto; sin embargo, el análisis numérico demostró que presenta el mejor desempeño sísmico (**Funcional** en ambas

direcciones según **SEAOC Vision 2000**).

El **segundo caso** corresponde a la Vivienda V-03: obtuvo el menor puntaje **INDECI** del conjunto (24 puntos, nivel ALTO), lo cual sugeriría una vulnerabilidad comparativamente menor; no obstante, el análisis numérico revela el mismo nivel de desempeño **Resguardo de vida** que las Viviendas V-04, V-05 y V-06, que tienen puntajes **INDECI** superiores.

4.2.2.4 Factores que explican las discrepancias.

Las principales razones de las discrepancias identificadas entre la metodología **INDECI** y el análisis numérico son:

1. **Penalización excesiva por número de pisos:** La ficha **INDECI** penaliza el mayor número de niveles de la V-01 (3 niveles vs. 2 niveles), sin considerar que una configuración más compacta con mejor distribución de muros puede compensar este factor, como lo demuestra su nivel de desempeño **Funcional**.
2. **Subestimación de la configuración en planta:** La configuración irregular en L de la V-03 genera concentraciones de esfuerzo que determinan un nivel de desempeño equivalente al de viviendas con mayor puntaje **INDECI**, aspecto que la evaluación cualitativa no logra capturar con precisión.
3. **No considera el comportamiento diferencial por dirección:** La V-02 presenta desempeño **Funcional** en X y **Resguardo de vida** en Y; esta diferencia crítica es invisible para la metodología **INDECI**.
4. **No considera el sistema de cobertura:** El techo a dos aguas de la V-02 y V-04 genera excentricidad de masas y concentración de esfuerzos que incrementan la vulnerabilidad en determinadas direcciones, factor no contemplado explícitamente en la ficha **INDECI**.

En base a las evidencias presentadas — dos casos de inversión de predicción, incapacidad para diferenciar el comportamiento direccional, y ausencia de parámetros cuantitativos de desempeño — la **hipótesis específica 02 se acepta**. Las tablas de evaluación de vulnerabilidad sísmica **INDECI** presentan limitaciones de precisión al ser contrastadas con los resultados del modelamiento numérico no lineal, siendo incapaces de capturar el comportamiento estructural real, la respuesta diferenciada por dirección y los parámetros cuantitativos de desempeño que sí proporciona el análisis pushover con **DIANA FEA**.

4.2.3. Contrastación de hipótesis específica 3

- **Hipótesis específica 03:** Las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan vulnerabilidades estructurales comunes que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural específico.

4.2.3.1 Identificación de vulnerabilidades estructurales comunes.

El análisis de las seis viviendas de estudio permitió identificar vulnerabilidades estructurales recurrentes características de la tipología constructiva de adobe en el distrito

de Huancaray. El Cuadro 81 presenta las vulnerabilidades identificadas y su presencia en cada vivienda.

Cuadro 81

Vulnerabilidades estructurales comunes identificadas en las seis viviendas de estudio

Vulnerabilidad identificada	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06	Frecuencia
Ausencia de viga collar o solera	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100 %
Conexión deficiente muro–techo	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100 %
Falta de arriostramiento horizontal	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100 %
Vanos sin refuerzo en contornos	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100 %
Diafragma flexible (entrepiso)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100 %
Presencia de humedad en base de muros	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	100 %
Ausencia de juntas sísmicas	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	83 %
Concentración de masas en niv. superiores	Sí	Sí	No	No	No	No	33 %
Deficiencia de muros en dirección débil	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	83 %
Configuración geométrica irregular	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí	67 %

Nota. Las vulnerabilidades con frecuencia del 100 % son características sistémicas de la tipología constructiva de adobe en el distrito de Huancaray. V-03 no presenta ausencia de juntas sísmicas según la ficha INDECI. La concentración de masas en niveles superiores aplica solo a las viviendas de mayor altura (V-01 con 3 niveles y V-02).

Se identificaron **6 vulnerabilidades presentes en el 100 % de las viviendas**: ausencia de viga collar, conexión deficiente muro–techo, falta de arriostramiento horizontal, vanos sin refuerzo, diafragma flexible y presencia de humedad en la base de muros. Estas constituyen vulnerabilidades sistémicas inherentes a la tipología constructiva de adobe autoconstruida sin supervisión profesional en el distrito.

4.2.3.2 Correlación entre vulnerabilidades y mecanismos de falla.

El análisis numérico permitió establecer la correlación directa entre las vulnerabilidades identificadas y los mecanismos de falla observados en las seis viviendas. El Cuadro 82 presenta esta relación.

Cuadro 82*Correlación entre vulnerabilidades estructurales y mecanismos de falla*

Vulnerabilidad	Mecanismo de falla asociado	Evidencia
Ausencia de viga collar	Volcamiento de muros fuera del plano	V-01, V-02 Dir. Y
Vanos sin refuerzo	Agrietamiento diagonal en esquinas de vanos	V-01, V-02 Dir. X
Diafragma flexible	Desplazamientos diferenciales entre muros	V-02 (Ekwnn máx. 90.50 mm)
Deficiencia de muros Dir. débil	Baja capacidad resistente direccional	V-02 (50.14 tonf Dir. Y)
Concentración de masas	Amplificación de demanda sísmica en niveles	V-01, V-02
Config. geométrica irregular	Asimetría de rigidez y torsión en planta	V-03, V-04, V-06
Falta de arriostramiento	Propagación de grietas sin redistribución	V-03 a V-06

Nota. Correlaciones establecidas a partir del análisis de patrones de agrietamiento, curvas de capacidad y niveles de desempeño obtenidos del modelamiento en DIANA FEA con el modelo constitutivo **EMM**.

4.2.3.3 Propuesta de soluciones de reforzamiento estructural.

Con base en las vulnerabilidades identificadas en las seis viviendas y los mecanismos de falla observados en el análisis numérico, se proponen las siguientes soluciones de reforzamiento estructural específico:

1. **Instalación de viga collar de madera o concreto:** Elemento perimetral continuo en la parte superior de los muros que mejora la conexión muro-techo, distribuye uniformemente las cargas de la cubierta y restringe el volcamiento fuera del plano. Aplicable al 100 % de las viviendas evaluadas.
2. **Refuerzo de vanos con marcos de madera:** Instalación de marcos de madera en los contornos de puertas y ventanas para reducir la concentración de esfuerzos en las esquinas de los vanos, donde se inicia el agrietamiento diagonal confirmado en V-01 y V-02.
3. **Malla de refuerzo horizontal:** Aplicación de geomalla o malla electrosoldada en ambas caras de los muros, embebida en mortero de barro mejorado, para incrementar la resistencia a tracción y limitar la propagación de grietas.
4. **Contrafuertes o muros transversales adicionales:** Elementos de arriostramiento perpendiculares a los muros largos, especialmente necesarios en las viviendas con configuración rectangular alargada o deficiencia de muros en la dirección débil (V-02, V-03, V-04, V-05 y V-06).
5. **Mejoramiento de diafragma de entrepiso:** Instalación de elementos de arriostramiento diagonal en el plano del entrepiso para reducir los desplazamientos diferenciales entre muros, particularmente relevante en V-02 donde se registraron

anchos de grieta de hasta 90.50 mm en la conexión muro–losa.

6. **Protección contra humedad en base de muros:** Construcción de sobrecimiento impermeabilizado o instalación de drenaje perimetral para proteger la base de los muros de adobe, vulnerabilidad presente en el 100 % de las viviendas.

El Cuadro 83 presenta la matriz completa de vulnerabilidades y soluciones propuestas con su nivel de prioridad.

Cuadro 83

Matriz de vulnerabilidades y soluciones de reforzamiento propuestas

Vulnerabilidad	Solución de reforzamiento	Prioridad	Viviendas
Ausencia de viga collar	Viga collar de madera o concreto	Alta	6/6
Vanos sin refuerzo	Marcos de madera en contornos de vanos	Alta	6/6
Falta de arriostramiento	Malla de refuerzo horizontal (geomalla)	Alta	6/6
Deficiencia muros dirección débil	Contrafuertes o muros transversales	Media	5/6
Diafragma flexible	Arriostramiento diagonal en entrepiso	Media	6/6
Humedad en base de muros	Sobrecimiento impermeabilizado	Media	6/6
Ausencia de juntas sísmicas	Juntas sísmicas entre edificaciones	Media	5/6
Config. geométrica irregular	Regularización mediante muros adicionales	Baja	4/6
Concentración de masas	Alivianamiento de cobertura superior	Baja	2/6

Nota. Prioridad establecida según impacto en la reducción de vulnerabilidad y factibilidad de implementación en el contexto rural del distrito de Huancaray. La columna “Viviendas” indica cuántas de las seis viviendas evaluadas presentan la vulnerabilidad correspondiente.

En base a las evidencias presentadas — seis vulnerabilidades sistémicas presentes en el 100 % de las viviendas, correlación directa entre vulnerabilidades y mecanismos de falla confirmados por el análisis numérico, y propuestas de reforzamiento específicas y factibles — la **hipótesis específica 03 se acepta**. Las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan vulnerabilidades estructurales comunes identificadas en todas las edificaciones evaluadas, las cuales pueden ser mitigadas mediante las soluciones de reforzamiento estructural específico propuestas, con posibilidad de mejorar significativamente su nivel de desempeño sísmico según **SEAOC Vision 2000**.

4.2.4. Contrastación de hipótesis general

- **Hipótesis general:** El análisis de la vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal permite demostrar que las viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un nivel de vulnerabilidad alto según los

criterios de INDECI.

4.2.4.1 Síntesis de resultados del análisis de vulnerabilidad.

La investigación aplicó dos metodologías complementarias para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las seis viviendas de estudio: la evaluación cualitativa mediante fichas **INDECI** y el análisis cuantitativo mediante modelamiento numérico no lineal en DIANA FEA con el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)**. El Cuadro 84 presenta la síntesis de resultados para las seis viviendas.

Cuadro 84

Síntesis de resultados del análisis de vulnerabilidad sísmica – Seis viviendas

Criterio de evaluación	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05	V-06
Puntaje INDECI	39 pts	35 pts	24 pts	28 pts	25 pts	25 pts
Clasificación INDECI	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
Umbral > 24 superado	Sí	Sí	Límite	Sí	Sí	Sí
Comportamiento estructural	Frágil	Frágil	Frágil	Frágil	Frágil	Frágil
Ductilidad promedio	2.63	5.38	8.20	3.19	2.80	5.57
Mecanismo de falla	Corte diagonal	Corte diagonal	Corte diagonal	Corte diagonal	Corte diagonal	Corte diagonal
Nivel desempeño crítico (SEAOC)	Funcional	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida	Resguardo vida
Vulnerabilidad confirmada	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Nota. La ductilidad promedio se calculó como la media aritmética de los valores de ductilidad en las direcciones X e Y. Las seis viviendas confirman condición de vulnerabilidad mediante ambas metodologías. V-03 alcanza exactamente el umbral de 24 puntos **INDECI** (nivel ALTO).

4.2.4.2 Demostración del nivel de vulnerabilidad alto.

El modelamiento numérico no lineal en DIANA FEA permitió demostrar cuantitativamente la vulnerabilidad sísmica de las seis viviendas mediante los siguientes hallazgos:

1. **Comportamiento estructural frágil en las seis viviendas:** Las curvas de capacidad muestran ductilidades en el rango de 2.35 a 11.25, con valores predominantemente inferiores a 3.0 que confirman el comportamiento frágil. La degradación pronunciada de resistencia post-pico es característica común de todas las edificaciones evaluadas.
2. **Mecanismos de falla por corte diagonal:** El análisis de patrones de agrietamiento en las Viviendas V-01 y V-02 confirma la predominancia de mecanismos frágiles con anchos de grieta ponderados de hasta 90.50 mm, consistentes con los daños observados en viviendas de adobe afectadas por sismos reales en la región andina.
3. **Vulnerabilidad direccional en todas las viviendas:** La totalidad de las viviendas presenta comportamiento asimétrico entre las direcciones X e Y. Las Viviendas V-03 a V-06 alcanzan el nivel **Resguardo de vida** en ambas direcciones según **SEAOC Vision 2000**, mientras que la V-02 presenta el nivel más desfavorable en la dirección Y con

cortante máximo de 50.14 tonf (39 % menor que en dirección X).

4. **Concordancia con criterios INDECI:** Cinco de las seis viviendas superan el umbral de 24 puntos (puntajes entre 25 y 39 puntos), confirmando la clasificación **MUY ALTO**. La Vivienda V-03 alcanza exactamente 24 puntos (nivel **ALTO**), y el análisis numérico confirma igualmente su condición de vulnerabilidad con nivel de desempeño **Resguardo de vida** en ambas direcciones.
5. **Vulnerabilidades estructurales sistémicas:** Las seis viviendas presentan seis vulnerabilidades comunes al 100 %: ausencia de viga collar, conexión deficiente muro-techo, falta de arriostramiento, vanos sin refuerzo, diafragma flexible y humedad en la base de muros, lo que confirma el carácter sistémico de la vulnerabilidad en la tipología constructiva de la zona.

4.2.4.3 Verificación de la hipótesis general.

Con base en la evidencia presentada, se **ACEPTA** la hipótesis general. El análisis de vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal en DIANA FEA permitió demostrar que:

1. Las seis viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray **presentan un nivel de vulnerabilidad alto** según los criterios de **INDECI**: cinco clasificadas como **MUY ALTO** (puntajes entre 25 y 39 puntos) y una como **ALTO** (24 puntos), todas superando el umbral crítico de 24 puntos.
2. El modelamiento numérico no lineal **confirma y complementa** la evaluación **INDECI**, proporcionando evidencia cuantitativa del comportamiento estructural frágil, los mecanismos de falla por corte diagonal y los niveles de desempeño **Funcional** (V-01) y **Resguardo de vida** (V-02 a V-06) según **SEAO Vision 2000**.
3. La vulnerabilidad identificada se manifiesta en **características estructurales comunes** de la tipología constructiva, con seis vulnerabilidades sistémicas presentes en el 100 % de las edificaciones evaluadas, independientemente de su ubicación, dimensiones o configuración geométrica particular.
4. Los resultados fundamentan la necesidad urgente de implementar **programas de intervención y reforzamiento estructural** en las viviendas de adobe del distrito de Huancaray, priorizando la instalación de viga collar, marcos de madera en vanos y malla de refuerzo horizontal como medidas de mayor impacto y factibilidad.

La aceptación de la hipótesis general, sustentada en la verificación de las tres hipótesis específicas, confirma que el modelamiento numérico no lineal con el modelo constitutivo **EMM** en DIANA FEA constituye una herramienta válida, precisa y complementaria para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de construcciones de adobe, superando las limitaciones de la evaluación cualitativa **INDECI** al proporcionar parámetros cuantitativos de desempeño diferenciados por dirección de análisis.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

La presente investigación ha logrado cumplir de manera efectiva con cada uno de los objetivos específicos planteados en su etapa inicial, lo que a su vez ha permitido alcanzar el objetivo general propuesto. Los resultados obtenidos de las seis viviendas de estudio han dado lugar a hallazgos significativos que respaldan de forma sólida las hipótesis formuladas al inicio del estudio.

5.1.1. Conclusión del objetivo específico 1

- Desarrollar el análisis no lineal estático pushover mediante el modelamiento en DIANA FEA en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025.

Se desarrolló exitosamente el análisis no lineal estático pushover en DIANA FEA para seis viviendas de adobe representativas del distrito de Huancaray. El modelo numérico, calibrado con el ensayo experimental MUENSR de la PUCP (error en cortante máximo: 1.55 %), empleó el modelo constitutivo **Engineering Masonry Model (EMM)** que reproduce adecuadamente el comportamiento no lineal del adobe. Los resultados demuestran que las seis viviendas presentan comportamiento estructural frágil con ductilidades entre 2.35 y 11.25, mecanismos de falla predominantes por corte diagonal con anchos de grieta de hasta 90.50 mm en las Viviendas V-01 y V-02, y capacidad de desplazamiento lateral limitada con derivas de fluencia entre 0.03 % y 0.37 %.

En cuanto a la capacidad resistente, la Vivienda V-01 alcanzó un cortante máximo de 67.63 tonf (Dir. X) y 96.56 tonf (Dir. Y); la Vivienda V-02 de 82.30 tonf (Dir. X) y 50.14 tonf (Dir. Y); la Vivienda V-03 de 55.197 tonf (Dir. X) y 66.791 tonf (Dir. Y); la Vivienda V-04 de 58.803 tonf (Dir. X) y 67.196 tonf (Dir. Y); la Vivienda V-05 de 49.314 tonf (Dir. X) y 40.314 tonf (Dir. Y); y la Vivienda V-06 de 42.843 tonf (Dir. X) y 38.447 tonf (Dir. Y). Respecto al nivel de desempeño según la filosofía **SEAOC Vision 2000**, la Vivienda V-01 alcanzó el nivel **Funcional** en ambas direcciones; la Vivienda V-02 presentó **Funcional** en la dirección X y **Resguardo de vida** en la dirección Y; y las Viviendas V-03, V-04, V-05 y V-06 presentaron el nivel **Resguardo de vida** en ambas direcciones, evidenciando la influencia crítica de la configuración geométrica, el número de niveles y la densidad de muros en la respuesta sísmica de cada edificación.

5.1.2. Conclusión del objetivo específico 2

- Analizar la precisión de las tablas de la INDECI frente a los resultados estructurales obtenidos por modelamiento no lineal en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025.

El análisis comparativo entre las metodologías **INDECI** y **DIANA FEA** evidenció limitaciones de precisión en la evaluación cualitativa. Cinco de las seis viviendas fueron clasificadas como vulnerabilidad **MUY ALTO** según **INDECI** (puntajes entre 25 y 39 puntos) y una como **ALTO** (V-03: 24 puntos); sin embargo, el análisis numérico reveló comportamientos

diferenciados: V-01 alcanzó nivel de desempeño **Funcional** en ambas direcciones, V-02 resultó **Funcional** en X y **Resguardo de vida** en Y, y V-03 a V-06 presentaron **Resguardo de vida** en ambas direcciones según **SEAO Vision 2000**.

Se identificaron dos casos de inversión de predicción que demuestran las limitaciones de la metodología cualitativa: (1) la Vivienda V-01 obtuvo el mayor puntaje **INDECI** (39 puntos) pero el mejor desempeño numérico (**Funcional**); (2) la Vivienda V-03 obtuvo el menor puntaje **INDECI** (24 puntos, nivel **ALTO**) pero el mismo nivel de desempeño **SEAO** que las Viviendas V-04, V-05 y V-06 con puntajes superiores. Las principales limitaciones identificadas en la metodología **INDECI** son: ausencia de análisis direccional, ponderación uniforme de parámetros sin considerar su impacto real en el comportamiento sísmico, no cuantificación de parámetros de desempeño (cortante, desplazamiento, ductilidad), clasificación por rangos amplios que no diferencian estructuras con comportamientos significativamente diferentes, y no consideración de la configuración geométrica específica en planta. No obstante, ambas metodologías son complementarias: **INDECI** para tamizaje rápido de campo y **DIANA FEA** para análisis detallado de desempeño sísmico.

5.1.3. Conclusión del objetivo específico 3

- Identificar las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray y determinar las vulnerabilidades estructurales comunes que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural específico.

Se identificaron **seis vulnerabilidades estructurales sistémicas** con frecuencia del 100 % en las seis viviendas estudiadas: ausencia de viga collar, conexión deficiente muro–techo, falta de arriostramiento horizontal, vanos sin refuerzo en contornos, diafragma flexible y presencia de humedad en la base de muros. Adicionalmente, la ausencia de juntas sísmicas se presentó en el 83 % de las viviendas (5/6), la deficiencia de muros en dirección débil en el 83 % (5/6) y la configuración geométrica irregular en el 67 % (4/6).

Se estableció correlación directa entre las vulnerabilidades identificadas y los mecanismos de falla observados: la ausencia de viga collar genera volcamiento de muros evidenciado en la dirección Y de V-01 y V-02; los vanos sin refuerzo producen agrietamiento diagonal en esquinas, confirmado por los patrones Eknn en ambas viviendas; la deficiencia de muros en dirección Y limita la capacidad resistente (V-02: 50.14 tonf vs. 82.30 tonf en Dir. X); y la configuración geométrica irregular genera asimetría de rigidez en V-03, V-04 y V-06. Se propusieron soluciones de reforzamiento priorizadas: viga collar de madera o concreto (Alta, 6/6 viviendas), refuerzo de vanos con marcos de madera (Alta, 6/6), malla de refuerzo horizontal o geomalla (Alta, 6/6), contrafuertes transversales (Media, 5/6), rigidización de diafragma de entrepiso (Media, 6/6) y protección contra humedad en base de muros (Media, 6/6).

5.1.4. Conclusión del objetivo general

- Analizar la vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025, según los criterios establecidos por INDECI.

El análisis de vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal en DIANA FEA permitió demostrar que las seis viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un nivel de vulnerabilidad alto según los criterios de **INDECI**: cinco clasificadas como **MUY ALTO** (puntajes entre 25 y 39 puntos) y una como **ALTO** (V-03: 24 puntos), todas superando o alcanzando el umbral crítico de 24 puntos. El modelamiento numérico confirma y complementa la evaluación cualitativa, proporcionando evidencia cuantitativa del comportamiento estructural frágil con ductilidades entre 2.35 y 11.25, mecanismos de falla por corte diagonal, y niveles de desempeño que varían entre **Funcional** (V-01 en ambas direcciones) y **Resguardo de vida** (V-02 a V-06) según la filosofía **SEAOC Vision 2000**.

