

Códigos observacionales: desarrollo de un método de inspección visual y evaluación de daños en albañilería simple durante la post-emergencia sísmica

Observation codes: development for a method of visual inspection and damage assessment in unreinforced masonry during a post-seismic emergency

Daniel Ruddoff^(*), Orlando Vigouroux^(**), Alejandro Durán-Vargas^(***), Carlos Aguirre-Nuñez^(****), Felipe Encinas^(**), Patricio Bertholet^(**), Camilo Meneses^(**)

RESUMEN

Examinar una tradición de levantamientos de inspección visual fundamentados en evidencia empírica representa la base para el desarrollo de un asistente digital (App) como instrumento de diagnóstico y valoración de estructuras en albañilería simple durante la post-emergencia sísmica. La integración de los códigos observacionales derivados de esta tradición permitió la calibración y el análisis de las técnicas de levantamiento y medición utilizadas. El asistente aprovecha las tecnologías ampliamente disponibles en la población e integra los conocimientos especializados y las técnicas tradicionales derivadas del levantamiento directo como base analítica para la valoración de los daños. Esta dimensión analítica de la representación del daño es uno de los aspectos críticos que establece las correlaciones entre los códigos visuales y las escalas de valoración del algoritmo que determina el riesgo sísmico y el grado de habitabilidad estructural de las viviendas.

Palabras clave: inspección visual; diagnóstico estructural; valoración de daños; terremoto; post-emergencia sísmica; alerta temprana; albañilería simple; fábrica de ladrillos; representación; tecnologías.

ABSTRACT

Examining a particular tradition of visual inspection methodologies based on empirical evidence represents the basis for developing a method of evaluating simple masonry structural damages during post-seismic emergencies. Integrating these observation codes allows the calibration and analysis of the survey and its measurement techniques. By taking advantage of the technologies widely available, the digital assistant (App) integrates both specialized knowledge and traditional techniques that derive from directly surveying as an analytical basis for assessing the damage. The representation of this analytical dimension of the damage is a critical aspect of establishing the correlations between the visual codes and the algorithm's scaled assessment that determine the seismic risk and the degree of the structural integrity of the houses.

Keywords: *visual inspection; structural diagnosis; damage assessment; earthquake; post-seismic emergency; early warning; unreinforced masonry; bricks fabric; representation; technologies.*

(*) Departamento de Arquitectura, Universidad Católica de Temuco, Temuco (Chile).

(**) Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago (Chile).

(***) Escuela de Diseño, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago (Chile).

(****) Escuela de Arquitectura, Universidad San Sebastián (Chile).

Persona de contacto/Corresponding author: daniel.ruddoff@gmail.com (D. Ruddoff)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5869-9385> (D. Ruddoff); <https://orcid.org/0000-0003-1573-929X> (O. Vigouroux); <https://orcid.org/0000-0003-0152-9590> (A. Durán-Vargas); <https://orcid.org/0000-0001-7556-8352> (C. Aguirre-Nuñez); <https://orcid.org/0000-0002-9428-3907> (F. Encinas); <https://orcid.org/0000-0003-2961-4906> (P. Bertholet); <https://orcid.org/0000-0002-4487-8793> (C. Meneses)

Cómo citar este artículo/Citation: Daniel Ruddoff, Orlando Vigouroux, Alejandro Durán-Vargas, Carlos Aguirre-Nuñez, Felipe Encinas, Patricio Bertholet, Camilo Meneses (2023). Códigos observacionales: desarrollo de un método de inspección visual y evaluación de daños en albañilería simple durante la post-emergencia sísmica. *Informes de la Construcción*, 75(570): e500 <https://doi.org/10.3989/ic.92680>

Copyright: © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

1. INTRODUCCIÓN

La inspección visual (VT) es el método más próximo utilizado por el experto para detectar las evidencias de los daños en estructuras en el contexto de la post-emergencia sísmica. Su aplicación como método de ensayo no destructivo (NDT) se sustenta en la experiencia práctica y el conocimiento experto acerca de los comportamientos mecánicos de las estructuras ante la acción de un terremoto. Buena parte del cuerpo de conocimientos en materia de daños estructurales derivados de la acción sísmica en los edificios se basa en la observación y el levantamiento directo como un método sistemático, comprendiendo un conjunto de técnicas analógicas y asistidas digitalmente para recoger las evidencias empíricas de los daños a través de mediciones manuales e instrumentales, notas de campo, dibujos proyectivos a escala y registro fotográfico.

En el contexto de alerta posterremoto uno de los problemas recurrentes es la disponibilidad y coordinación de la información registrada por los equipos de expertos y voluntarios encargados del registro visual de daños. El desarrollo de tecnologías y avances en la comprensión de los fenómenos físicos de alta complejidad relacionados con diversos peligros naturales han promovido la utilización de nuevas herramientas de mitigación de desastres (1). Algunos de los estudios más recientes exploran nuevas perspectivas (2), incorporando tecnologías del tipo UAV-based (3) o la realidad virtual que ha sido utilizada para eventos de preparación ante un evento sísmico reforzando las medidas de evaluación en general (4). Una de las líneas más recientes, ha avanzado en la posibilidad de incorporar como un medio válido la red masiva de dispositivos móviles ampliamente distribuidos por el territorio como una capacidad potencial de registro mediante los sensores de vibración y visión en el contexto de la alerta temprana como método de levantamiento de los daños en edificios (1).

2. SEISMO Y EL DESARROLLO RECIENTE DE ASISTENTES DIGITALES DE ALERTA Y RESPUESTA TEMPRANA

En este mismo sentido, el grupo de investigación aplicada SEISMO (www.seismo.cl) se encuentra en pleno desarrollo

de un instrumento digital que permita a un usuario no experto con diversos grados de conocimiento en estructuras realizar una evaluación temprana del estado de hecho de las construcciones afectadas en diversos sistemas constructivos en Chile.

El desarrollo de un asistente digital para el catastro de daños estructurales durante la post emergencia sísmica permitiría determinar si una vivienda se encuentra estructuralmente habitable o no habitable. El instrumento aporta una evaluación global y parcial de los elementos que componen el organismo estructural identificando posibles riesgos tanto para sus habitantes como para los usuarios del asistente. En la primera fase, la aplicación georeferencia la vivienda, captura imágenes del lugar y permite la caracterización del entorno, el reconocimiento de posibles peligros para las personas, tipología de vivienda y determinación del sistema constructivo. En paralelo a estos elementos contextuales, se pone a disposición del usuario, un sistema de levantamiento asistido de la estructura desde la definición de los segmentos y esquinas, sumado a la definición de puertas, ventanas y ventanales para el cálculo del número de dinteles, machones entre otros lugares de la vivienda. Despejada esta variable, la aplicación asiste al usuario en el reporte de daños por medio de la visualización digital de escenarios reconocibles desde su caracterización por familias y grados de intensidad. Durante este proceso la aplicación determina el nivel de gravedad de los daños y si la valoración alcanza umbrales de peligro para habitantes o voluntarios, se emite un mensaje de alerta para prevenir posibles incidentes durante el diagnóstico estructural.

