

Armonizzazione di standard spaziali e normativa antisismica

Una proposta per la rappresentazione semantica 3D del complesso architettonico di Tolentino

Colucci, Elisabetta; Spanò, Antonia; Lingua, Andrea; Matrone, Francesca; Noardo, F.; Pascale, Adriana

Publication date

2019

Document Version

Final published version

Published in

Atti e rassegna tecnica della società degli ingegneri e degli architetti in Torino

Citation (APA)

Colucci, E., Spanò, A., Lingua, A., Matrone, F., Noardo, F., & Pascale, A. (2019). Armonizzazione di standard spaziali e normativa antisismica: Una proposta per la rappresentazione semantica 3D del complesso architettonico di Tolentino. *Atti e rassegna tecnica della società degli ingegneri e degli architetti in Torino*, LXXIII(3), 118-129.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Armonizzazione di standard spaziali e normativa antisismica. Una proposta per la rappresentazione semantica 3D del complesso architettonico di Tolentino

Harmonization of spatial standards and anti-seismic regulations. A proposal for the semantic representation of the architectural complex of Tolentino

ELISABETTA COLUCCI, NANNINA SPANÒ, ANDREA LINGUA, FRANCESCA MATRONE, FRANCESCA NOARDO, ADRIANA PASCALE

Abstract

La necessità di condividere informazioni per la documentazione e la prevenzione dei danni del patrimonio costruito colpito da eventi calamitosi, quali i sismi, richiede l'utilizzo di standard e linguaggi comuni utilizzabili dai diversi *stakeholders* coinvolti e a differenti livelli operativi. In questo contesto, è ormai opinione condivisa che l'adozione di database spaziali e strutture informative geografiche permette sia la rappresentazione del territorio e dei beni architettonici che vi insistono, sia la loro connessione con i dati e le serie storiche riguardanti catastrofi e rischi (naturali e antropici), facilitando così analisi di rischio e vulnerabilità pre e post evento.

Lo studio delinea quindi da un lato una metodologia per la rappresentazione 3D del patrimonio architettonico, considerando standard geografici e vocabolari internazionali già strutturati (INSPIRE, CityGML, UNESCO, CIDOC-CRM, MONDIS, Getty thesauri), dall'altro, come conseguenza della collaborazione tra il gruppo di geomatica e quello ingegneria strutturale e sismica del Politecnico di Torino, si è sperimentata una integrazione del database che prevede una stretta correlazione tra le entità geometriche che rappresentano le componenti strutturali degli edifici-chiesa e i relativi meccanismi di danno¹.

The need of effectively sharing information about architectural heritage affected by disaster event, in order to foster its preservation, requires the adoption of a common language and standards among the involved actors and stakeholders. The application of spatial and geographical databases, enabling to connect architectural heritage representation with the data useful for hazard and risk analysis, could facilitate the pre and post event estimation of vulnerability.

This paper outlines a methodology to represent 3D models of the architectural heritage according to some existing standards data models and thesauri inventories (INSPIRE, CityGML, UNESCO, CIDOC-CRM, MONDIS, Getty). In addition, as a consequence of the collaboration between the Geomatics group and the Structural and Seismic Engineering group of the Polytechnic of Turin, an integration of the database for a correlation between the geometric entities of structural components and their related earthquake damage mechanisms was tested.

Introduzione

L'elevato rischio sismico della penisola italiana e il crescente numero di eventi catastrofici occorsi sul territorio nazionale e in altri luoghi del mondo rendono

Elisabetta Colucci, dottoranda in Urban and regional development, Politecnico e Università di Torino

elisabetta.colucci@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD

antonia.spano@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI

andrea.lingua@polito.it

Francesca Matrone, dottoranda in Urban and regional development, Politecnico di Torino

francesca.matrone@polito.it

Francesca Noardo, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista presso 3D Geoinformation group, Delft University of Technology, the Netherlands

F.Noardo@tudelft.nl

Adriana Pascale, dottoranda in Ingegneria civile e ambientale, Politecnico di Torino

adriana.pascale@polito.it

sempre più necessarie l'integrazione e la condivisione dei dati spaziali con quelli relativi alla vulnerabilità e al rischio sia a scala territoriale che architettonica.

Per rappresentare e gestire tali informazioni geografiche e ambientali, è necessario adottare linguaggi e strutture di dati univocamente condivise, oltre ad adottare standard geografico/spaziali ai quali sempre più si associano le ontologie informatiche, il cui ruolo è quello di rappresentare descrizioni formali esplicite per indicare i concetti in un determinato dominio. La condivisione e diffusione di queste informazioni risulta infatti fondamentale come supporto per l'adozione di politiche comuni da attuare a livello locale e globale.

A questo proposito, lo studio qui presentato è legato ad una più ampia ricerca finanziata dallo *European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations*, denominata *ResCult*, finalizzata a migliorare le capacità di intervento della Protezione Civile (nazionale e internazionale) implementando un database interoperabile per documentare il rischio di esposizione ai danni del patrimonio costruito².

Data l'estrema vulnerabilità riscontrata dalle chiese nel corso degli eventi sismici del Centro Italia nel 2016-17, si è scelto di prendere in considerazione la Basilica di San Nicola a Tolentino (MC) per testare questo strumento di supporto alle decisioni volto a sostenere le operazioni di salvaguardia dei beni culturali in situazioni di emergenza e favorirne la resilienza.

Il database *ResCult* consisteva già in una proposta di estensione del modello concettuale di *INSPIRE*, standard geografico adottato dalla Comunità Europea per rendere interoperabile e facilmente condivisibile l'informazione spaziale, al fine di ottenere la possibilità di una gestione dell'informazione complessiva e non frammentata dai confini nazionali.

Per poter prendere in considerazione i beni costruiti in una prospettiva non soltanto geografica, sono stati ulteriormente considerati alcuni standard e linee guida per la rappresentazione a scala urbana, nonché per considerare i valori culturali dei beni. Lo standard *CityGML*, le linee guida UNESCO, lo standard *CIDOC-CRM*, e altri ancora ai quali si dedicherà spazio nei prossimi paragrafi, ma anche direttive internazionali in tema di rischio come il *Sendai framework for disaster risk reduction*³, contribuiscono – se integrati – a garantire risultati già ricercati e parzialmente ottenuti nei riguardi dell'interoperabilità semantica e geometrica nei database, oltre alle possibilità di analisi multi-scala a differenti Livelli di Dettaglio (LoD).

A oggi svariate ricerche si sono occupate di investigare i metodi per implementare e poter gestire tramite sistemi informativi i valori semantici utili a descrivere il patrimonio costruito, nelle molte direzioni consolidate tipiche dei progetti di conservazione. Finora, per i comportamenti strutturali degli edifici e i meccanismi di danno non erano disponibili sperimentazioni di una loro integrazione in modelli standardizzati per la strutturazione dei dati nella cartografia.

Per questo motivo, a partire dalla Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011⁴ destinata alle valutazioni sismiche delle murature storiche e la specificazione inerente le chiese⁵, lo studio propone la generazione di nuove entità dei database spaziali che identificano il modello della fabbrica suddiviso in macro-elementi e relativi meccanismi di danno, con l'obiettivo finale di rappresentare e analizzare tali elementi in ambiente GIS, facilitando le analisi sismiche sui beni architettonici

1. Gli standard per la rappresentazione del patrimonio costruito

Gli standard per la rappresentazione del patrimonio architettonico sono proposti da vari settori di studio diversi; tra i quali quelli più indagati provengono dal campo di indagine della cartografia numerica, per descrivere il patrimonio nel suo contesto territoriale, urbano o paesaggistico, e si estendono anche a quelli orientati a descriverne la storia, il valore culturale e molti altri caratteri connessi.

L'ontologia principale per la rappresentazione concettuale rigorosa nel dominio dei beni culturali è il modello concettuale del *CIDOC (CIDOC-CRM)*⁶, sviluppato dalla Commissione Internazionale per la Documentazione del Consiglio Internazionale dei Monumenti (*ICOM*), oggi standard *ISO 21127: 2014*⁷.

Per quanto riguarda invece i *Vocabolaries*, cioè gli inventari di terminologie strutturate, che propongo termini legati al patrimonio culturale, il Getty Institute, in conformità con il *CIDOC-CRM*, propone diversi standard: *The Art and Architecture Thesaurus (ATT)*, per i termini connessi all'arte e architettura; il *Thesaurus of Geographic Names (TGN)*, che, a differenza di *GeoNames* (un database strutturato per toponimi), include anche denominazioni storiche; la *Union List of Artist Names (ULAN)* per gli autori; il *Cultural Objects Name Authority (CONA)* che contiene titoli, attribuzioni, soggetti raffigurati e altri metadati su opere d'arte. I vocabolari Getty, grazie alla loro strutturazione gerarchica e tramite un ID univoco, possono essere utilizzati per la catalogazione, la classificazione semantica e l'accesso alle informazioni sui beni culturali, artistici e architettonici.