La investigación demuestra que el modelamiento numérico no lineal con el modelo constitutivo **EMM** constituye una herramienta válida y complementaria para superar las limitaciones de las metodologías cualitativas tradicionales, permitiendo identificar el comportamiento real diferenciado por dirección de análisis, cuantificar los parámetros de desempeño sísmico y fundamentar técnicamente las estrategias de mitigación del riesgo sísmico en construcciones de adobe de la región andina del Perú.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Recomendaciones para el modelamiento numérico

- Se recomienda emplear el modelo constitutivo *Engineering Masonry Model* (EMM) de DIANA FEA en lugar del *Total Strain Based Crack Model* (TSCM), dado que el EMM reproduce de manera más precisa el comportamiento ortotrópico y los mecanismos de falla del adobe, diferenciando explícitamente los modos de falla por tracción, compresión y corte en las juntas de mampostería.
- Se recomienda realizar la calibración del modelo numérico con ensayos experimentales locales antes de aplicarlo a casos de estudio específicos, considerando que las propiedades mecánicas del adobe varían significativamente según la composición del suelo, el proceso de fabricación y las condiciones climáticas de cada región.
- Para futuros proyectos de modelamiento de viviendas de adobe, se recomienda considerar el análisis en ambas direcciones principales (X e Y), dado que la presente investigación demostró en las seis viviendas evaluadas que una misma estructura puede presentar niveles de desempeño significativamente diferentes según la dirección de análisis, como se evidenció en la Vivienda V-02 con nivel Funcional en dirección X y Resguardo de vida en dirección Y.
- Se recomienda emplear el método de control de longitud de arco (*Arc-length control*) en la configuración del análisis pushover, ya que este permite capturar el comportamiento post-pico y la rama de degradación de resistencia característica de las estructuras de adobe.
- Para investigadores que deseen mejorar la metodología, se recomienda incorporar el análisis de interacción suelo-estructura, considerando que las viviendas de adobe en zonas rurales andinas se cimentan típicamente sobre suelos de baja capacidad portante que pueden amplificar la respuesta sísmica.
- Se recomienda complementar el análisis numérico con la evaluación cualitativa mediante fichas INDECI, empleando ambas metodologías de forma complementaria: INDECI para identificación y priorización inicial, y DIANA FEA para cuantificación detallada del comportamiento estructural. Estas metodologías son conceptualmente distintas y no equivalentes: INDECI evalúa la vulnerabilidad como predisposición al daño mediante observación directa, mientras que DIANA FEA cuantifica el desempeño sísmico real ante una demanda específica.
- Para proyectos que incluyan propuestas de reforzamiento, se recomienda modelar la estructura en condición existente y reforzada, permitiendo cuantificar el incremento de capacidad resistente y validar numéricamente la efectividad de las soluciones propuestas antes de su implementación.

5.2.2. Recomendaciones de reforzamiento estructural para viviendas de adobe

Con base en las vulnerabilidades estructurales identificadas en las seis viviendas de estudio y los mecanismos de falla observados en el análisis pushover, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas específicas de reforzamiento estructural, priorizadas según su impacto en la reducción de vulnerabilidad y su factibilidad de implementación en el contexto rural del distrito de Huancaray.

1. **Instalación de viga collar perimetral.** La viga collar constituye el elemento de reforzamiento de mayor impacto para viviendas de adobe, dado que mejora la conexión muro–techo, distribuye uniformemente las cargas de la cubierta y restringe el volcamiento fuera del plano de los muros, mecanismo de falla identificado en la dirección Y de las seis viviendas. Se recomienda su instalación de acuerdo con las siguientes especificaciones técnicas (Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki, 2011):
 - **Material:** Madera de eucalipto o pino tratado de la región.
 - **Sección mínima:** 3.0 cm × 15.0 cm (ancho × alto) para madera aserrada, o sección equivalente de madera rolliza de diámetro mínimo 10 cm.
 - **Ubicación:** A lo largo del perímetro superior de todos los muros portantes, enrasada con la cara superior del muro.
 - **Uniones:** Empalmes a media madera con pernos de 1/2" y longitud de empalme mínima de 50 cm en las esquinas; anclaje a los muros mediante varillas de 3/8" embebidas 30 cm en el muro con espaciado máximo de 60 cm.
 - **Continuidad:** La viga collar debe ser continua en todo el perímetro, sin interrupciones en los vanos de puertas y ventanas.
2. **Refuerzo de vanos con marcos de madera.** Los vanos de puertas y ventanas constituyen zonas de concentración de esfuerzos donde se inicia el agrietamiento diagonal por corte, confirmado por los patrones Eknn observados en las Viviendas V-01 y V-02. Se recomienda la instalación de marcos de madera con las siguientes especificaciones (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2017):
 - **Material:** Madera de eucalipto o especie local de densidad media.
 - **Sección mínima de elementos:** 3.0 cm × 10.0 cm para montantes y cabecales.
 - **Configuración:** Marco perimetral con montantes verticales a ambos lados del vano y cabezal horizontal en la parte superior (dintel) e inferior (umbral).
 - **Anclaje:** Los montantes deben empotrarse un mínimo de 15 cm en la mampostería de adobe en la parte inferior y superior, con cuñas de madera y mortero de barro mejorado.
 - **Dimensiones máximas de vanos sin refuerzo adicional:** Ancho máximo 1.20 m; si el vano supera esta dimensión, instalar refuerzo diagonal adicional en las esquinas del marco.
3. **Aplicación de malla de refuerzo horizontal (geomalla).** La malla de refuerzo incrementa la resistencia a tracción de los muros y limita la propagación de grietas ante cargas laterales, siendo particularmente efectiva para los mecanismos de falla

por corte diagonal identificados. Se recomienda su instalación con las siguientes especificaciones (Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki, 2011):

- **Material:** Geomalla biaxial de polipropileno (apertura mínima 25 mm × 25 mm) o malla electrosoldada galvanizada de alambre N° 16 (1.6 mm de diámetro) con abertura de 25 mm × 25 mm.
- **Disposición:** En ambas caras del muro, con traslape mínimo de 20 cm en uniones y esquinas.
- **Fijación:** Adherida a los muros con mortero de barro mejorado (barro + arena fina en proporción 1:1) de 1.5–2.0 cm de espesor, asegurando penetración de mortero en la malla.
- **Anclaje transversal:** Conectar ambas caras de la malla mediante grapas de alambre galvanizado N° 8 pasantes a través del muro, con espaciado máximo de 40 cm en ambas direcciones.
- **Extensión:** Cubrir la totalidad de la superficie de los muros portantes, con especial énfasis en las zonas adyacentes a vanos y esquinas.

4. **Instalación de contrafuertes transversales.** Los contrafuertes mejoran el arriostramiento de los muros longitudinales y reducen la deficiencia de muros en la dirección débil, vulnerabilidad identificada en el 83 % de las viviendas evaluadas. Se recomienda su implementación con las siguientes especificaciones:

- **Material:** Adobe del mismo tipo que el muro existente o madera rolliza de eucalipto de diámetro mínimo 15 cm.
- **Dimensiones mínimas (adobe):** Ancho 0.50 m × profundidad 0.50 m, con altura igual a la del muro.
- **Separación máxima:** 3.0 m entre contrafuertes a lo largo del muro.
- **Integración:** Los contrafuertes deben integrarse a los muros existentes mediante llaves de adobe intercaladas (dentado de trabazón) o, en el caso de madera, mediante anclajes metálicos de 1/2" embebidos en el muro existente.
- **Ubicación prioritaria:** En muros con longitud libre mayor a 3.0 m sin intersección perpendicular.

5. **Rigidización del diafragma de entrepiso.** El diafragma flexible de viguetas de madera genera desplazamientos diferenciales entre muros que concentran daño en la conexión muro–losa, evidenciado por anchos de grieta de hasta 90.50 mm en la Vivienda V-02. Se recomienda su mejoramiento mediante (Blondet, Vargas, Tarque & Iwaki, 2011):

- **Arriostramiento diagonal:** Instalación de piezas de madera de 3.0 cm × 10.0 cm en disposición diagonal (Cruz de San Andrés) entre las viguetas del entrepiso, con uniones mediante clavos de 3" y escuadras metálicas.
- **Tablero adicional:** Colocación de una segunda capa de tablones de madera de 1" de espesor perpendicular a la primera capa, clavada a las viguetas con clavos de 2", incrementando la rigidez en el plano del diafragma.

- **Conexión muro–diafragma:** Anclaje de las viguetas extremas a la viga collar mediante pernos de 3/8" con espaciado máximo de 60 cm, garantizando la transferencia de fuerzas horizontales entre el diafragma y los muros.
6. **Protección contra humedad en la base de muros.** La humedad en la base de los muros constituye una vulnerabilidad sistémica presente en el 100 % de las viviendas evaluadas, debilitando la resistencia mecánica del adobe.
- **Sobrecimiento impermeabilizado:** Construcción o reparación del sobrecimiento de concreto simple ($f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$) con altura mínima de 0.45 m sobre el nivel de terreno terminado, aplicando impermeabilizante asfáltico en la cara superior antes de asentar el adobe.
 - **Barrera capilar:** Interposición de dos capas de plástico polietileno de 200 micras entre el sobrecimiento y los primeros adobes del muro, para interrumpir el ascenso capilar de humedad.
 - **Drenaje perimetral:** Conformación de un drenaje perimetral de piedra chancada de 1/2" con pendiente mínima de 2 % alejando el agua de lluvia de la base de los muros, con cuneta de concreto simple de 0.20 m $\times$ 0.15 m en zonas de alta precipitación.
 - **Alero de protección:** Extensión de los aleros del techo un mínimo de 0.60 m más allá del paramento exterior de los muros, protegiendo la base de la lluvia directa.

La implementación de estas medidas de reforzamiento debe realizarse con la supervisión de un profesional de ingeniería civil o arquitectura, priorizando las soluciones de alta prioridad (viga collar, marcos de vanos y malla de refuerzo) que abordan las vulnerabilidades sistémicas presentes en el 100 % de las viviendas evaluadas. Se estima que la aplicación conjunta de estas medidas puede incrementar significativamente la capacidad resistente de las edificaciones y mejorar su nivel de desempeño sísmico desde *Resguardo de vida* hasta *Funcional* según los criterios de **SEAOC Vision 2000**, aspecto que se recomienda verificar mediante modelamiento numérico de la estructura reforzada en investigaciones futuras.

5.3. Trabajos futuros

- Desarrollar análisis dinámico no lineal tiempo-historia en DIANA FEA empleando registros sísmicos representativos de la zona sísmica 2 del Perú, para comparar los resultados con el análisis estático pushover y evaluar la influencia del contenido frecuencial en la respuesta estructural de viviendas de adobe.
- Modelar numéricamente viviendas de adobe incorporando diferentes técnicas de reforzamiento estructural (malla de geomalla, viga collar de madera, contrafuertes de adobe) para cuantificar el incremento de capacidad resistente, ductilidad y nivel de desempeño sísmico.
- Ampliar el estudio a una muestra estadísticamente representativa de viviendas de adobe en la región Apurímac, incorporando variaciones en número de pisos, configuración geométrica, antigüedad y estado de conservación, para establecer curvas de fragilidad específicas para la tipología constructiva andina.
- Desarrollar una metodología de evaluación rápida mejorada que incorpore los factores críticos identificados en la presente investigación, incluyendo el análisis direccional diferenciado, la configuración del sistema de techo y la relación de aspecto en planta, como complemento a las fichas INDECI existentes.
- Realizar campañas de ensayos experimentales de caracterización mecánica del adobe y la mampostería de adobe en diferentes localidades de la sierra peruana, para generar una base de datos de propiedades mecánicas que permita calibrar con mayor precisión los modelos numéricos según la procedencia del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acharya, O., Dahal, A., & Shrestha, K. C. (2023). Confined masonry in seismic regions: Application to a prototype building in Nepal. *Structures*, 47, 19. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.045>
- Acuña García, R. S. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas autoconstruidas de una provincia peruana con riesgo sísmico. *Revista de Investigación*.
- Ademović, N., Hadzima-Nyarko, M., ... Stojnović, V. (2024). Various numerical modeling procedures of XIX-century masonry building. *Engineering Structures*, 301, 19. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117361>
- Aguilar, R., Noel, M. F., & Ramos, L. F. (2019). Integration of reverse engineering and non-linear numerical analysis for the seismic assessment of historical adobe buildings. *Automation in Construction*, 98, 15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.010>
- Aguilar, R., Pando, M. A., ... Uceda, S. (2018). Structural and geotechnical engineering assessment of Huaca de la Luna – A massive earthen Moche culture pyramid in Northern Peru. *Journal of Cultural Heritage*, 34, 15. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.006>
- Albines Bruno, J. (2024). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas en el Centro Poblado San Miguel-Jorge Chávez, Tambogrande, 2024* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (inf. téc. N.º ASCE/SEI 41-17). American Society of Civil Engineers. Reston, VA.
- Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Development and Verification of a Displacement-Based Adaptive Pushover Procedure. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(5), 643-661. <https://doi.org/10.1080/13632460409350504>
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (inf. téc. N.º ATC-40). Applied Technology Council. Redwood City, CA.
- Arevalo Casas, A. S. (2020). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas autoconstruidas de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones en el A.H. San José, distrito de San Martín de Porres* [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Asteris, P. G., Chronopoulos, M. P., ... Silva, V. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Engineering Structures*, 62–63, 17. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.031>
- Baca Ramos, M. K., & Valdez Chipa, A. M. (2024). *Análisis de vulnerabilidad y comportamiento sísmico de viviendas autoconstruidas del distrito de Tamburco-Abancay, 2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Continental.

- Bakhshi, A., & Asadi, P. (2013). Probabilistic evaluation of seismic design parameters of RC frames based on fragility curves. *Scientia Iranica*, 20(2), 11. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.11.012>
- Barazangi, M., & Isacks, B. L. (1976). Spatial Distribution of Earthquakes and Subduction of the Nazca Plate Beneath South America. *Geology*, 4(11), 686-692. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1976\)4<686:SDOEAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4<686:SDOEAS>2.0.CO;2)
- Barbat, A. H., Carreño, M. L., ... Marulanda, M. C. (2010). Seismic Vulnerability and Risk Evaluation Methods for Urban Areas. A Review with Application to a Pilot Area. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 17-38. <https://doi.org/10.1080/15732470802663763>
- Bathe, K.-J. (2014). *Finite Element Procedures* (2nd). Prentice Hall.
- Bellalem, F., Molina, S., ... Djellit, H. (2024). Seismic risk assessment for the downtown of the city of Blida, Algeria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 104314. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104314>
- Benedetti, D., & Petrini, V. (1984). Sulla Vulnerabilità Sismica di Edifici in Muratura: Proposte di un Metodo di Valutazione [En italiano]. *L'Industria delle Costruzioni*, 149, 66-74.
- Blondet, M., Vargas, J., & Tarque, N. (2008a). Low-Cost Reinforcement of Earthen Houses in Seismic Areas. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Blondet, M., Vargas, J., & Tarque, N. (2008b). Observed Behaviour of Earthen Structures During the Pisco (Peru) Earthquake of August 15, 2007. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Blondet, M., Vargas, J., ... Iwaki, C. (2011). Construcción Sismorresistente en Tierra: La Gran Experiencia Contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523), 41-50. <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- Blondet, M., Villa García, G., ... Rubiños, Á. (2005). Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial [Contribution to the Earthquake Engineering Research Institute]. *EERI/IAEE World Housing Encyclopedia*.
- Blondet, M., Villa Garcia M., G., ... Rubiños, Á. (2011, abril). *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial* (2.^a ed.). Earthquake Engineering Research Institute.
- Braga, F., Dolce, M., & Liberatore, D. (1982). A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuing Review of the MSK-76 Scale. *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, 431-450.
- Brando, G., Rapone, D., ... Russo, S. (2022). A Review of Local Construction Practices Applied on Unreinforced Adobe Buildings in South America. *Frontiers in Built Environment*, 8, 974005. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.974005>
- Briceño, C., Noel, M. F., ... Aguilar, R. (2021). Integration of non-destructive testing, numerical simulations, and simplified analytical tools for assessing the structural performance of historical adobe buildings. *Construction and Building Materials*, 290, 15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123224>

- Calle Huamán, S. M., & Salazar Ildefonso, J. H. (2023). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas autoconstruidas en el Pueblo Joven Santa Rosa en el distrito del Rímac* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Calvi, G. M., Pinho, R., ... Crowley, H. (2006). Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies over the Past 30 Years [Paper No. 472]. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(3), 75-104.
- Canditone, C., Diana, L., ... Vicente, R. (2023). Failure mechanisms and behaviour of adobe masonry buildings: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 150, 25. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107343>
- Cardona, O. D. (2001). *Estimación Holística del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Dinámicos Complejos* [Tesis Doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Carhuanira Herrera, W. E. (2021). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas informales de albañilería confinada del sector Aranjuez, distrito de Trujillo, 2021* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada de Trujillo.
- Çelik, A., Kocaman, İ., ... Milani, G. (2025). Understanding roots of failure of historical Ottoman monumental buildings by means of advanced finite element modelling: The effect of the 1939 Erzincan earthquake on Nafiz Pasha Bath-house and Izzet Pasha Mosque. *Engineering Failure Analysis*, 179, 27. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109811>
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 561-582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- Choque Sucasaca, J. F., & Luque Solis, E. D. (2019). *Análisis estático no lineal y evaluación del desempeño sísmico de un edificio de 8 niveles diseñado con la norma E.030* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Ciocci, M. P., Sharma, S., & Lourenço, P. B. (2021). Engineering Simulations of a Super-Complex Cultural Heritage Building: Ica Cathedral in Peru. *Meccanica*, 56, 1931-1956. <https://doi.org/10.1007/s11012-021-01367-5>
- Cocco, G., Spacone, E., & Brando, G. (2024). Seismic vulnerability assessment of urban areas made of adobe buildings through analytical and numerical methods: The case study of the historical center of Cusco (Peru). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 112, 46. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104786>
- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
- Cosgun, T., Ceylan, O., ... Akcay, C. (2023). Seismic performance assessment and retrofitting proposal for a historic masonry school building (Bursa, Türkiye). *Case Studies in Construction Materials*, 18, 35. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02087>
- Cuadros-Rojas, E., Saloustros, S., ... Pelà, L. (2024). Photogrammetry-Aided Numerical Seismic Assessment of Historical Structures Composed of Adobe, Stone and Brick Masonry. Application to the San Juan Bautista Church Built on the Inca Temple of

- Huaytará, Peru. *Engineering Failure Analysis*, 158, 107984. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107984>
- DIANA FEA BV. (2020). *DIANA User's Manual – Release 10.4*. DIANA FEA BV. Delft, The Netherlands. <https://dianafea.com>
- Dorbath, L., Cisternas, A., & Dorbath, C. (1990). Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(3), 551-576.
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. CEN.
- Fajfar, P. (2000). A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 16(3), 573-592. <https://doi.org/10.1193/1.1586128>
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (inf. téc. N.º FEMA 356). Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.
- FEMA. (2020). *Hazus Earthquake Model Technical Manual* (inf. téc. N.º Hazus 4.2 SP3). Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.
- Flores Olortegui, P. L. (2020). *Análisis de la vulnerabilidad física de las viviendas de adobe frente a un evento sísmico en el distrito de Llama-provincia de Mariscal Luzuriaga-Áncash* [Tesis de pregrado]. Universidad San Pedro.
- Freeman, S. A. (1998). The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design. *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*.
- García Chávez, N. (2024). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe del centro histórico de Chachapoyas mediante el análisis estático no lineal y curvas de fragilidad* [Tesis de pregrado]. Universidad San Ignacio de Loyola.
- García Llico, G. (2025). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe en el centro poblado de Cotaruse, Aymaraes-Apurímac 2023* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de los Andes.
- GNDT. (1994). *Scheda di Esposizione e Vulnerabilità e di Rilevamento Danni di Primo Livello e Secondo Livello (Muratura e Cemento Armato)* (inf. téc.). Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. Roma, Italia.
- Greco, F., & Lourenço, P. B. (2021). Seismic assessment of large historic vernacular adobe buildings in the Andean Region of Peru. Learning from Casa Arones in Cusco. *Journal of Building Engineering*, 40, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102341>
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)* (Vol. 15). Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.
- Guettiche, A., Soltane, M. A., ... Boudina, A. (2025). Seismic performance of historical unreinforced masonry buildings. The case of Souika district in Constantine, Algeria. *Journal of Building Engineering*, 111, 23. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113377>