El asistente digital SEISMO en su versión preliminar (technical preview [TP]) es una aplicación para dispositivos móviles que permite captar una gran cantidad de datos específicos de acuerdo con los perfiles de los usuarios que han sido definidos por el diseño de interacción, los sistemas de programación y validación técnica (Figura 1). Cada usuario es jerarquizado por su función, conocimientos y niveles de formación en la materia: (a) avanzado (peritos y autoridades), (b) en formación o con un grado de capacitación y (c) ciudadano o voluntario inicial.

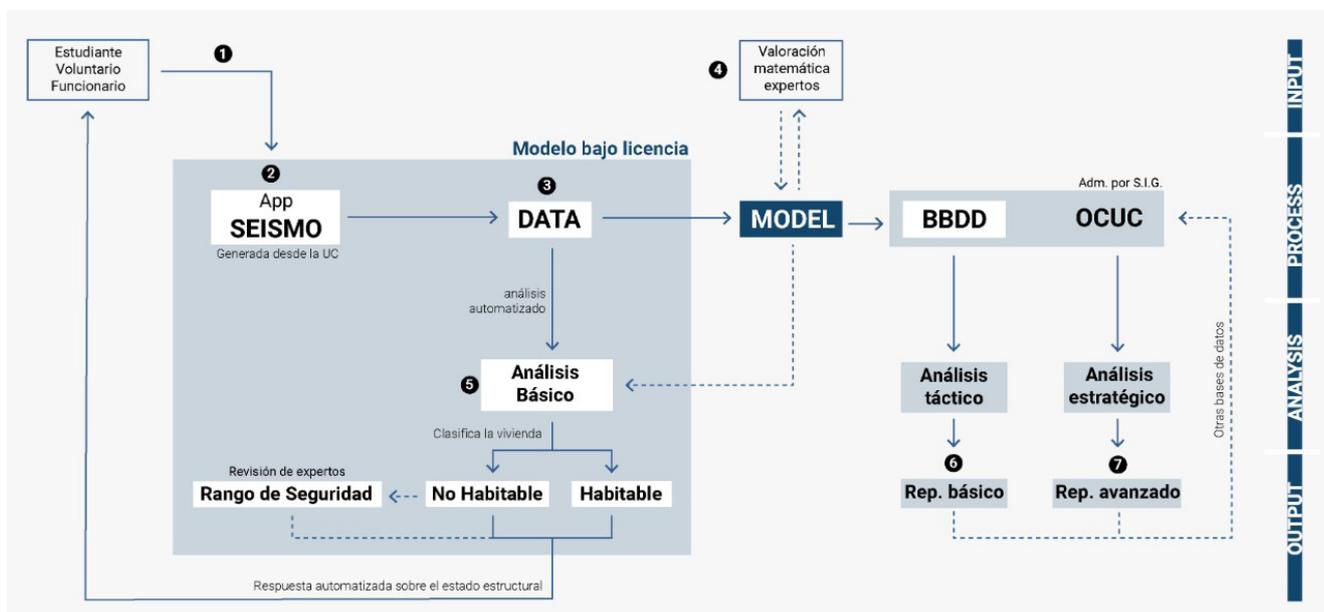
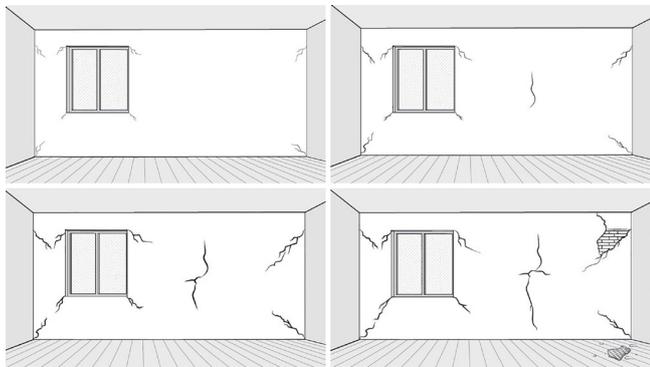
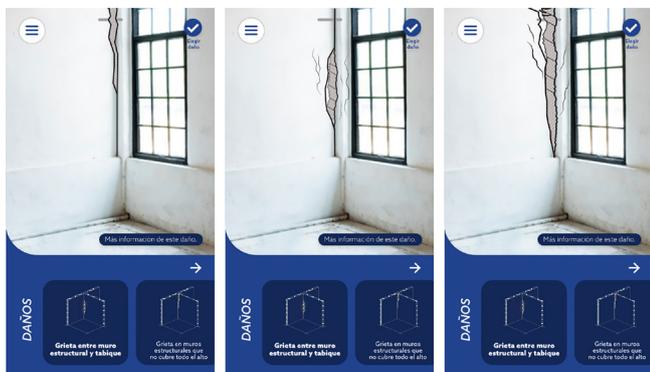


Figura 1. Esquema gráfico del sistema de funcionamiento del asistente digital (SEISMO, 2021). OCUC: Observatorio de Ciudades UC

Junto a una serie de objetivos científicos, tecnológicos y educativos, SEISMO plantea contribuir al desarrollo de alianzas y colaboraciones entre la investigación académica y las instancias existentes en el sector público definidas por el actual marco institucional chileno que actúan en distintos momentos de la post-emergencia sísmica. Dándole vida y uso al sistema de información administrado en clave geográfica para que los datos registrados se almacenen, sistematicen y pongan a disposición como información confiable y coordinada con otras bases de datos y en escaso tiempo. De este modo, el levantamiento de SEISMO complementaría la información recabada por las entidades y organismos públicos que coordinan la ayuda a las familias afectadas por un terremoto. Parte de la investigación se orienta al análisis táctico y estratégico de las políticas públicas propendiendo a establecer un diálogo directo que pueda amplificar y fortalecer las diversas instancias de levantamiento de información ya existentes.



(a)



(b)

Figura 2. a) Representación de la progresión de daños en muros y b) machones de albañilería simple e imágenes en desarrollo del asistente digital SEISMO (versión Beta 1.0, 2021) (A. Henríquez y D. Rojas.)

En particular, el Sistema de Información Social de Emergencia del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDS) que gestiona la información recogida por la Ficha Básica de Emergencia (FIBE) y la Ficha Básica de Emergencia Hídrica (FIBEH) apoyando a los órganos competentes frente a distintas situaciones de emergencias y/o catástrofes. Pero también, en el ámbito de la gestión del riesgo de desastres a cargo del Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) del Ministerio del Interior y Seguridad Pública en Chile. Para ello, tanto el

sistema como la aplicación, cuentan con elementos de auto instrucción y desarrollo de prueba para la instrucción del “catastrador” (Figura 2a y 2b).