Nello specifico, la presente ricerca ha preso in considerazione alcuni oggetti e specificazioni dell'*ATT* in modo da definire univocamente le diverse parti del complesso architettonico preso in esame.

Per quanto riguarda, invece, gli standard per l'informazione geografica, a livello internazionale sono noti il *CityGML*, pubblicato dall'*Open Geospatial Consortium* per rappresentare informazioni 3D multi-scala in ambito urbano⁸ e *INSPIRE*, che mira a ottenere una cartografia unica e interoperabile in Europa⁹. Nonostante *INSPIRE* includa ovviamente all'interno del suo modello concettuale un modello dati a scala dell'edificio, lo standard *CityGML* lo integra definendo un maggiore livello di dettaglio e una definizione semantica più approfondita per tali oggetti tipici della scena urbana.

Infine, tra gli standard per la rappresentazione degli edifici, è necessario citare l'IFC (*Industry Foundation Classes*) dedicato al dominio del BIM (*Building information Model*). Quest'ultimo, predisposto per la rappresentazione 3D alla scala dei manufatti costruiti, sebbene sia intrinsecamente strutturato per un elevato livello di dettaglio (in questo ambito denominato livello di sviluppo), nasce come standard per la modellazione a oggetti di edifici di nuova costruzione, e risulta quindi poco adatto alla rappresentazione del patrimonio costruito storico.

2. L'estensione del modello concettuale INSPIRE, proposto dal progetto ResCult

Uno degli obiettivi fondamentali del progetto ResCult è consistito nello sviluppo di un database interoperabile al fine di fornire un possibile modello di dati unico e favorire quindi l'interazione tra i vari enti che collaborano nella gestione delle emergenze¹⁰.

Durante le prime fasi del progetto ResCult, l'integrazione dei modelli dei dati degli standard INSPIRE e CityGML ha considerato la loro completezza, aggiornamento, possibilità di estensione ed il riconoscimento internazionale di cui godono.

Dal modello di dati INSPIRE sono stati considerati gli oggetti *Protected Site*, dall'Annex I, per siti che necessitano di protezione per svariati motivi – ecologico, biologico, culturale – e che sono legalmente riconosciuti; proprio questi caratteri, una volta esteso il modello, candidano tipologie di entità così definite a poter comprendere il patrimonio culturale, nelle accezioni paesaggistico, materiale, immateriale, tangibile e intangibile. Una parte naturalmente molto rilevante del modello dati INSPIRE è rappresentata dall'identificazione dell'entità *Buildings*, dall'Annex III, che è stato particolarmente esteso per la rappresentazione del patrimonio costruito e i suoi elementi. Il tema *Natural Risk Zone*, dall'Annex III, descrivendo le caratteristiche e proprietà dei rischi e delle catastrofi naturali risulta una delle parti selezionate per l'estensione in quanto consente di relazionare gli oggetti al rischio a cui sono esposti (Figura 1).

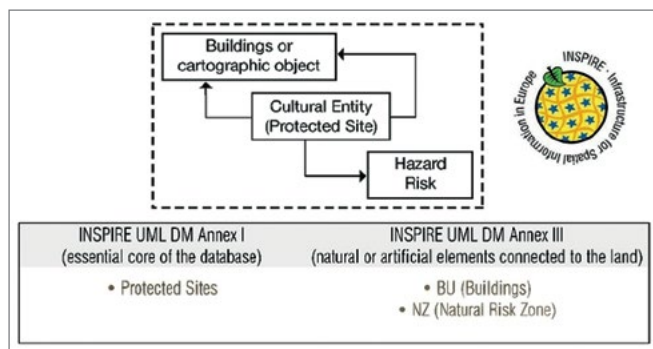


Figura 1. Evidenziazione delle parti del modello dati dello standard INSPIRE particolarmente soggette all'estensione da parte del progetto ResCult.

Dal momento che lo standard CityGML descrive oggetti e parti di città, che i dati sono rappresentati secondo livelli di dettaglio (LoDs) con una *granularità* che può essere migliorata¹¹, e prevedendo inoltre la visualizzazione multi-scala 2D e 3D degli edifici della città, la parte del modello dati che interessa gli edifici è quella che in maggior misura può essere implementata e armonizzata per rappresentare adeguatamente i caratteri architettonici del patrimonio costruito necessari agli scopi del database ResCult.

Infine, per la strutturazione del modello concettuale del database, sono stati presi in considerazione anche alcuni standard per la classificazione dei rischi analizzando sia i recenti documenti dell'UNESCO¹² che il modello di classificazione dei dati sui disastri naturali formulato dal CRED (Centre of Research on the Epidemiology of Disasters)¹³.

La Figura 3 rappresenta una schematizzazione semplificata del modello concettuale del database ResCult, derivato dai modelli di dati descritti. Le frecce rosse simboleggiano le relazioni di eredità dalle tabelle "madri", quelle nere le relazioni tra oggetti; in giallo sono evidenziati i parametri dei rischi sviluppati nell'ambito del progetto, i riquadri blu identificano gli oggetti che sono stati implementati con nuovi attributi per meglio descriverne le caratteristiche; in grigio, l'estensione per la classificazione dei manufatti costruiti che deriva da una ricerca che mette al centro l'interpretazione strutturale dell'edificio¹⁴.

Come anticipato, il modello di dati del database ResCult sin qui presentato risultava incompleto per la rappresentazione del patrimonio edilizio a un maggior livello di dettaglio e per la descrizione dei comportamenti strutturali delle componenti architettoniche in caso di rischio sismico. È stata pertanto sviluppata un'estensione integrando le entità e gli attributi per la valutazione del rischio sismico del patrimonio costruito storico.

3. Riduzione del rischio sismico: standard e linee guida in relazione ai DB spaziali

Esistono alcuni modelli schematici di dati che descrivono i valori semantici delle componenti degli edifici in associazione con i meccanismi di danneggiamento e deterioramento.



Figura 2. Schematizzazione grafica dei 5 LOD di base dello standard CityGML (cfr. nota 11 p. 129).

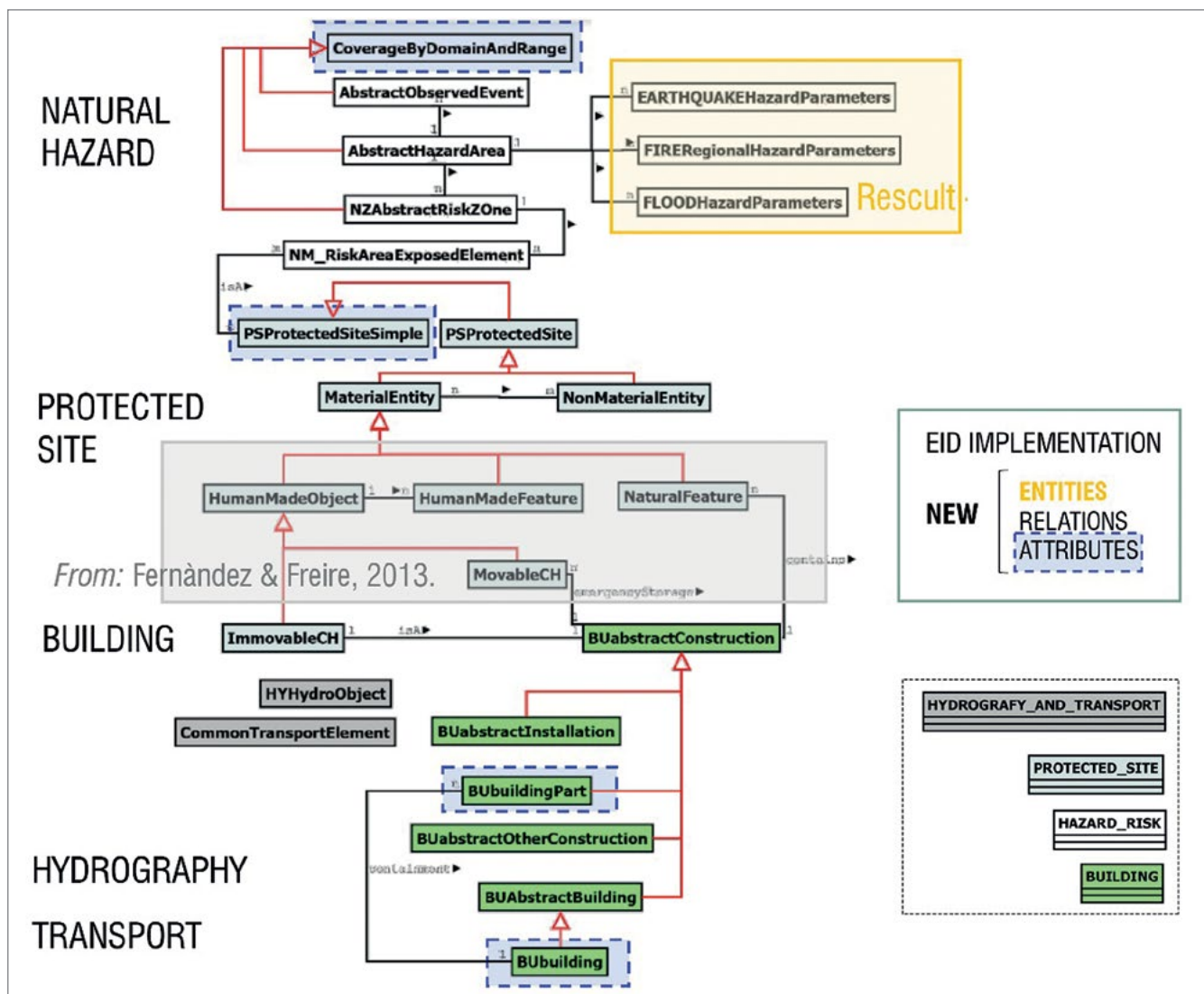


Figura 3. Modello concettuale semplificato del database interoperabile del progetto ResCult.

In particolare, non si può ignorare l'ontologia MONDIS (*Monument Damage Information System*)¹⁵, conforme al CIDOC-CRM e comprendente oggetti inclusi anche nella parte del modello di dati INSPIRE sottoposto ad estensione per il progetto ResCult e ulteriormente dettagliati nel presente studio.

Il linguaggio utilizzato per la definizione di MONDIS è abbastanza diverso da quello di INSPIRE, poiché è un *Linked Open Data*, quindi rappresentato in *Ontology Web Language* (OWL), finalizzato alla rappresentazione in linguaggio *Resource Description Framework* (RDF) delle fonti web. D'altro canto, il modello di dati INSPIRE si basa sulle tecnologie GML (*Geographic Markup Language*), utili per rappresentare dati geografici e spaziali. Dal momento che sia probabile che le due rappresentazioni si possano in futuro incontrare in ambiente web, si propone una mappa comparativa tra alcune classi di oggetti di MONDIS e altre proposte nell'estensione di INSPIRE, in modo che sia possibile prevedere un'interoperabilità tra i due tipi di rappresentazione per

sfruttare i vantaggi derivati da entrambi. Le entità comparate sono brevemente elencate nella Tabella 1 (per i macro-elementi confrontare i paragrafi successivi).

MONDIS class	INSPIRE extended data model class
Risk	Components of the NaturalHazard theme of INSPIRE, in particular to naturalHazardClassification values
Hazard	
Vulnerability	Better defined in the features and attributes of buildings and protected sites in the RESCULT extension to INSPIRE
Component	Macroelement
	Element
Mechanism	DamageMechanism – MechanismType

Tabella 1. Comparazione e possibile corrispondenza semantica tra le classi di entità di MONDIS e le classi che caratterizzano l'estensione di INSPIRE nel database ResCult.

Un elemento innovativo nell'implementazione ed estensione del modello di dati del database ResCult è consistito nel proposito di introdurre classi di entità per il patrimonio architettonico esposto al rischio sismico, e in conseguenza le relazioni tra gli elementi architettonici o componenti delle fabbriche che raggruppano più elementi architettonici e i rispettivi comportamenti strutturali.

L'interpretazione dei danni sismici sulle murature storiche, radicata negli studi di ingegneria sismica¹⁶, ha dato impulso al proposito di implementazione del database nella direzione indicata, che deriva naturalmente dalla collaborazione tra il gruppo di geomatica e quello di ingegneria Strutturale e Sismica del Politecnico di Torino.

Nello specifico, la ben nota DPCM sulla "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008"¹⁷ fornisce una classificazione dei danni strutturali più frequenti, in base agli elementi geometrici, strutturali e architettonici dell'edificio. La conoscenza approfondita e il riconoscimento di meccanismi di danno tipici che possono intervenire in caso di un evento sismico facilitano la valutazione del livello di sicurezza idoneo per progettare interventi localizzati, di adeguamento e/o miglioramento sismico, adatti ai beni architettonici¹⁸.

Dato che l'attenzione si è concentrata sulle chiese¹⁹, per la pluralità di comportamenti ricorrenti collegati al danno locale e ai meccanismi di collasso tipici delle diverse parti architettoniche, si è adottato il caso studio del complesso architettonico della Basilica di Tolentino per avviare la sperimentazione. Le diverse componenti dell'edificio in muratura storica vengono definiti "macro-elementi" e manifestano un comportamento sismico quasi del tutto indipendente dal resto della struttura. Nella Figura 4 è riportata la classificazione completa dei meccanismi di danno in relazione alle diverse parti della chiesa, che è stata oggetto di implementazione nel database interoperabile.

Se l'analisi dei meccanismi di danno rappresenta un metodo efficace volto all'interpretazione del comportamento strutturale del manufatto storico in una prospettiva territoriale, in quanto si tratta di un livello di interpretazione sicuramente schematico e da approfondire in ciascun caso reale, proprio questo approccio si è pensato particolarmente idoneo a essere rappresentato nella cartografia numerica basata su database spaziali conformi a standard.

Per poter adottare lo strumento della classificazione dei meccanismi e relativi macro-elementi all'interno del database è stato necessario strutturare e organizzare un modello adeguato sia in termini di definizione delle entità geometriche che rappresentano gli elementi di fabbrica, sia delle relative informazioni semantiche di tale dominio strutturale, in modo da rappresentare al meglio gli elementi architettonici e le relative caratteristiche che li interessano.

La prima fase dello studio ha previsto quindi la segmentazione del modello 3D²⁰ in macro-elementi architettonici,

Damage mechanisms	Part of the church
1 – Overturning of the facade	Façade
2 – Damage at the top of facade	
3 – Shear mechanisms in the	
4 – Nartex	
5 – Transversal vibration of the nave	Nave
6 – Shear mechanisms in the side walls	
7 – Longitudinal response of the colonnade	
8 – Vaults of the nave	
9 – Vaults of the aisles	Transept
10 – Overturning of the transept's end wall	
11 – Shear mechanisms in the transept walls	
12 – Vaults of the transept	Dome
13 – Triumphal arches ii triumphal arch	
14 – Dome and drum	
15 – Lantern	Apse
16 – Overturning of apse	
17 – Shear mechanisms in presbitery and apse	
18 – Vaults in presbitery and apse	Roof covering
19 – Part of roof: side walls of nave and aisles	
20 – Part of roof: transept	
21 – Part of roof: apse and presbitery	Chapel
22 – Overturning of the chapels	
23 – Shear mechanisms in the walls of chapels	
24 – Vaults of chapels	Bell tower
25 – Interactions next to irregularities	
26 – Projections (domed vaults, pinnacles, statues)	
27 – Bell tower	Bell tower
28 – Bell cell	

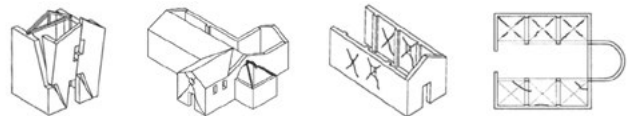


Tabella 2. Meccanismi di danno in relazione ai macro-elementi architettonici della chiesa (DPCM 9 febbraio 2011).

strutturati secondo gli standard per la rappresentazione architettonica presentati nel Paragrafo 2, e l'estensione del database con nuovi attributi ideati per ospitare le informazioni legate alle caratteristiche strutturali degli edifici storici, alle categorie di rischio sismico e ai meccanismi di danno codificati.

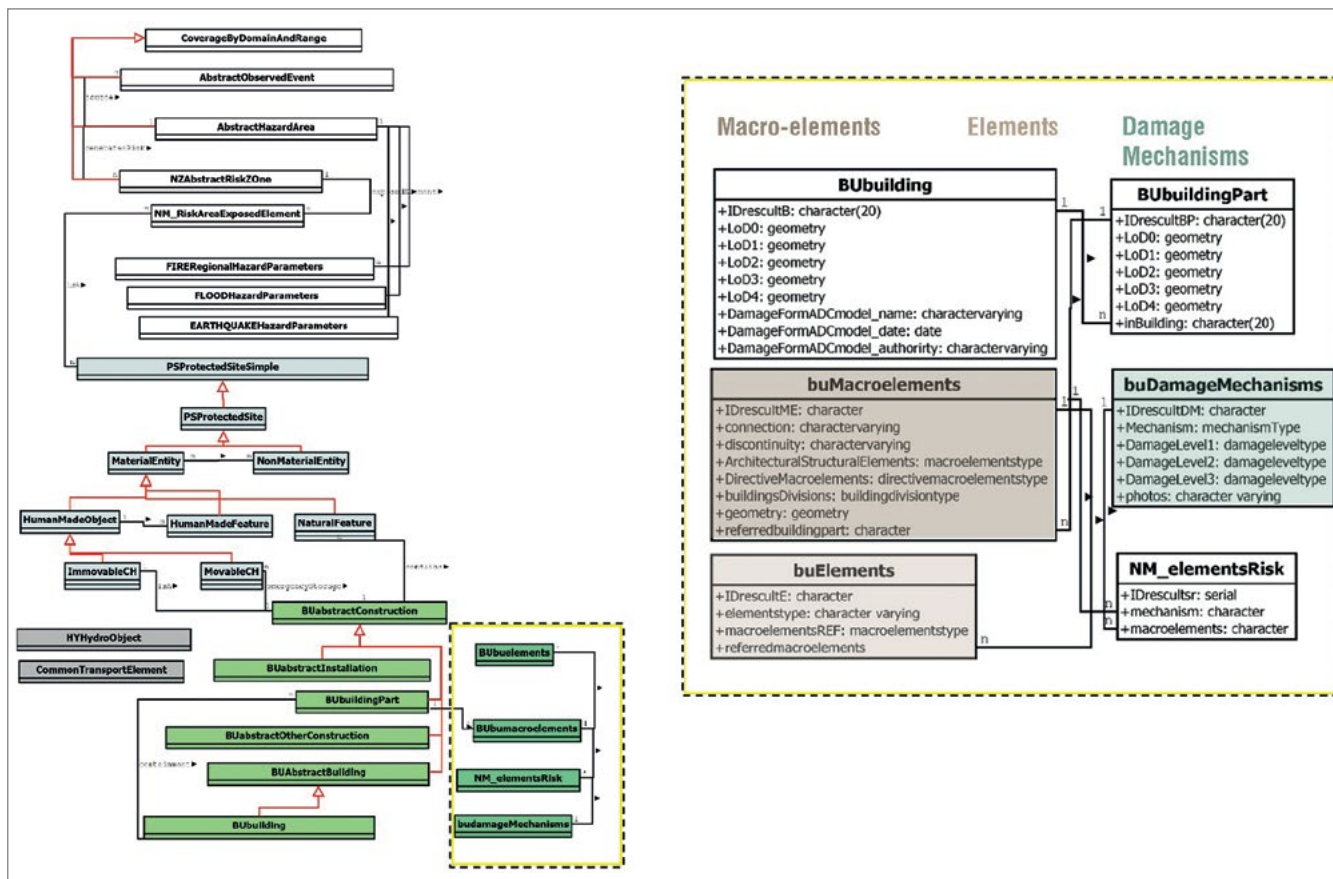


Figura 4. Estensione del modello concettuale ResCult.

Per attuare tale strategia, oltre ai contenuti della Direttiva si è fatto riferimento al “Modulo per la documentazione delle chiese”²¹ che integra le informazioni generali dell’edificio (A1-A13) e la classificazione dei 28 meccanismi di collasso delle chiese, ai quali vengono attribuiti 6 diversi *livelli di danno* (sezione A16), desunti dalle scale macrosismiche europee (EMS98)²² anche impiegate utilizzate nei metodi di indagine e rilievo di vulnerabilità per edifici ordinari (GNDT): 0-danno nullo; 1-danno lieve; 2-danno moderato; 3-danno grave; 4-danno molto grave; 5-crollo.

Lo studio qui proposto integra inoltre le modalità con le quali è possibile assegnare i valori di danno definiti dal Modello A-DC prevedendo diversi gradi di conoscenza, basati su accuratezza e dettaglio delle osservazioni, per la generazione delle entità geometriche degli elementi architettonici e strutturali da introdurre nel database.

Grazie al lavoro interdisciplinare condotto con il gruppo di ingegneria strutturale è stato possibile definire molteplici livelli in base alle rispettive analisi effettuate in-situ o in base alla disponibilità di modelli 3D *reality based*:

- il primo rappresenta il valore attribuito tramite l’osservazione diretta di un esperto durante un primo sopralluogo;
- il secondo, che offre un grado di conoscenza decisamente più significativo, consiste nell’integrare all’analisi visiva in sito, un’analisi del modello numerico 3D derivato da un rilievo metrico integrato;

- infine, il terzo è rappresentato dalle analisi condotte grazie alla modellazione strutturale che consente simulazioni numeriche, utilizzando come punto di partenza il modello 3D ottenuto dal rilievo metrico.

4. L’estensione del database e la classificazione delle entità geometriche

A partire dal modello concettuale del database ResCult (Figura 3) è stata pertanto sviluppata una nuova estensione: la prima integrazione ha interessato l’entità “Buildings” (in verde nella Figura 4), dal tema di INSPIRE. I modelli concettuale e logico sono stati implementati dapprima nello schema in linguaggio UML (Figura 5) e in seguito nella struttura del database del progetto ResCult.

Il database è stato quindi esteso tramite l’utilizzo del sistema di gestione dei database relazionali a oggetti (ORDBMS) *PostgreSQL*, con l’ausilio dell’interfaccia grafica *PgAdmin* e l’estensione spaziale *PostGIS*. Quest’ultima permette il popolamento degli oggetti geometrici del database in ambiente GIS (tramite il software Open Source *QuantumGIS* – *QGIS*).

Come precedentemente accennato, essendo i macro-elementi parte dell’edificio (*Buildings*), per la loro rappresentazione è stata considerata l’entità “BuildingPart” (parti di edificio) del Modello UML consolidato di INSPIRE. Nello standard INSPIRE, “BuildingPart” è compreso nel tema

“Buildings3D” dell’Annex III ed è identificato come «suddivisione di un edificio da considerare come parte di esso». Più in particolare, nella prima estensione dell’entità “Building”, sono stati aggiunti gli attributi (i campi) relativi al Modello A-DC per le chiese, quali *nome*, *data* e *autorità competente*, per identificare il protocollo e in modo da creare un nuovo campo in relazione all’entità “BuildingPart” (nella figura 4 la relazione tra i due oggetti è rappresentata come “1 a n” – uno a molti – a un edificio corrispondono infatti molteplici elementi). Successivamente è stata creata la tabella “Macroelements” in modo da definire un’entità geometrica specifica per le geometrie 3D della chiesa in reazione ai macro-elementi strutturali riconosciuti. L’oggetto “Macroelements” contiene tra gli attributi *connessioni* e *discontinuità* che rappresentano collegamenti e dis-unioni tra elementi strutturali ed elementi non strutturali, che possono influenzare e amplificare i meccanismi di danno. L’attributo *DirectiveMacroelements* rappresenta la classificazione mostrata nella Tabella 2. Gli altri campi, denominati elementi strutturali, *architectureStructuralElements* (*macroelements_type*) e composizione degli spazi dell’edificio, *buildingDivisions* (*building division type*), rappresentano la classificazione adottata secondo lo standard AAT Getty Vocabularies, al fine di rappresentare elementi e parti della chiesa come concepito negli aggiornamenti della direttiva (Figura 6, lato sinistro).

Lo standard AAT ha quindi consentito di identificare una definizione condivisa delle parti architettoniche: in questo modo i macro-elementi, già descritti secondo la DPCM e il Modulo A-DC, possono essere propriamente rappresentati, gestiti e diffusi senza incoerenze nella loro definizione. La Figura 5 rappresenta l’elenco dei codici (denominati *codelist enumeration* in PostgreSQL) per identificare le diverse tipologie di macro-elementi e spazi della fabbrica. In particolare, sono stati considerati i termini della categoria AAT “Componenti” selezionando due classificazioni sub-gerarchiche: la prima riguarda gli spazi degli edifici (ad esempio “navate”, “cappelle”, “transetto” e così via); la seconda è stata adottata per rappresentare gli elementi architettonici e strutturali degli edifici (ad esempio “muri”, “cupola”, “volte”, “colonne” e relative sottocategorie). L’uso del vocabolario Getty, conforme al CIDOC-CRM, rende possibile l’identificazione del singolo macro-elemento in relazione all’ambiente in cui è localizzato; questa scelta è stata adottata considerando le classificazioni descritte nella DPCM. Successivamente è stata inserita la tabella “Elements”, che rappresenta la segmentazione dei Macro-elementi in sotto parti, necessariamente collegata all’entità “Macroelements” che a sua volta è messa in relazione con l’oggetto “DamageMechanisms” (la relazione “molti-a-molti” è indicata con codice NM nella Figura 4).

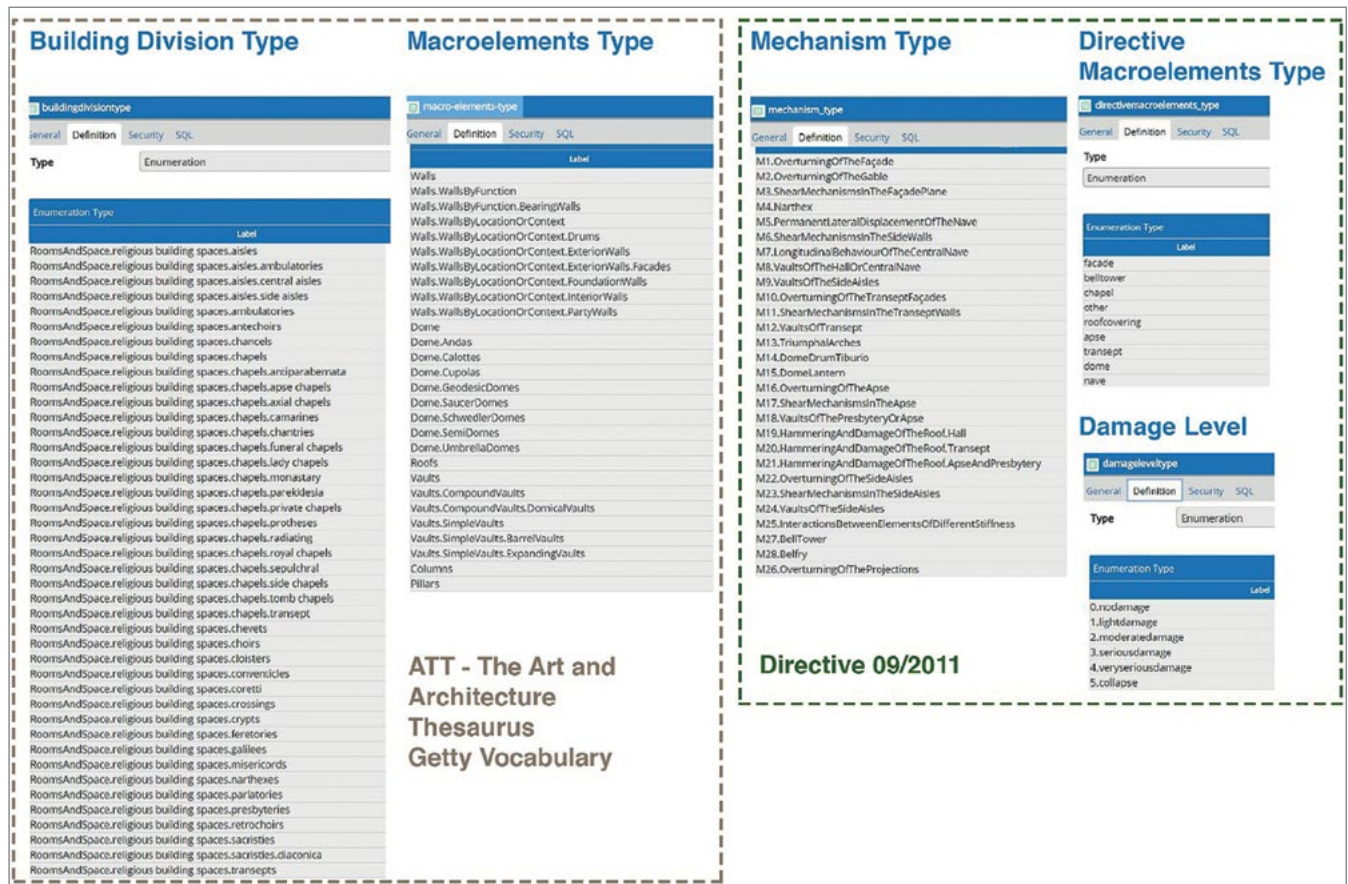


Figura 5. Codelist degli attributi “building division type”, “macroelements type” strutturati secondo lo standard ATT del Getty Vocabulary e “mechanism type”, “directive macroelements type” e “damage level” secondo la DPCM 9 febbraio 2011.

Tra gli attributi dei meccanismi di danno sono presenti il livello del danno (di cui la *code list* nella Figura 5) oltre al campo *photos* (foto) in modo da poter inserire le foto che documentano il danno.

Alla tabella “*DamageMechanisms*” appartiene anche l’attributo *mechanism* che identifica i 28 diversi meccanismi di danno definiti dalla DPCM.

5. Segmentazione del modello 3D per la definizione delle entità geometriche (macro-elementi): applicazione alla Basilica di San Nicola a Tolentino

Il caso test sul quale sperimentare l’implementazione del modello esteso del database sin qui descritto, è quello della Basilica di San Nicola a Tolentino, uno dei più importanti complessi religiosi e culturali del Centro Italia. Come descritto anche in altri contributi della presente raccolta, la città di Tolentino e la sua basilica sono state in parte danneggiate dal sisma che ha colpito il Centro Italia tra agosto e ottobre 2016, a seguito del quale il complesso religioso risulta a oggi chiuso al pubblico per motivi di sicurezza, per la valutazione dei danni e necessità di restauri e consolidamenti. Come descritto in altri contributi del presente volume, il rilievo 3D da tecniche integrate laser scanning e fotogrammetriche, insieme ai metodi topografici tradizionalmente impiegati per ottenere una copertura completa della documentazione 3D sia esterna che interna al complesso architettonico, ha garantito la possibilità di disporre di un’informazione metrica estesa e densa, georiferita, precisa e dettagliata. Parallelamente al monitoraggio strutturale dinamico²³ e alle valutazioni di stabilità della struttura, dal rilievo metrico del team DIRECT del 2017 si sono operate tre modellazioni condotte tramite strategie diverse: una prima che ha conservato la ricchezza informativa estremamente densa delle nuvole di punti originali per l’analisi delle deviazioni, dei fuori piombo, dei distacchi di murature²⁴, la seconda una modellazione strutturale²⁵ condotta con software specifici e orientata ad ottenere un modello di calcolo semplificato ma fedele al funzionamento strutturale degli elementi modellati, e in ultimo quella innescata per l’identificazione dei macro-elementi come oggetti indipendenti del database spaziale e per la conseguente visualizzazione e interrogazione in ambiente GIS come componente della cartografia numerica 3D.

Come facilmente intuibile, mentre il primo tipo di modellazione mira a conservare l’informazione estremamente densa acquisita, le seconde due tipologie mirano a una schematizzazione e semplificazione dei dati, finalizzata a mantenere un’elevata aderenza alla realtà rilevata, ma usando strutture di dati facilmente utilizzabili per scopi diversi e che possono ridurre drasticamente l’esuberanza informativa iniziale, anche in termini di pesantezza dei files.

La generazione e la visualizzazione di entità geometriche 3D, inserite all’interno di un database strutturato secondo un modello relazionale complesso, e la necessità di ottenerne

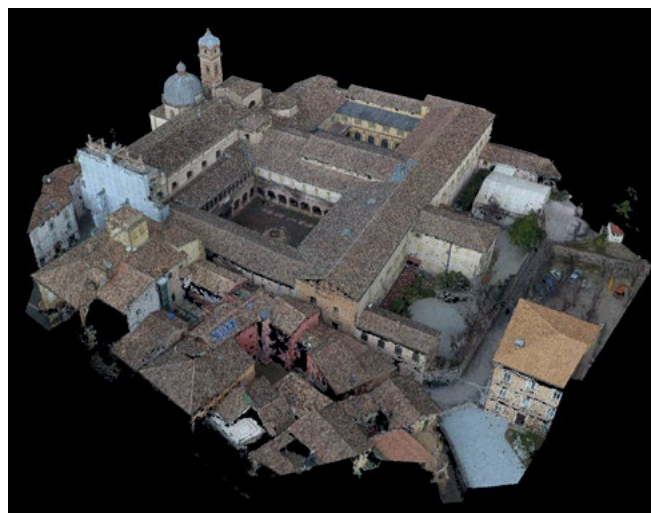


Figura 6. Vista della nuvola 3D complessiva, derivata da fotogrammetria UAV (Unmanned Aerial Vehicle).



Figura 7. Porzioni di modelli 3D (mesh e nuvola) interni alla chiesa, con identificazione a destra dei settori che presentano criticità elevate di stabilità (ribaltamento della facciata e distacco del corpo absidale dalla navata).

le informazioni attraverso alcune *query* (interrogazioni) comportano importanti problemi di interoperabilità tra gli strumenti disponibili nello scenario attuale. A questo proposito è stato necessario testare l’utilizzo di software e strumenti diversi al fine di garantire un’effettiva interoperabilità geometrica e semantica dei dati in diversi scenari e per scopi multidisciplinari.

A seguito della generazione della nuvola di punti densa dai dati acquisiti grazie al rilievo metrico sul campo sono state pertanto eseguite le consuete operazioni di filtraggio e ottimizzazione del modello.

Successivamente il modello 3D (costituito da poligoni 3D) è stato strutturato in Autocad (Autodesk) ed esportato in formato *.dxf* per la visualizzazione in ambiente GIS. Già durante questo primo passaggio sono stati riscontrati alcuni problemi di interoperabilità: non è stato infatti possibile visualizzare il modello 3D nella piattaforma GIS ArcScene (software commerciale di ESRI): erano infatti visibili i centroidi delle geometrie, ma non le forme geometriche stesse. Si è pertanto scelto di importare il file (esportato in formato *.igs* 3D (IGES) da Autocad) all’interno di 3DReshaper

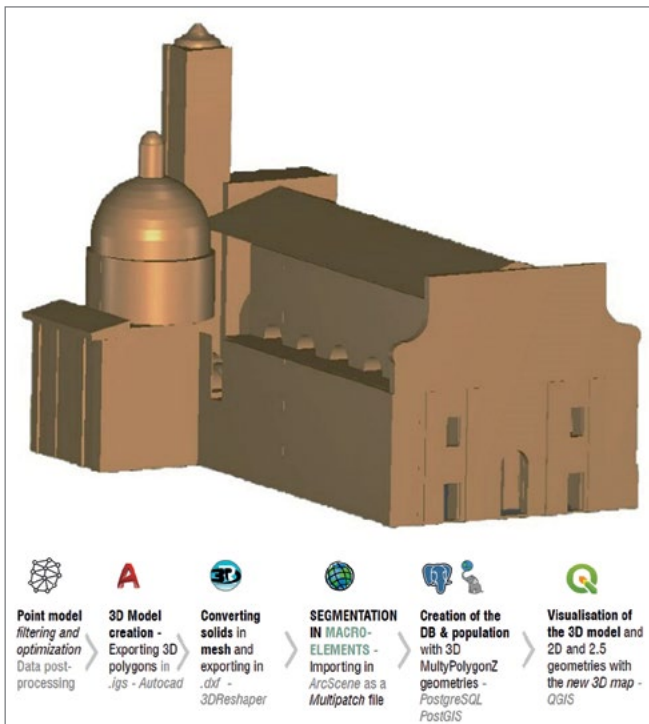


Figura 8. Modello mesh della chiesa esportato nel software 3DReshaper (terzo passaggio) e step di trasformazione e conversione del modello per l’inserimento in ambiente GIS.

(Technodigit) nel quale è stato possibile convertire la geometria da solido a *mesh* poligonale. Il modello è stato poi nuovamente esportato in formato *.dxf* e la *mesh* è stata inserita in ArcScene, in grado di riconoscere il modello come geometria *Multipatch* (rappresentata da punti, poligoni e polilinee).

Una volta visualizzate le geometrie, e a seguito della creazione del database, l’entità “*Macroelements*” è stata popolata in QGIS, importando il file *Multipatch* salvato da ArcScene. Per inserire le entità geometriche del modello 3D (in PostGIS) è stato necessario impostare il tipo di geometria (in PostgreSQL) come “geometria *MultyPolygonZ*”. Nella Figura 8 sono descritte le principali trasformazioni effettuate per ovviare ai problemi di interoperabilità geometrica dei dati.

Una volta chiarita la strategia opportuna, è stata innescata la segmentazione opportuna del modello in macro-elementi (Figura 9), e associare le informazioni necessarie e relative all’analisi dei danni a ciascuno di essi.

6. GIS 3D, visualizzazione e prospettive future

Per visualizzare e interrogare il modello geometrico, il database esteso e popolato è stato connesso in GIS e, grazie a una funzione specifica del software QGIS, è stato possibile riconoscere le relazioni tra i vari oggetti geometrici e non. Inoltre, per consentire le analisi multi-scala, è stata mantenuta nel database interoperabile la suddivisione in diversi Livelli di Dettaglio proposta da CityGML.

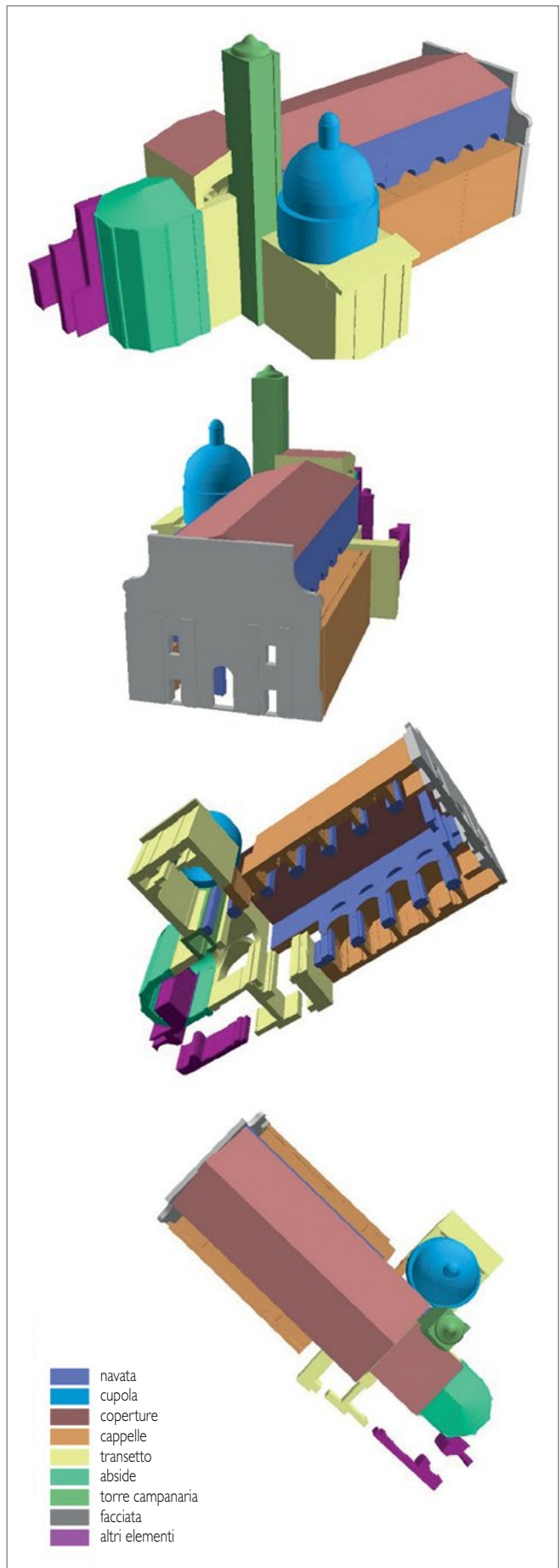


Figura 9. Segmentazione del modello in macro-elementi.

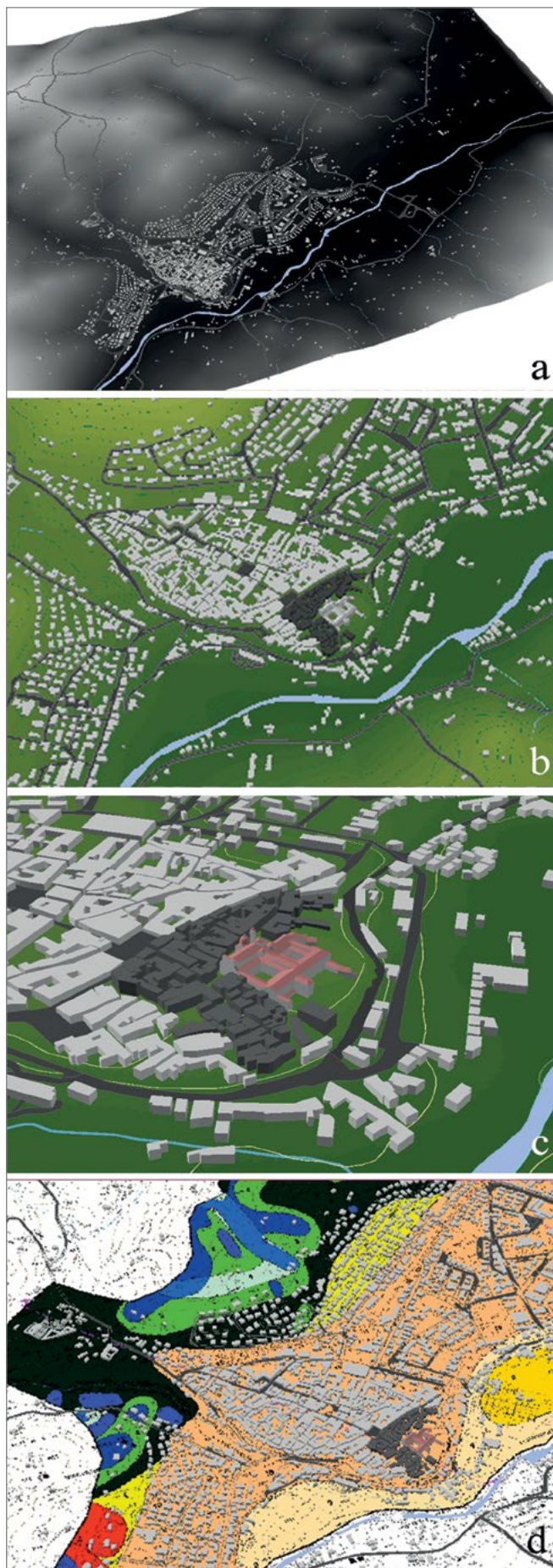


Figura 10. Visualizzazione dei diversi LoD all'interno del software GIS.

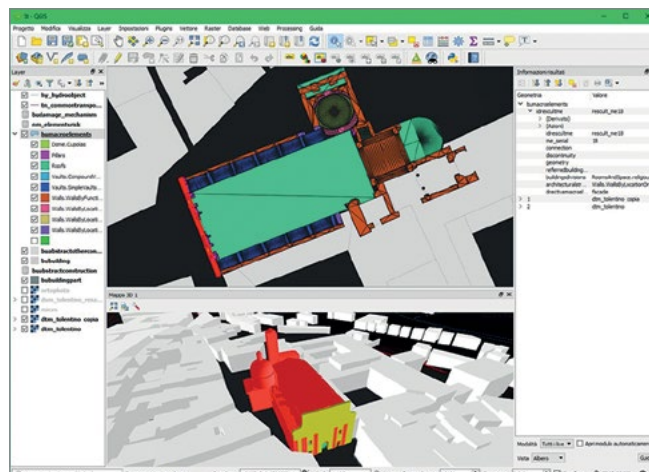


Figura 11. Visualizzazione 3D in QGIS, selezione e interrogazione dell'entità geometrica facciata all'interno della classe macro-elementi. Il macro-elemento "Facciata" è correlato al meccanismo "MI. Sovraccarico della facciata", a cui corrispondono tre livelli di danno. Per la Basilica di San Nicola è stato assegnato, mediante osservazione visiva post-sisma, un livello di danno grave. In seguito, grazie alle analisi strutturali condotte e al modello metrico 3D sul quale sono state basate, è stato conferito un livello di danno moderato.

Nel LoD 0 la mappa mostra la basilica all'interno del contesto urbano: in Figura 10a sono rappresentati il DTM (*Digital Terrain Model*), le strade, l'idrografia e gli edifici (in 2D), derivati dalla cartografia tecnica regionale (CTR scala 1:10000). Nel LoD 1 (Figura 10b) sono mostrati gli edifici della cartografia regionale e la Basilica di San Nicola e il suo contesto, in 2.5D; i dati derivano dal DSM (*Digital Surface Model*), elaborato dalle acquisizioni UAV della campagna di indagine metrica. Il LoD 2 rappresenta le geometrie 3D della chiesa con le coperture (Figura 10c) che derivano dalla nuvola di punti. Infine, grazie a un'apposita entità denominata "Coverage", che connette i beni ai rischi, è possibile visualizzare l'immagine *raster* della microzonazione sismica dell'area (Figura 10d).

Per la visualizzazione 3D del modello e dei macro-elementi è stata utilizzata la nuova funzionalità "Mappa 3D" di QGIS, che rende possibile definire lo stile e le proprietà della visualizzazione 3D, assegnando il DTM della Regione Marche come mappa di base. Inoltre, gli elementi possono essere interrogati attraverso la mappa 3D, visualizzando la selezione anche nella finestra 2D standard (Figura 11).

Grazie alle relazioni tra oggetti è anche possibile navigare le tabelle degli attributi acquisendo informazioni sui vari oggetti del database. In questo modo, si possono identificare, per ogni macro-elemento, uno o più meccanismi di danno ad esso associati, le connessioni, le discontinuità e i diversi livelli di danno.

Nella Figura 12 è riportata come esempio una interrogazione del database applicata all'oggetto "facciata". Infine, interrogando la tabella degli attributi "DamageMechanisms"

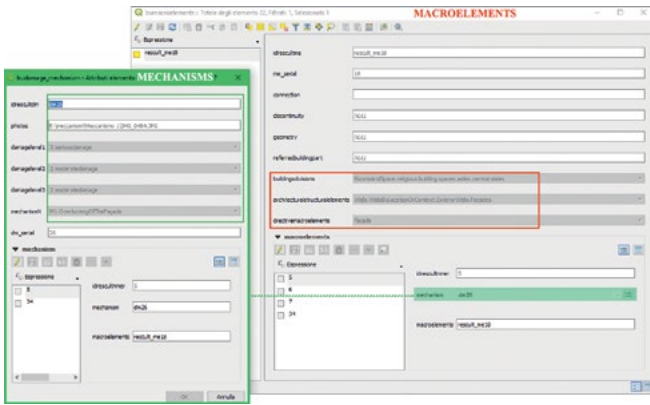


Figura 12. Tabella degli attributi della classe di oggetti "Macroelementi". Informazioni relative alla "Facciata" in relazione all'entità "Meccanismi di danno".

(usando il plugin del database Evis in QGIS) è possibile visualizzare le foto associate, che descrivono i danni relativi all'elemento selezionato (Figura13).

Conclusioni

Il metodo proposto consente di archiviare dati e informazioni all'interno di un database multi-scala e 3D, raggiungendo un elevato livello di dettaglio, considerata la partenza dalla scala territoriale e urbana. L'estensione del modello concettuale del database interoperabile del progetto ResCult rende inoltre possibile l'integrazione di dati a differenti scale e derivanti da diversi domini di conoscenza e campi applicativi diversi. La definizione a grande scala delle entità geometriche e l'accuratezza del modello permettono di supportare le analisi e archiviare le valutazioni del danno su edifici in murature storiche,

mentre la presenza di dati relativi al rischio e vulnerabilità garantisce la possibilità di interrogare il modello e acquisire informazioni utili durante le fasi di emergenza durante le quali una visione d'insieme a scala territoriale di informazioni inerenti il danno agli edifici è fondamentale. L'utilizzo di standard internazionali garantisce la fruizione e la condivisione dei dati e l'interoperabilità con altre mappe disponibili, che, in Europa, dovrebbero essere ormai diffusamente conformi allo standard INSPIRE.

Uno dei punti deboli dello studio riguarda i problemi di interoperabilità, semantica e geometrica: l'inserimento del modello 3D in ambiente GIS necessita infatti dell'utilizzo di diversi strumenti e software per gestire la nuvola di punti, la costruzione e segmentazione del modello 3D fino all'importazione del modello in GIS. A oggi l'importanza di sviluppare metodi per risolvere i problemi di interoperabilità è riconosciuta a livello internazionale. Per superare questi problemi, anche gli sviluppatori di software per l'informazione geografica (open source e commerciali) si stanno muovendo alla definizione di soluzioni innovative basate sulle esigenze attuali di uso della cartografia numerica in svariati campi applicativi.

Infine, la ricerca ha dimostrato, ancora una volta, le potenzialità di un lavoro interdisciplinare a supporto di strumenti e analisi volti al miglioramento delle infrastrutture di dati esistenti. Grazie a queste iniziative è possibile nel prossimo futuro supportare lo sviluppo di piani di prevenzione nei quali strumenti informativi più efficaci possono supportare meglio la prevenzione, la valorizzazione e la conservazione dei beni culturali, in casi di disastri naturali e antropici.

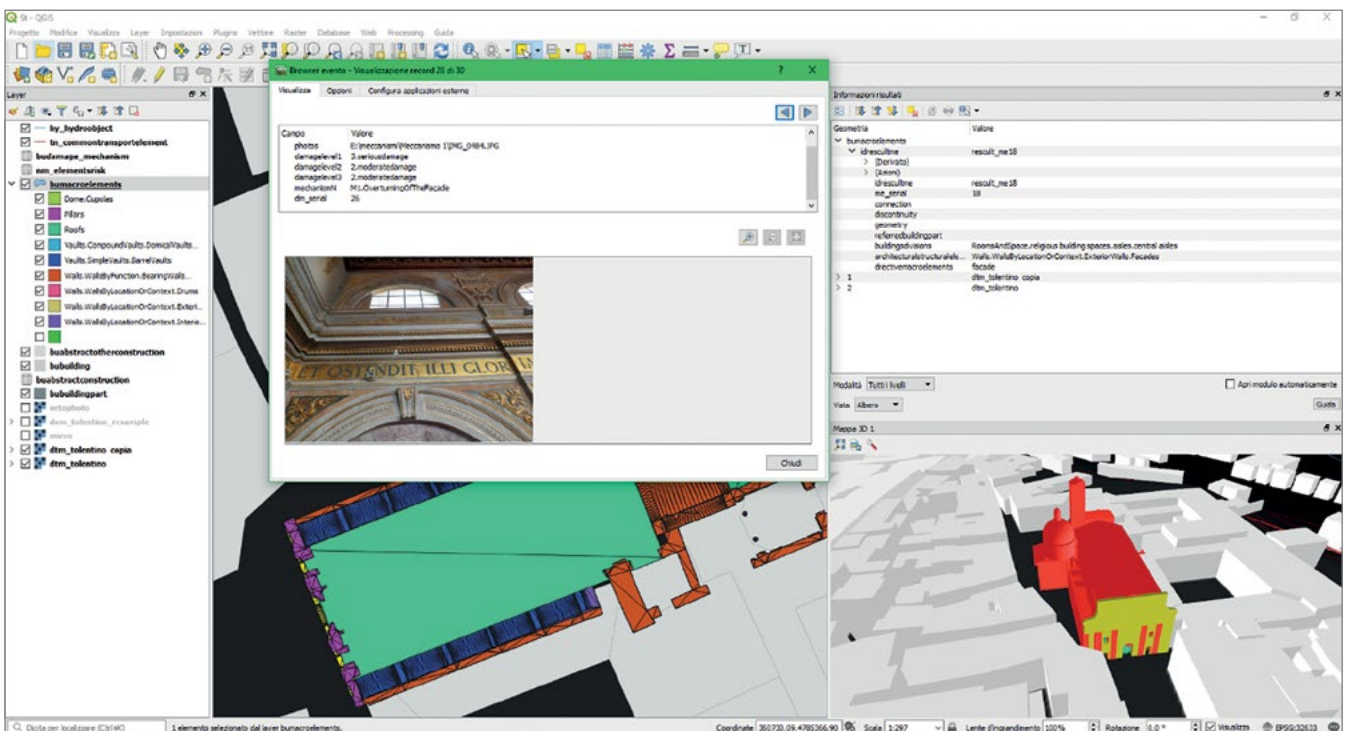


Figura 13. Immagine del danno in relazione alla facciata visualizzabile interrogando la geometria nel modello.

Note

¹ Il presente contributo consiste in una edizione rivista di: Elisabetta Colucci, Francesca Noardo, Francesca Matrone Antonia Spanò, Andrea Lingua, *High-Level-Of-Detail Semantic 3D GIS for Risk and Damage Representation of Architectural Heritage*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-4, 2018, pp. 107-114; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-107-2018.

² <https://www.rescult-project.eu>.

³ Unisdr 2017 - *Disaster-related Data for Sustainable Development. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. Global Summary Report, 2017, <https://www.unisdr.org/files/53080-entrybgpaperglobalsummaryreportdisa.pdf>.

⁴ Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011, *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008*. Pubblicata nella G.U. n. 47 del 26/02/2011, Suppl. ord. 54, 2011.

⁵ Simona Papa, Giacomo Di Pasquale, *Manuale per la compilazione della scheda per il rilievo del danno ai beni culturali, Chiese Model A-DC*, Presidenza del Consiglio dei Ministri -Dipartimento della Protezione Civile, 2013; <http://www.awn.it/component/attachments/download/1247> (dicembre 2019).

⁶ Martin Doerr, Christian-Emil Ore, Stephen Stead, *The CIDOC Conceptual Reference Model - A New Standard for Knowledge Sharing*, in *Tutorials, posters, panels and industrial contributions*, 26th International Conference on Conceptual Modeling, ACS, 83, 2007, pp. 51-56.

⁷ <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21127:ed-2:v1:en> (dicembre 2019).

⁸ <https://www.opengeospatial.org/standards/citygml> (dicembre 2019).

⁹ Definito nel 2007, lo standard ISPIRE nasce con l'obiettivo di essere adottato estensivamente entro il 2020: <http://inspire.ec.europa.eu/data-model/approved/r4618-ir/html/>.

¹⁰ Filiberto Chiabrando, Elisabetta Colucci, Andrea Lingua, Francesca Matrone, Francesca Noardo, Antonia Spanò, *A European Interoperable Database (Eid) to Increase Resilience of Cultural Heritage*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-3/W4, 2018, pp.151-158. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-151-2018.

¹¹ Filip Biljecki, Hugo Ledoux, Jantien Stoter, *An improved LOD specification for 3D building models. Computers*, in «Environment, and Urban Systems», 59, 2016, pp. 25-37. DOI: 10.1016/j.compenurbysys.2016.04.005.

¹² UNESCO, ICCROM, ICOMOS IUCN, *Managing Disaster Risks for World Heritage*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2010.

¹³ Regina Below, Angelica Wirtz, Debarati Guha-Sapir, *Disaster category classification and peril terminology for operational purpose: common accord*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) and Munich Reinsurance Company (Munich RE), Working paper n. 624, Brussel 2019. Si veda anche: Milos Drdácý, Luigia Binda, Ivo Herle, L. Giovanni Lanza, I. Maxwell, Stanislav Pospíšil, *Protecting the Cultural Heritage from Natural Disasters-Study*, European Parliament, Directorate-General for International Policies of the Union, Policy Department Structural and Cohesion Policies Culture and Education, Brussels, February 2007; [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2007/369029/IPOL-CULT_ET\(2007\)369029_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2007/369029/IPOL-CULT_ET(2007)369029_EN.pdf) (dicembre 2019) e: UNISDR, 2009, *Terminology on Disaster Risk*

Reduction. ISDR, International Strategy for disaster reduction. United Nations; <https://www.undrr.org/publication/2009-uni-sdr-terminology-disaster-risk-reduction> (dicembre 2019).

¹⁴ Per quanto riguarda l'estensione del modello INSPIRE nella direzione del patrimonio culturale si veda anche: Carlos Fernández-Freire, Isabel del-Bosque-González, Juan Manuel Vicent-García, Esther Pérez-Asensio, Alfonso Fraguas-Bravo, Antonio Uriarte-González, Pastor Fábrega-Álvarez, Cesar Parcero-Oubiña, *A Cultural Heritage Application Schema: Achieving Interoperability of Cultural Heritage Data in INSPIRE*, in «International Journal of Spatial Data Infrastructures Research», 8, 2013, pp. 74-97.

¹⁵ Riccardo Cacciotti, Jaroslav Valach, Petr Kuneš, M. Čerňanský, Miroslav Blaško, Petr Křemen, *Monument damage Information System (MONDIS), An Ontological Approach to Cultural Heritage Documentation*, in «Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W1, 2013, pp. 55-60; DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-55-2013.

¹⁶ NIKER (New Integrated Knowledge Based Approaches to the Protection of Cultural heritage from Earthquake-induced Risk), *Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements, and materials, Deliverable 3.1*, 2010; <http://www.niker.eu/assets/Files/Download/D3.1%20-%20Annex1%20-%20Damage%20Abacus.pdf> (dicembre 2019). Sergio Lagomarsino, Stefano Podestà, Giandomenico Cifani, Alberto Lemme, *The 31st October 2002 earthquake in Molise (Italy): a new methodology for the damage and seismic vulnerability survey of churches*, in 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.

¹⁷ Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011, *Valutazione e riduzione...* cit.

¹⁸ Antonino Giuffrè, *Sicurezza e conservazione dei centri storici in zona sismica. Il caso di Ortigia*, Laterza, Roma-Bari 1993. Integrated Research on Disaster Risk, *Peril Classification and Hazard Glossary (IRDR DATA Publication No. 1)*, Beijing 2014; http://www.ir-drinternational.org/wpcontent/uploads/2014/04/IRDR_DATA-Project-Report-No.-1.pdf (dicembre 2019).

¹⁹ Sergio Lagomarsino, Stefano Podestà, *Seismic Vulnerability of Ancient Churches: I. Damage Assessment and Emergency Planning*, in «Earthquake Spectra», 20, 2, 2004, pp. 377-394. Sergio Lagomarsino, Stefano Podestà, *Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis*, 2004.

²⁰ Si tratta del modello 3D derivato dalle tecniche fotogrammetriche e laser scanning presentato nei contributi alle pp. 102 e 206 del presente volume.

²¹ Simona Papa, Giacomo Di Pasquale, *Manuale...* cit.

²² EMS89, Gottfried Grünthal, *European Macroseismic Scale 1998*, European Seismological Commission (ESC), 1998.

²³ Donato Sabia, Takayoshi Aoki, Daniele Costanzo, Renato Lancellotta, Antonino Quattrone, *Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino*, in atti della conferenza ANIDIS 2017.

²⁴ Per citare il solo caso della chiesa di Tolentino, le applicazioni di questa tipologia di modellazione sono quelle presentate nei contributi "Nuvole di punti, rappresentazione architettonica e analisi dei modelli 3D ottimizzati [...]", cfr p. 206, oppure "Tecniche di acquisizioni fotogrammetriche [...]" cfr p. 212.

²⁵ Adriana Pascale, *Analisi sismica della basilica di San Nicola a Tolentino*, laurea magistrale in Ingegneria civile, Politecnico di Torino, relatori Donato Sabia, Antonia Spanò, dicembre 2017. Cfr. in questo volume il contributo a p. 102.