- Gutierrez Mendoza, C. A., & Villacorta Olivares, D. (2023). *Estimación del comportamiento sísmico mediante el análisis no lineal estático de una vivienda multifamiliar de 8 niveles, La Esperanza, Trujillo* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- He, Z., Guo, H., ... Yang, Z. (2025). Seismic vulnerability model for typical buildings in Sichuan Province, China, based on empirical seismic damage statistics. *Structures*, 78, 23. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109294>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide* (2nd). Intermediate Technology Publications.
- Instituto Geofísico del Perú. (2007). *El Terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007 (7.9 Mw)* (inf. téc. N.º Informe Preliminar). Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2006). *Manual Básico para la Estimación del Riesgo* (inf. téc.). INDECI. Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2007). *Sismo de Pisco, 15 de Agosto de 2007: Evaluación de Daños* (inf. téc.). INDECI. Lima.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2010). *Ficha de Verificación para la Determinación de la Vulnerabilidad de la Vivienda para Casos de Sismo* [Proyecto INDECI-PNUD-ECHO "Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao"]. Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). Lima, Perú. <https://www.indeci.gob.pe>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas* (inf. téc.). INEI. Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Perú: Perfil Sociodemográfico. Informe Nacional. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas* (inf. téc.). INEI. Lima. <https://www.inei.gob.pe>
- Jiménez, B., Saloustros, S., & Pelà, L. (2021). Seismic vulnerability index method for hybrid timber-masonry structures. Numerical calibration and application to the city of Valparaíso, Chile. *Journal of Building Engineering*, 44, 16. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103185>
- Kim, J., Lorenzoni, F., ... Valluzzi, M. R. (2021). Seismic vulnerability assessment of free-standing massive masonry columns by the 3D Discrete Element Method. *Engineering Structures*, 16, 113004. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113004>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Krawinkler, H., & Seneviratna, G. D. P. K. (1998). Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation. *Engineering Structures*, 20(4-6), 452-464. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and Mechanical Models for the Vulnerability and Damage Assessment of Current Buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415-443. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>

- Lourenço, P. B. (1996). *Computational Strategies for Masonry Structures* [PhD Thesis]. Delft University of Technology. Delft University Press.
- Lourenço, P. B. (2000). Anisotropic Softening Model for Masonry Plates and Shells. *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1008-1016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:9\(1008\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:9(1008))
- Mamani Poma, F. (2022). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales de dos niveles autoconstruidas en adobe, Parcialidad de Japisse, Centro Poblado Mallco-Puno, 2021* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Mauricio, A. C., Prieto, G., ... Kaulicke, P. (2021). The Earliest Adobe Monumental Architecture in the Americas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(48), e2102941118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2102941118>
- Mesta, C., Kahhat, R., & Santa-Cruz, S. (2019). Quantification of Lost Material Stock of Buildings After an Earthquake. A Case Study of Chiclayo, Peru. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 352-362. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.001>
- Michiels, T., Adriaenssens, S., & Dejong, M. (2019). Form finding of corrugated shell structures for seismic design and validation using non-linear pushover analysis. *Engineering Structures*, 181, 12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.043>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *Norma Técnica E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada* (inf. téc.) (Actualizada mediante R.M. N° 121-2017-VIVIENDA). Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente* (inf. téc.) (Actualizada mediante D.S. N° 002-2018-VIVIENDA). Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2020). *Norma E.080: Diseño y Construcción con Tierra Reforzada* (Reglamento Nacional de Edificaciones) (Publicación Oficial). SENCICO - Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2017). *Norma Técnica E.080: Diseño y Construcción con Tierra Reforzada* [Reglamento Nacional de Edificaciones, aprobado mediante Decreto Supremo N° 005-2017-VIVIENDA]. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/vivienda>
- Minke, G. (2021). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture* (4.ª ed.). Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035622553>
- Mosoarca, M., Onescu, I., ... Szitar-Sirbu, M. (2019). Seismic vulnerability assessment for the historical areas of the Timisoara city, Romania. *Engineering Failure Analysis*, 101, 16. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.013>
- Nizama Flores, A. F., & Yamunaque Ramos, L. A. (2022). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de adobe del distrito de la Huaca-Paita 2022* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo.

- NonlinearAnalysis. (2020). *Adaptive Nonlinear Analysis as Applied to Performance Based [Design]* [Presentación PowerPoint]. SlideServe. Consultado el 23 de diciembre de 2025, desde <https://www.slideserve.com/>
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., ... Ellis, M. (1998). Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence Across the Central Andes. *Science*, 279(5349), 358-362. <https://doi.org/10.1126/science.279.5349.358>
- Orellana Minaya, G. M., & Vasquez Palacios, J. A. (2024). *Diseño por desempeño de una vivienda multifamiliar de 5 pisos mediante el análisis estático no lineal Pushover en Villa el Salvador* [Trabajo de suficiencia profesional]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Orozco Orozco, G. F. (2019, septiembre). *Análisis de vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería confinada, mediante análisis no lineal de cargas laterales incrementales en Guatemala* [Tesis de maestría]. Universidad de San Carlos de Guatemala [Asesorado por el Mtro. Ing. Francisco Arrecis].
- Ortega, J., Vasconcelos, G., ... Correia, M. (2018). Assessment of the efficiency of traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture. *Engineering Structures*, 173, 27. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.101>
- Palomino Vega, A. (2025). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en las viviendas construidas de adobe en el Caserío Guadalupe del distrito de Bagua 2024* [Trabajo de investigación]. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía.
- Park, Y.-J., & Ang, A. H.-S. (1985). Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722-739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
- Pfiffner, O. A., & Gonzalez, L. (2013). Mesozoic–Cenozoic Evolution of the Western Margin of South America: Case Study of the Peruvian Andes. *Geosciences*, 3(2), 262-310. <https://doi.org/10.3390/geosciences3020262>
- Plafker, G., Ericksen, G. E., & Fernández Concha, J. (1971). Peru Earthquake of May 31, 1970: Engineering Geology Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(3), 511-521.
- Porter, K. (2007). A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk [University of Colorado Boulder]. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*.
- Pozzi-Escot, D., Bernuy, K., & Cornejo, I. (1989). *Proyecto de Conservación Huaca de la Luna*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Prasad. (2024). *Finite Element Analysis: History, Applications, Benefits, Limitations and Future Trends* [Civil & Structural Engineering Knowledge Base]. Structural Guide. Consultado el 23 de diciembre de 2025, desde <https://structuralguide.com/finite-element-analysis/>
- Rajkumari, S., Thakkar, K., & Goyal, H. (2022). Fragility analysis of structures subjected to seismic excitation: A state-of-the-art review. *Structures*, 40, 14. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.023>

- Reyes, J. C., Yamin, L. E., ... Galvis, F. A. (2018). Shear Behavior of Adobe and Rammed Earth Walls of Heritage Structures. *Engineering Structures*, 174, 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.061>
- Riccio, C., Remus, A., ... Perucchio, R. (2023). A macroblock 2D finite element model for assessing the roots of failure of Huaca de la Luna's main pyramid (Peru) under seismic action. *Engineering Failure Analysis*, 19, 107417. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107417>
- Roca, P., Cervera, M., ... Pelà, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299-325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- Rots, J. G. (1988). *Computational Modeling of Concrete Fracture* [PhD thesis]. Delft University of Technology.
- Rozas Villasante, M. F., & Condori Cusi, S. B. (2024). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe de dos niveles en el centro poblado de Pucyura, provincia de Anta, Cusco, 2023* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Salamanca Barja, J. J., & Santiago Chavez, C. A. (2023). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en las viviendas rurales en torno a las variables físico, social, económico, ambiental e intercultural* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica del Perú.
- Salazar Huamán, E. G. (2018). *Vulnerabilidad sísmica de las viviendas de albañilería confinada en la ciudad de Jesús* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Santos Quispe, D. J. (2019). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas autoconstruidas en el distrito de Chilca en el 2017* [Tesis de pregrado]. Universidad Continental.
- Schroeder, H. (2016). *Sustainable Building with Earth*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19491-2>
- Seed, H. B., Romo, M. P., ... Lysmer, J. (1988). The Mexico Earthquake of September 19, 1985—Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions. *Earthquake Spectra*, 4(4), 687-729. <https://doi.org/10.1193/1.1585498>
- Silgado Ferro, E. (1978). *Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú (1513-1974)*. Instituto de Geología y Minería.
- Structural Engineers Association of California. (1995). *Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings* (Technical Report) (Prepared by the SEAOC Ad Hoc Committee on Earthquake Engineering). Structural Engineers Association of California (SEAOC). Sacramento, California, Estados Unidos.
- Sumerente, G., Lovon, H., ... Chácará, C. (2020). Assessment of Combined In-Plane and Out-of-Plane Fragility Functions for Adobe Masonry Buildings in the Peruvian Andes. *Frontiers in Built Environment*, 6, 52. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00052>

- Tarque, N., Crowley, H., ... Varum, H. (2012). Displacement-Based Fragility Curves for Seismic Assessment of Adobe Buildings in Cusco, Peru. *Earthquake Spectra*, 28(2), 759-794. <https://doi.org/10.1193/1.4000001>
- Tarque Ruíz, S. N. (2011). *Numerical Modelling of the Seismic Behaviour of Adobe Buildings* [Tesis doctoral, Università degli Studi di Pavia] [Tesis Doctoral, PhD Programme in Earthquake Engineering].
- Tavera, H. (2014). *Evaluación del Peligro Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú* (inf. téc.). Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú.
- Tavera, H. (2025). Lima Acumula más de 275 Años de Silencio Sísmico. *Instituto Geofísico del Perú, Comunicado de Prensa*. <https://www.igp.gob.pe>
- Tavera, H., Bernal, I., & Stresser-Péan, H. (2007). *El Sismo de Pisco del 15 de Agosto de 2007 (7.9Mw), Departamento de Ica, Perú: Informe Preliminar* (inf. téc.). Instituto Geofísico del Perú. Lima. <https://repositorio.igp.gob.pe>
- Torres, W., Almazán, J. L., ... Boroschek, R. (2017). Operational modal analysis and FE model updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 143, 20. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.008>
- Usta, P., & Bozdağ, Ö. (2022). Seismic fragility analysis of traditional himis structures in Turkey. *Structures*, 43, 12. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.028>
- Valle Castro, A. P. (2019). *Evaluación experimental del comportamiento de muros de adobe reforzados con cuerdas sometidos a carga lateral cíclica* [Tesis de maestría]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- van den Bos, A. (2018, noviembre). *DIANA Finite Element Analysis* [Official Distributor Text]. SoilModels - Hub For Geotechnical Professionals. Consultado el 23 de diciembre de 2025, desde <https://soilmodels.com/dianafea/>
- Vargas-Neumann, J. (1993). Earthquake Resistant Rammed-Earth (Tapial) Buildings. *Proceedings of the 7th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture*, 503-508.
- Varum, H., Costa, A., ... Rodrigues, H. (2006). Caracterização Mecânica e Patológica das Construções em Adobe no Distrito de Aveiro como Suporte em Intervenções de Reabilitação. *Revista Conservar Património*, 3-4, 41-58.
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Journal*, 83(2), 219-231.
- Vega Fernández, G. (2020). *Evaluación del desempeño sísmico mediante el análisis estático no lineal, vivienda-comercio Miura Grill, Chiclayo* [Tesis de pregrado]. Universidad Señor de Sipán.
- Velarde Abugattas, G. K. (2014). *Análisis de vulnerabilidad sísmica de viviendas de dos pisos de adobe existente en Lima* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Walker, C. F. (2008). *Shaky Colonialism: The 1746 Earthquake-Tsunami in Lima, Peru, and Its Long Aftermath*. Duke University Press.

- Whitman, R. V., Reed, J. W., & Hong, S. T. (1973). Earthquake Damage Probability Matrices. *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, 2531-2540.
- Woo, G., Gargiulo, M. V., ... Capuano, P. (2024). Turkish earthquake death tolls: lessons from downward counterfactual analysis and informal construction [Open Access - Acceso gratuito verificado]. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1376924. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1376924>
- Wu, F., Li, G., ... Jia, J.-Q. (2013). Strength and Stress-Strain Characteristics of Traditional Adobe Block and Masonry. *Materials and Structures*, 46(9), 1449-1457. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9987-y>
- Xia, C., Nie, G., ... Zeng, X. (2023). Research on lethal levels of buildings based on historical seismic data. *Frontiers in Earth Science*, 10, 767586. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.767586>
- Yu, X., Hu, X., Song, Y., et al. (2024). Intelligent assessment of building damage of 2023 Turkey-Syria Earthquake by multiple remote sensing approaches. *npj Natural Hazards*, 1, 3. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00003-0>
- Zhang, Z.-J., Chen, B.-S., ... Liu, Y.-P. (2023). Non-Linear Behavior and Design of Steel Structures: Review and Outlook [Open Access - CC BY 4.0]. *Buildings*, 13(8), 2111. <https://doi.org/10.3390/buildings13082111>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (7th). Butterworth-Heinemann.

6. ANEXOS

6.1. Panel fotográfico: Recolección de fotografías en campo

Figura 129

Fotografía panorámica del distrito de Huancaray



Nota. Imagen propia.

Figura 130

Detalle constructivo de muros de adobe y estado de conservación de la vivienda V-01



Nota. Imagen propia. Vivienda V-01, distrito de Huancaray, Apurímac.

Figura 131

Vista frontal de la vivienda de adobe V-01 mostrando configuración estructural de dos niveles



Nota. Imagen propia. Vivienda V-01, distrito de Huancaray, Apurímac.

Figura 132

Vista en esquina de la vivienda V-02 durante el levantamiento de campo



Nota. Imagen propia. Vivienda V-02, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.757777° , Long. -73.527047°). Se aprecia la configuración en esquina de la edificación de adobe con cobertura de teja artesanal y revestimiento de mortero en estado de deterioro avanzado.

Figura 133

Vista de la vivienda V-02 mostrando fachada principal y estado de conservación de los muros de adobe



Nota. Imagen propia. Vivienda V-02, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.757756° , Long. -73.527033°). Se observa el deterioro superficial del revestimiento de mortero de barro en la fachada principal, con exposición de la mampostería de adobe.

Figura 134

Vista lateral de la vivienda V-02 evidenciando configuración estructural y degradación del revestimiento exterior



Nota. Imagen propia. Vivienda V-02, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.7577° , Long. -73.527025°). Vista lateral que muestra la longitud de la edificación, la cobertura de teja artesanal a un agua y el estado de deterioro generalizado de los muros de adobe.

Figura 135

Vista lateral de la vivienda V-03 mostrando el sistema constructivo de adobe y configuración estructural



Nota. Imagen propia. Vivienda V-03, sector Turpo, Apurímac. Se observan los dos niveles de muros de adobe, la presencia de balcón de madera en el segundo nivel y el estado de conservación aparente de la edificación.

Figura 136

Vista lateral de la vivienda V-04 evidenciando balcón de madera y configuración de dos niveles



Nota. Imagen propia. Vivienda V-04, sector Turpo, Apurímac (Lat. -13.770651° , Long. -73.486688°). Se aprecia el balcón de madera en el segundo nivel como elemento estructural característico de la tipología constructiva local.

Figura 137

Vista frontal de la vivienda V-04 mostrando fachada principal y vanos de puertas y ventanas



Nota. Imagen propia. Vivienda V-04, sector Turpo, Apurímac. Se observa la distribución de vanos en la fachada principal, muros de adobe sin revestimiento y cobertura de calamina a dos aguas.

Figura 138

Vista en esquina de la vivienda V-05 durante el levantamiento de campo en el distrito de Huancaray



Nota. Imagen propia. Vivienda V-05, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.757883° , Long. -73.528149°). Edificación de adobe de dos niveles ubicada en zona urbana del distrito, con revestimiento de mortero de barro y cobertura de teja artesanal.

Figura 139

Levantamiento geométrico de la vivienda V-06 mediante medición con wincha en el distrito de Huancaray



Nota. Imagen propia. Vivienda V-06, distrito de Huancaray, Apurímac (Lat. -13.757363° , Long. -73.528812°). Se aprecia el proceso de levantamiento geométrico con wincha métrica, evidenciando la configuración rectangular alargada de la edificación.

Figura 140

Vista frontal completa de la vivienda V-06 mostrando configuración estructural y estado de conservación



Nota. Imagen propia. Vivienda V-06, distrito de Huancaray, Apurímac. Se observa la fachada principal de la edificación de adobe de dos niveles con configuración rectangular alargada, cobertura de teja artesanal y revestimiento de mortero de barro en estado deteriorado.

6.2. Matriz de consistencia y operacionalización

La matriz de consistencia y operacionalización de variables, se detallan a continuación:

Cuadro 85
Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
Problema general: ¿De qué manera el modelamiento numérico no lineal permite analizar la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025, según los criterios establecidos por INDECI?	Objetivo general: Analizar la vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025, según los criterios establecidos por INDECI.	Hipótesis general: El análisis de la vulnerabilidad sísmica mediante modelamiento numérico no lineal permite demostrar que las viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un nivel de vulnerabilidad alto según los criterios de INDECI.		Enfoque: Cuantitativo
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Independiente (X): Modelamiento numérico no lineal	Alcance: Correlacional-comparativo
PE1: ¿Cuál es el comportamiento estructural determinado mediante el análisis no lineal estático pushover en DIANA FEA en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025?	OE1: Desarrollar el análisis no lineal estático pushover mediante el modelamiento en DIANA FEA en viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025.	HE1: El análisis no lineal estático pushover mediante DIANA FEA demuestra que las viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan un comportamiento estructural frágil, con capacidad de desplazamiento lateral limitada y mecanismos de falla predominantes por corte diagonal en muros.	Dimensiones: – X1: Análisis pushover – X2: Modelamiento DIANA FEA – X3: Propiedades del material – X4: Tipología estructural	Diseño: No experimental, transversal
PE2: ¿Cuál es la precisión de las tablas de la INDECI frente a los resultados estructurales obtenidos por modelamiento no lineal en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025?	OE2: Analizar la precisión de las tablas de la INDECI frente a los resultados estructurales obtenidos por modelamiento no lineal en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025.	HE2: Las tablas de evaluación de vulnerabilidad sísmica de INDECI presentan limitaciones de precisión al ser contrastadas con los resultados obtenidos mediante modelamiento numérico no lineal.	Dependiente (Y): Vulnerabilidad sísmica	Población: 250 viviendas de adobe de 2 niveles en Huancaray
PE3: ¿Cuáles son las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray y qué vulnerabilidades estructurales comunes presentan que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural?	OE3: Identificar las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray y determinar las vulnerabilidades estructurales comunes que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural específico.	HE3: Las tipologías predominantes de viviendas rurales autoconstruidas de adobe en el distrito de Huancaray presentan vulnerabilidades estructurales comunes que pueden ser mitigadas mediante soluciones de reforzamiento estructural específico.	Dimensiones: – Y1: Configuración estructural – Y2: Índice de vulnerabilidad numérico – Y3: Calidad constructiva – Y4: Parámetros INDECI	Muestra: 3 viviendas (no probabilístico por conveniencia)
				Técnicas: Observación directa, medición, modelamiento numérico
				Instrumentos: Fichas INDECI, fichas de levantamiento, DIANA FEA

Nota. Elaboración propia.

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Cuadro 86
Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad
Independiente (X): Modelamiento numérico no lineal	X1: Análisis pushover	Curva de capacidad (cortante vs. desplazamiento)	kN vs mm
		Resistencia lateral máxima / Cortante basal máximo	kN
		Desplazamiento máximo en punto de control	mm
		Deriva máxima de entrepiso	%
	X2: Modelamiento DIANA FEA	Geometría estructural (planta, altura, espesor muros)	m
		Discretización (número de elementos y nodos)	Número
		Convergencia del modelo / Patrón de agrietamiento	% / Categórico
	X3: Propiedades del material	Resistencia a compresión (f'_c)	MPa
		Resistencia a tracción (f_t)	MPa
		Módulo de elasticidad (E)	MPa
		Densidad (ρ) / Coef. Poisson (ν)	kg/m ³ / Adim.
	X4: Tipología estructural	Número de pisos / Tipo de cubierta	Número / Categ.
		Área de muros en dirección X e Y	m ²
		Densidad de muros / Presencia de refuerzos	% / Pres./Aus.
	Y1: Configuración estructural	Regularidad en planta / Regularidad en elevación	Categórico
		Relación altura/espesor de muro (esbeltez)	Adimensional
		Presencia de arriostres (viga collar, contrafuertes)	Pres./Ausencia
Dependiente (Y): Vulnerabilidad sísmica	Y2: Índice vulnerabilidad numérico	Índice de daño según resultados DIANA FEA	Escala 0-1
		Deriva máxima vs. deriva límite NTE E.030	%
		Ductilidad global disponible	Adimensional
	Y3: Calidad constructiva	Clasificación de vulnerabilidad numérica	Baja/Media/Alta
		Composición del adobe / Técnica de elaboración	Categórico
		Estado de conservación de muros	Bueno/Reg./Malo
		Calidad de mortero / Patologías presentes	Categórico
	Y4: Parámetros INDECI	Nivel de vulnerabilidad según fichas técnicas	Baja/Media/Alta/Muy alta
		Índice de vulnerabilidad normalizado	Escala 0-100
		Factor de zona sísmica (Z) / Tipo de suelo	Adim. / S0-S4

Nota. Elaboración propia.

**DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA PARA CASOS DE SISMO
FICHA DE VERIFICACION****A.- UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA VIVIENDA**

1. UBICACIÓN GEOGRAFICA		2. UBICACION CENSAL (Fuente INEI)		3. FECHA y HORA		
1 Departamento		1 Zona	Nº		dd	mm
2 Provincia		2 Manzana	Nº		aa	
3 Distrito		3 Lote	Nº		Hora	: horas

4. DIRECCION DE LA VIVIENDA	1 Avenida ()	2 Jirón ()	3 Pasaje ()	4 Carretera ()	5 Otro: ()		
Nombre de la Calle, Av, Jr, etc.		Puerta Nº	Interior	Piso	Mz	Lote	Km
Nombre de la Urbanización / Asentamiento Humano /Asoc. de vivienda /otros							
Referencia:							

5. APELLIDOS Y NOMBRES DEL JEFE(A) DE HOGAR O ENTREVISTADO(A)							
Apellido Paterno							
Apellido Materno							
Nombres		6. DNI					

B.- INFORMACIÓN DEL INMUEBLE POR OBSERVACIÓN DIRECTA

1. DESDE EL EXTERIOR SE PUEDE OBSERVAR QUE :	2. LA VIVIENDA SE ENCUENTRA ...
1 En caso de colapso, por el predominante deterioro, SI compromete al área colindante ()	1 Habitada ()
2 Ante posible colapso, por el predominante deterioro, NO compromete al área colindante ()	2 No habitada ()
3 No muestra precariedad ()	3 Habitada, pero sin ocupantes ()
4 No fue posible observar el estado general de la vivienda ()	

En caso la respuesta corresponda a La Vivienda se encuentra NO habitada se deberá pasar al campo Nº 6 de la sección "C" y CONCLUIR LA VERIFICACIÓN

C.- CARACTERISTICAS DEL TIPO DE VIVIENDA

1. CUENTA CON PUERTA INDEPENDIENTE	2. FORMA PARTE DE UN COMPLEJO	3. TOTAL DE OCUPANTES (Cantidad de personas)
1 SÍ cuenta con puerta de calle ()	1 Multifamiliar horizontal ()	1 De la vivienda
2 NO es parte de un complejo multifamiliar ()	2 Multifamiliar vertical ()	2 Del complejo multifamiliar (aproximado)
	3 No Aplica ()	

4. CANTIDAD DE PISOS DE LA VIVIENDA	5. CANTIDAD DE PISOS DEL COMPLEJO MULTIFAMILIAR
1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1º piso)	1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1º piso)
2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)	2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)
3 No aplica por ser vivienda multifamiliar	3 No aplica por ser vivienda unifamiliar

6. FACTORES CRITICOS PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD "MUY ALTO" o "ALTO":	
1 El inmueble se encuentra en un terreno inapropiado para edificar	()
2 Encontrarse el inmueble en una ubicación expuesta a derrumbes y/o deslizamientos	()
3 Otro:	()
4 Otro:	()
5 No aplica	()

De ser necesario, se deberá especificar los factores y tener en consideración esta información para la evaluación de las edificaciones colindantes.

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



D.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA

1. MATERIAL PREDOMINANTE DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Adobe ()	4	6 Adobe reforzado ()	3	8 Albañilería confinada ()	2	9 Concreto Armado ()	1
2 Quincha ()							
3 Mampostería ()							
4 Madera ()							
5 Otros ()							
2. LA EDIFICACION CONTÓ CON LA PARTICIPACION DE INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No ()	4	2 Solo Construcción ()	3	3 Solo diseño ()	3	4 Si, totalmente ()	1
3. ANTIGÜEDAD DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Mas de 50 años ()	4	2 De 20 a 49 años ()	3	3 De 3 a 19 años ()	2	4 De 0 a 2 años ()	1
4. TIPO DE SUELO							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Rellenos ()	4	4 Depósito de suelos finos ()	3	6 Granular fino y arcilloso ()	2	7 Suelos rocosos ()	1
2 Depósitos marinos ()							
3 Pantanosos, turba ()							
5. TOPOGRAFIA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% ()	2	4 Hasta 10% ()	1
6. TOPOGRAFIA DEL TERRENO COLINDANTE A LA VIVIENDA Y/O EN AREA DE INFLUENCIA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% ()	2	4 Hasta 10% ()	1
7. CONFIGURACION GEOMETRICA EN PLANTA				8. CONFIGURACION GEOMETRICA EN ELEVACION			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1	1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1
9. JUNTAS DE DILATACION SISMICA SON ACORDES A LA ESTRUCTURA				10. EXISTE CONCENTRACION DE MASAS EN NIVELES ...			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No / No Existen ()	4	2 Si ()	1	1 Superiores ()	4	2 Inferiores ()	1
11. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA							
11.1 No existen/son Precarios	Valor	11.2 Deterioro y/o humedad	Valor	11.3 Regular estado	Valor	11.4 Buen estado	Valor
1 Cimiento ()	4	1 Cimiento ()	3	1 Cimiento ()	2	1 Cimiento ()	1
2 Columnas ()							
3 Muros portantes ()							
4 Vigas ()							
5 Techos ()							
12. OTROS FACTORES QUE INCIDEN EN LA VULNERABILIDAD POR ...							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Humedad ()	4	4 Debilitamiento por modificaciones ()	4	6 Densidad de muros inadecuada ()	4	8 No aplica: ()	0
2 Cargas laterales ()							
3 Colapso elementos del entorno ()							
5 Debilitamiento por sobrecarga ()							

E.- DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA

Llevar los valores más críticos de cada uno de los campos de la Sección D

E.1.- SUMATORIA DE VALORES DE LA SECCION "D" CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA												
Σ												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 = Total

E.2.- Calificación del Nivel de Vulnerabilidad de la vivienda

Nivel de Vulnerabilidad	Rango del Valor	Características del Nivel de Vulnerabilidad	Calificación Según E.1 (marcar con "X")
MUY ALTO	Mayor a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	
ALTO	Entre 18 a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación, requiere cambios drásticos en la estructura.	
MODERADO	Entre 15 a 17	Requiere reforzamiento en potencial Zona de Seguridad Interna.	
BAJO	Hasta 14	En las condiciones actuales es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



F.- RECOMENDACIONES DE CARÁCTER INMEDIATO PARA JEFE(A) DE HOGAR

Calificación viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones Generales para caso de SISMOS (*)	Calificación (marcar con "X")
MUY ALTO	La Vivienda NO DEBE SER HABITADA Muy Importante: * Si el Nivel de Vulnerabilidad responde a factores inherentes al Tipo de Suelo, Ubicación y/o normas vigentes, la restricción del uso del terreno es Definitiva * Si el Nivel de Vulnerabilidad corresponde a elementos estructurales de la vivienda considerar reconstrucción si el uso del terreno es adecuado.	()
ALTO	En caso de Sismo se debe EVACUAR la edificación en forma inmediata ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Reforzar los elementos de la vía de evacuación, en caso de ser factible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
MODERADO	Determinar y/o REFORZAR la potencial Zona de Seguridad Interna ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; REFORZAR la vía de evacuación; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
BAJO	Determinar la Zona de Seguridad Interna ; Determinar la vía de evacuación ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()

Otras recomendaciones:

* Para viviendas cercanas al mar, tener en cuenta las recomendaciones para caso de tsunami

G.- RECOMENDACION REFERIDA A LA POTENCIAL "ZONA DE SEGURIDAD" Y/O "VIA DE EVACUACION"

El Nivel de Vulnerabilidad viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones para la ZONA DE SEGURIDAD y/o VIA DE EVACUACION
MUY ALTO	NO aplica , la Vivienda NO ES HABITABLE
ALTO	NO aplica recomendar zona de seguridad interna Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
MODERADO	REFORZAR potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. <i>Si la Zona de Seguridad no es suficiente para la cantidad de personas que la requieren, para el uso de esta área se deberá dar prioridad a las personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes).</i> Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
BAJO	Potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. <i>Si la Zona de Seguridad no es suficiente, para el uso de esta área se deberá priorizar a personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes).</i> Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos

..... de 2010
Lugar y fecha de recepción de la copia de la ficha

Firma

Firma

DNI N°.....

DNI N°.....

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indec.gov.pe

DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA PARA CASOS DE SISMO
FICHA DE VERIFICACION

A.- UBICACION GEOGRAFICA DE LA VIVIENDA

1. UBICACIÓN GEOGRAFICA		2. UBICACION CENSAL (Fuente INEI)		3. FECHA y HORA		
1 Departamento	APURIMAC	1 Zona N°	01	09	09	25
2 Provincia	ANDAHUAYLAS	2 Manzana N°		dd	mm	aa
3 Distrito	HUANCARAY	3 Lote N°		Hora 11	:	30 horas

4. DIRECCION DE LA VIVIENDA	1 Avenida ()	2 Jirón (x)	3 Pasaje ()	4 Carretera ()	5 Otro: ()		
Nombre de la Calle, Av, Jr, etc.		Puerta N°	Interior	Piso	Mz	Lote	Km
Jr. COMERCIO s/n		04					
Nombre de la Urbanización / Asentamiento Humano /Asoc. de vivienda /otros							
Referencia: CERCA A LA PLAZA DE HUANCARAY							

5. APELLIDOS Y NOMBRES DEL JEFE(A) DE HOGAR O ENTREVISTADO(A)												
Apellido Paterno	RODAS											
Apellido Materno	RODAS											
Nombres	PABLO			6. DNI	3	1	1	8	1	8	4	4

B.- INFORMACIÓN DEL INMUEBLE POR OBSERVACIÓN DIRECTA

1. DESDE EL EXTERIOR SE PUEDE OBSERVAR QUE :	2. LA VIVIENDA SE ENCUENTRA ...
1 En caso de colapso, por el predominante deterioro, SI compromete al área colindante ()	1 Habitada (x)
2 Ante posible colapso, por el predominante deterioro, NO compromete al área colindante ()	2 No habitada ()
3 No muestra precariedad (x)	3 Habitada, pero sin ocupantes ()
4 No fue posible observar el estado general de la vivienda ()	

En caso la respuesta corresponda a La Vivienda se encuentra NO habitada se deberá pasar al campo N° 6 de la sección "C" y CONCLUIR LA VERIFICACIÓN

C.- CARACTERÍSTICAS DEL TIPO DE VIVIENDA

1. CUENTA CON PUERTA INDEPENDIENTE	2. FORMA PARTE DE UN COMPLEJO	3. TOTAL DE OCUPANTES (Cantidad de personas)
1 SI cuenta con puerta de calle (x)	1 Multifamiliar horizontal ()	1 De la vivienda x
2 NO es parte de un complejo multifamiliar ()	2 Multifamiliar vertical (x)	2 Del complejo multifamiliar (aproximado)
	3 No Aplica ()	

4. CANTIDAD DE PISOS DE LA VIVIENDA	5. CANTIDAD DE PISOS DEL COMPLEJO MULTIFAMILIAR
1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1º piso) 02	1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1º piso) 02
2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)	2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)
3 No aplica por ser vivienda multifamiliar	3 No aplica por ser vivienda unifamiliar

6. FACTORES CRITICOS PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD "MUY ALTO" o "ALTO":
1 El inmueble se encuentra en un terreno inapropiado para edificar ()
2 Encontrarse el inmueble en una ubicación expuesta a derrumbes y/o deslizamientos ()
3 Otro: (x)
4 Otro: ()
5 No aplica ()

De ser necesario, se deberá especificar los factores y tener en consideración esta información para la evaluación de las edificaciones colindantes.

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe

**D.- CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA**

1. MATERIAL PREDOMINANTE DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Adobe (X)	4	6 Adobe reforzado ()	3	8 Albañilería confinada ()	2	9 Concreto Armado ()	1
2 Quincha ()							
3 Mampostería ()							
4 Madera ()							
5 Otros ()							
2. LA EDIFICACION CONTÓ CON LA PARTICIPACION DE INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No (X)	4	2 Solo Construcción ()	3	3 Solo diseño ()	3	4 Si, totalmente ()	1
3. ANTIGÜEDAD DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Mas de 50 años ()	4	2 De 20 a 49 años (X)	3	3 De 3 a 19 años ()	2	4 De 0 a 2 años ()	1
4. TIPO DE SUELO							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Rellenos (X)	4	4 Depósito de suelos finos ()	3	6 Granular fino y arcilloso ()	2	7 Suelos rocosos ()	1
2 Depósitos marinos ()							
3 Pantanosos, turba ()							
5. TOPOGRAFIA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% (X)	2	4 Hasta 10% ()	1
6. TOPOGRAFIA DEL TERRENO COLINDANTE A LA VIVIENDA Y/O EN AREA DE INFLUENCIA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% (X)	2	4 Hasta 10% ()	1
7. CONFIGURACION GEOMETRICA EN PLANTA				8. CONFIGURACION GEOMETRICA EN ELEVACION			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Irregular ()	4	2 Regular (X)	1	1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1
9. JUNTAS DE DILATACION SISMICA SON ACORDES A LA ESTRUCTURA				10. EXISTE CONCENTRACION DE MASAS EN NIVELES ...			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No / No Existen (X)	4	2 Si ()	1	1 Superiores ()	4	2 Inferiores ()	1
11. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA							
11.1 No existen/ son Precarios	Valor	11.2 Deterioro y/o humedad	Valor	11.3 Regular estado	Valor	11.4 Buen estado	Valor
1 Cimiento (X)	4	1 Cimiento ()	3	1 Cimiento ()	2	1 Cimiento ()	1
2 Columnas (X)							
3 Muros portantes ()							
4 Vigas ()							
5 Techos ()							
12. OTROS FACTORES QUE INCIDEN EN LA VULNERABILIDAD POR ...							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Humedad (X)	4	4 Debilitamiento por modificaciones ()	4	6 Densidad de muros inadecuada ()	4	8 No aplica: ()	0
2 Cargas laterales ()							
3 Colapso elementos del entorno ()							
5 Debilitamiento por sobrecarga (X)		7 Otros:..... ()					

E.- DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA

Llevar los valores más críticos de cada uno de los campos de la Sección D

E.1.- SUMATORIA DE VALORES DE LA SECCION "D" CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA												
4	4	2	3	2	2	1	1	4	4	3	5	= 35
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total

E.2.- Calificación del Nivel de Vulnerabilidad de la vivienda

Nivel de Vulnerabilidad	Rango del Valor	Características del Nivel de Vulnerabilidad	Calificación Según E.1 (marcar con "X")
MUY ALTO	Mayor a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	X
ALTO	Entre 18 a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación, requiere cambios drásticos en la estructura.	
MODERADO	Entre 15 a 17	Requiere reforzamiento en potencial Zona de Seguridad Interna.	
BAJO	Hasta 14	En las condiciones actuales es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



F. - RECOMENDACIONES DE CARÁCTER INMEDIATO PARA JEFE(A) DE HOGAR

Calificación viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones Generales para caso de SISMOS (*)	Calificación (marcar con X)
MUY ALTO	La Vivienda NO DEBE SER HABITADA <i>Muy Importante:</i> * Si el Nivel de Vulnerabilidad responde a factores inherentes al Tipo de Suelo, Ubicación y/o normas vigentes, la restricción del uso del terreno es Definitiva * Si el Nivel de Vulnerabilidad corresponde a elementos estructurales de la vivienda considerar reconstrucción si el uso del terreno es adecuado.	(X)
ALTO	En caso de Sismo se debe EVACUAR la edificación en forma inmediata; Reconocer la vía de evacuación, eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Reforzar los elementos de la vía de evacuación, en caso de ser factible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
MODERADO	Determinar y/o REFORZAR la potencial Zona de Seguridad Interna; Reconocer la vía de evacuación, eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; REFORZAR la vía de evacuación; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
BAJO	Determinar la Zona de Seguridad Interna; Determinar la vía de evacuación; Reconocer la vía de evacuación, eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()

Otras recomendaciones:

SE RECOMIENDA HACER UN REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA. DADO QUE PRESENTA UNA HUMEDAD EXCESIVA, COMO TAMBIEN LA CANTIDAD DE PISOS HACE QUE SEA VULNERABLE DICHA VIVIENDA

* Para viviendas cercanas al mar, tener en cuenta las recomendaciones para caso de tsunami

G. - RECOMENDACION REFERIDA A LA POTENCIAL "ZONA DE SEGURIDAD" Y/O "VIA DE EVACUACION"

El Nivel de Vulnerabilidad viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones para la ZONA DE SEGURIDAD y/o VIA DE EVACUACION
MUY ALTO	NO aplica, la Vivienda NO ES HABITABLE
ALTO	NO aplica recomendar zona de seguridad interna Vía de evacuación recomendada: <i>Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos</i>
MODERADO	REFORZAR potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. <i>Si la Zona de Seguridad no es suficiente para la cantidad de personas que la requieren, para el uso de esta área se deberá dar prioridad a las personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes).</i> Vía de evacuación recomendada: <i>Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos</i>
BAJO	Potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. <i>Si la Zona de Seguridad no es suficiente para el uso de esta área se deberá priorizar a personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes).</i> Vía de evacuación recomendada: <i>Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos</i>

HUANCARAY, 09 DE SETIEMBRE DEL 2025

..... de 2010

Lugar y fecha de recepción de la copia de la ficha

Firma

RODAS RODAS PABLO

Nombres y APELLIDOS de Jefe(a) de hogar o entrevistado(a)

DNI N° 31181844

Firma

CARDENAS BERROCAL KELVIN JACK

Nombres y APELLIDOS de Verificador(a)

DNI N° 70668463

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;

Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;

Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe

**DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA PARA CASOS DE SISMO
FICHA DE VERIFICACION****A.- UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA VIVIENDA**

1. UBICACIÓN GEOGRAFICA		2. UBICACION CENSAL (Fuente INEI)		3. FECHA y HORA		
1 Departamento		1 Zona	N°			
2 Provincia		2 Manzana	N°		dd	mm
3 Distrito		3 Lote	N°		aa	
				Hora	:	horas

4. DIRECCION DE LA VIVIENDA	1 Avenida ()	2 Jirón ()	3 Pasaje ()	4 Carretera ()	5 Otro: ()		
Nombre de la Calle, Av, Jr, etc.			Puerta N°	Interior	Piso	Mz	Lote
Nombre de la Urbanización / Asentamiento Humano /Asoc. de vivienda /otros							
Referencia:							

5. APELLIDOS Y NOMBRES DEL JEFE(A) DE HOGAR O ENTREVISTADO(A)							
Apellido Paterno							
Apellido Materno							
Nombres		6. DNI					

B.- INFORMACIÓN DEL INMUEBLE POR OBSERVACIÓN DIRECTA

1. DESDE EL EXTERIOR SE PUEDE OBSERVAR QUE :	2. LA VIVIENDA SE ENCUENTRA ...
1 En caso de colapso, por el predominante deterioro, SI compromete al área colindante ()	1 Habitada ()
2 Ante posible colapso, por el predominante deterioro, NO compromete al área colindante ()	2 No habitada ()
3 No muestra precariedad ()	3 Habitada, pero sin ocupantes ()
4 No fue posible observar el estado general de la vivienda ()	

En caso la respuesta corresponda a La Vivienda se encuentra NO habitada se deberá pasar al campo N° 6 de la sección "C" y CONCLUIR LA VERIFICACIÓN

C.- CARACTERISTICAS DEL TIPO DE VIVIENDA

1. CUENTA CON PUERTA INDEPENDIENTE	2. FORMA PARTE DE UN COMPLEJO	3. TOTAL DE OCUPANTES (Cantidad de personas)
1 SÍ cuenta con puerta de calle ()	1 Multifamiliar horizontal ()	1 De la vivienda
2 NO es parte de un complejo multifamiliar ()	2 Multifamiliar vertical ()	2 Del complejo multifamiliar (aproximado)
	3 No Aplica ()	

4. CANTIDAD DE PISOS DE LA VIVIENDA	5. CANTIDAD DE PISOS DEL COMPLEJO MULTIFAMILIAR
1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1° piso)	1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1° piso)
2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)	2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)
3 No aplica por ser vivienda multifamiliar	3 No aplica por ser vivienda unifamiliar

6. FACTORES CRITICOS PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD "MUY ALTO" o "ALTO":	
1 El inmueble se encuentra en un terreno inapropiado para edificar	()
2 Encontrarse el inmueble en una ubicación expuesta a derrumbes y/o deslizamientos	()
3 Otro:	()
4 Otro:	()
5 No aplica	()

De ser necesario, se deberá especificar los factores y tener en consideración esta información para la evaluación de las edificaciones colindantes.