En la actualidad, el creciente desarrollo de conferencias e instancias de colaboración científica como la 6th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures o la ICBPDD 15 International Conference on Building Pathology and Defect, apuntan a avanzar en el uso de nuevos métodos de registro, coordinación y análisis de los datos considera, por una parte, los tópicos relacionados con las técnicas de levantamiento y el diagnóstico para la caracterización de las construcciones y, por otro, las metodologías de evaluación de daños en estructuras civiles e históricas bajo premisas que permitan dotar de sostenibilidad a la ciudad y sus sitios patrimoniales.

La diversificación de aplicaciones multi-plataforma para la evaluación de estados y procesos de recolección de datos ha complementado y, en algunos casos, reemplazado los métodos con papel y lápiz para incorporar sistemas de información que puedan actualizarse y asegurar mejores estándares en la evaluación (5). En la misma línea, se han generado aplicaciones multi-plataforma como Earthquakes Damage Assessments Manager (EDAM), desarrollada por el Committee Disaster Resilience of Structures, Infrastructures and Communities de la American Society of Civil Engineers.

Este asistente está dedicado a apoyar las labores de captura y carga de datos georreferenciados de los daños estructurales durante la fase preliminar de diagnóstico durante la post emergencia sísmica. Otro aspecto derivado de la transformación digital ha sido el desarrollo de una serie de software orientados a la certificación como CdA® (Classe di Attenzione Rischi Strutturale, Geologico, Sismico edifici), Blumatica SismicApp, SismaBonus, los cuales proveen diversos métodos para evaluar el riesgo sísmico en edificios y obras civiles. Algunos de estos asistentes comprenden además de la tecnología Web GIS, la aplicación sucesiva de un algoritmo con un sistema de mapeo que permite determinar los niveles de vulnerabilidad de los edificios evaluados, entre otros software complementarios que se encuentran disponibles para la evaluación de escenarios de riesgo sísmico y el análisis de los catálogos sismológicos como ZMAP, Seis-Comp3 y Legacy Software, Swiss Sismological Service perteneciente a ETH en Zúrich en colaboración con el Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences.

3. ENFOQUE METODOLÓGICO

En la actualidad, algunas de las metodologías de diagnóstico cualitativo han sufrido importantes transformaciones debido a la proliferación de nuevas tecnologías de registro y almacenamiento (5). La representación y simulación digital asistida por computadores e instrumentos técnicos de registro y medición han complementado, expandido y abreviado las formas tradicionales de catastro fundadas en el levantamiento métrico directo manual (6). Dado el carácter y el objetivo del asistente digital desarrollado por SEISMO, resulta imprescindible examinar algunas de las metodologías de base tradicional orientadas a la detección y el levantamiento de daños. En particular, una amplia tradición de trabajos dedicados al desarrollo de métodos de evaluación basado en parámetros y códigos observacionales que combinan el conocimiento empírico y el dibujo descriptivo y analítico de los daños para la determinación de su tipología y gravedad en edificios construidos en URM.

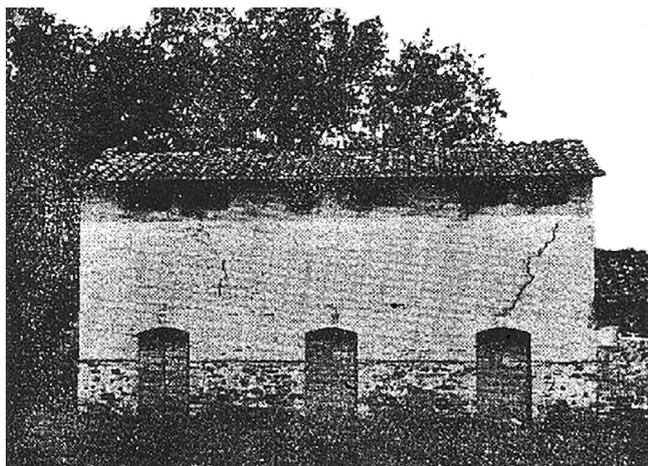


Figura 3. Registro fotográfico de un hundimiento de las fundaciones por traslación vertical terminal en un edificio rústico (S. Mastrodicasa).

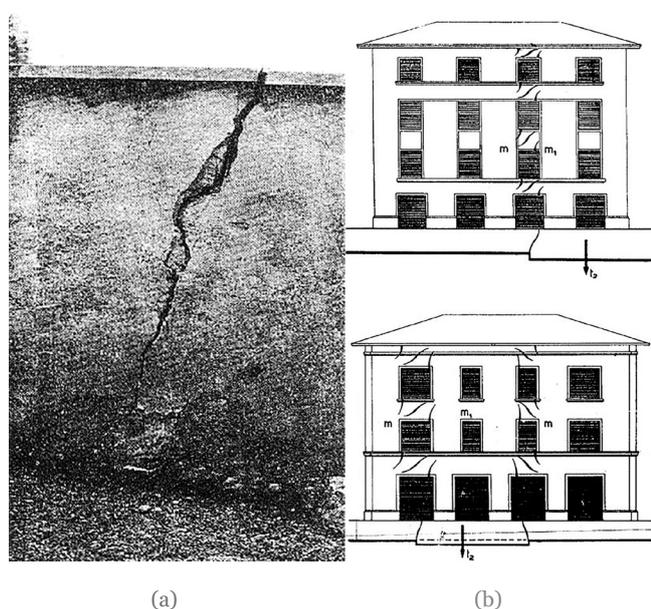


Figura 4. a) Registro fotográfico y representación de hundimientos por traslación vertical terminal en un muro sin vanos o aperturas y b) en un edificio con vanos de 3 pisos de altura (S. Mastrodicasa).

Existe un amplio conjunto de trabajos que han utilizado y depurado los métodos de dibujo análogo y digital como medio de contacto entre el conocimiento empírico y la caracterización de los daños y el nivel de valoración que implican para el elemento y el organismo estructural. S. Mastrodicasa, A. Giuffrè, C. Baggio y G. Cangini han dado continuidad a esta línea de trabajos que mediante los códigos observacionales y de representación han sistematizado una colección razonada de tipos y patrones de daños y mecanismos de colapso con un grado predictibilidad. Las evaluaciones de daños en edificios existentes comprenden dimensiones físicas que requieren entender los procesos de construcción y sus detalles.

Asimismo, las consideraciones conceptuales y empíricas derivadas de las caracterizaciones mecánicas de los daños más corrientes y recurrentes, distinguiendo los daños particulares relativos a cada una de las técnicas y sistemas constructivos. Este es, uno de los aspectos críticos para es-

tablecer la correlación entre la valorización del daño y la determinación de su gravedad con el fin de determinar el riesgo sísmico y el estado de habitabilidad de la vivienda. La identificación de la gravedad mediante un asistente digital depende del reconocimiento por asociación visual que realice el usuario de la aplicación y, al mismo tiempo, de la capacidad analítica que provee el dibujo para caracterizar apropiadamente el daño. De este modo, los mecanismos e intensidades de los daños estructurales son transferidos a través de los códigos observacionales mediante una ilustración capaz de describir el tipo y la intensidad de cada familia de daños. La selección de la información para la elaboración de estos dispositivos gráficos podría resultar insuficiente como mecanismo para proveer un entendimiento razonable y completo de los daños. Debido a lo anterior, se ha avanzado en pruebas de concepto y testeos con usuarios con distintos grados de conocimiento a través de metodologías Delphi, que, a través de un panel de expertos en la materia, han permitido calibrar las correlaciones entre la formulación del algoritmo predictivo, los dispositivos gráficos y las determinaciones de las familias e intensidades de los daños. La imagen es un punto decisivo del diagnóstico que pone en contacto el conocimiento de base con la percepción del usuario.

Los procedimientos de calibración del algoritmo predictivo permiten corroborar las definiciones y criterios estructurales adoptados por el equipo interdisciplinario. Tanto en su dimensión cuantitativa como cualitativa que determina la escala de valoración de los tipos y grados de intensidad para cada una de las familias y subfamilias de daño estructural en la vivienda. La dimensión cualitativa asociada a la representación analítica del daño en correspondencia con los mecanismos de daños elementales y recurrentes permitiendo definir del impacto causado en el elemento estructural específico y la vivienda en su conjunto.

Las líneas de trabajos basadas en modelos de diagnóstico cualitativo sustentadas en la representación gráfica como instrumento de investigación, interpretación y análisis han sido corrientemente aquellas que tienden a definir formas de intervención, consolidación y recuperación de las estructuras dañadas por la acción sísmica (7). La aproximación de este trabajo se basa por una parte en la premisa de que el esfuerzo por integrar y sintetizar provee en este caso un paso requerido para sustentar la propuesta científica de SEISMO (8) y, por otro, que los procedimientos de investigación para el diagnóstico cualitativo se encuentran orientados principalmente en un contexto donde existe un sentido de urgencia y poco tiempo para obtener los resultados. (9).

En este sentido, se ha revisado un marco de referencias que comprende un cuerpo de investigaciones sistemáticas, manuales, artículos y libros dedicados a la materia con el objetivo de profundizar y sintetizar algunas de las preguntas específicas que enfrenta el desarrollo de SEISMO como investigación aplicada. En su mayoría, se han seleccionado trabajos basados en la recolección de evidencias empíricas para la detección, identificación y caracterización de los tipos de daños en estructuras de albañilería simple que permitan cubrir los dominios fundamentales, las aproximaciones teóricas y los enfoques metodológicos del tópico en el contexto de algunos de los principales países con tradición sísmica.

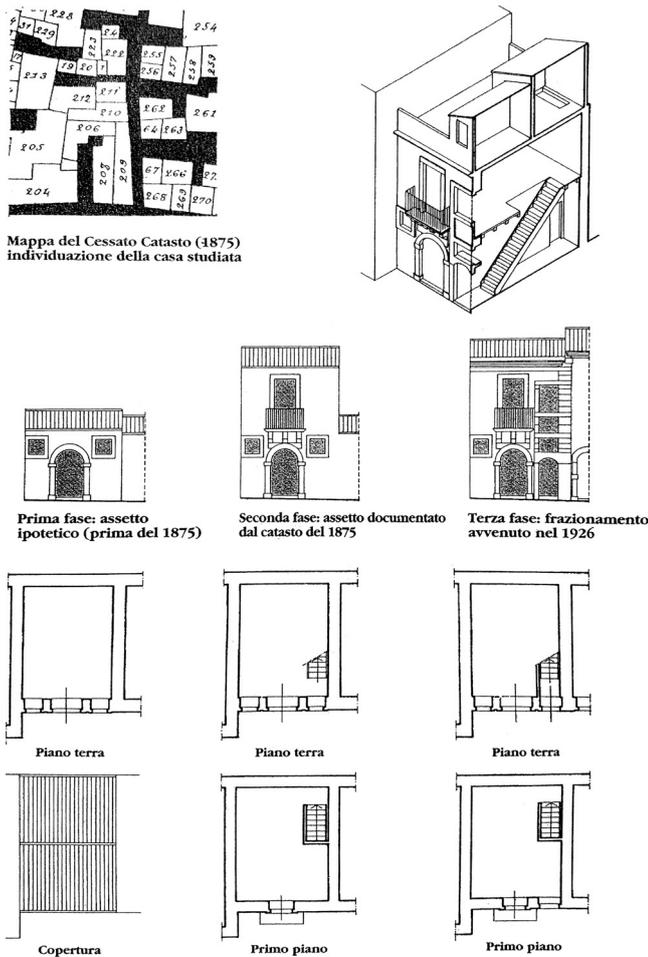


Figura 5. Fases de crecimiento de una casa 'terranea' (M. Zampilli).

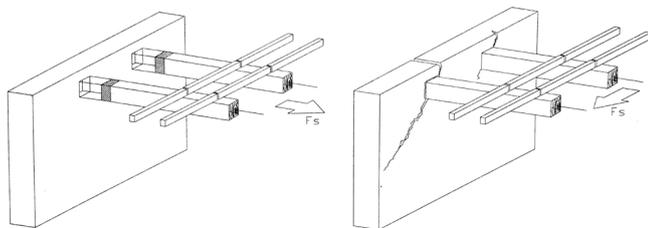


Figura 6. Respuesta sísmica de muros en un plano: mecanismos de daño al corte y flexión en presencia de entrepisos rígidos o de pisos deformables (G. Cangi).

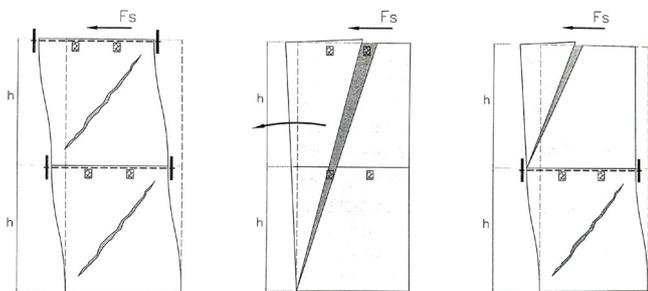


Figura 7. Influencia de las vigas de piso dispuestas en dirección ortogonal o paralela a la dirección de la propagación del sismo (G. Cangi).

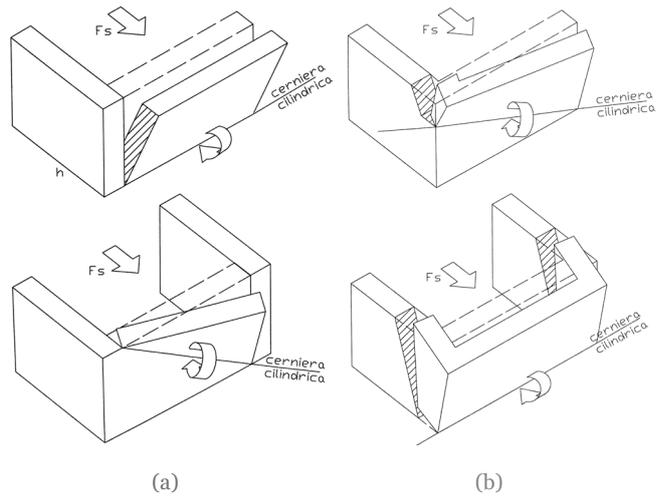


Figura 8. a) Mecanismos de daño elemental de paredes libres o vinculadas en uno de sus extremos. b) Mecanismos de daño elemental en paredes ortogonales conectadas (G. Cangi).

Una parte esencial del análisis se centra en revisar y reunir los aportes de trabajos que han desarrollado metodologías de catastro y observación directa basadas en el dibujo proyectivo manual y digital. Particularmente, aquellos que comprenden una base analítica y enfoque sistemático que no aísla el fenómeno estructural sino más bien lo comprende como parte de un cuerpo de conocimientos multiescalar que involucra desde las técnicas constructivas y el levantamiento directo hasta el análisis histórico integrando la valoración de los daños al proyecto de intervención y el proyecto estructural antisísmico destacando los trabajos de P. Marconi, A. Pugliano, C. Baggio, M. Zampilli y F. Giovanetti (Figuras 5-8).

Estas aproximaciones de carácter predominantemente inductivo y descriptivo se combinan con otros trabajos dedicados a la recolección y análisis de los mecanismos de daños estructurales para construir modelos interpretativos en base al componente observacional y experimental que permitan una lectura estructural detallada. La dimensión analítica de los dibujos que describen los distintos mecanismos y comportamientos sísmicos de los elementos consideran desde los aspectos morfológicos del organismo estructural hasta las variables relativas al proceso de agregación o ampliación en el tiempo. Asimismo, los datos de ubicación, las formas o sistemas de agrupamiento en las manzanas urbanas, el conocimiento del léxico constructivo y la composición material de cada elemento.

En el caso de los métodos de diagnóstico cualitativo orientados a la respuesta ante la emergencia es necesario integrar y sintetizar este tipo de conocimientos en un esquema procedimental distinto, donde prima el sentido de urgencia y la escasez de tiempo para entregar una respuesta inmediata frente al riesgo inminente de las estructuras dañadas. Debido a esta condición, es relevante incorporar los procedimientos para calibrar todas las correlaciones posibles entre los efectos y las causas ante la imposibilidad de implementar un método de análisis tradicional o de mayor duración (9).

Transferir el conocimiento experto para el reconocimiento de los daños a través de los dibujos, como dispositivos gráficos que expresan visualmente la intensidad de los daños, requiere conocer y comprender un conjunto extenso de me-

canismos de daños en cada una de las familias y elementos constructivos. Por consiguiente, el conjunto de dibujos que provee la síntesis de cada uno de los mecanismos de colapso y progresión de los daños debe tener la capacidad de establecer una correlación estrecha y directa con el algoritmo que determina la escala de valoración de las intensidades de los daños en cada uno de los elementos estructurales. Sin embargo, como señalan Binda, Saisi y Tiraboschi (2000), frecuentemente las correlaciones causa-efecto no pueden ser hechas sin una investigación experimental y analítica. Por lo mismo, la hipótesis es que esta dimensión analítica de la representación de los daños que provee el asistente digital representa, en el contexto del catastro en la postemergencia, un aspecto crítico para la metodología aplicada y la formulación del algoritmo predictivo.

4. PERSPECTIVA MULTIESCALAR: LOCALIZACIÓN Y SISTEMAS DE AGRUPAMIENTO

Uno de los principales desafíos metodológicos del diagnóstico es que, junto al levantamiento y el catastro de daños, es necesario incorporar la dimensión multiescalar de la entidad observada.

Antes que la tecnología, según señala Giuffrè (1993), la ciudad estaría caracterizada por los tipos edilicios, la data del sistema constructivo, como también por las macrozonas sísmicas que se apoyan sobre la información histórica.

SEZIONE 6 Pericolo ESTERNO indotto da altre costruzioni e provvedimenti di p.i. eseguiti

Causa potenziale	PERICOLO SU			PROVVEDIM DI P.I. ESEGUITI	
	Edificio	Via d'accesso	Vie interne	Divieto di accesso	Trasenne e protez. passaggi
	A	B	C	D	E
1 Crolli o cadute da altre costruzioni	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Rottura di reti di distribuzione	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 9. Tabla de valoración para la definición sintética del nivel y extensión del daño. Carlo Baggio et al. (2014). Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (Manual AeDES), Dipartimento della Protezione Civile, (p. 53).

Componente strutturale	Livello - estensione	DANNO									
		D4-D5 Gravissimo			D2-D3 Medio grave			D1 Leggero			Nulla
		>2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	> 2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	>2/3	1/3 - 2/3	< 1/3	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	L		
1 Strutture verticali		<input type="checkbox"/>									
2 Solai		<input type="checkbox"/>									
3 Scale		<input type="checkbox"/>									
4 Copertura		<input type="checkbox"/>									
5 Tamponature-tramezzi		<input type="checkbox"/>									
6 Danno preesistente		<input type="checkbox"/>									

Figura 10. Tabla de identificación de peligros externos. Manual AeDES.

SEZIONE 7 Terreno e fondazioni

MORFOLOGIA DEL SITO				DISSESTI: (in alto o femibili):			
1	2	3	4	A	B	C	B
○ Cresta	○ Pendio forte	○ Pendio leggero	○ Pianura	○ Assenti	○ Generali dal sisma	○ Acuti dal sisma	○ Preesistenti
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 11. Tabla de identificación de terreno y fundaciones. Manual AeDES.

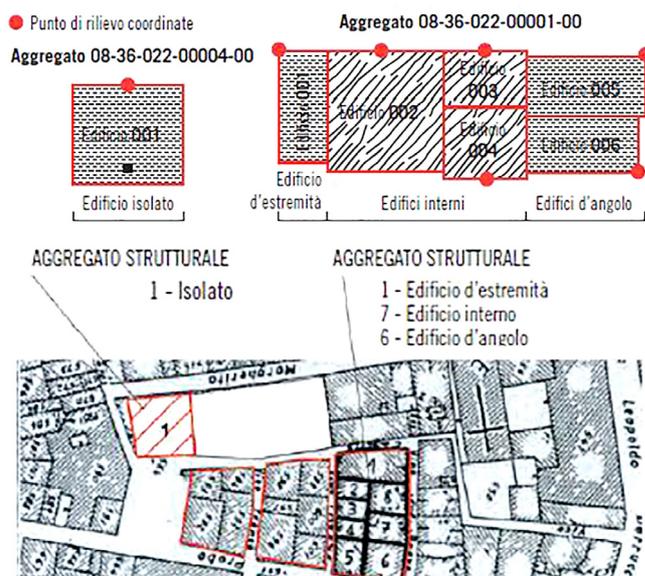


Figura 12. Ejemplos de identificación de "agregados estructurales" e identificación de algunos edificios singulares señalando los puntos coordinados de levantamiento. Manual AeDES.

Por lo mismo, continúa Giuffrè, no es posible definir con exactitud una función de vulnerabilidad dependiente de la intensidad del sismo, por consiguiente, la aproximación probabilística resultaría estéril por estar basada en variables arbitrarias. Por lo mismo, antes que las definiciones básicas de localización, como un primer nivel de análisis visual que identifica los síntomas que signifiquen un riesgo inminente para sus habitantes y a los usuarios que realizan el diagnóstico, la primera caracterización se asocia a los procesos de transformación de las ciudades y sus sistemas constructivos predominantes. Esta primera caracterización multiescalar y contextual se encuentra incorporada en el Manuale per la compilazione AeDES (2009) que define las instancias del catastro y levantamiento del Dipartimento della Protezione Civile (Figuras 9-12).

A partir un esquema similar, el asistente SEISMO, registra las indicaciones generales para la identificación de las casas. Entre estos aspectos se encuentra su sistema de agrupamiento, la identificación de peligros externos y de elementos visiblemente dañados. Asimismo, la comprobación del estado del terreno y las fundaciones entre otras observaciones contextuales que permitan recabar la información suficiente para hacer posible el diagnóstico completo al interior de la vivienda (10).

En el caso de las estructuras en albañilería simple como primer sistema constructivo analizado por SEISMO se contemplan, además de los parámetros dimensionales, los sistemas de agrupamiento y las formas elementales. La homogeneidad presente en estas edificaciones fuertemente tipificadas juega, según Giuffrè (1993), un rol importante para la base analítica dado que esta condición constructiva conduce a la homogeneidad de reacción frente al evento sísmico. El sistema de agrupamiento de las edificaciones, que en Chile se encuentra definido por la Ley General de Urbanismo y Construcciones (D.F.L. N°458 de 1976, actualizada al 2020 por la Ley N°21.284) como aislado, pareado y continuo (Figuras 13 y 14), reviste un aspecto relevante al momento de analizar las articulaciones mecánicas particularmente en las casas pareadas y continuas que están en contacto directo a través de sus muros medianeros.



Figura 13. Fotografía de un sistema típico de agrupamiento continuo que se ha ido transformando progresivamente en paredado y aislado, Chanco, Chile (SEISMO, 2021).

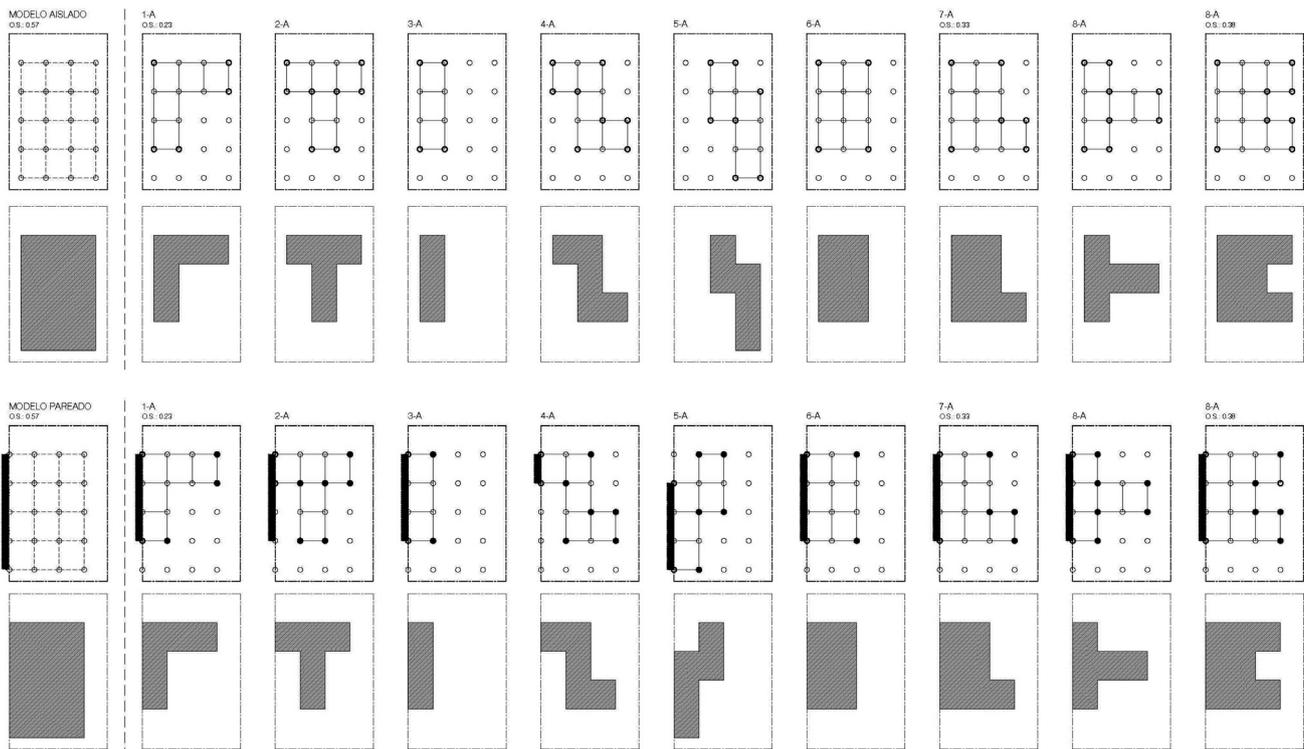


Figura 14. Modelos de los sistemas de agrupamiento 'aislado' y 'paredado' (sin considerar el sistema de agrupamiento 'continuo', el cual está muy presente en los asentamientos más antiguos en Chile). El modelo considera una casa genérica de uno o dos pisos de albañilería simple (SEISMO, 2021).

Para estos casos, algunos autores proponen una lectura de las fases formativas mediante un levantamiento constructivo de las zonas involucradas. Una consideración de los procesos de transformación que fue ampliamente difundida por los trabajos de Saverio Muratori y luego continuada por Gianfranco Caniggia (11). En este sentido, la documentación cartográfica opera como un primer instrumento de reconocimiento de los sistemas de agrupamiento y loteo de la estructura residencial, jugando un rol decisivo en los casos de los sistemas de agrupamientos continuos donde los contactos físicos se asumen como condición de partida del diagnóstico.

Para el caso de las viviendas construidas en albañilería simple, donde la tendencia es el sistema de agrupamiento continuo o paredado (Figura 13), las continuidades entre los edificios establecen ciertos patrones de dimensionamiento, materialidad y altura. Según Baggio et al. (2014), los edificios constituyen organismos estáticos únicos pudiendo ser identificado de acuerdo con los siguientes criterios: (a) construcciones de épocas diversas; (b) construidos con materiales diversos; (c) construcciones con diferencia de alturas edificadas.

De un modo equivalente al planteado por el Manual AeDES, la segunda fase del catastro general planteado por SEISMO considera aspectos como la identificación del número de pisos, datos métricos, fecha de construcción, uso o destino.

La tercera fase del catastro comprende información relativa a la composición de los muros, la forma general a partir de un esquema en planta y elevación. Asimismo, las tablas de valoración comprenden los componentes estructurales en conjunto sin distinción de partes o elementos particulares como vigas, esquinas, cornisas o cielos (10).

5. INDAGACIONES SOBRE LAS MECÁNICAS DE DAÑO EN ALBAÑILERÍA SIMPLE

Una de las premisas de la identificación de síntomas para su posterior valoración es que el evaluador opera sobre el juicio de las inspecciones visuales en concordancia con el reconocimiento de las señales objetivas verificables en la edificación sobre la superficie del muro o el elemento construido (12). Las indagaciones en las técnicas constructivas y las defini-

ciones mecánicas de los daños forman parte de una línea de estudios que ha sistematizado el conocimiento empírico a través del levantamiento geométrico y los patrones de las grietas. Para los diagnósticos tradicionales estas primeras indagaciones in-situ permiten identificar los puntos donde es necesaria una observación más detallada (9).

En el caso de las investigaciones orientadas a la intervención y recuperación estructural antisísmica interesan particularmente las aproximaciones que han estudiado los mecanismos de daño desde la perspectiva de la apreciación de las cualidades tecnológicas y estructurales del modo de construir tradicional en albañilerías de ladrillo (13-16). Esta aproximación a los métodos de diagnóstico en estructuras integra principios físicos y técnicas constructivas de origen con el conocimiento científico y las experiencias de aplicación y proyectación en viviendas nuevas y existentes. En general, los escenarios de daños se basan en una colección de casos de viviendas con datos de sus daños y ensayos experimentales, caracterizando los mecanismos de fisuración, rotura y dislocación de las partes y elementos estableciendo parámetros con variantes poco significativas. Exceptuando los casos singulares es posible afirmar que, debido a la configuración geométrica específica y a las cualidades de los materiales asociada, estos mecanismos de daños son sustancialmente idénticos en su formación y evolución (17). En el ámbito de las estructuras de albañilería simple aplica la idea de una descomposición del organismo edificado en porciones elementales. Según Cangi, la comprensión de fenómenos de las partes aisladas permitiría indagaciones particulares para pasar sucesivamente al análisis de un muro específico y de esta manera las conexiones que se expresan luego a un nivel superior (Figuras 6-8). Esta articulación progresiva de los modelos estáticos favorecería la comprensión de los organismos estructurales permitiendo analizar las causas para diversos modelos analíticos (17).

Los modelos interpretativos basados en este tipo de patrones observacionales y experimentales han sido desarrollados desde la perspectiva de distintos materiales y sistemas constructivos que en el caso de SEISMO considera, además de la albañilería simple como primer sistema constructivo analizado, la quinchá, las albañilerías confinada y armada, el hormigón armado, la madera y los sistemas mixtos como, por ejemplo, el sistema binario compuesto de ladrillo y madera.

En el caso de la albañilería simple, el patrón o mecanismo de daño más común y visible se presenta a través del agrietamiento y la fisuración de los muros estructurales y los paramentos no estructurales como tabiquerías. Este ocurre debido a que las cargas inducen los esfuerzos de tracción en el material en un compuesto que resiste cargas principalmente a compresión. Como se muestra en las figuras de G. Cangi (Figuras 6-8) y S. Mastrodicasa (Figuras 3 y 4), las grietas no sólo se ubican en la interfaz unidad-mortero ya que debido a las interacciones dentro del material las grietas suelen atravesar tanto la unidad como el mortero (18).

Este tipo de patrones y mecanismo de daño han sido ampliamente estudiados en algunos de los trabajos de S. Mastrodicasa en los que sistemáticamente describe y analiza los desplazamientos estáticos en las estructuras de albañilería de ladrillo y mampostería en piedra, clasificando los fenómenos de fisuración en los elementos portantes y cimentaciones. Las clasificaciones de los daños comprenden los agrietamientos y roturas en prismas elementales, definiendo subfamilias de

acuerdo con cada uno de los esfuerzos que enfrentan las estructuras ante la acción sísmica.

La perspectiva de SESIMO se encuentra orientada a partir de este tipo de aproximaciones que basan su enfoque metodológico a partir de la experiencia del equipo estructural y en consecuencia con los conocimientos teóricos y prácticos que cada uno de los integrantes aporta al desarrollo del asistente digital. Las hipótesis fundamentales para la formulación del algoritmo han determinado cuatro niveles de intensidad para los daños estructurales, clasificándolos como “leve, moderado, mayor y grave” para cada una de las familias y subfamilias de daños. Dado que las caracterizaciones genéricas requieren de un alto grado de exactitud, la estimación de las intensidades de los daños se asignaron límites amplios para generar alertas conservadoras, considerando los niveles de riesgo de los ocupantes. De acuerdo con estas escalas de valoración se fijaron puntajes mediante una regla que define la presencia de los daños en relación con los tercios del total de la vivienda. Para el caso de la albañilería simple, como primer sistema constructivo, la matriz de puntuación del algoritmo requirió una serie de calibraciones a partir de grupos de expertos, metodologías Delphi, pruebas de campo y en casos reales que han permitido validar los límites que definen el estado de habitabilidad estructural de las viviendas analizadas.

6. CONCLUSIONES PRELIMINARES Y PROYECCIONES

El sistema de información que se alimenta de SEISMO, puede ser muy útil y tiene un gran potencial de aplicaciones en diversos escenarios de respuesta temprana durante la post-emergencia sísmica. En consonancia con otros desarrollos en proceso (19-21), el asistente podría determinar eficazmente los casos críticos y por consiguiente reducir considerablemente la cantidad de casos que requieran la presencia de peritos expertos disponibles en terreno.

Los códigos observacionales examinados sugieren que el desarrollo de instrumentos tecnológicos y digitales integren ampliamente en sus metodologías de base los conocimientos empíricos para cubrir algunas de las brechas que significa enfrentar el fenómeno estructural en el período de post emergencia sísmica. Dado que el asistente digital SEISMO integra a los usuarios no expertos y el personal voluntario para el reconocimiento visual y el diagnóstico de los daños estructurales después de un terremoto, la investigación ha considerado una diversidad de procedimientos para calibrar y validar sus métodos de formulación del algoritmo y los dispositivos de representación, después de cada uno de los usos masivos. En este proceso la interfaz de la aplicación permite realizar una revisión completa de los posibles daños enunciados por el sistema, para luego evaluación automatizada de la gravedad de los daños, indicando con un margen amplio de seguridad si la vivienda está en condiciones de ser habitada.

Finalmente, uno de los alcances de las discusiones para los diagnósticos orientados a una respuesta temprana en el cual se abordan las acciones con un sentido de urgencia y plazos breves, son los tipos de validación técnica que les permita transferir la parte esencial del diagnóstico tradicional. Los procedimientos de evaluación de los daños deben asegurar un estándar mínimo de efectividad y certeza en ausencia de una metodología tradicional basada en procedimientos detallados utilizados para otros efectos como son la intervención posterior, la recuperación o la consolidación estructural.

El método de registro de daños utilizado en la aplicación se encuentra orientado al desarrollo de un modelo de interpretación del fenómeno que no es “sujeto específico” sino más bien basado en comportamientos y caracterizaciones genéricas, pero con un alto grado de exactitud en cuanto a la estimación de las intensidades de los daños en relación con las pruebas y predicciones realizadas mediante metodologías Delphi con expertos, pruebas de campo y casos reales. En consecuencia, se ha avanzado en pruebas de concepto para comprobar mediante el conocimiento experto una definición de los elementos y componentes que permiten determinar los tipos y mecanismos de daños más

comunes en albañilería simple y luego en otros sistemas constructivos como hormigón armado, quincha y albañilerías confinadas y armadas dando continuidad a la propuesta científica de SEISMO.

AGRADECIMIENTOS

El Grupo de Investigación aplicada SEISMO (<http://www.seismo.cl/>) agradece el financiamiento recibido mediante Proyecto de investigación FONDEF IDE A I+D 2019 ID: 19I10180, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Pontificia Universidad Católica de Chile.

REFERENCIAS

- (1) Velazquez, O., Pescaroli, G., Cremen, G., Galasso, C. (2020). A review of the technical and socio-organizational components of earthquake early warning systems. *Front. Earth Sci.*, 8, 533498. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.533498>.
- (2) Cremen, G., Galasso, C. (2020). Earthquake early warning: Recent advances and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 205, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103184>.
- (3) Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D., Vetrivel, A. (2020). UAV-based structural damage mapping: A review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 14. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010014>.
- (4) Lovreglio, R., Gonzalez, V., Feng, Z., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Trotter, M., Sacks, R. (2018). Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The Auckland City Hospital case study. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 670-682. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.08.018>.
- (5) Raja, C., Mathews, V., Abraham, M. (2021). Elemental approach to design a worker profile as a selection tool in Last Planner System©, 281-295. En Dasgupta, K., Sudheesh, T.K., Praseeda, K.I., Unni Kartha, G., Kavitha, P.E., Jawahar Saud, S. (Eds) Proceedings of SECON 2020. SECON 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham., 97, 281-295. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55115-5_27.
- (6) Domaneschi, M., Cimellaro, G.P., Scutiero, G. (2019). A simplified method to assess generation of seismic debris for masonry structures. *Engineering Structures*, 186, 306-320. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.092>.
- (7) Pugliano, A. (2009). *Elementi di un costituendo thesaurus utile alla conoscenza, alla tutela, alla conservazione dell'architettura: il riconoscimento, la documentazione, il Catalogo del Beni Architettonici*. (Vol. 1). Roma: Prospettive.
- (8) Palmatier, R. W., Houston, M. B., Hulland, J. (2018). Review articles: purpose, process, and structure. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 46, 1-5. <https://doi.org/10.1007/s11747-017-0563-4>.
- (9) Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14(4), 199-233. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00018-0).
- (10) Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Della Bella, M., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., Papa, F., Zuccaro, G. (2014). Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES), *Dipartimento della Protezione civile*, Roma: Editrice Italiana nel Mondo srl.
- (11) Zampilli, M. (1993). Lo sviluppo processuale dell'edilizia di base. En A. Giuffrè (Ed.), *Sicurezza e conservazione del centri storici. Il caso Ortigia* (pp. 37-68). Roma: Laterza.
- (12) Giuffrè, A. (Ed.) (1993). *Sicurezza e conservazione del centri storici. Il caso Ortigia*. Laterza.
- (13) Giovanetti, F. (2005) Introducción. En Manuale del recupero strutturale e antisismico (pp. 9-21). Dei Tipografia del Genio Civile.
- (14) Giuffrè, A. (1996). A mechanical model for statics and dynamics of historical masonry buildings. En Petrini, V., Save, M., (Ed.) Protection of the architectural heritage against earthquakes. *CISM International Centre for Mechanical Sciences*, 359, 71-152. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2656-1_4.
- (15) Sorrentino, L., D'Ayala, D., de Felice, G., Griffith, M.C., Lagomarsino, S., Magenes, G. (2017). Review of out-of-plane seismic assessment techniques applied to existing masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 11, 2-21. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1237586>.
- (16) Vettore, M., Saretta, Y., Sbrogiò, L., Valluzzi, M.R. (2020). A new methodology for the survey and evaluation of seismic damage and vulnerability entailed by structural interventions on masonry buildings: validation on the town of Castelsantangelo sul Nera (MC). *International Journal of Architectural Heritage*, 16(2), 182-207. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1766159>.
- (17) Cangi, G. (2005). *Manuale del recupero strutturale e antisismico*. Roma: Dei Tipografia del Genio Civile.
- (18) Gallegos, H., Casabonne, C. (2005). *Albañilería Estructural*. Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
- (19) Alzughairi, A.A., Ibrahim, A.M., Na, Y., El-Tawil, S., Eltawil, A.M. (2020, 25-28 de mayo). Feasibility of utilizing smart-phone cameras for seismic structural damage detection. Trabajo presentado en el 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik. <https://doi.org/10.1109/I2MTC43012.2020.9128554>.
- (20) Clarke, J.A. Laefer, D.F. (2014). Systematic approach for large-scale, rapid, dilapidation surveys of historic masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(2), 290-310. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.692849>.
- (21) Wu, X., Liu, X. (2021). Building crack identification and total quality management method based on deep learning. *Pattern Recognition Letters*, 145, 225-231. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.01.034>.