

## GLI SPAZI APERTI NELL'AMBIENTE COSTRUITO.

STRUMENTI DIGITALI INTEGRATI
PER LA DESCRIZIONE DEL RISCHIO SISMICO.

PhD Candidate: Marco Angelosanti

Advisor: Prof. Ing. Edoardo Currà Co-Advisor: Dr. Alessandro Sabato

# OPEN SPACES IN BUILT ENVIRONMENT.

INTEGRATED DIGITAL TOOLS FOR SEISMIC RISK DESCRIPTION.

Sapienza Università degli Studi di Roma Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale DICEA

Dottorato di ricerca in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica Curriculum A (Edile-Architettura)

XXXIV Ciclo

### **INDICE**

A.	BSTRAC	Т	7
R]	ESEARC	H QUESTIONS E STRUTTURA DELLA TESI	11
1.	AMBI	IENTE COSTRUITO E DISASTRI	19
	1.1.	Disastri ad insorgenza improvvisa che affliggono l'ambiente costruito	27
	1.1.1.	Definizioni e origine del concetto di disastro	27
	1.1.2.	Classificazioni dei disastri	31
	1.1.3.	Imparare dai disastri ad insorgenza improvvisa passati	36
	1.2.	Ambiente costruito soggetto a disastri ad insorgenza improvvisa	39
	1.2.1.	Approccio morfologico per l'analisi dell'ambiente costruito	39
	1.2.2.	Spazi aperti nell'ambiente costruito	45
	1.2.3.	Definizione di Sistemi Morfologici degli Spazi Aperti nell'ambiente cos	
	1.2.4.	Classificazione preliminare Risk-Related dei Sistemi Morfologici degli Aperti nell'Ambiente Costruito	i Spazi
	1.2.5.	Ulteriori aspetti di caratterizzazione Risk-Related dei Sistemi Morfo degli Spazi Aperti nell'Ambiente Costruito	
	1.3.	CONCLUSIONI	67
2.		TEGIE DI DEFINIZIONE DEL RISCHIO SISMICO DEGLI S	
	2.1.	Gli spazi aperti come centro ontologico nell'analisi del rischio sismico	77
	2.1.1.	Dagli edifici agli spazi aperti	77
	2.1.2.	Struttura del capitolo	81
	2.2.	Processo di review sistematica	82
	2.3.	Risultati della review di letteratura	87
	2.4.	Classificazione dei parametri che influenzano il rischio sismico negli spazi	
	2.5.	CONCLUSIONI	117

STRUMENTI DIGITALI PER LA DEFINIZIONE DEL RISCHIO SISMIC DEGLI SPAZI APERTI NELL'AMBIENTE COSTRUITO1	
Introduzione12	3.1.
3.1.1. Gestione dei dati del rischio sismico degli Spazi Aperti nell'Ambien Costruito	3.1.1.
3.1.2. Struttura del capitolo	3.1.2.
Valutazione GIS-based dei caratteri di rischio sismico degli Spazi Aperti13	3.2.
3.2.1. Informazioni geografiche governative e volontarie come fonte di dati13	3.2.1.
3.2.2. Analisi Geospaziali14	3.2.2.
3.2.3. Definizione metodologica del layer GIS degli Spazi Aperti e delle frontie degli Spazi Aperti14	3.2.3.
3.2.4. Definizione metodologica dei parametri risk-related associati al lay AS_ITALY1	3.2.4.
3.2.5. AS_ITALY e AS_FRONTIERS_ITALY come database GIS degli Spa	3.2.5.
3.2.6. Potenzialità e limiti dell'applicazione metodologica1	3.2.6.
Valutazione BIM-based dei caratteri di rischio sismico degli Spazi Aperti1	3.3.
3.3.1. Potenzialità del BIM come data repository per l'ambiente costruito: cirilievo integrato all'HBIM costruttivo	3.3.1.
3.3.2. Indici consolidati per la descrizione dei modelli BIM18	3.3.2.
3.3.3. Modelli BIM interscalari per gli Spazi Aperti18	3.3.3.
3.3.4. Definizione metodologica del Level of Information Need per gli Spa Aperti18	3.3.4.
3.3.5. Definizione metodologica delle strategie di modellazione e implementazione parametrica degli Spazi Aperti in BIM	3.3.5.
3.3.6. Definizione metodologica delle strategie di reality capture del caso studio Piazza dei Priori a Narni	3.3.6.
3.3.7. Analisi del caso studio di Piazza dei Priori a Narni	3.3.7.
3.3.8. Riflessioni sull'applicazione del BIM come data repository per gli Spa Aperti2	3.3.8.
CONCLUSIONI2	3.4.