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



D.- CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA

1. MATERIAL PREDOMINANTE DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Adobe ()	4	6 Adobe reforzado ()	3	8 Albañilería confinada ()	2	9 Concreto Armado ()	1
2 Quincha ()							
3 Mampostería ()							
4 Madera ()							
5 Otros ()							
2. LA EDIFICACION CONTÓ CON LA PARTICIPACION DE INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No ()	4	2 Solo Construcción ()	3	3 Solo diseño ()	3	4 Si, totalmente ()	1
3. ANTIGÜEDAD DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Mas de 50 años ()	4	2 De 20 a 49 años ()	3	3 De 3 a 19 años ()	2	4 De 0 a 2 años ()	1
4. TIPO DE SUELO							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Rellenos ()	4	4 Depósito de suelos finos ()	3	6 Granular fino y arcilloso ()	2	7 Suelos rocosos ()	1
2 Depósitos marinos ()							
3 Pantanosos, turba ()							
5. TOPOGRAFIA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% ()	2	4 Hasta 10% ()	1
6. TOPOGRAFIA DEL TERRENO COLINDANTE A LA VIVIENDA Y/O EN AREA DE INFLUENCIA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% ()	2	4 Hasta 10% ()	1
7. CONFIGURACION GEOMETRICA EN PLANTA				8. CONFIGURACION GEOMETRICA EN ELEVACION			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1	1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1
9. JUNTAS DE DILATACION SISMICA SON ACORDES A LA ESTRUCTURA				10. EXISTE CONCENTRACION DE MASAS EN NIVELES ...			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No / No Existen ()	4	2 Si ()	1	1 Superiores ()	4	2 Inferiores ()	1
11. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA							
11.1 No existen/son Precarios	Valor	11.2 Deterioro y/o humedad	Valor	11.3 Regular estado	Valor	11.4 Buen estado	Valor
1 Cimiento ()	4	1 Cimiento ()	3	1 Cimiento ()	2	1 Cimiento ()	1
2 Columnas ()							
3 Muros portantes ()							
4 Vigas ()							
5 Techos ()							
12. OTROS FACTORES QUE INCIDEN EN LA VULNERABILIDAD POR ...							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Humedad ()	4	4 Debilitamiento por modificaciones ()	4	6 Densidad de muros inadecuada ()	4	8 No aplica: ()	0
2 Cargas laterales ()							
3 Colapso elementos del entorno ()							
5 Debilitamiento por sobrecarga ()							

E.- DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA

Llevar los valores más críticos de cada uno de los campos de la Sección D

E.1.- SUMATORIA DE VALORES DE LA SECCION "D" CARACTERISTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA												
Σ												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 = Total

E.2.- Calificación del Nivel de Vulnerabilidad de la vivienda

Nivel de Vulnerabilidad	Rango del Valor	Características del Nivel de Vulnerabilidad	Calificación Según E.1 (marcar con "X")
MUY ALTO	Mayor a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	
ALTO	Entre 18 a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación, requiere cambios drásticos en la estructura.	
MODERADO	Entre 15 a 17	Requiere reforzamiento en potencial Zona de Seguridad Interna.	
BAJO	Hasta 14	En las condiciones actuales es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



F.- RECOMENDACIONES DE CARÁCTER INMEDIATO PARA JEFE(A) DE HOGAR

Calificación viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones Generales para caso de SISMOS (*)	Calificación (marcar con "X")
MUY ALTO	La Vivienda NO DEBE SER HABITADA Muy Importante: * Si el Nivel de Vulnerabilidad responde a factores inherentes al Tipo de Suelo, Ubicación y/o normas vigentes, la restricción del uso del terreno es Definitiva * Si el Nivel de Vulnerabilidad corresponde a elementos estructurales de la vivienda considerar reconstrucción si el uso del terreno es adecuado.	()
ALTO	En caso de Sismo se debe EVACUAR la edificación en forma inmediata ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Reforzar los elementos de la vía de evacuación, en caso de ser factible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
MODERADO	Determinar y/o REFORZAR la potencial Zona de Seguridad Interna ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; REFORZAR la vía de evacuación; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
BAJO	Determinar la Zona de Seguridad Interna ; Determinar la vía de evacuación ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()

Otras recomendaciones:

* Para viviendas cercanas al mar, tener en cuenta las recomendaciones para caso de tsunami

G.- RECOMENDACION REFERIDA A LA POTENCIAL "ZONA DE SEGURIDAD" Y/O "VIA DE EVACUACION"

El Nivel de Vulnerabilidad viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones para la ZONA DE SEGURIDAD y/o VIA DE EVACUACION
MUY ALTO	NO aplica , la Vivienda NO ES HABITABLE
ALTO	NO aplica recomendar zona de seguridad interna Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
MODERADO	REFORZAR potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. Si la Zona de Seguridad no es suficiente para la cantidad de personas que la requieren, para el uso de esta área se deberá dar prioridad a las personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes). Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
BAJO	Potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. Si la Zona de Seguridad no es suficiente, para el uso de esta área se deberá priorizar a personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes). Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos

Firma

Nombres y APELLIDOS de Jefe(a) de hogar o entrevistado(a)

DNI N°

..... de 2010
Lugar y fecha de recepción de la copia de la ficha

Firma

Nombres y APELLIDOS de Verificador(a)

DNI N°

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe

**DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA PARA CASOS DE SISMO
FICHA DE VERIFICACION****A.- UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA VIVIENDA**

1. UBICACIÓN GEOGRAFICA		2. UBICACION CENSAL (Fuente INEI)		3. FECHA y HORA		
1 Departamento		1 Zona N°		dd	mm	aa
2 Provincia		2 Manzana N°		Hora : horas		
3 Distrito		3 Lote N°				

4. DIRECCION DE LA VIVIENDA	1 Avenida ()	2 Jirón ()	3 Pasaje ()	4 Carretera ()	5 Otro: ()		
Nombre de la Calle, Av, Jr, etc.		Puerta N°	Interior	Piso	Mz	Lote	Km
Nombre de la Urbanización / Asentamiento Humano /Asoc. de vivienda /otros							
Referencia:							

5. APELLIDOS Y NOMBRES DEL JEFE(A) DE HOGAR O ENTREVISTADO(A)							
Apellido Paterno							
Apellido Materno							
Nombres		6. DNI					

B.- INFORMACIÓN DEL INMUEBLE POR OBSERVACIÓN DIRECTA

1. DESDE EL EXTERIOR SE PUEDE OBSERVAR QUE :	2. LA VIVIENDA SE ENCUENTRA ...
1 En caso de colapso, por el predominante deterioro, SI compromete al área colindante ()	1 Habitada ()
2 Ante posible colapso, por el predominante deterioro, NO compromete al área colindante ()	2 No habitada ()
3 No muestra precariedad ()	3 Habitada, pero sin ocupantes ()
4 No fue posible observar el estado general de la vivienda ()	

En caso la respuesta corresponda a La Vivienda se encuentra NO habitada se deberá pasar al campo N° 6 de la sección "C" y CONCLUIR LA VERIFICACIÓN

C.- CARACTERISTICAS DEL TIPO DE VIVIENDA

1. CUENTA CON PUERTA INDEPENDIENTE	2. FORMA PARTE DE UN COMPLEJO	3. TOTAL DE OCUPANTES (Cantidad de personas)
1 SÍ cuenta con puerta de calle ()	1 Multifamiliar horizontal ()	1 De la vivienda
2 NO es parte de un complejo multifamiliar ()	2 Multifamiliar vertical ()	2 Del complejo multifamiliar (aproximado)
	3 No Aplica ()	

4. CANTIDAD DE PISOS DE LA VIVIENDA	5. CANTIDAD DE PISOS DEL COMPLEJO MULTIFAMILIAR
1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1° piso)	1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1° piso)
2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)	2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)
3 No aplica por ser vivienda multifamiliar	3 No aplica por ser vivienda unifamiliar

6. FACTORES CRITICOS PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD "MUY ALTO" o "ALTO":	
1 El inmueble se encuentra en un terreno inapropiado para edificar	()
2 Encontrarse el inmueble en una ubicación expuesta a derrumbes y/o deslizamientos	()
3 Otro:	()
4 Otro:	()
5 No aplica	()

De ser necesario, se deberá especificar los factores y tener en consideración esta información para la evaluación de las edificaciones colindantes.

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



D.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA

1. MATERIAL PREDOMINANTE DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Adobe ()	4	6 Adobe reforzado ()	3	8 Albañilería confinada ()	2	9 Concreto Armado ()	1
2 Quincha ()							
3 Mampostería ()							
4 Madera ()							
5 Otros ()							
2. LA EDIFICACION CONTÓ CON LA PARTICIPACION DE INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No ()	4	2 Solo Construcción ()	3	3 Solo diseño ()	3	4 Si, totalmente ()	1
3. ANTIGÜEDAD DE LA EDIFICACION							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Mas de 50 años ()	4	2 De 20 a 49 años ()	3	3 De 3 a 19 años ()	2	4 De 0 a 2 años ()	1
4. TIPO DE SUELO							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Rellenos ()	4	4 Depósito de suelos finos ()	3	6 Granular fino y arcilloso ()	2	7 Suelos rocosos ()	1
2 Depósitos marinos ()							
3 Pantanosos, turba ()							
5. TOPOGRAFIA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% ()	2	4 Hasta 10% ()	1
6. TOPOGRAFIA DEL TERRENO COLINDANTE A LA VIVIENDA Y/O EN AREA DE INFLUENCIA							
Muy Pronunciada	Valor	Pronunciada	Valor	Moderada	Valor	Plana o Ligera	Valor
1 Mayor a 45% ()	4	2 Entre 45% a 20% ()	3	3 Entre 20% a 10% ()	2	4 Hasta 10% ()	1
7. CONFIGURACION GEOMETRICA EN PLANTA				8. CONFIGURACION GEOMETRICA EN ELEVACION			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1	1 Irregular ()	4	2 Regular ()	1
9. JUNTAS DE DILATACION SISMICA SON ACORDES A LA ESTRUCTURA				10. EXISTE CONCENTRACION DE MASAS EN NIVELES ...			
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 No / No Existen ()	4	2 Si ()	1	1 Superiores ()	4	2 Inferiores ()	1
11. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA							
11.1 No existen/son Precarios	Valor	11.2 Deterioro y/o humedad	Valor	11.3 Regular estado	Valor	11.4 Buen estado	Valor
1 Cimiento ()	4	1 Cimiento ()	3	1 Cimiento ()	2	1 Cimiento ()	1
2 Columnas ()							
3 Muros portantes ()							
4 Vigas ()							
5 Techos ()							
12. OTROS FACTORES QUE INCIDEN EN LA VULNERABILIDAD POR ...							
Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor	Características	Valor
1 Humedad ()	4	4 Debilitamiento por modificaciones ()	4	6 Densidad de muros inadecuada ()	4	8 No aplica: ()	0
2 Cargas laterales ()							
3 Colapso elementos del entorno ()							
5 Debilitamiento por sobrecarga ()		7 Otros:..... ()					

E.- DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA

Llevar los valores más críticos de cada uno de los campos de la Sección D

E.1.- SUMATORIA DE VALORES DE LA SECCION "D" CARACTERÍSTICAS DE LA CONSTRUCCION DE LA VIVIENDA												
Σ												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 = Total

E.2.- Calificación del Nivel de Vulnerabilidad de la vivienda

Nivel de Vulnerabilidad	Rango del Valor	Características del Nivel de Vulnerabilidad	Calificación Según E.1 (marcar con "X")
MUY ALTO	Mayor a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	
ALTO	Entre 18 a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación, requiere cambios drásticos en la estructura.	
MODERADO	Entre 15 a 17	Requiere reforzamiento en potencial Zona de Seguridad Interna.	
BAJO	Hasta 14	En las condiciones actuales es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



F.- RECOMENDACIONES DE CARÁCTER INMEDIATO PARA JEFE(A) DE HOGAR

Calificación viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones Generales para caso de SISMOS (*)	Calificación (marcar con "X")
MUY ALTO	La Vivienda NO DEBE SER HABITADA Muy Importante: * Si el Nivel de Vulnerabilidad responde a factores inherentes al Tipo de Suelo, Ubicación y/o normas vigentes, la restricción del uso del terreno es Definitiva * Si el Nivel de Vulnerabilidad corresponde a elementos estructurales de la vivienda considerar reconstrucción si el uso del terreno es adecuado.	()
ALTO	En caso de Sismo se debe EVACUAR la edificación en forma inmediata ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Reforzar los elementos de la vía de evacuación, en caso de ser factible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
MODERADO	Determinar y/o REFORZAR la potencial Zona de Seguridad Interna ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; REFORZAR la vía de evacuación; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
BAJO	Determinar la Zona de Seguridad Interna ; Determinar la vía de evacuación ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()

Otras recomendaciones:

* Para viviendas cercanas al mar, tener en cuenta las recomendaciones para caso de tsunami

G.- RECOMENDACION REFERIDA A LA POTENCIAL "ZONA DE SEGURIDAD" Y/O "VIA DE EVACUACION"

El Nivel de Vulnerabilidad viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones para la ZONA DE SEGURIDAD y/o VIA DE EVACUACION
MUY ALTO	NO aplica , la Vivienda NO ES HABITABLE
ALTO	NO aplica recomendar zona de seguridad interna Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
MODERADO	REFORZAR potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. <i>Si la Zona de Seguridad no es suficiente para la cantidad de personas que la requieren, para el uso de esta área se deberá dar prioridad a las personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes).</i> Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
BAJO	Potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. <i>Si la Zona de Seguridad no es suficiente, para el uso de esta área se deberá priorizar a personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes).</i> Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos

..... de 2010
Lugar y fecha de recepción de la copia de la ficha

Firma

Firma

Nombres y APELLIDOS de Jefe(a) de hogar o entrevistado(a)

Nombres y APELLIDOS de Verificador(a)

DNI N°

DNI N°

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe

**DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD DE LA VIVIENDA PARA CASOS DE SISMO
FICHA DE VERIFICACION****A.- UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA VIVIENDA**

1. UBICACIÓN GEOGRAFICA		2. UBICACION CENSAL (Fuente INEI)		3. FECHA y HORA		
1 Departamento		1 Zona N°		dd	mm	aa
2 Provincia		2 Manzana N°		Hora : horas		
3 Distrito		3 Lote N°				

4. DIRECCION DE LA VIVIENDA	1 Avenida ()	2 Jirón ()	3 Pasaje ()	4 Carretera ()	5 Otro: ()		
Nombre de la Calle, Av, Jr, etc.		Puerta N°	Interior	Piso	Mz	Lote	Km
Nombre de la Urbanización / Asentamiento Humano /Asoc. de vivienda /otros							
Referencia:							

5. APELLIDOS Y NOMBRES DEL JEFE(A) DE HOGAR O ENTREVISTADO(A)							
Apellido Paterno							
Apellido Materno							
Nombres		6. DNI					

B.- INFORMACIÓN DEL INMUEBLE POR OBSERVACIÓN DIRECTA

1. DESDE EL EXTERIOR SE PUEDE OBSERVAR QUE :	2. LA VIVIENDA SE ENCUENTRA ...
1 En caso de colapso, por el predominante deterioro, SI compromete al área colindante ()	1 Habitada ()
2 Ante posible colapso, por el predominante deterioro, NO compromete al área colindante ()	2 No habitada ()
3 No muestra precariedad ()	3 Habitada, pero sin ocupantes ()
4 No fue posible observar el estado general de la vivienda ()	

En caso la respuesta corresponda a La Vivienda se encuentra NO habitada se deberá pasar al campo N° 6 de la sección "C" y CONCLUIR LA VERIFICACIÓN

C.- CARACTERISTICAS DEL TIPO DE VIVIENDA

1. CUENTA CON PUERTA INDEPENDIENTE	2. FORMA PARTE DE UN COMPLEJO	3. TOTAL DE OCUPANTES (Cantidad de personas)
1 SÍ cuenta con puerta de calle ()	1 Multifamiliar horizontal ()	1 De la vivienda
2 NO es parte de un complejo multifamiliar ()	2 Multifamiliar vertical ()	2 Del complejo multifamiliar (aproximado)
	3 No Aplica ()	

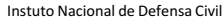
4. CANTIDAD DE PISOS DE LA VIVIENDA	5. CANTIDAD DE PISOS DEL COMPLEJO MULTIFAMILIAR
1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1º piso)	1 Cantidad de niveles superiores (incluido el 1º piso)
2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)	2 Cantidad de niveles inferiores (sótanos)
3 No aplica por ser vivienda multifamiliar	3 No aplica por ser vivienda unifamiliar

6. FACTORES CRITICOS PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE VULNERABILIDAD "MUY ALTO" o "ALTO":	
1 El inmueble se encuentra en un terreno inapropiado para edificar	()
2 Encontrarse el inmueble en una ubicación expuesta a derrumbes y/o deslizamientos	()
3 Otro:	()
4 Otro:	()
5 No aplica	()

De ser necesario, se deberá especificar los factores y tener en consideración esta información para la evaluación de las edificaciones colindantes.

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser asistidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

Mayor información en www.indeci.gob.pe



3. MATERIAL PREDOMINANTE DE LA EDIFICACION															
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	Adobe	()	4	6	Adobe reforzado	()	3	8	Albañilería confinada	()	2	9	Concreto Armado	()	1
2	Quincha	()		7	Albañilería	()			10	Acero		()			
3	Mampostería	()													
4	Madera	()													
5	Otros	()													
2. LA EDIFICACION CONTÓ CON LA PARTICIPACION DE INGENIERO CIVIL EN EL DISEÑO Y/O CONSTRUCCION															
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	No	()	4	2	Solo Construcción	()	3	3	Solo diseño	()	3	4	Si, totalmente	()	1
3. ANTIGÜEDAD DE LA EDIFICACION															
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	Mas de 50 años	()	4	2	De 20 a 49 años	()	3	3	De 3 a 19 años	()	2	4	De 0 a 2 años	()	1
4. TIPO DE SUELO															
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	Rellenos	()	4	4	Depósito de suelos finos	()	3	6	Granular fino y arcilloso	()	2	7	Suelos rocosos	()	1
2	Depósitos marinos	()													
3	Pantanosos, turba	()		5	Arena de gran espesor	()									
5. TOPOGRAFIA DEL TERRENO DE LA VIVIENDA															
Muy Pronunciada		Valor	Pronunciada		Valor	Moderada		Valor	Plana o Ligera		Valor				
1	Mayor a 45%	()	4	2	Entre 45% a 20%	()	3	3	Entre 20% a 10%	()	2	4	Hasta 10%	()	1
6. TOPOGRAFIA DEL TERRENO COLINDANTE A LA VIVIENDA Y/O EN AREA DE INFLUENCIA															
Muy Pronunciada		Valor	Pronunciada		Valor	Moderada		Valor	Plana o Ligera		Valor				
1	Mayor a 45%	()	4	2	Entre 45% a 20%	()	3	3	Entre 20% a 10%	()	2	4	Hasta 10%	()	1
7. CONFIGURACION GEOMETRICA EN PLANTA						8. CONFIGURACION GEOMETRICA EN ELEVACION									
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	Irregular	()	4	2	Regular	()	1	1	Irregular	()	4	2	Regular	()	1
9. JUNTAS DE DILATAION SISMICA SON ACORDES A LA ESTRUCTURA						10. EXISTE CONCENTRACION DE MASAS EN NIVELES ...									
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	No / No Existen	()	4	2	Si	()	1	1	Superiores	()	4	2	Inferiores	()	1
11. EN LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE OBSERVA															
11.1 No existen/son Precarios		Valor	11.2 Deterioro y/o humedad		Valor	11.3 Regular estado		Valor	11.4 Buen estado		Valor				
1	Cimiento	()	4	1	Cimiento	()	3	1	Cimiento	()	2	1	Cimiento	()	1
2	Columnas	()		2	Columnas	()		2	Columnas	()					
3	Muros portantes	()		3	Muros portantes	()		3	Muros portantes	()					
4	Vigas	()		4	Vigas	()		4	Vigas	()					
5	Techos	()		5	Techos	()		5	Techos	()					
12. OTROS FACTORES QUE INCIDEN EN LA VULNERABILIDAD POR...															
Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor	Características		Valor				
1	Humedad	()	4	4	Debilitamiento por modificaciones	()	4	6	Densidad de muros inadecuada	()	4	8	No aplica:	()	0
2	Cargas laterales	()													
3	Colapso elementos del entorno	()		5	Debilitamiento por sobrecarga	()									

Llevar los valores más críticos de cada uno de los campos de la Sección D

 Σ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	=	Total
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	---	-------

Nivel de Vulnerabilidad	Rango del Valor	Características del Nivel de Vulnerabilidad	Calificación Según E.1 (marcar con "X")
MUY ALTO	Mayor a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	
ALTO	Entre 18 a 24	En las condiciones actuales NO es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación, requiere cambios drásticos en la estructura.	
MODERADO	Entre 15 a 17	Requiere reforzamiento en potencial Zona de Seguridad Interna.	
BAJO	Hasta 14	En las condiciones actuales es posible acceder a una Zona de Seguridad dentro de la edificación.	

Mayor información en www.indeci.gob.pe



F.- RECOMENDACIONES DE CARÁCTER INMEDIATO PARA JEFE(A) DE HOGAR

Calificación viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones Generales para caso de SISMOS (*)	Calificación (marcar con "X")
MUY ALTO	La Vivienda NO DEBE SER HABITADA Muy Importante: * Si el Nivel de Vulnerabilidad responde a factores inherentes al Tipo de Suelo, Ubicación y/o normas vigentes, la restricción del uso del terreno es Definitiva * Si el Nivel de Vulnerabilidad corresponde a elementos estructurales de la vivienda considerar reconstrucción si el uso del terreno es adecuado.	()
ALTO	En caso de Sismo se debe EVACUAR la edificación en forma inmediata ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Reforzar los elementos de la vía de evacuación, en caso de ser factible; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
MODERADO	Determinar y/o REFORZAR la potencial Zona de Seguridad Interna ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; REFORZAR la vía de evacuación; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()
BAJO	Determinar la Zona de Seguridad Interna ; Determinar la vía de evacuación ; Reconocer la vía de evacuación , eliminar los elementos suspendidos que puedan caer y los obstáculos; Después de un Sismo se debe evacuar la edificación lo antes posible ; Reconocer la Zona de Seguridad Exterior ; Practicar los simulacros para casos de sismos, tanto municipales como familiares.	()

Otras recomendaciones:

* Para viviendas cercanas al mar, tener en cuenta las recomendaciones para caso de tsunami

G.- RECOMENDACION REFERIDA A LA POTENCIAL "ZONA DE SEGURIDAD" Y/O "VIA DE EVACUACION"

El Nivel de Vulnerabilidad viene de la sección "E"

Nivel de Vulnerabilidad	Recomendaciones para la ZONA DE SEGURIDAD y/o VIA DE EVACUACION
MUY ALTO	NO aplica , la Vivienda NO ES HABITABLE
ALTO	NO aplica recomendar zona de seguridad interna Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
MODERADO	REFORZAR potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. Si la Zona de Seguridad no es suficiente para la cantidad de personas que la requieren, para el uso de esta área se deberá dar prioridad a las personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes). Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos
BAJO	Potencial Zona de Seguridad Interna recomendada: Area aproximada: m2 Total de ocupantes: Zona de Seguridad para personas aprox. Si la Zona de Seguridad no es suficiente, para el uso de esta área se deberá priorizar a personas vulnerables (Ejemplo: Adulto Mayor, Niños, Madre Gestante y Personas con capacidades diferentes). Vía de evacuación recomendada: Hacer uso de la Cartilla de recomendaciones para el hogar en caso de sismos

Firma

Nombres y APELLIDOS de Jefe(a) de hogar o entrevistado(a)

DNI N°

..... de 2010
Lugar y fecha de recepción de la copia de la ficha

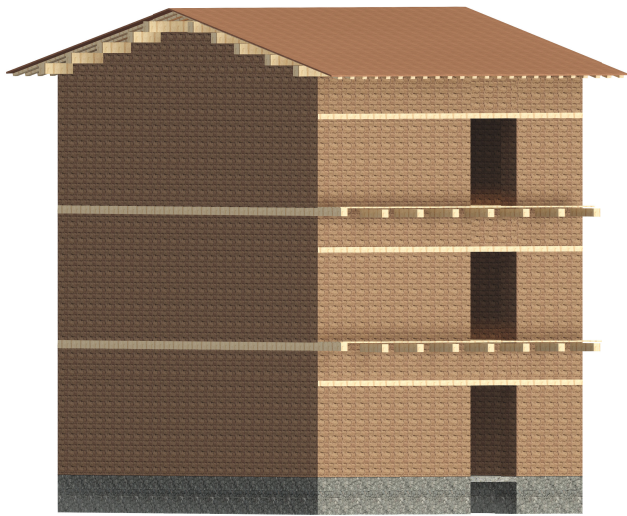
Firma

Nombres y APELLIDOS de Verificador(a)

DNI N°

La Vulnerabilidad será determinada considerando la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud;
Las labores de reforzamiento recomendadas son de responsabilidad del jefe(a) de hogar. Para estas tareas deberán ser así stidos por profesionales de la materia;
Las consultas podrán ser absueltas en la Oficina de Defensa Civil de la Municipalidad de su jurisdicción.

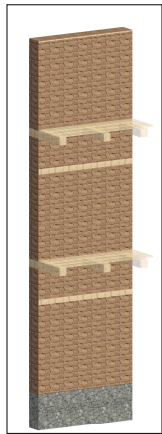
Mayor información en www.indeci.gob.pe



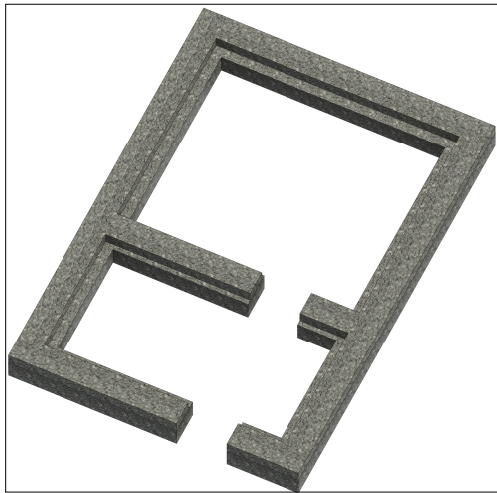
3D STR.



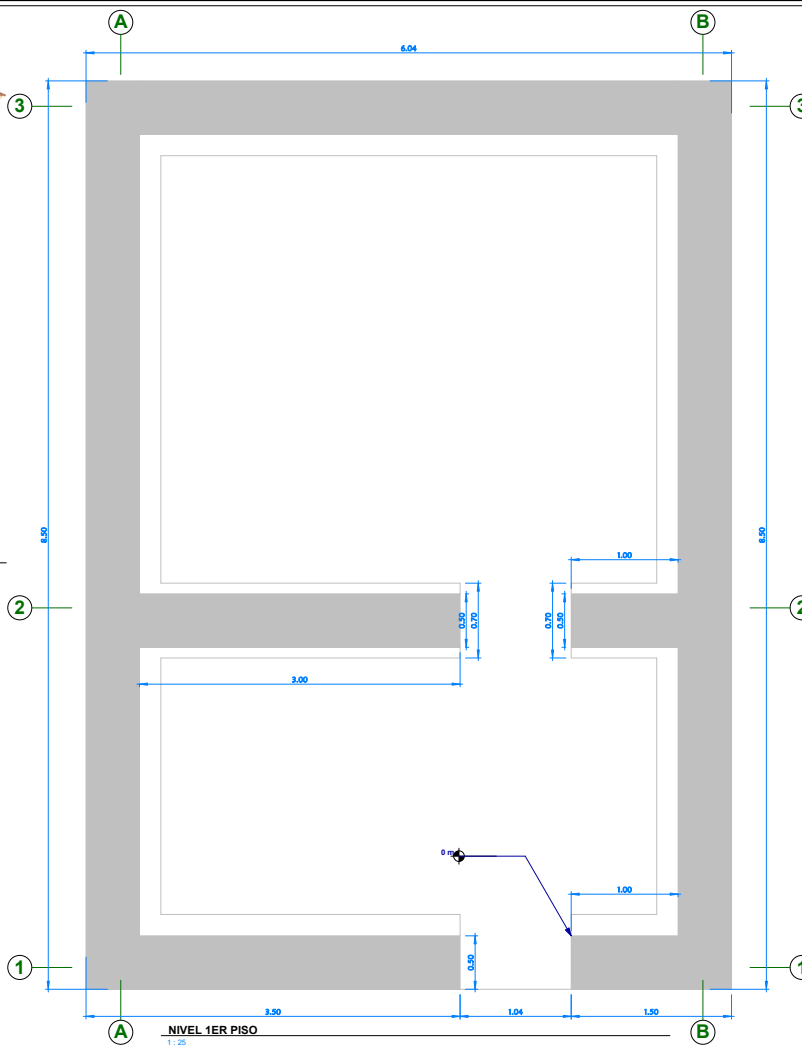
CIMENTACIÓN 3D
ESCALA: 1/50



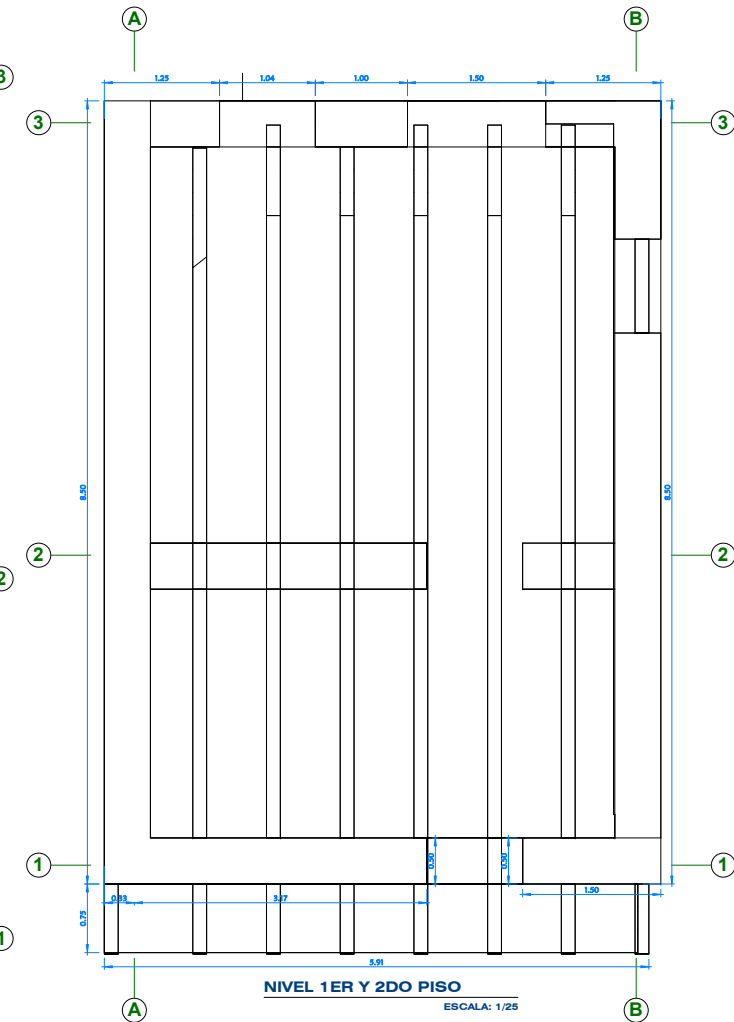
3D CORTE Y DETALLE
ESCALA: 1/50



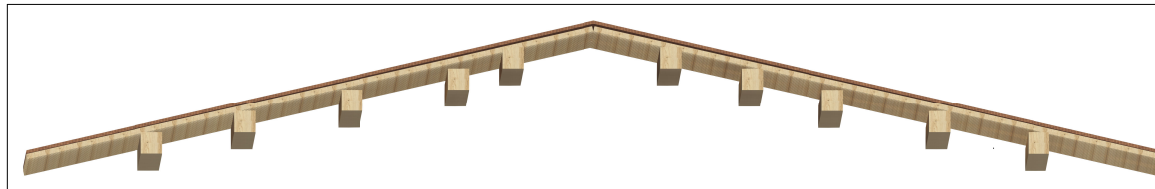
3D STR. ZAPATA
ESCALA: 1/50



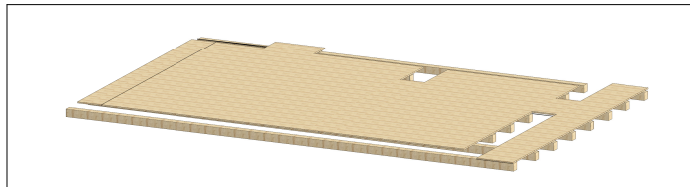
NIVEL 1ER PISO
ESCALA: 1/25



NIVEL 1ER Y 2DO PISO
ESCALA: 1/25



3D STR. TECHO
ESCALA: 1/50



3D TERRAZA Y PISOS
ESCALA: 1/50

LEYENDA	
SIMB.	DESCRIPCIÓN
C-1	Columna tipo 1
Z-1	Zapata tipo 1
VC	Viga de Cimentación
VA	Viga de Arriostro
VCn	Viga de Conexión
CC	Cimiento Corrido
SC	Sobre Cimiento
N	Nivel
NFZ	Nivel de Fondo de Zapata
NFC	Nivel de Fondo de CC
NTN	Nivel de Terreno Natural
NO+/- 00	Nivel Cero Cero
NPT	Nivel de Piso Terminado
STR.	ESTRUCTURA
ARQ.	ARQUITECTURA
Fc	Resistencia del Concreto
Fy	Límite de Fluencia del Acero
PG	Piedra Grande
PM	Piedra Mediana
C-H	Cemento : Hormigón
Ø	Distribución a cada:
Ø	Diámetro de acero
db	Resto
db	diámetro de barra
As	Distribución de acero



VIVIENDA DE ADOBE

PROPIETARIO: RESERVADO

PLANO: PLANO ESTRUCTURAL PERU

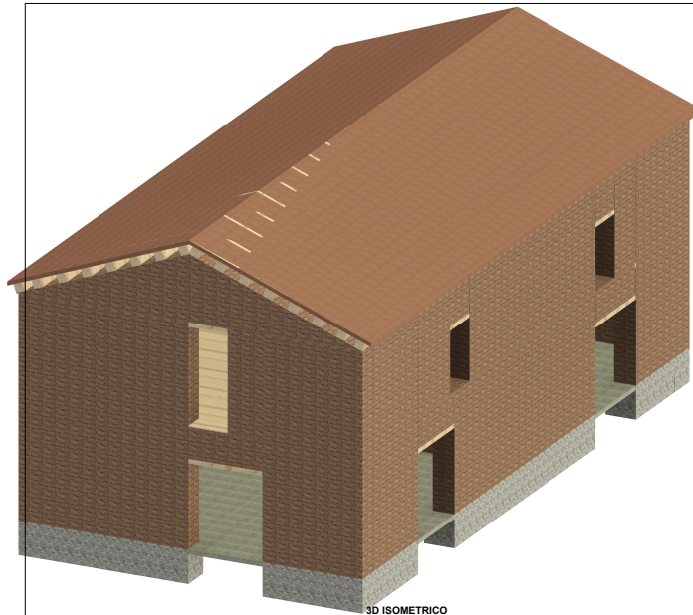
USUARIO: JACK KELVIN AUTORIZADOR: Autorizador