4.		MENTI INNOVATIVI PER UN BIM-BASED SHM DEGLI S TI NELL'AMBIENTE COSTRUITO	
	4.1.	Introduzione	233
	4.1.1.	Verso il superamento degli strumenti consolidati	233
	4.1.2.	Focus della ricerca e struttura del capitolo	235
	4.2.	Tecniche ottiche per il monitoraggio della salute strutturale	237
	4.2.1.	Tecniche ottiche di cattura del movimento	237
	4.2.2.	Algoritmi e applicazioni di Motion Magnification	239
	4.3.	Il BIM per il monitoraggio della salute strutturale	245
	4.4.	Innovazione dalla ricucitura dei research gap	247
	4.5.	METODOLOGIA	249
	4.5.1.	Descrizione del setup di laboratorio per l'approccio High Level	250
	4.5.2.	Descrizione del setup in situ per l'approccio Low Level	256
	4.5.3.	Analisi ottica con il Moto Magnificato	258
	4.5.4.	Approccio High Level per il monitoraggio della salute strutturale in E	
	4.5.5.	Approccio Low Level per il monitoraggio della salute strutturale in B	
	4.6.	RISULTATI	267
	4.6.1.	Applicazione dell'approccio High Level per il monitoraggio della strutturale di un setup di laboratorio	
	4.6.2.	Applicazione dell'approccio Low Level per il monitoraggio della strutturale della frontiera di uno Spazio Aperto	
	4.7.	DISCUSSIONE	277
	4.7.1.	Integrazione del MM e della 3D-DIC nel monitoraggio della strutturale	
	4.7.2.	Potenziale di approcci BIM-based per il monitoraggio della salute stru	
	4.8.	CONCLUSIONI	283
5.	BIBL	IOGRAFIA	287
6.	PUBE	BLICAZIONI E ATTIVITA' DI RICERCA	313
P	UBBLICA	AZIONI DURANTE IL DOTTORATO	315
A	TTIVITA	' DI RICERCA	319
7.	ACRO	ONIMI E INDICE ANALITICO	323

#### **ABSTRACT**

Open Spaces (OSs) in the Built Environment (BE) are key places in disaster risk management, especially in SUddenly-Onset Disasters (SUOD) such as earthquakes. The research presents how the seismic risk of the OSs is related to intrinsic aspects, concerning the OSs elements that could be subject to the direct effects of disasters, and extrinsic aspects, related to the elements on the OS frontier (e.g., buildings) that could cause indirect effects on the OSs and the interconnected network they define. Therefore, specific parameters are identified and classified in 5 macro-categories (i.e., morphological, physical-spatial, construction, use and contextual aspects) that address the main seismic risk factors of the OSs: Hazard (H), Vulnerability (V) and Exposure (E). In this context, the management of BE data and risk parameters passes through their translation into open digital databases. The Geographic Information System (GIS) and the Building Information Model (BIM) are recognized as consolidated solutions for the digitization of BE and allow to investigate certain aspects at different scales, from territorial to construction. However, in the literature there are still few researches that consider the specificities of the digitization of the OSs system. Moreover, adequate considerations must be made to solve the problem of integration of GIS and BIM environment at the mesoscale that characterizes the OSs. The thesis shows the result of OpenStreetMap (OSM) and other National Spatial Data Infrastructures (NSDIs) extraction of the AS\_ITALY and AS\_FRONTIERS\_ITALY layers, which digitize the concept of OS content and frontier and host additional geometric and informational content, Moreover, a modeling strategy of OSs in BIM from point clouds generated from an integrated photogrammetric and Terrestrial Laser

#### **ABSTRACT**

**KEYWORDS** 

Seismic Risk | Open Space | Built Environment | BIM | GIS | Motion Magnification | Digital Image Correlation | Structural Health Monitoring

Gli spazi aperti (Open Spaces, OSs) nell'ambiente costruito (Built Environment, BE) sono luoghi chiave nella gestione del rischio di disastri, in particolare di quelli ad insorgenza improvvisa (SUddenly-Onset Disaster, SUOD) come il terremoto. Nella ricerca viene presentato come il rischio sismico degli OSs sia legato ad aspetti intrinseci, relativi agli elementi degli OSs che potrebbero essere soggetti agli effetti diretti dei disastri, ed estrinseci, relativi agli elementi sulla frontiera degli OS (e.g., gli edifici) che potrebbero causare effetti indiretti sugli OSs e sulla rete interconnessa che definiscono. Vengono quindi identificati specifici parametri classificati in 5 macro-categorie (i.e., aspetti morfologici, fisicospaziali, costruttivi, di uso e di contesto) che condizionano i principali fattori di rischio sismico degli OSs: Pericolosità (Hazard, H), Vulnerabilità (Vulnerability, V) e Esposizione (Exposure, E). In questo contesto, la gestione dei dati riguardanti il BE e dei parametri di rischio passa per la loro traduzione in database digitali aperti. Il Geographic Information System (GIS) e il Building Information Model (BIM) sono riconosciuti come soluzioni consolidate per la digitalizzazione del BE e permettono di approfondirne determinati aspetti a diverse scale, dalla territoriale alla costruttiva. Ad ogni modo, in letteratura sono ancora poche le ricerche che considerano le specificità della digitalizzazione del sistema degli OSs. Inoltre, adeguate considerazioni devono essere fatte per risolvere il problema di integrazione di ambiente GIS e BIM alla mesoscala che contraddistingue gli OSs. Nella tesi viene mostrato il risultato dell'estrazione da OpenStreet-Map (OSM) e da altre infrastrutture di dati spaziali (Spatial Data Infrastructures, SDIs) dei layer AS\_ITALY e AS\_FRONTIERS\_ITALY, che digitalizzano il concetto di contenuto e di frontiera dell'OS e ospitano al loro interno contenuti

Scanner (TLS) surveys is presented. Thus, the hierarchy of BIM models into High Level (HL) and Low Level (LL) families optimizes the process of geometric and informational digitization of the OS content and frontier, on the one hand, and of the other components that characterize them, on the other hand. In this context, a Level of Information Need is defined for the OSs system to integrate GIS and BIM modeling environments, implementing five significant steps. The results of the methodological application to the case study of Piazza dei Priori in Narni are then presented to highlight limits and potential. Consequently, the work is configured as an update in digital key of the research on seismic risk of the OSs, structuring processes of open and interoperable digitization in which the informative and parametric parts play a fundamental role. In this context, Structural Health Monitoring (SHM) of BE components can also provide an important contribution to the comprehension of seismic risk of OSs, and BIM can serve as a robust repository and information management tool to store and exchange long sequences of SHM data. Over the years, 3D Digital Image Correlation (3D-DIC) has gained popularity as a high-resolution, full-field, non-invasive optical technique for SHM. However, 3D-DIC is still impractical when correlating the natural frequencies and mode shape of a structure. Recently, the use of Motion Magnification (MM) in the field of optical analysis has been explored, particularly as a pre-processing tool for 3D-DIC, to filter and magnify even the smallest motions of a structure or its parts. However, the need for reasoning about the definition of a more systematic and simpler workflow for multi-scale applications of these techniques on the BE arises. In addition, the large amount of raw output from MM and 3D-DIC requires appropriate tools to store, visualize, and analyze the data. This research proposes two approaches for SHM data management in BIM. On the one hand, the High Level (HL) approach proposes the point cloud implementation of 3D-DIC and MM combination in BIM. In fact, a new Cloud to Model (C2M) tool is developed that translates the Scalar Fields (SFs) of the point cloud directly into analysis layers on the faces of BIM model instances in order to make the modifications of Operational Deflection Shapes (ODS) computable and quantify structural changes. On the other hand, the Low Level (LL) approach focuses on extending the methodology to OSs, evaluating part of the Piazza dei Priori frontier in Narni, proposing the BIM implementation of virtual sensors with data obtained from MM and edge detection, to compute displacements in specific frequency bands and monitor structural changes with periodic measurements.

geometrici ed informativi aggiuntivi. Inoltre, viene presentata una strategia di modellazione degli OSs in BIM a partire da nuvole di punti di rilievi integrati fotogrammetrici e da Laser scanner terrestre (Terrestrial Laser Scanner, TLS). Quindi, la gerarchizzazione dei modelli BIM in famiglie di alto (High Level, HL) e basso livello (Low Level, LL) ottimizza il processo di digitalizzazione geometrica e informativa del contenuto e della frontiera dell'OS, da un lato, e degli altri componenti che li caratterizzano, dall'altro. In questo contesto, viene definito un livello di fabbisogno informativo (Level of Information Need) per il sistema degli OSs, che permetta di integrare ambienti di modellazione GIS e BIM, implementando cinque step significativi. Vengono quindi presentati i risultati dell'applicazione della metodologia al caso studio di Piazza dei Priori a Narni, che ne evidenzia limiti e potenzialità. Di conseguenza, il lavoro si configura come aggiornamento e continuazione in chiave digitale delle ricerche sul rischio sismico degli OSs, strutturando processi di digitalizzazione aperti, interoperabili, in cui la parte informativa e parametrica assume un ruolo fondamentale. In questo contesto, anche il monitoraggio della salute strutturale (Structural Health Monitoring, SHM) dei componenti del BE può fornire un contributo importante per la comprensione del rischio sismico degli OSs, ed il BIM si offre come un robusto repository e strumento di gestione informativa per archiviare e scambiare lunghe sequenze di dati SHM. Nel corso degli anni, la 3D Digital Image Correlation (3D-DIC) ha guadagnato popolarità come tecnica ottica per lo SHM ad alta risoluzione, a pieno campo e non invasiva. Tuttavia, la 3D-DIC è ancora poco pratica quando si devono correlare le frequenze naturali e la forma dei modi di una struttura. Recentemente, è stato esplorato l'utilizzo del moto magnificato (Motion Magnification, MM) nel campo delle analisi ottiche, in particolare come strumento di preelaborazione per la 3D-DIC, per filtrare e magnificare anche i minimi movimenti di una struttura o di sue parti. Tuttavia, emerge la necessità di maggiori ragionamenti riguardo la definizione di un flusso di lavoro, sistematico e semplice, per applicazioni interscalari di queste tecniche sul BE. Inoltre, la grande quantità di output grezzi provenienti dal MM e dalla 3D-DIC richiede strumenti appropriati per archiviare, visualizzare e analizzare i dati. Questa ricerca propone due approcci alla gestione dei dati SHM in BIM. Da un lato, l'approccio High Level (HL) propone l'implementazione in BIM della nuvola di punti della combinazione di 3D-DIC e MM. Viene, infatti, sviluppato un nuovo strumento Cloud to Model (C2M) che traduce i campi scalari (Scalar Fields, SFs) della nuvola di punti direttamente in laver di analisi sulle facce delle istanze del modello BIM in modo da rendere calcolabile l'evoluzione delle forme di deflessione operativa (Operational Deflection Shapes, ODS) e quantificare i cambiamenti strutturali. Dall'altro lato, l'approccio Low Level (LL) si concentra sull'estensione della metodologia agli OSs, valutando parte della frontiera di Piazza dei Priori a Narni, proponendo l'implementazione in BIM di sensori virtuali con dati ottenuti da MM ed edge detection, per calcolare spostamenti in bande di frequenza specifiche e monitorare i cambiamenti strutturali con misurazioni periodiche.