E-01

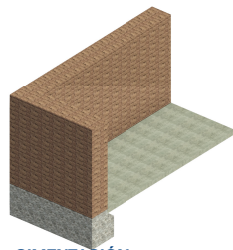
26/12/2025

18:58:38

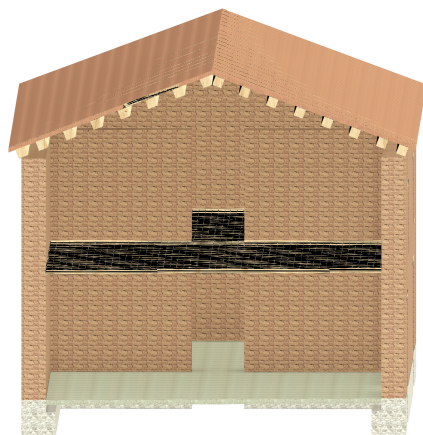
ESCALA: Como se indica



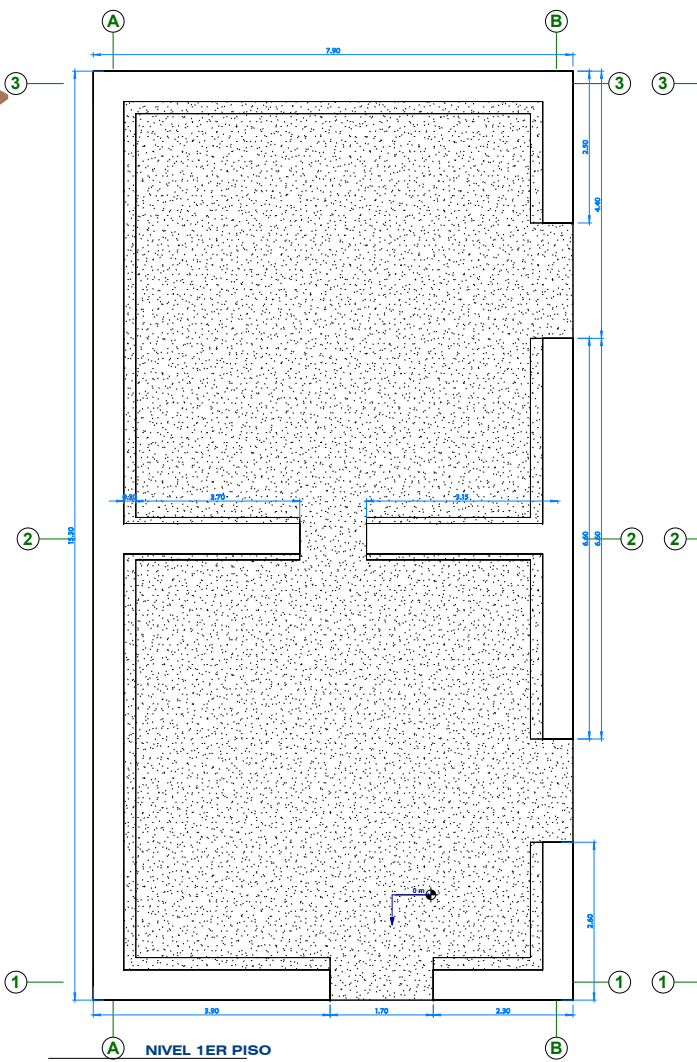
3D ISOMETRICO



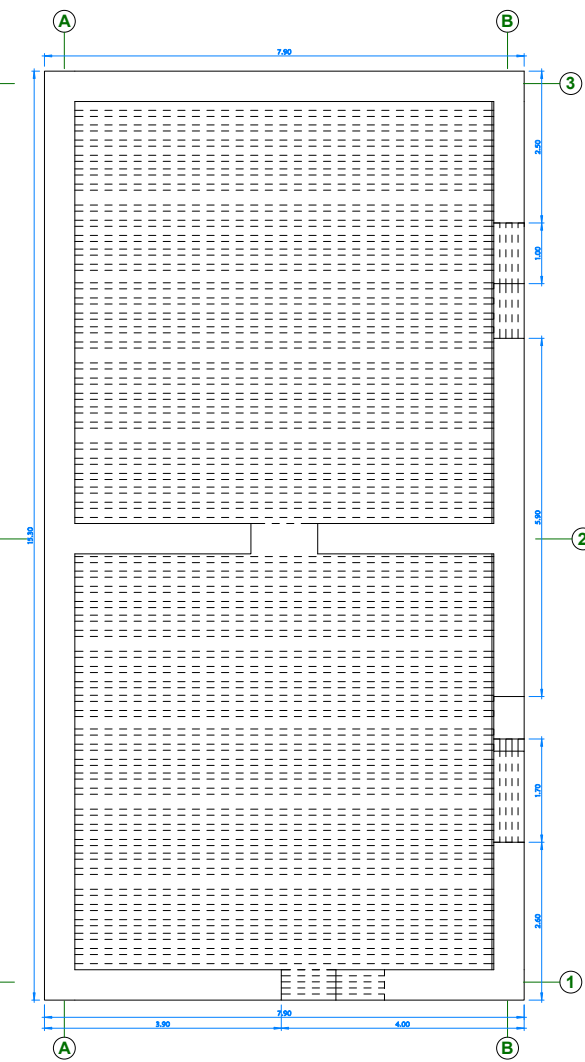
CIMENTACIÓN
ESCALA: 1/50



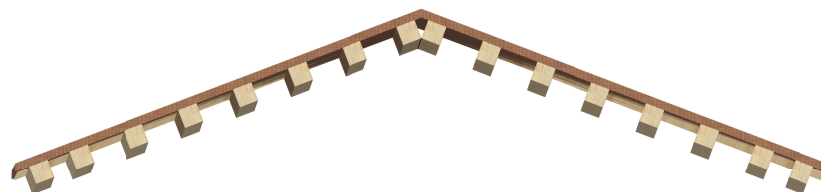
3D STR. CORTE



NIVEL 1ER PISO
ESCALA: 1/50



NIVEL 2DO PISO
1 : 40



3D TECHO



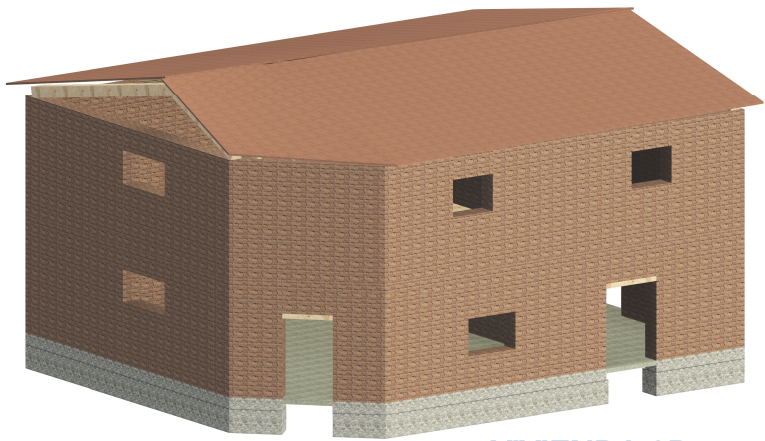
VIVIENDA DE ADOBE

PROPIETARIO:	RESERVADO
PLANO:	ESTRUCTURAL
PERI:	
AUTORIZADOR:	Autorizador

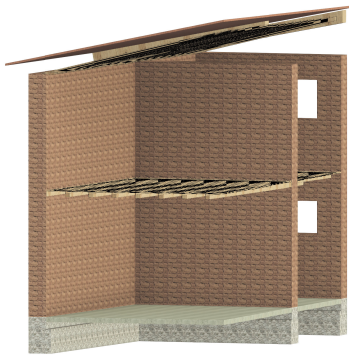
E-01

27/10/2025
08:10:34

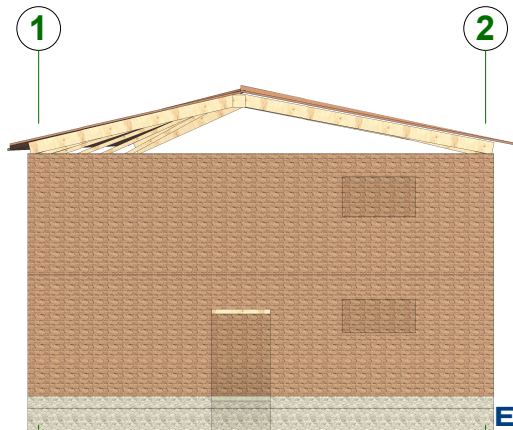
ESCALA: 1 : 40



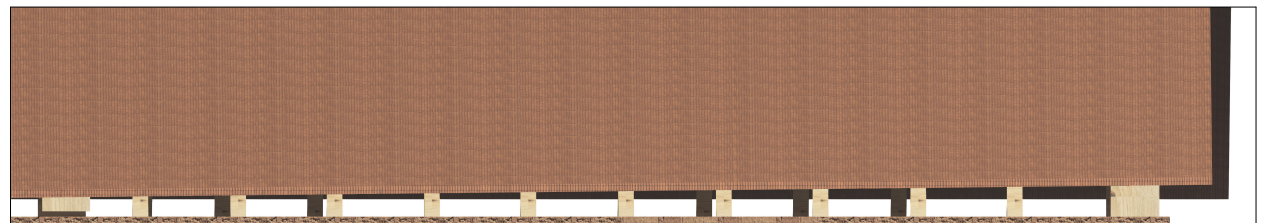
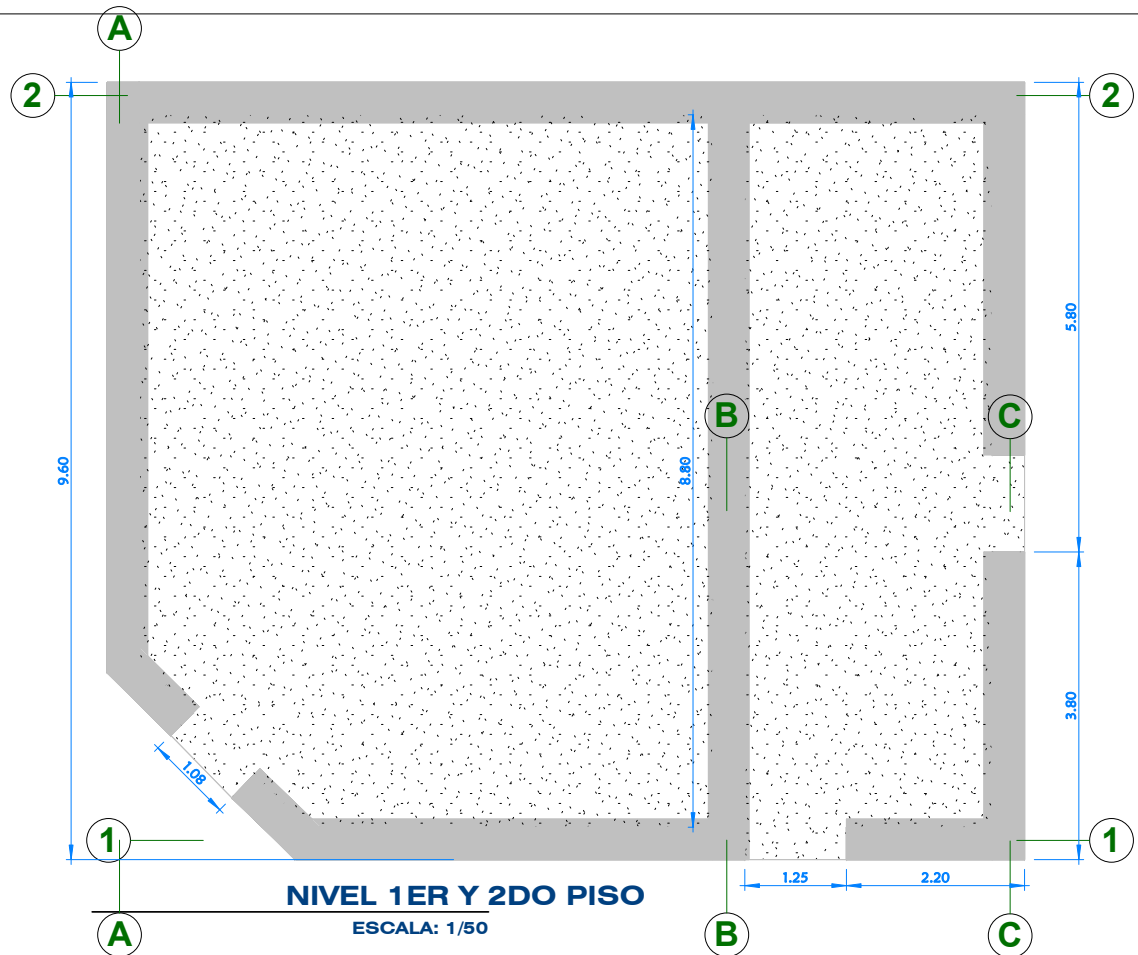
VIVIENDA 3D
ESCALA: 1/50



CORTE A-A 3D
ESCALA: 1/50



ESTE VIVIENDA
ESCALA: 1/50



TECHO 3D
ESCALA: 1/50



VIVIENDA DE ADOBE

A-01

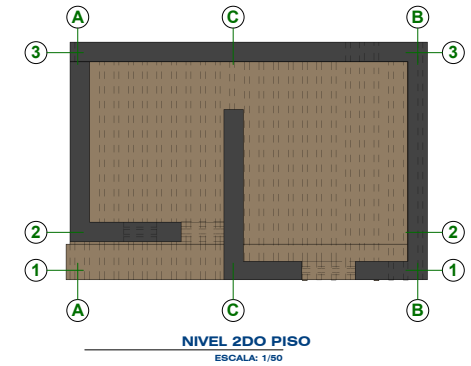
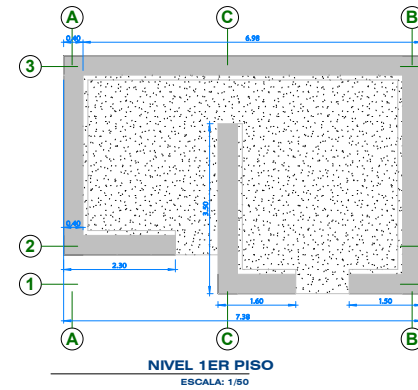
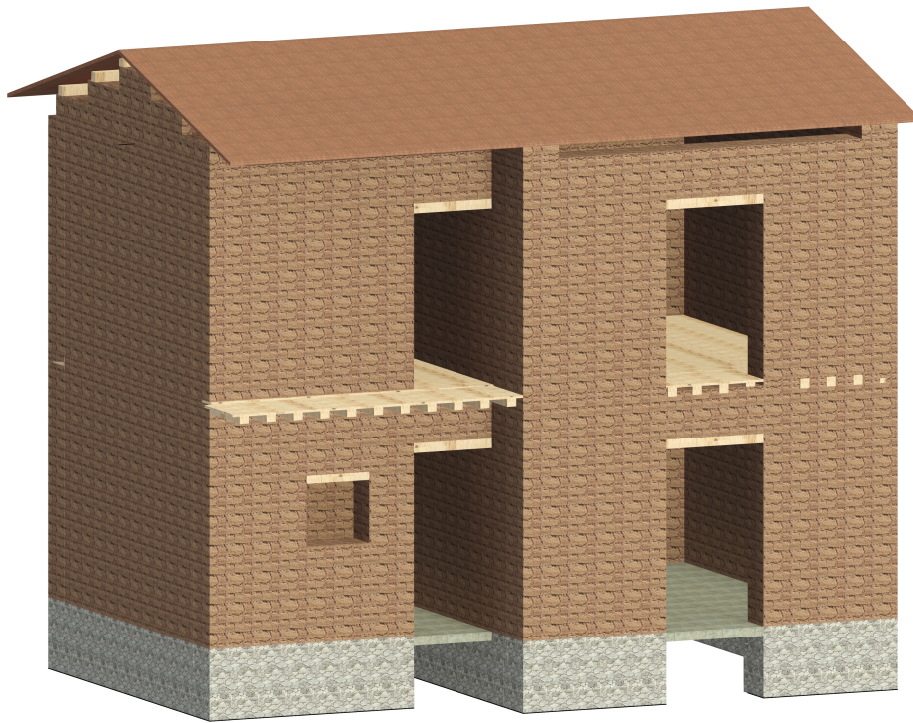
PROPIETARIO: RESERVADO

PLANO: ESTRUCTURAL

PERÚ

04/04/2026
14:46:20

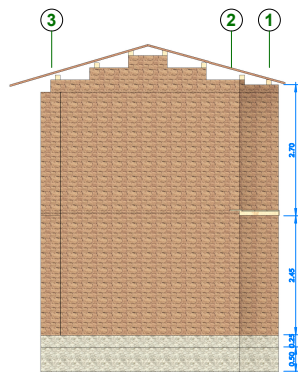
ESCALA: Como se indica



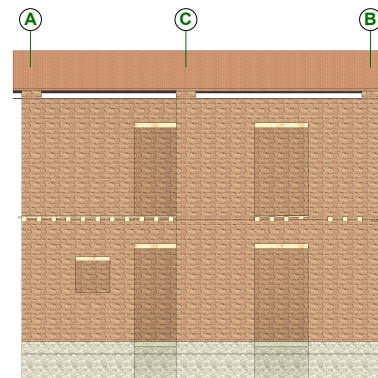
3D TECHO



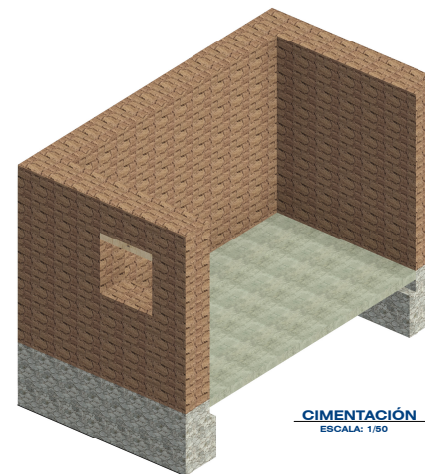
3D STR. CORTE



Oeste STR.
1:50



Sur STR.
1:50



CIMENTACIÓN
ESCALA: 1/50

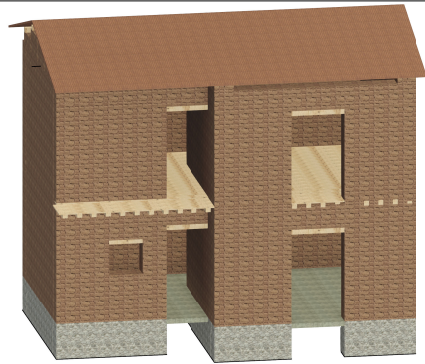


VIVIENDA DE ADOBE

PROPIETARIO:	RESERVADO
PLANO:	ESTRUCTURAL
PERI:	
DISEÑO:	JACK KELVIN
AUTORIZADOR:	Autorizador

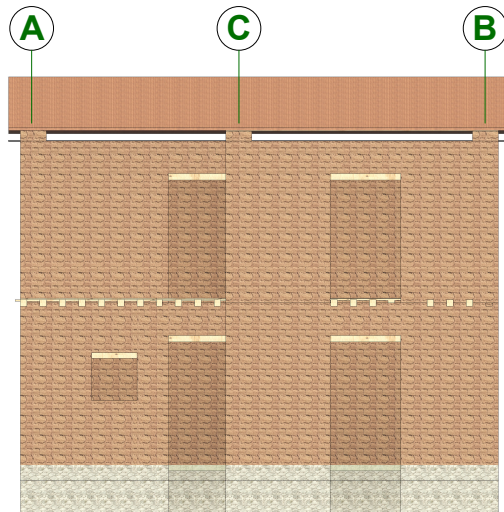
E-01

02/03/2025
21:50:13
ESCALA: 1:50



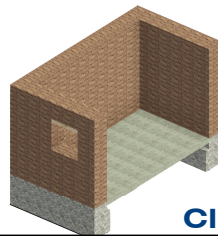
VIVIENDA 05 3D

ESCALA: 1/50



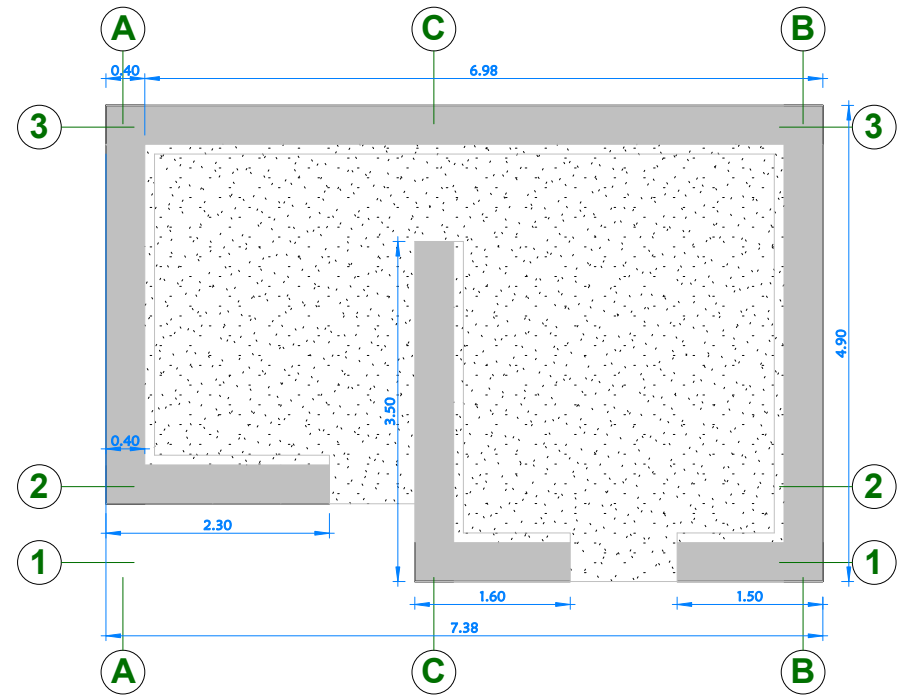
CORTE A-A

ESCALA: 1/50



CIMENTACION

ESCALA: 1/50



NIVEL 1ER PISO Copia 1

1 : 50



TECHO 3D

ESCALA: 1/50



VIVIENDA DE ADOBE

A-04

PROPIETARIO: RESERVADO

PLANO: ESTRUCTURAS VIVIENDA 05

PERÚ

07/04/2026
10:46:43

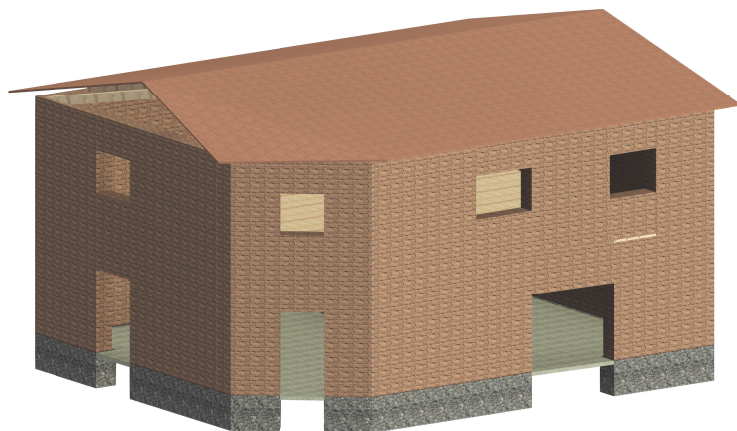
DISEÑO:

JKC

AUTORIZADOR:

Autorizador

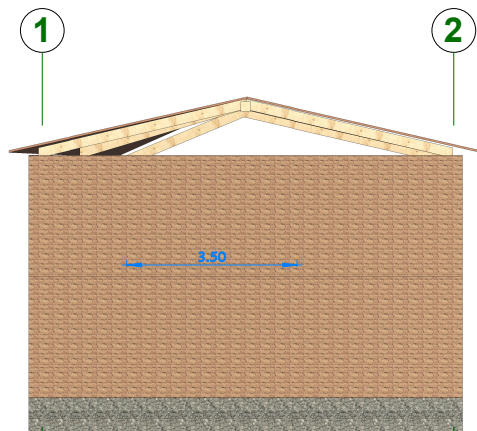
ESCALA: Como se indica



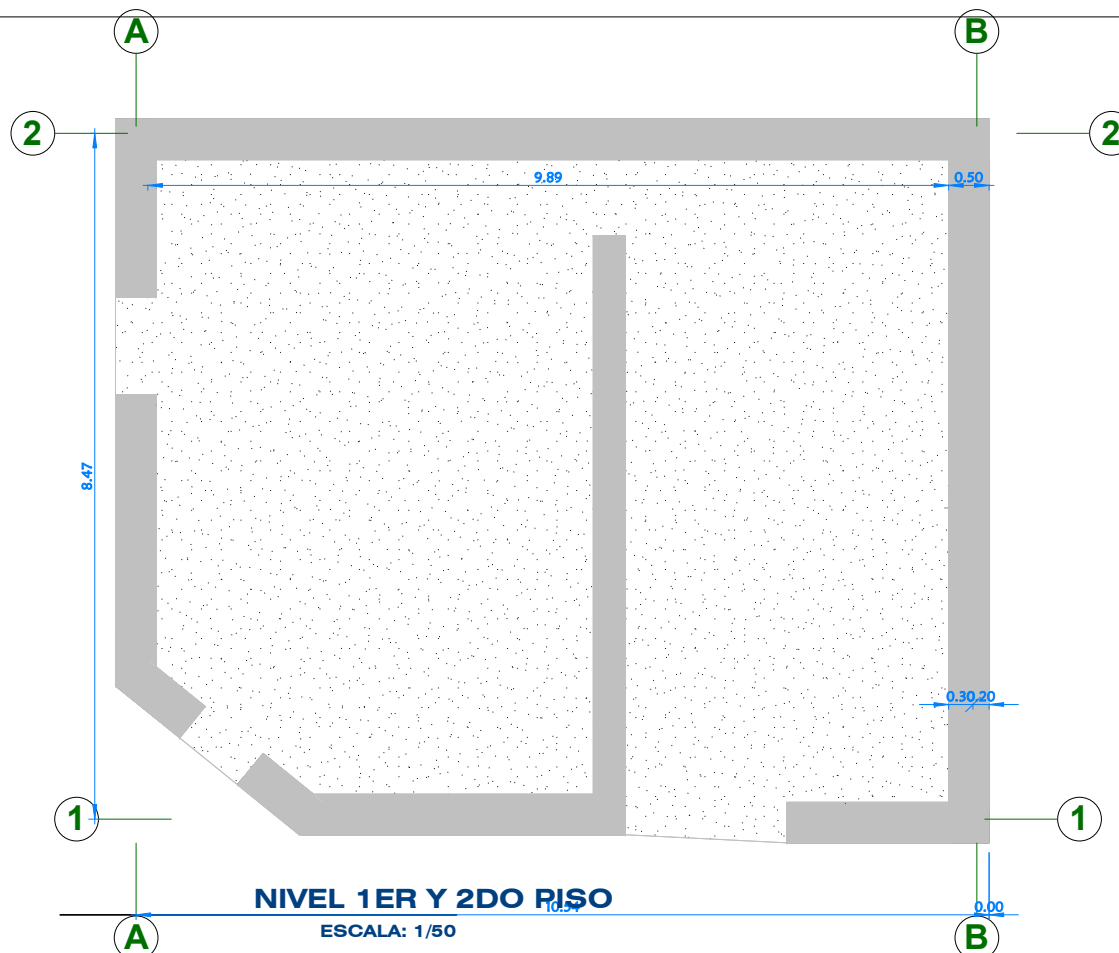
VIVIENDA 3D
ESCALA: 1/50



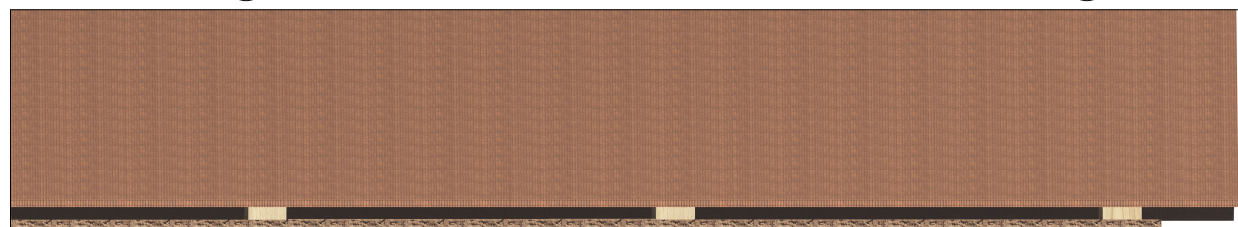
CORTE A-A 3D
ESCALA: 1/50



ESTE VIVIENDA
ESCALA: 1/50



NIVEL 1ER Y 2DO PISO
ESCALA: 1/50



TECHO 3D
ESCALA: 1/50



VIVIENDA DE ADOBE 06

A-01

PROPIETARIO: RESERVADO

PLANO: ESTRUCTURAL PERÚ

07/04/2026
13:46:13

ESCALA: Como se indica

CURVAS DE CAPACIDAD

Análisis Pushover

Vivienda Huancaray

Autor: Jack Kelvin

```
import pandas as pd
```

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Variable para la dirección y sentido
```

```
direccion_sentido = 'XX' # Cambia a 'X+', 'Y+', 'Y-' según corresponda
```

```
# Nombre del archivo Excel de entrada
```

```
archivo = 'python1.xlsx'
```

```
# Cargar datos de desplazamiento desde 'Hoja2', columna número 3
```

```
hoja_desplazamiento = 'Hoja2'
```

```
df_desplazamiento = pd.read_excel(archivo, sheet_name=hoja_desplazamiento)
```

```
desplazamiento_mm = df_desplazamiento.iloc[:, 2].values # Columna número 3 (índice 2)
```

```
desplazamiento_mm = abs(desplazamiento_mm) # Aseguramos que sea positivo
```

```
# Cargar datos de cortante basal desde 'Hoja1'
```

```
hoja_cortante = 'Hoja1'
```

```
df_cortante = pd.read_excel(archivo, sheet_name=hoja_cortante)
```

```
cortante_N = abs(df_cortante.sum(axis=1).values) # Sumar cada fila para obtener el  
cortante basal en N (positivo)
```

```
cortante_tonf = cortante_N / 1000 # Convertir N a toneladas fuerza
```

```
# Convertir a tipo float
```

```
desplazamiento_mm = desplazamiento_mm.astype(float)
```

```
cortante_tonf = cortante_tonf.astype(float)
```

```
#####
```

```
# Exportar datos a un nuevo archivo Excel
```

```
#####
```

```
# Crear DataFrame con los resultados
```

```
df_resultados = pd.DataFrame({  
    'Desplazamiento (mm)': desplazamiento_mm,  
    'Cortante basal (tonf)': cortante_tonf  
})
```

```
# Nombre del archivo de salida
```

```
archivo_salida = f'{direccion_sentido}_Curva_Capacidad.xlsx'
```

```
# Guardar el DataFrame en Excel
```

```
df_resultados.to_excel(archivo_salida, index=False)
```

```
print(f"Archivo Excel exportado correctamente: {archivo_salida}")
```

```
#####
```

```
# Graficar los resultados
```

```
#####
```

```

# Obtener el cortante máximo
max_cortante_tonf = round(np.max(cortante_tonf), 3)

# Crear la figura y graficar
plt.figure(figsize=(10, 6), facecolor='lightgray')
plt.plot(desplazamiento_mm, cortante_tonf,
         label=f'Curva de Capacidad {direccion_sentido} - Vmax = {max_cortante_tonf} tonf',
         color='blue', linewidth=2)

plt.title(f'Curva de Capacidad {direccion_sentido} - Vivienda 4')
plt.xlabel('Desplazamiento (mm)')
plt.ylabel('Cortante basal (tonf)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()

# Guardar y mostrar el gráfico
nombre_imagen = f'casa_2_{direccion_sentido}_Curva_Capacidad.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300)
plt.show()
plt.close()

```

BILINEALIZACION DE RECTA

Análisis Pushover

Vivienda Huancaray

Autor: Jack Kelvin

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

```

1. Carga de datos desde Excel para dirección XX

```

archivo = 'python.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Hoja1')
delta_full = datos.iloc[:, 0].to_numpy() / 1000 # desplazamiento (mm → m)
V_full      = datos.iloc[:, 1].to_numpy() / 1    # fuerza (N → tonf)

```

2. Parámetro du elegido por el usuario

```
du = 0.0228 # modificar según necesidad
```

3. Interpolación de V_u en du

```
V_u = np.interp(du, delta_full, V_full)
```

4. Construcción de datos hasta du para cálculos (incluye punto interpolado)

```

mask = delta_full < du
delta_calc = np.concatenate((delta_full[mask], [du]))
V_calc     = np.concatenate((V_full[mask],    [V_u]))

```

5. Cálculo de área real bajo la curva hasta du

```
area_real = np.trapz(V_calc, delta_calc)
```

6. Impresión de datos básicos

```
print("===== DATOS BÁSICOS XX =====")
```

```
print(f"du elegido = {du:.4f} m")
```

```
print(f"Valor interpolado Vu = {V_u:.4f} ton")
```

```
print(f"Área bajo la curva hasta du = {area_real:.4f} ton·m")
```

```
print()
```

7. Estimación de rigidez inicial Ki

```
Ki_aprox = (V_calc[1] / delta_calc[1]) * 0.9
```

```
print("===== RIGIDEZ INICIAL =====")
```

```
print(f"Ki ≈ V_calc[1]/delta_calc[1] * = ({V_calc[1]:.4f}/{delta_calc[1]:.6f}) * =  
{Ki_aprox:.4f} ton/m")
```

```
print()
```

8. Búsqueda iterativa del punto de fluencia hasta du

```
step = du / 200
```

```
threshold = area_real / 100
```

```
dy_sol = None
```

```
print("Iterando dy desde du/200 hasta |diferencia| ≤ area_real/100:")
```

```
for i in range(1, 601):
```

```
    dy = step * i
```

```
    Vy = Ki_aprox * dy
```

```
    area_tri = 0.5 * Ki_aprox * dy**2
```

```
    area_trap = 0.5 * (Vy + V_u) * (du - dy)
```

```
    area_bilin = area_tri + area_trap
```

```
    diferencia = abs(area_bilin - area_real)
```

```
    print(f" Iter {i:3d}: dy = {dy:.6f} m, area_tri = {area_tri:.6f}, area_trap =  
{area_trap:.6f}, area_bilin = {area_bilin:.6f}, diferencia = {diferencia:.6f}")
```

```
    if diferencia <= threshold:
```

```
        dy_sol = dy
```

```
        Vy_sol = Vy
```

```
        print(" → Condición cumplida (diferencia ≤ area_real/100)")
```

```
        break
```

```
if dy_sol is None:
```

```
    print("No se encontró dy que cumpla la condición en 600 iteraciones.")
```

```
    dy_sol = du
```

```
    Vy_sol = Ki_aprox * du
```

```
print()
```

```
print("===== RESULTADO DE FLUENCIA =====")
```

```
print(f"Desplazamiento de fluencia dy = {dy_sol:.6f} m")
```

```
print(f"Corte de fluencia Vy = {Vy_sol:.4f} ton")
```

```
print()
```

9. Creación de la curva bilineal hasta du

```
delta_bilin = [0, dy_sol, du]
```

```
V_bilin      = [0, Vy_sol, V_u]
```

```
# 10. Gráfico: curva original (azul), recta bilineal (negro), puntos con valores
plt.figure(figsize=(8, 5), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta_full, V_full, color='blue', label='Curva Original XX')
plt.plot(delta_bilin, V_bilin, '--', color='black', label='Recta Bilineal')
plt.scatter([dy_sol], [Vy_sol], color='black', s=50,
            label=f'Punto Fluencia (dy={dy_sol:.4f} m, Vy={Vy_sol:.4f} tonf)')
plt.scatter([du], [V_u], color='blue', marker='x', s=50,
            label=f'Punto Desempeño (du={du:.4f} m, Vu={V_u:.4f} tonf)')
plt.title(f'ASCE 41 - Curva XX y Recta Bilineal hasta du = {du:.4f} m - Vivienda 4')
plt.xlabel('Desplazamiento (m)')
plt.ylabel('Cortante (tonf)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig('CASA_2_Desempeno_curva_XX.png', dpi=300)
plt.show()
```

DESEMPEÑO Y SECTORIZACION

Análisis Pushover

Vivienda Huancaray

Autor: Jack Kelvin

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
from scipy.optimize import fsolve
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# =====
```

```
# 1. Carga de datos desde Excel (dirección YY)
```

```
# =====
```

```
archivo = 'python.xlsx'
```

```
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Hoja1')
```

```
# Se asume que la primera columna es desplazamiento (mm) y la segunda es cortante (tonf)
```

```
delta_full = datos.iloc[:, 0].to_numpy()/1000 # convertir mm → m
```

```
V_full = datos.iloc[:, 1].to_numpy()           # ya en tonf
```

```
# Asegurar valores positivos
```

```
delta_full = np.abs(delta_full)
```

```
V_full = np.abs(V_full)
```

```
# =====
```

```
# 2. Cálculo de la rigidez inicial (Ki)
```

```
# =====
```

```
delta1, delta2 = delta_full[0], delta_full[1]
```

```
V1, V2 = V_full[0], V_full[1]
```

```
if (delta2 - delta1) != 0:
```

```
    Ki_inicial = (V2 - V1) / (delta2 - delta1)
```

```

else:
    Ki_inicial = 0

# Calcular delta0 (intersección con el eje X)
if Ki_inicial != 0:
    delta0 = delta1 - V1 / Ki_inicial
else:
    delta0 = delta1

# Insertar el punto inicial
delta = np.insert(delta_full, 0, delta0)
V = np.insert(V_full, 0, 0.0)

# =====
# 3. Cálculos base
# =====
delta_u, V_u = delta[-1], V[-1]
A_capacidad = np.trapz(V, delta)

# =====
# 4. Definición de función para cálculo iterativo
# =====
def calcular(factor):
    Ki_escalado = (V[2] - V[1]) / (delta[2] - delta[1]) * factor

    eq = lambda dy: (
        0.5 * Ki_escalado * (dy - delta0) ** 2
        + ((Ki_escalado * (dy - delta0) + V_u) / 2) * (delta_u - dy)
        - A_capacidad
    )

    dy_sol = fsolve(eq, (delta_u + delta0) / 2.0)[0]
    Vy_sol = Ki_escalado * (dy_sol - delta0)

    recta_Ke = Ki_escalado * (delta - delta0)
    idx = np.argmin(np.abs(recta_Ke - V)[2:]) + 2
    V_inter = V[idx]
    division = 0.6 * Vy_sol / V_inter if V_inter != 0 else np.nan

    return factor, delta[idx], V_inter, 0.6 * Vy_sol, division

# =====
# 5. Búsqueda del mejor factor
# =====
factores = np.arange(0.5, 1.0001, 0.0001)
resultados = [calcular(f) for f in factores]
df_resultados = pd.DataFrame(resultados, columns=[
    'Factor', 'Desplazamiento Intersección',
    'Cortante Intersección', '0.6 * Vy', 'División'
])

df_resultados['Error'] = (df_resultados['División'] - 1).abs()

```

```

mejor = df_resultados.iloc[df_resultados['Error'].idxmin()]

print(df_resultados)
print(f"\nEl mejor factor es: {mejor['Factor']:.4f}")
print(f"Cortante Intersección: {mejor['Cortante Intersección']:.4f}")
print(f"0.6 * Vy: {mejor['0.6 * Vy']:.4f}")

# =====
# 6. Cálculo final con el mejor factor
# =====
Ki_mejor = (V[2] - V[1]) / (delta[2] - delta[1]) * mejor['Factor']

eq_final = lambda dy: (
    0.5 * Ki_mejor * (dy - delta0) ** 2
    + ((Ki_mejor * (dy - delta0) + V_u) / 2) * (delta_u - dy)
    - A_capacidad
)
dy_sol = fsolve(eq_final, (delta_u + delta0) / 2.0)[0]
Vy_sol = Ki_mejor * (dy_sol - delta0)

# Puntos bilineales
delta_bilineal = [delta0, dy_sol, delta_u]
V_bilineal = [0, Vy_sol, V_u]

# Intersección
recta_Ke_final = Ki_mejor * (delta - delta0)
idx_inter = np.argmin(np.abs(recta_Ke_final - V)[1:]) + 1
delta_inter, V_inter = delta[idx_inter], V[idx_inter]
Vy_06 = 0.6 * Vy_sol

# =====
# 7. Resultados y exportación
# =====
print(f"Punto de fluencia: Δy = {dy_sol:.4f} m, Vy = {Vy_sol:.4f} tonf")
print(f"Punto final: Δu = {delta_u:.4f} m, Vu = {V_u:.4f} tonf")
print(f"Intersección: Δ = {delta_inter:.4f} m, V = {V_inter:.4f} tonf")
print(f"0.6 * Vy = {Vy_06:.4f} tonf")

# Exportar resultados a Excel
df_exportar = pd.DataFrame({
    'Desplazamiento (m)': delta,
    'Cortante basal (tonf)': V
})
nombre_excel = 'YY_Bilinealizacion_Resultados.xlsx'
df_exportar.to_excel(nombre_excel, index=False)

# =====
# 8. Gráfico final
# =====
plt.figure(figsize=(10, 8), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta, V, label='Curva de Capacidad Original', color='blue', linewidth=2)

```



```
plt.plot(delta_bilineal, V_bilineal, label='Curva Bilineal', linestyle='--',
color='black', linewidth=2)

plt.title('Bilinealización de la Curva de Capacidad - Dirección XX - Vivienda 1',
fontsize=14)
plt.xlabel('Desplazamiento (m)', fontsize=12)
plt.ylabel('Cortante Basal (tonf)', fontsize=12)
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.7)
plt.legend(fontsize=10)

nombre_imagen = 'XX_Bilinealizacion_Capacidad.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300, facecolor='lightgray', bbox_inches='tight')
plt.show()
plt.close()
```

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# Parámetros
# =====
# Punto de desempeño
delta_desempeno = 0.0228    # m
V_desempeno = 26.70        # tonf

# Punto de fluencia y último solo para cálculos de límites (no se mostrarán)
dy_sol = 0.0048
delta_u = 0.1121

# =====
# Cargar datos desde Excel (dirección XX)
# =====
archivo = 'python.xlsx'
datos = pd.read_excel(archivo, sheet_name='Hoja1')
delta = datos.iloc[:, 0].to_numpy()/1000 # convertir mm → m
V = datos.iloc[:, 1].to_numpy()
delta = np.abs(delta)
V = np.abs(V)

# =====
# Cálculo del desplazamiento plástico y límites de desempeño
# =====
dp = delta_u - dy_sol
limite1 = dy_sol
limite2 = dy_sol + 0.3 * dp
limite3 = dy_sol + 0.6 * dp
limite4 = dy_sol + 0.8 * dp
limite5 = delta_u

limites = [limite1, limite2, limite3, limite4, limite5]
```

```

colores = ['green', 'yellow', 'orange', 'red']
etiquetas = ['Funcional', 'Resguardo de vida', 'Cerca al colapso', 'Colapso']

# =====
# Gráfico de la curva
# =====
plt.figure(figsize=(10, 8), facecolor='lightgray')
plt.plot(delta, V, color='blue', linewidth=2, label='Curva de Capacidad - Dirección XX')

# Líneas verticales y relleno de franjas
max_cortante = max(V) * 1.2
for i in range(len(limites) - 1):
    plt.axvline(x=limites[i], color='k', linestyle='--', linewidth=1)
    plt.fill_betweenx(
        [0, max_cortante],
        limites[i],
        limites[i + 1],
        color=colores[i],
        alpha=0.25,
        label=f'{etiquetas[i]}: {limites[i]:.4f} m - {limites[i+1]:.4f} m'
    )
plt.axvline(x=limites[-1], color='k', linestyle='--', linewidth=1)

# =====
# Punto de desempeño (único punto mostrado)
# =====
plt.scatter(delta_desempeno, V_desempeno, color='black', s=100, zorder=6,
            label=f'Punto Desempeño (du={delta_desempeno:.4f} m, Vu={V_desempeno:.4f} ton)')

# =====
# Configuración del gráfico
# =====
plt.title('Sectorización de Desempeño (SEAOC) - Dirección XX - Vivienda 4', fontsize=14)
plt.xlabel('Desplazamiento (m)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.ylabel('Cortante Basal (tonf)', fontsize=12, fontweight='bold')
plt.xlim(0, delta_u * 1.1)
plt.ylim(0, max_cortante)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend(loc='lower right', fontsize=9)
plt.tight_layout()

# =====
# Guardar imagen
# =====
nombre_imagen = 'XX_DesempenoSEAOC.png'
plt.savefig(nombre_imagen, dpi=300, facecolor='lightgray', bbox_inches='tight')
plt.show()
plt.close()

```






UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 24-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 098-2026-FIMGC-D**, a los **diecinueve días del mes de mayo de 2026**, siendo las **10:26 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **Ing. Javier Francisco TAIPE CARBAJAL**, **Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ** y **Ing. Rocky Giban AYALA BIZARRO**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería civil:

Kelvin Jack CARDENAS BERROCAL,

Quien presentó la tesis denominada:

Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 17 (diecisiete)

Siendo las **11:32 a.m.** del día **19 de mayo del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

Ing. Javier Francisco TAIPE CARBAJAL
Miembro

Ing. Rocky Giban AYALA BIZARRO
Miembro

Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 16-2026-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Kelvin Jack CARDENAS BERROCAL
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025
Evaluación de la Originalidad : 13 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2989406887

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 25 de junio del 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025

por kelvin Jack CARDENAS BERROCAL

Fecha de entrega: 25-jun-2026 11:04a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2989406887

Nombre del archivo: Te_Kelvin_Jack_Cardenas_Berrocal.pdf (5.55M)

Total de palabras: 63251

Total de caracteres: 371962

Análisis de la vulnerabilidad sísmica en viviendas rurales autoconstruidas en adobe en el distrito de Huancaray, provincia Andahuaylas y región Apurímac-2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	11%	5%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	3%
3	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1%
6	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unibagua.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1%

9	repositorio.unj.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	Herrera Villa, Jhomayra de los angeles. "Modelamiento numerico del comportamiento sismico de viviendas de mamposteria con bloques de tierra comprimida.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020 Publicación	<1 %
14	Ruiz Esquivel, Jose Oscar. "Estimacion de perdidas por sismos mediante funciones de fragilidad analiticas: caso de dos pabellones universitarios del Cusco.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020 Publicación	<1 %
15	"Análisis de fragilidad sísmica de edificaciones de albañilería armada de bloques de hormigón parcialmente rellenos", Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2021	<1 %

16	repositorio.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	purl.org Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
19	img1.wsimg.com Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.uasb.edu.bo Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria Trabajo del estudiante	<1 %
24	Enciso Miranda, Fernando Ubaldo. "Diseno Comparativo de Edificacion de 7 Pisos Con Aislamiento de Base Utilizando Acero Grado 60 y 75", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2022 Publicación	<1 %

25	www.grafiati.com Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

26	Noel Tapia, Maria Fernanda. "Integracion de ingenieria inversa y modelamiento numerico para la evaluacion sismica de construcciones historicas de adobe.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 Publicación	<1 %
----	--	------

27	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

28	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

29	tarptautine.kaunas.lm.lt Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

30	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

31	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

32	Montesinos Escobar, Mijail. "Caracterizacion mecanica de componentes estructurales en construcciones arqueologicas de tierra: el caso de Huaca de La Luna.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 Publicación	<1 %
----	--	------

33

repositorio.upn.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

34

Fuentes Torres, Milagros. "La programación de abastecimiento y su incidencia en la gestión de logística en las redes asistenciales EsSalud Región Puno 2015-2016", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru)

Publicación

<1 %

35

www.getty.edu

Fuente de Internet

<1 %

36

Chinchay Poma, Deybi Alejandro. "Análisis de elementos finitos de concreto simple en compresión simple y triaxial.", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Peru), 2021

Publicación

<1 %

37

Yacila Alvarado, Luciano Jhair | Salsavilca Pomarcahua, Jhoselyn Junny. "Aplicación de la Fibra de Acero Galvanizado para el Reforzamiento Estructural de Muros de Albañilería Confinada ante Cargas Cíclicas en Su Plano.", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Peru), 2020

Publicación

<1 %

38

[Submitted to Universidad Politécnica del Perú](#)

Trabajo del estudiante

<1 %

39	repositorio.untrm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1 %
41	repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
42	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
43	Vega, David Hernan Goni. "Análisis Comparativo del Comportamiento Inelástico de un Pabellón Educativo con Aislamiento Sísmico Diseñado en Concreto Armado y Acero Estructural", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Perú) Publicación	<1 %
44	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
45	Huamani Rojas, Smith Kevin Enciso Castro, Rossemary. "Caracterización de las Propiedades Mecánicas y Modelado Numérico del Comportamiento Sísmico de Sistemas de Mampostería Utilizando Bloques Ensamblables de Tierra Comprimida (BTC) Reforzados con Geomallas", Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú), 2022 Publicación	<1 %

46	Loayza León, José Luis. "Propuesta para la implementación de la Norma Peruana de Análisis y Diseño de Edificios con Disipadores de Energía de Fluido Viscoso.", Pontificia Universidad Católica del Peru (Peru) Publicación	<1 %
47	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	Submitted to uni Trabajo del estudiante	<1 %
49	Submitted to UC - Semipresencial / A distancia Trabajo del estudiante	<1 %
50	www.tdx.cat Fuente de Internet	<1 %
51	Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología (NO TOCAR) Trabajo del estudiante	<1 %
52	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
53	Ignacio Ferrer Ballester. "Simulación estocástica de espectros sísmicos de respuesta cinemática a partir de modelos sismológicos no estacionarios.", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2015 Fuente de Internet	<1 %

54 Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca <1 %
Trabajo del estudiante

55 repositorio.igp.gob.pe <1 %
Fuente de Internet

56 repositorio.uandina.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

57 Chacon alvarez, Roberto. "Análisis de desempeño sísmico de los edificios escolares típicos 780 post 97 de la costa peruana.", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Peru), 2021 <1 %
Publicación

58 Submitted to Universidad Cesar Vallejo <1 %
Trabajo del estudiante

59 repositorioinstitucional.uabc.mx <1 %
Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo