Cultural heritage management: optimising procedures and maintenance costs

Giovanna Acampa*,
Claudia Mariaserena Parisi**

keywords: cultural heritage, maintenance management, opportunity maintenance, BCA, BIM, cost optimisation

Abstract

The management of maintenance activities is an ongoing concern for facility managers in the existing building sector due to its complexity and uncertainty. This applies all the more to cultural heritage as protection, preservation and enhancement are a priority in order to keep the artistic and cultural value of historical assets for future generations. In addition, problems related to the increasingly limited economic resources complicate maintenance management processes. Therefore, it has become a common standard to carry them out only when actual emergencies occur, thus causing inefficiencies in the planning of Facility Management and an increase in maintenance costs. This paper shows a method to support the management decision-making in maintenance activities through Building Condition Assessment (BCA) processes integrated with Building Information Modeling (BIM) systems. The main objective is to develop a maintenance management strategy and support technicians in identifying priorities in a practical, simple

and automated way in order to optimise procedures and costs. To achieve such a goal, the method proposes a BCA process that uses the following tools: 1) building breakdown structure according to UNI 8290 adapted to historic buildings; 2) a degradation level index and a technological and operational connection matrix to assess opportunity maintenance; 3) field inspections and data collection on Excel spreadsheets acting as external Database; 4) data management in BIM environment using Revit as BIM Authoring Software and Dynamo scripts as visual programming language (VPL) to link external Database to BIM model. The results highlight the important role of BIM in Facility Management of existing buildings and buildings of historical and cultural value by allowing the continuous update of information in a single model for BCA purposes and shows a great potential to support facility managers in managing building maintenance activities and optimising costs.

1. INTRODUCTION

"The well-being of a society is reflected in its way of inhabiting the territory and taking care of its cultural heritage" (ISTAT, 2021). In the Encyclical Laudato si', Pope Francis defined historical, artistic and cultural heritage as "part of the shared identity of every place and the

foundation on which to build a habitable city" (Ch. IV, Integral Ecology; point 143) (2015). He added that a sense of social value "drives us to devise wider strategies to stop environmental degradation and to encourage a "culture of care" that permeates all of society" (Chapter VI, Ecological Education and Spirituality; para 231) (2015).

The discipline of estimation and valuation has always

been close to the subject of cultural heritage, embracing the topic from both an economic and a social point of view. The first analysis of this subject was carried out by Carlo Forte (1977), who enlarged the concept of economic value of cultural heritage dealing also with its social use value (Forte, 1977). Thus the topic has to do with culture, economics and social value simultaneously (Forte, 2018).

In Italy for historical reasons, these aspects take on special relevance, given that the protection of the landscape and of the historical and artistic heritage is even mentioned as a fundamental principle in Article 9 of the Italian Constitution¹.

Despite the awareness of the extraordinary richness of Italy's cultural heritage², its importance for country's social identity and its unique role in bearing witness of historical events for future generations, Italian public investment in cultural heritage management is among the lowest in Europe (Paesaggio e patrimonio culturale - ISTAT, 2021). An analysis of State budget data for³ "protection and enhancement of cultural heritage and landscape activities" showed a decrease in public investment in this sector of over 40% (Fig. 1). This constraint becomes a major issue for those involved in the management and maintenance of state- and privately-owned cultural assets.

Figure 1 - Funding from the Ministry of Cultural Heritage and Activities and Tourism (2010-2020) (Acampa and Parisi, 2021).

¹ Art. 9 of the Italian Constitution "The Republic promotes development and scientific and technical research. It protects the landscape and the historical and artistic heritage of the Nation".

² Italy has the largest number of cultural assets on its territory with 55 sites registered in the UNESCO list. This cultural heritage is managed by the Ministry of Culture (formerly MiBACT), which has been exercising the function of protection, management and enhancement of cultural and environmental heritage since 1998 and applies a planning principle (art. 1, paragraph 1, Legislative Decree no. 368 of 20 October 1998). This principle has been confirmed in the Code of Cultural Heritage and Landscape (Legislative Decree no. 42/2004) with the term of planned conservation, which ensures that the conservation of cultural heritage takes place through study, prevention, maintenance and restoration activities.

³ The Accounting and Public Finance Act No 196 of 31 December 2009 identifies three levels of aggregation (missions,

The conservation of cultural heritage is a source of concern for facility managers who, in a situation of economic crisis where economic resources are increasingly limited, have to decide which maintenance actions are a priority and which can be postponed. Emergency maintenance has become a common standard that causes inefficiencies in facility management planning and consequently an increase in maintenance costs.

Therefore, it is necessary to support managers in the protection and conservation of cultural heritage by optimising maintenance procedures and costs and by favouring preventive methods, as suggested in the "Cultural Heritage and Landscape Code" (Legislative Decree 42/2004). The aim of preventive maintenance⁴ is in fact to prevent the deterioration of buildings with simple actions, continuous over time, with low cost and high preventive effectiveness that would allow a more fruitful use of resources on a wider asset base (Totaro and Gasparoli, 2014).

The Public Procurement Code (Legislative Decree 50/2016) talks about maintenance plans⁵ to be drawn up during the execution phase (art. 147, c. 3) and to "take care of the constant verification of the validity of the maintenance programme, user manuals and maintenance manuals, modifying and updating their contents upon completion of the works" (art. 101, c. 3, point b). At the same time, Article 23 paragraph 13, adopting the European Directive on Public Procurement (2014/24/EU), brings a significant innovation in the field of construction by suggesting the use of specific electronic methods and tools using interoperable platforms that allow the involvement of specific skills among designers.

Therefore, taking into account the increasing demand for recovery and conservation of existing buildings and the

programmes and actions) in the State budget in order to allow a better understanding of allocation choices. Missions are "the main functions and strategic spending objectives", to which several administrations may contribute. In other words, missions represent the main objectives pursued through public spending. The State Budget Law for 2019-2021 set 34 missions. Mission 21 concerns "protection and enhancement of cultural heritage and landscape activities".

⁴ The UNI 9910 standards provide the following definition for preventive maintenance: maintenance carried out at predetermined intervals or in accordance with prescribed criteria and aimed at reducing the probability of failure or degradation of the operation of an entity.

⁵ Merloni Law (L. 109/94) and the subsequent Implementation Regulation (D.P.R. 554/99) spoke for the first time of Maintenance Plans as "the complementary document to the executive project that foresees, plans and schedules, taking into account the executive project drawings actually carried out, the maintenance activity of the intervention in order to maintain its functionality, quality characteristics, efficiency and economic value over time", which "assumes differentiated content in relation to the importance and specificity of the intervention" (Nicollella, 2003).

need to adapt within a few years methods, processes and electronic design tools to the new directives (DM 560/2017)⁶, designers/assessors can no longer ignore the use of *Building Information Modeling (BIM)* systems.

1.1 The goal

Existing heritage buildings are constantly threatened by natural and anthropogenic deterioration throughout their life cycle (Che Ani et al., 2015). Although every building has a time-limited useful life, this is not the case for heritage buildings. Managers have to face several challenges to preserve the cultural heritage physically and functionally as long as possible in order to conserve and enhance the historical evidence for future generations. Unfortunately, increasingly limited budgets do not help in this mission.

The main objective of the paper is to show a method to optimise the procedures and costs of cultural heritage maintenance through a BIM-based decision support system. In particular, the method proposes a *Building Condition Assessment (BCA)* process applied to Facility Management of cultural heritage buildings in a BIM environment. This is achieved through the definition of some specific objectives:

- Definition of the most suitable *tools* to integrate BCA processes in a BIM environment.
- Definition of operational *procedures* to improve collaboration and interoperability between the different stakeholders involved in maintenance processes according to BIM methodologies.
- Definition of a method that takes into account the technical-economic-organisational aspects through the implementation of a *Maintenance Workflow Management*.

The method was applied to the Brunelleschi's Cloister in order to respond to the needs of the managers of the Opera Santa Croce, who were looking for a decision support system using new technologies to optimise management of maintenance procedures and costs of their cultural heritage buildings⁷.

⁶ Ministerial Decree n. 560 of 01 December 2017 "BIM Decree".

⁷ PhD thesis in "Civil Infrastructures for the Territory" (Cycle XXXIII) at the University of Enna "Kore", (Cycle XXXIII) at the University of Enna "Kore"; Author: PhD Ing. Claudia Mariaserena Parisi, Tutor: Prof.ssa Arch. Giovanna Acampa, Co-Tutor: Prof. Ing. Maurizio Nicoletta; SSD: ICAR/22; Dissertation title: "BIM-based support system for the optimization of maintenance costs of cultural heritage: the case of the Brunelleschi's Cloister in Santa Croce, Florence (Italy), A.Y. 2019-2020.

⁸ WARMEST (LoW Altitude Remote sensing for the Monitoring of the state of cultural hEritage Sites: building an inTegrated model for maintenance). This is a Horizon 2020 Marie Curie Research and Innovation Staff Mobility Project (H2020- Marie Skłodowska-Curie Actions-RISE-2017) that started in December 2017. Its aim

The site is being investigated within an EU-funded project (WARMEST)⁸ along with two other sites: the Patio de Los Leones (Patronato de la Alhambra y Generalife, Granada, Spain) and the underwater archaeological site of Marzamemi (Museo subacqueo Marzamemi, Sicily, Italy).

2. STATE OF THE ART

In the literature, several studies address the issue of maintenance, restoration and reuse of historic buildings. Many researchers use multicriteria analysis techniques to support managers in their decision-making choices according to different criteria and alternatives (Ferretti et al., 2014; Oppio et al., 2015; Acampa and Grasso, 2020). Other simplify the procedures for designers and technicians, using the well-known BIM systems for the evaluation of the building conditions, investigate the state of preservation and facilitate decision-making choices for maintenance (Piaia et al., 2020; Barontini et al., 2021).

BIM has emerged as a collaborative process between stakeholders in construction projects, aiming to exchange information through a single model thus improving design quality and saving costs and time during construction. In the last decades, numerous studies have shown how the BIM solutions for parametric 3D modelling of cultural heritage can also support the conservation phases (Jouan and Hallot, 2020).

Relating to BIM applied to cultural heritage, several authors (López et al., 2018; Pocobelli et al., 2018) observe that built heritage is characterised by complex morphology and non-homogeneous features, which clash with standardised procedures. There are several areas of research concerning BIM. Some of them address the problem of complex modelling through "scan-to-BIM"⁹ processes (Barazzetti et al., 2016; Oreni et al., 2017; Yang et al., 2019; Nousias et al., 2020). Other research addresses the use of HBIM models for data dissemination and collaboration between stakeholders through web applications, augmented reality technologies and virtual reality (Ashraf and Nagy, 2019). Still other research addresses interoperability between BIM and GIS solutions (Acampa et al., 2021b), condition assessment and structural analysis in the BIM environment (Bassier et al., 2016; Chiabrando et al., 2017).

is to analyse the degradation of monuments due to factors such as climate change and the increasing number of tourists, create a model to describe and anticipate the phenomenon, and put in place a user-friendly decision support system that will help in the creation of preventive maintenance plans. Website: <https://warmestproject.eu/>

⁹ Scan to BIM is the process that captures the built environment using 3D laser scanning technology and transforms it into an integrated BIM model, albeit in a non-automated way to date.

2.1 Building Condition Assessment (BCA)

Building Condition Assessment (BCA) is a process that aims to collect as much information as possible about the physical-performance state of a building. Its proper planning is important to help technicians have a better understanding of the criticalities and behaviours a building may have, facilitating decision-making choices among maintenance activities (Re Cecconi et al., 2017). BCA is useful to rank priorities for intervention and the number of repairs and costs required. BCA is an important process also to achieve maintenance service quality standards. Indeed, a low level of building performance can have a negative impact on the organisation and lead to increased operational costs.

BCA techniques have been developed since the late 1990s mainly to understand asset performance and keep it as effective as possible (Standard & Poor's, 1995; RICS, 2005; Singh Ahluwalia, 2008).

According to the Ahluwalia studies (2008), the BCA process is divided into four phases (Fig. 2):

Figure 2 - Four steps in the process evaluation of conditions (Singh Ahluwalia, 2008).

2.1.1 Asset Hierarchy

Asset hierarchy consists of breaking down the building organism into its elementary components. The ISO 12006-2:2015¹⁰ standard, although not totally complete, defines a framework for the development of classification systems for the built environment. Table 1 shows that several classifications exist internationally:

Table 1 - International classification systems

Building classification systems	Country
OmniClass	(North America)
MasterFormat	(USA and Canada)
UniFormat II	(USA and Canada)
UniClass NBS	(UK)
European CEEC building classification	(Europe)
Canadian CIQS classification	(Canada)
CoClass	(Sweden)
CCS	(Denmark)
TALO 2000	(Finland)
UNI 8290	(Italy)

2.1.2 Evaluation Mechanism

BCA methodologies aim to determine the performance of building components (Ashworth, 1996; Chew and De Silva, 2003). Looking into the scientific literature we can find several studies on BCA techniques (Tab. 2):

Table 2 - Evaluation methods

Evaluation methods	Authors
Dutch standard	(Straub, 2009; Yacob et al., 2016)
Distress method and Direct-condition rating survey	(Linggar et al., 2019)
JKR 21602-0004-13	(Mohd Noor et al., 2019)
National Health Facilities Audit	(Abbott et al., 2007)
BREEAM and LEED	(Amasuomo et al., 2017)
Key Performance Indicators (KPIs)	(Franceschini, 2018; Marmo et al., 2019, 2019, 2020; UNI EN 15341, 2019)
BUILDER RECAPP TOBUS	(Singh Ahluwalia, 2008)

The UNI EN 15341 standard defines the Key Performance Indicators (KPIs) of the Maintenance Function and provides guidelines for defining a set of suitable indicators to assess and improve the effectiveness, efficiency and sustainability of the maintenance of existing physical assets whether industrial, infrastructure, civil buildings or transport systems, etc. in the context of external and internal influencing factors.

Thus, KPIs could be a valuable tool to monitor the building's condition over time, even better if controls are planned periodically through the asset's life cycle (Dejaco et al., 2017). According to Dejaco et al. (2017) and Marmo et al. (2019), KPIs are the best way to measure building performance by allowing accessible and useful information about buildings and their assets (Dejaco et al., 2017; Marmo et al., 2019).

Furthermore, Cable and Davis (2004) state that measuring performance using established KPIs helps the senior management team to make strategic decisions (Cable and Davis, 2004). Table 3 shows a list of KPIs used in building condition assessments:

¹⁰ ISO 12006-2:2015 (International Organization for Standardization) - "Building construction - Organization of information about construction works Part 2: Framework for classification".

Table 3 - Performance indicators

Category	Indicators
Economic	FCI (Facility Condition Index) (Moretti and Re Cecconi, 2019; Re Cecconi et al., 2019a)
	AME (Annual Maintenance Expenditure)
	MEI (Maintenance Efficiency Indicator) (Enshassi and El Shorafa, 2015)
Technical	BPI (Building Performance Indicator) (Leite et al., 2020)
	BEI (Building Efficiency Index) (Moghimi et al., 2011)
	A (Degradation Index) (Ishizuka, 1981)
Functional	O (Action KPI)
	Document index (Dejaco et al., 2017)
User satisfaction	I_{ins} (Dissatisfaction index) (Acampa et al., 2020, 2021a)

2.1.3 Field Inspection

This is the most important part of the process as technicians must be able to collect the information necessary to apply the method for assessing the condition of the building. However, inspections often cause excessive costs if they are not organised efficiently and must be planned considering the characteristics of the property (Uzarski et al., 2007). Documenting and recording the current state of the heritage is the first step towards an effective development of management, conservation and/or restoration processes. Therefore, the systematic collection, storage and processing of all types of available information about buildings will be necessary to determine their geometric characteristics and current physical state, defects or pathologies, architectural style, different phases of construction, as well as the historical and cultural circumstances of when they were conceived (Bruno and Fatiguso, 2018; Bruno et al., 2018; Bruno and Roncella, 2019). To standardise the process, many researchers have developed checklists in both paper and electronic formats¹¹. In addition, data collection systems on specially made digital devices are also used to digitize information directly in situ without the need for re-processing afterwards (Di Pietro et al., 2020).

2.1.4 Condition Analysis

The condition analysis phase consists of the application of the chosen evaluation method to the study of the building's condition. Since the data provided by the inspection process is collected in the form of damage measurements of a component, a careful analysis is required to translate these measurements into a qualitative and/or quantitative condition value.

2.2 BIM-based BCA per il Facility Management (FM)

The ISO 41011:2017 defines Facility Management as the “organisational function that integrates people, place and process within the built environment with the aim of improving people’s quality of life and core business productivity”. While the IFMA (International Facility Management Association) defines it as: “*he designs, implementation and control process through which the facilities (the buildings and services necessary to support and facilitate the company’s activity) are identified, specified, found and supplied in order to provide and maintain those levels of service able to meet business needs, creating a quality work environment with a cost as low as possible*”.

Building maintenance management is one of the biggest challenges in facility management and its key to success is accurate knowledge of the building’s condition (Lin and Su, 2013). However, a limitation of BCA is the outdated procedure of data collection, recording and reporting information stored on paper and rarely linked to the as-built model. This causes the potential loss of information and thus the outperformance and cost overruns. In this sense, the potential of integrating the BCA process with Building Information Modeling (BIM) cannot be ignored. In fact, BIM methodologies solve the problem of collecting and managing data on building conditions by implementing them directly within a single digital model. This is an as-built model of the building equipped with “intelligent” objects that contain not only three-dimensional graphic information but also semantic (non-geometric) information that can be updated infinitely and can be queried at any time during the entire life cycle of the building. In the specific phase of use and management of the building, the main task of BIM is to always have an as-built model including a database that improves the maintenance and management processes

¹¹ Many researchers, on the other hand, try to automate the inspection process using robots, images, satellite technology, automated devices and/or intelligent sensors. Many programmes and techniques developed in the literature (Singh Ahluwalia, 2008) can be classified into four main groups: (1) Visual inspection; (2) Photographic and optical methods; (3) Non-destructive evaluation methods; (4) Intelligent sensors.

of the building and facilitates the work of the managers (Su et al., 2011). BIM allows maintenance personnel to access and review their digitised building to update or query maintenance records.

BIM is increasingly used over the years in design and construction of buildings and infrastructures but is a relatively new concept in the field of Facility Management especially when dealing with existing buildings and even more so if they have a historical-cultural importance. Indeed, in such event, the implementation of BIM-based facility management procedures requires a greater effort to collect correct data on quantities, dimensions, materials and technologies (due to the common lack of updated as-built documents). The first scientific studies on the integration of FM to BIM systems in cultural heritage (known as HBIM¹²) are dated 2012 (Fig. 3).

Figure 3 - Literature search trend on “HBIM and Facility Management”.

The difficulties in implementing an asset management process in a BIM environment are mainly due to (Villa et al., 2016):

- Identifying the information necessary and sufficient for management and maintenance operations.
- The management of this information on platforms that are interoperable with those of FM.
- Reducing the effort to update the model.

¹² The application of BIM to historic built heritage was initially identified as Historic Building Information Modeling (HBIM) by (not to be confused with Heritage-BIM which generally deals with existing buildings not belonging to the cultural-historical heritage). However, according to their research, the concept of information management (complementary to modelling) is excluded; in fact, they only talk about new data acquisition procedures for the three-dimensional reconstruction of built assets. This process differs from classical BIM in the type of information to be processed and its acquisition. The digital model of the historic building uses BIM objects that are rarely imported from the builders’ catalogues, but are mostly modelled individually after a survey (photogrammetric surveys, LIDAR, etc.) and subsequently integrated with parametric data.

- The BIM methodology improves the current way of working and sharing data between professionals, users and clients. Just think of the amount of paper documents that need to be stored in an asset repository, with all the problems associated with acquiring and updating data; with BIM, data is stored in a database, so paper is greatly reduced, with greater benefits in terms of updating effort. This digitised information can be used to plan and carry out further maintenance work, such as preventive maintenance, repairs or upgrades depending on the condition of the building (Che Ani et al., 2015).

In the literature, only in the last few years studies concerning the integration of BCA in a BIM environment have been published. These are mostly studies that have university campuses as objects (Re Cecconi et al., 2017, 2019b; Matos et al., 2021) and hospitals (Ahmed, 2012; Marmo et al., 2019, 2020).

Regarding the field of cultural heritage, the latest scientific publications found include those by (Bruno and Fatiguso, 2018; Bruno et al., 2018; Bruno and Roncella, 2019). The authors proposed the implementation of the HBIM approach for the renovation and conservation of historic buildings. The scientific and technical community confirmed the effectiveness of BIM tools for knowledge management and sharing, noting still limited research of BCA in HBIM.

The analysed literature shows that in the last years not only the number of studies on the integration of BCA processes in a BIM environment has increased, but more and more authors have had to expand their expertise in the IT sector, developing web platforms or plug-ins in .net language to add further functionalities to the already existing BIM Software Authoring (Re Cecconi et al., 2017; Bruno and Roncella, 2019; Marmo et al., 2019; Matos et al., 2021). This is also in order to facilitate technicians, users and managers in consulting the BIM model of the building. This means that, to date, software houses are marketing products that are not only not accessible to all due to their high purchase cost, but that need to be integrated with user-friendly tools to make BIM models truly accessible to all.

3. TOOLS

The research method consists in integrating BCA processes in a BIM environment for the management of cultural heritage maintenance activities. This means that technicians and managers will have to use specific BIM tools and a particular procedure in order for interoperability and collaboration between the different stakeholders involved in the process to be effective.

3.1 Building Breakdown Structure - UNI 8290

The system proposed by the Italian standard UNI 8290 is used to break down the building into its elements (or

Work Breakdown Structure - WBS)¹³. Its purpose is to unify the terminology to be used in regulatory, programming, planning, operational and communication activities. UNI 8290 is presented as an enumerative hierarchical structure based on the breakdown of the building into classes of technological units; each class of technological unit is in turn broken down into technological units; each technological unit is in turn broken down into classes of technical elements¹⁴. The three main levels, to which further ones can be added, were defined according to a criterion that is functional in nature, even though it might seem to be related to its object¹⁵. Each level is characterised by a numerical code which identifies the requirements and/or systems of requirements which are attributed to that specific technical element. Thanks to this code it is also possible to go back to the three previous levels to which it belongs. Furthermore, by adding further codes in the following positions it will be possible to characterise the technical element with further information. The purpose of coding is to unambiguously identify the building components and to allow the recording of all information available or generated over time, both during maintenance and inspection. The attribution of the code takes place through the compilation of a summary table to which detail sheets are attributed for each technical element. The further levels of detail of the building decomposition refer to the technical elements, to the peculiarities of position and material of which they are

composed, variables describing the state of deterioration and information relating to the Maintenance Plan (controls and interventions).

Compared to UNI 8290, the decomposition of the building has been readjusted in terms of locutions and numerical codes in order to better adapt it to the characteristics of historical-cultural buildings. In addition, compared to the standard, the name of the third level has been changed from "Class of technical elements" to "Maintainable element". Table 4 shows the list of levels of detail in the building decomposition:

Table 4 - Building breakdown structure

WBS level	Parameters	Parameters group
LEVEL 1	Technological Unit Class	Identity
LEVEL 2	Technological Unit	
LEVEL 3	Maintenance element	
LEVEL 4	ID_Element	
LEVEL 5	Material Exposition Place	state Decay evaluation
LEVEL 6	Decay (UNI 11182) Id Conservation	
LEVEL 7	Control type Control description Control frequency Maintenance type Description maintenance Maintenance Frequency Control cost (€/h) Maintenance cost (€/mq)	Maintenance Plan
LEVEL 8	Control sheets Intervention sheets Price analysis sheets	Link datasheets

¹³ WBS means Work Breakdown Structure. According to the Project Management Book of Knowledge (PMBOK) of the Project Management Institute (PMI), the WBS is defined as "a deliverable oriented hierarchical decomposition of the work to be executed by the project team" i.e. a deliverable oriented hierarchical decomposition of the work to be executed by project teams. It is a basic management tool, represented according to a hierarchical (tree) diagram that supports a systematic decomposition of the project into parts grouped by homogeneous levels of definition.

¹⁴ The UNI 8290 standard defines: Class of technological unit the homogeneous functional elements grouped by prevailing function for physical and functional continuity; Technological unit the set of technical elements that represent functions aimed at satisfying the user's needs; Class of technical elements the classes of products that perform functions specific to one or more technological classes.

¹⁵ A complex project, like any complex system, can be easily understood and managed by breaking it down into its components. The project structure is described according to a hierarchical tree diagram, with increasing levels of detail, is determined by the project manager at the start of each project and is maintained throughout the life cycle. The classifications can be of different types: Classification by project phases, Classification by object (Work Breakdown Structure - WBS), Classification by action or functional (Activity Breakdown Structure - ABS), Organisation Breakdown Structure (OBS), Resource Breakdown Structure (RBS), Cost Breakdown Structure (CBS), Project Breakdown Structure (PBS), Document Breakdown Structure (DBS), Risk Breakdown Structure (RBS) (Di Castri, 2009).

3.2 Degradation assessment methodology and opportunity maintenance

3.2.1 Degradation index id

In order to assess the state of preservation of each technical element of a building, a numerical indicator of

the “level of degradation” was proposed, expressed as:

$$i_d = \frac{A_d}{A_t} K_d K_c \quad (1)$$

The formula takes into account:

$\frac{A_d}{A_t}$ ratio of the area of degradation to the total area of the A_t technical element;

K_d is the factor that takes into account the type of degradation¹⁶. Its value varies from 1 to 4 (slight, medium, serious and very serious) depending on the damage it may cause to the material in terms of loss of historical and cultural value and risks to humans.

K_c is the weight factor that takes into account the importance of degradation in the sense of the complexity of restoration/maintenance operations and related costs. Its value is the ratio between the costs of ordinary maintenance (cleaning operations), material consolidation costs (material recovery) and the costs of complete material replacement (restoration of missing or no longer recoverable assets).

The degradation level index will make it possible to establish the state of conservation of each technical element as a function of its value in percentage terms as shown in Fig. 4:

$i_d = 0$	Level 0	No decay
$0\% < i_d \leq 15\%$	Level 1	Good condition
$15\% < i_d \leq 30\%$	Level 2	Light decay
$30\% < i_d \leq 45\%$	Level 3	Moderate decay
$i_d > 45\%$	Level 4	Generalized decay

Figure 4 - Degradation level index values i_d .

3.2.2 Maintenance of opportunities: connection matrix

When talking about maintenance work, at a technical and management level, it must be borne in mind that each technical element on which work is to be carried out has a relationship with other elements. These relationships can be of two types:

- *Technological connections* are those connections that link two technical elements making it inevitable to intervene on both at the same time.
- *Operational connections* are those connections where there is an operational convenience in associating in-

terventions on two elements, linked to executive reasons, i.e. equipment, provisional works, site organisation.

Fig. 5 shows a matrix with which it is possible to identify the technological and operational connections between technical elements. The matrix correlates the construction elements, identified in advance according to the classification set in UNI 8290. The aim, therefore, is to highlight the technical elements for which, given the importance of their technological and operational connections, it is particularly appropriate and convenient to make the maintenance operations coincide. The rows and columns in the matrix refer to the technical elements (or possibly the technological units) of the building. Each quadrant resulting from the row-column intersection is divided into four parts forming 4 small triangles: the upper and lower triangles refer to the technological connections, while the right and left triangles refer to the operational connections. The stronger the technological and operational connection, the more cost-effective it is to apply opportunity maintenance between technical elements.

¹⁶ UNI 11182:2006 - Cultural heritage - Natural and artificial stone materials - Description of the form of alteration - Terms and definitions. UNI 11130:2004 Wooden material deterioration.

Figure 5 - Technological and operational connection matrix¹⁷

Opportunity maintenance involves carrying out an intervention on a specific component when other maintenance activities are being carried out, either because a need is identified in such an eventuality, or because this possibility had been previously planned, or because a pressing need was perceived (Nicolella, 2003).

3.2.3 Optimisation of maintenance costs

Reducing costs is one of the main reasons for managers to carry out opportunity or group maintenance. In this perspective, performing a joint maintenance activity is more economical than performing individual maintenance activities. According to the Nicolai and Dekker (2008), this notion is called “positive economic dependency” and occurs due to the economies of scale of performing group maintenance activities (Nicolai and Dekker, 2008). It represents the percentage of fixed costs that are incurred in maintenance work and influence the total maintenance costs. In this sense, one can define the Economic Gain (EG) in the execution of opportunity maintenance activities as:

$$EG = N \times PED \times C_{MP} \quad (2)$$

Where:

- N is the number of technologically and operationally convenient group maintenance activities (convenience

is derived from the connection matrix);

- PED is the percentage of positive economic dependency, i.e. the percentage of fixed costs in maintenance works and affect total maintenance costs;
- C_{MP} is the cost of preventive maintenance carried out on technical elements.

The EG will therefore be a reduction in fixed cost (expressed as a percentage of fixed costs of total preventive maintenance costs) for each team maintenance activity. The number of group maintenance activities depends on the number of technical elements on which it is convenient to intervene.

The total costs of maintenance will be the sum of the total costs of preventive maintenance on the technical elements carried out reduced by the economic gains from applying opportunity maintenance. The equation describing the phenomenon is:

$$C_{TM} = \Sigma C_{MP} - \Sigma EG \quad (3)$$

This model makes it possible to plan cost-effective interventions, taking into account the technological and operational connections between the technical elements of a building system.

3.3 Field inspection – Control datasheets and Database Master

The objective of the inspection process is to obtain the data necessary to measure and/or calculate performance or to assess condition. The inspection must be carried out consistently, accurately and as objectively as possible.

¹⁷ Method created by Prof. Maurizio Nicolella, university lecturer (1CAR/11), Department of Civil, Building and Environmental Engineering, University of Naples Federico II.

In this study, a visual inspection was chosen and the information is collected in electronic format using Microsoft Excel software.

3.3.1 Control datasheets

For data collection and analysis, control sheets were created on Excel spreadsheets¹⁸. These sheets are pre-filled and are divided into three parts:

- The upper part of the sheet contains the identification data of the technical element. Each component will have a numerical code which will refer to the breakdown by classes of technical elements according to a structure similar to that proposed by UNI 8290. The difference with the UNI standard lies in using different terms. We use here terms more suitable for buildings of a historical-cultural nature rather than residential buildings¹⁹.
- The middle part of the sheet contains information about the type, description and frequency of checks and maintenance that are carried out on the technical element. This section is already pre-filled because, if there is a maintenance plan, this information will al-

ready be known. If there is no maintenance plan then this section will have to be completed in situ.

- The lower part of the sheet contains information about the degradation assessment. The technician must select from the drop-down menu the type of degradation affecting the technical element and the extent in percentage terms. In this way the system will automatically calculate the weight factor Kc relating to the importance of the degradation in operational and economic terms and the indicator Id (in percentage) which will correspond to a conservation status (no degradation, good condition, light, moderate and general degradation).

3.3.2 Database Master

The control sheets are linked to a Master Database, i.e. a single Excel spreadsheet where all the data from the control sheets is stored. The Master Database will be the main database which is linked directly to the as-built BIM model of the building. The information is entered in columns and each column represents the information of each technical element according to the building decomposition shown in Tab. 4.

SCHEDA DI CONTROLLO
B1 - WBS

EP ELEMENTI DI PREGIO	ID scheda
01.11 Elementi lapidei	
01.11.01 Colonne in pietra faccia vista: arenaria trizia	SC01.11.01.01
01.11.01.01 Colonna

B2 - CONTROLLI E MANUTENZIONE

Tipo di controllo 1: 01.11.01.01 Controllo superfici

Descrizione controllo 1: Controllo dello stato superficiale delle colonne ed in particolare degli elementi in pietra faccia vista. Verificare l'assenza di eventuali anomalie. In caso di dissesti verificare l'origine, l'estensione e il tipo di consolidamento da effettuarsi.

Frequenza di controllo 1: OGNI 2 ANNI

Tipo di manutenzione 1: 01.11.01.01 Ripristino superfici

Descrizione manutenzione 1: Pulizia degli strati superficiali ed in particolare degli elementi in pietra faccia vista mediante lavaggio con acqua deionizzata a bassa pressione. In alternativa provvedere alla pulizia manualmente mediante raschietti, bisturi, spazzole, spatole con acqua.

Frequenza manutenzione 1: QUANDO OCCORRE

B3 - INDICE DEL LIVELLO DI DEGRADO

Materiale	Materiale lapideo		
	Sud-Ovest		
Esposizione			
Tipo di grado Kd	Alterazione cromatica	Esfoliazione	Erosione
	BASSO	GRAVISSIMO	GRAVE
Estensione del degrado Ad/At	1	4	5
Importanza del degrado Kc	25%	25%	2%
Indice di degrado	0.18	1.71	1
Stato di conservazione	Degrado leggero		
Necessità di intervento urgente	No		
Possibili cause	Umidità da risalita		
Decadimento prestazionale	Estrinco		
Data controllo	27/07/2020		
Nome del tecnico	Ing. Claudia M. Parisi		

Identificazione dell'elemento tecnico con codice numerico corrispondente alla WBS (sulla base della norma UNI 8290)

Informazioni relative al Piano di Manutenzione: Controllo e Manutenzione (tipo e frequenza)

Valutazione del livello di degrado semiautomatizzato

B3 - INDICE DEL LIVELLO DI DEGRADO			
15 Materiale	Materiale lapideo		
	Sud-Ovest		
16 Esposizione			
17 Tipo di degrado Kd	Alterazione cromatica	Esfoliazione	Erosione
	GRAVISSIMO	GRAVE	
18 Estensione del degrado Ad/At	4	3	
19 Importanza del degrado Kc	25%	2%	
20 Indice di degrado	1,71	1	
21 Stato di conservazione	Degrado leggero		
22 Necessità di intervento urgente	No		
	PREVENTIVO		

Figure 6 - Control datasheets²⁰.

¹⁸ Excel spreadsheets are a user-friendly tool for engineers. They also lend themselves well to links with BIM models.

¹⁹ For example, Fig. 6 shows the Class of Technological Unit Valuable Elements, the Class of Technological Unit Stone Elements, the class of maintainable elements (or class of

technical elements) Facing stone column: grey sandstone.

²⁰ Figure 6 shows an example of a control sheet with the division of information as indicated above. In particular, the sheet refers to the case study of the Brunelleschi's Cloister of the Santa Croce Monumental Complex.

Figure 7 - Link between Control datasheets and Master Database.

3.4 Data analysis – BIM-Dynamo-DM

3.4.1 Revit Software

Based on surveys completed in the United Kingdom (UK) by National Building Specification (NBS) in 2014 (NBS 2014) and 2016 (NBS 2016), as well as a similar survey conducted in Canada by IBC in 2013 it was shown that Autodesk's Revit is the most widely used tool.

Revit is a BIM authoring software that offers a multidisciplinary and collaborative approach to the design, construction and data management process of a building.

	UK (NBS 2016)	UK (NBS 2014)	Canada (IBC 2013)
Autodesk Revit	31%	27%	40%
Graphisoft ArchiCAD	19%	10%	0%
Nemetschek Vectorworks	15%	8%	6%
Autodesk CAD	12%	22%	43%
Autodesk CAD LT	12%	20%	3%
Other	5%	7%	6%
Bentley Microstation	3%	3%	3%
Trimble Sketchup	1%	3%	0%
Bentley Building Suite	1%	1%	0%

Figure 8 - BIM Authoring Software comunemente usati (Dore and Murphy, 2012).

In UK, the tool used to produce drawings is not any more Autodesk CAD/CAD LT but BIM tools, namely Revit, Graphisoft ArchiCAD and Nemetschek Vectorworks; whereas in Canada, ArchiCAD and Vectorworks are little

adopted (Fig.8). Although Bentley had very little adoption in both the UK and Canada (3%), it was declared a popular BIM tool by researchers in the USA.

The biggest problem with all the software listed above is that the cost of purchasing licenses is high. Therefore, although the cost of creating a model of an existing building is increasingly low, the money to spend is not worth it if the sole purpose of the model is to store BCA data. The owner (or manager) of the asset needs to have a long-term strategic plan in which the use of BIM is vital for the whole management of the asset and not just the valuation. In the latter case, this is likely to result in implementation costs exceeding the savings.

With Revit software, as with others, it is possible to construct a BIM model of the building according to two main methods: "CAD to BIM" or 'scan to BIM". The "CAD to BIM" approach consists of constructing the BIM model by means of digital floor plans in CAD format. This method involves checking that the geometries correspond to reality. The Scan to BIM approach is the process of using any laser scan to create highly accurate 3D BIM models for redevelopment, refurbishment and renovation projects. Once the area of interest has been digitally surveyed, the resulting point cloud is manipulated and the BIM model is built. This process is useful for intervening in works of historical interest, carrying out renovations, monitoring the progress of works on construction sites and digitising existing works (Facility Management). Although Scan to BIM approaches

are far more geometrically accurate in the construction of traditional models, the tools with which they are surveyed and processed are very complex and expensive to use by competent personnel. In addition, if high-performance devices are not available, the processing times for point clouds are very high. Another limitation that has not yet been overcome is the conversion between point cloud and BIM model. There is no software or plug-in that can automatically convert a mesh or point cloud into a parametric 3D model.

Design parameters or shared parameters are added to the 3D model to include the semantic (not geometric) information of the technical elements that make up the building. These parameters refer to those indicated in Table 4 and which have also been reported in the Master Database (Fig. 7).

The variables of these parameters can be entered manually, but this would be time-consuming and more likely to result in errors, making the process inefficient. An alternative is to use a link between the Master Database and the BIM model in Revit through Script in Dynamo.

3.4.2 Dynamo

Dynamo is a Visual Programming Language (VPL) that allows programming using graphical expressions of elements such as nodes and arrows, rather than text²¹. This procedure of composing commands using nodes

and arrows is called Script.

In the BIM environment, VPLs were initially known for the parametric modelling of complex objects²². Today, in the field of construction management it finds useful use as an add-in to extend the parametric functionality of Revit, information retrieval and documentation in generating operation and maintenance deliverables in the format required by the end user (Sadeghi et al., 2019).

Dynamo reads and writes data to and from the Revit database via the Revit API. Any Revit user could learn Dynamo (since it uses visual programming it is very easy to learn) and could access the Revit API and perform simple tasks that previously could only be done by writing an Add-On or writing a macro with the .net language for Revit.

Fig. 9 shows a simplified script in Dynamo for importing data from the Master Database to the Revit BIM model.

²¹ User interfaces are quite different from text-based programming languages, where code is typed in a text editor or more sophisticated code editing program, e.g. BASIC, LISP, C#, Python, Java, Processing, etc. (Kensek, 2015).

²² In modelling, Grasshopper and Dynamo work for Rhino and Autodesk Revit respectively. The difference is that Rhino is a three-dimensional object modelling programme, whereas Revit Autodesk is a parametric modelling programme, so Dynamo does not work exclusively to model complex objects, but is widely used to speed up the input or extraction of parametric data (Kensek, 2014).

Figure 9 - Dynamo script: Importing data from Master Database to BIM Model in Revit.

4. PROCEDURES

Once the operational tools of the method have been described, it is possible to show the procedure by which operators take part in the maintenance process from the data collection phase, exploiting the potential of the tools shown above. Fig. 10 shows the procedure divided into 5 phases:

- F1 - technician responsible for the implementation of the maintenance plan inspects each technical component of the building to determine its state of preservation
- F2 - technicians annotate the data on the state of preservation of the elements through electronic tools (e.g.

tablets and smartphones) directly on the inspection sheets on Excel spreadsheets

- F3 - each control card is transferred to the Master Database in the cloud.
- F4 - information contained in the Master Database will be linked to the as-built BIM model via Script in Dynamo.
- F5 - through the technological and operational connection matrix, it is possible to identify further appropriate interventions to be carried out in conjunction with maintenance activities for the highest priority elements.

Figure 10 - Operating procedure

5. METHOD

5.1 Maintenance Workflow Management

The research, relying on the national and international guidelines (U.S. General Service Administration Public Buildings Office of Design and Construction, 2011; BuildingSMART Finland, 2012; PAS 1192:2014, 2014; Messner et al., 2019; UNI 11337-4:2017, n.d.) and on the literature on the implementation of BCA and FM in a BIM environment (Marmo et al., 2019, 2020; Re Cecconi et al., 2019b), could identify tools and procedures to support a method that integrates BCA processes in a BIM environment.

Fig. 11 shows a Maintenance Workflow Management that summarises the research method and the tools that were used for its application.

The proposed method involves a collaborative process between some of the different stakeholders that take part in maintenance design and management activities.

- *FM team* is made by managers (public or private) of the building who define the needs of the building, but also keep track of the budget available for these activities. They are in charge of technical-economic-organisational decisions on the management of maintenance during the building's life cycle, and therefore decide on the methods, criteria and processes by which these activities should be carried out. In Fig.12, the first column identifies the management team as responsible for identifying the needs for optimising maintenance management costs and deciding on the most suitable Building Condition Assessment technique to achieve the objective.
- *BIM team* is a group of technical experts in BIM

[

-

Fig

6. CASE HISTORY AND RESULTS

6.1 Brunelleschi's Cloister

Brunelleschi's Cloister or Second Cloister is one of the architectural spaces of the Monumental Complex of Santa Croce in Florence²³. It is named after the designer Filippo Brunelleschi, although the work was completed in 1453 after his death by the architect Bernardo Rossellino. It was once a place of meditation and elevation of the spirit to God. It was the centre of community life with the friars' cells, the library and the rooms for manual work. Today it is largely occupied by the National Library.

The cloister has a rectangular shape (31x38m) and is divided into two orders, the lower of which is formed by rounded arches and cross vaults resting on slender columns of pietra serena. The upper order, on the other hand, has a slightly lower development in height and a single pitch roof, warped in wood and covered in traditional terracotta, resting on thinner stone columns with the same interval as the ones below (Fig. 12).

Figure 12 - Brunelleschi's Cloister.

6.1.1 Conservation state

The state of deterioration of the cloister varies from area to area and is less evident and critical where previous restoration work has been carried out. The upper portico, protected by the overhanging roof and already restored in the past, is in a good state of conservation, especially

the capitals of the columns. On the other hand, the shafts of the columns, which are more exposed to the action of rainwater, are exfoliated on the external side and, above all, the cymatium is affected by numerous fractures, cracks, lifting and falling material, and the dangerous fragments could detach and fall due to accidental reasons. The lower portico is in a very advanced state of decay, especially on the two sides near the entrance to the cloister.

The lack of a rainwater collection gutter, the particular orientation of the exhibition and the prolonged lack of conservation work have undoubtedly had a heavy impact. Widespread corrosion affects all the reliefs of the cornices, arches, coats of arms and entire columns, to the point that the reliefs are often no longer legible. The presence of exfoliations, uplifts and, above all, a large number of cracks caused the loss of fragments during the inspection, which crumbled with the mere contact of fingers.

On the shorter side to the right of the entrance to the cloister, a number of evident and coarse interventions were identified, carried out in the past with cement-based mortars which, although temporarily restored the surface, over time worsened the state of conservation of the stone, favouring its surface swelling and the consequent fall of fragments.

Due to a probable structural failure, one of the capitals on this side is affected by a through fracture that divides it in half starting from the intrados of the arch, which is also cracked in several places. In the past, this fracture was temporarily filled with white cement, but due to further structural movements it has opened again. The other two sides of the portico have already been restored in the past, at least the longer one. In fact, some twenty years later, despite the loss of small fragments and the presence of some cracks, the surface is still affected by the effectiveness of the consolidating products used.

6.2 Procedure applied to the Cloister

6.2.1 Data collection and Database organization

The data collection of the Brunelleschi Cloister started in 2018 within the WARMEST project and continued until 2020, with some slowdowns caused by the overcoming health crisis that made inaccessible all public places where studies could be carried out (offices, archives, libraries, superintendences, etc.). Documents relating to the plans of the Monumental Complex, the Brunelleschi's Cloister and the draft of the Maintenance Plan were collected at the technical offices of the Santa Croce Monumental Complex. In addition to the data collection at the technical offices, surveys were carried out directly in situ to identify all the information necessary to determine the state of conservation of the technical elements of the Cloister. During the field inspection, control sheets (Fig. 6) were compiled for

²³ Opera Santa Croce is subdivided into 8 architectural spaces covering an area of almost 18,000 square metres. Owned by the Fondo Edifici di Culto del Ministero dell'Interno and the Comune di Firenze, the monumental complex of Santa Croce is managed by the Opera di Santa Croce, which has been responsible for the protection and enhancement of this place since the 14th century, in agreement with the owners.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	T	U	
1	Identificazione							Valutazione degrado			Piano di manutenzione										
2	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5			Livello 6			Livello 7										
3	Classe di stato investigate	Utile investigate	Minimo assicurabile	B) Elemento	Manuale	Esposizione	Problema	Tipi di degrado (CEN 11382)	Int	Strato di conservazione	Tipi di corrosione 1	Deteriorazione corrosione 1	Frequenza di corrosione 1	Coeff di corrosione 1 (N)	Tipi di manutenzione 1	Deteriorazione manutenzione 1	Frequenza di manutenzione 1	Coeff di manutenzione 1 (M)	Modalità di difesa	Modalità di intervento	
4	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.01 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Alterazione cromatica Effoliazione Erosione	0.23	Degrado leggero	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite
5	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.02 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Effoliazione Erosione Dettacco	0.32	Degrado modesto	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite
6	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.03 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Effoliazione Erosione Dettacco Rigorfallimento	0.27	Degrado leggero	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite
7	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.04 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Alterazione cromatica Effoliazione Erosione	0.29	Degrado leggero	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite
8	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.05 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Alterazione cromatica Effoliazione Erosione	0.15	Degrado leggero	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite
9	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.06 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Effoliazione Erosione Dettacco	0.21	Degrado leggero	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite
10	EP ELEMENTI DI FREGIO	01.11 Elementi lapidei	01.11.01 Colonne in pietra a faccia vista, arenaria grigia	01.11.01.07 Colonna	Pietra serena	Sud-Ovest	Piano terra	Erosione Dettacco	0.23	Degrado leggero	01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	61.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50.96	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	C-Useri-Ciudad alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite	Chiamata alfoogge Drive (clauda a parsi (Bunkire nite

6.2.2 BIM model of the Cloister

K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Piano di manutenzione								Schede collegate			
Livello 1								Livello 0			
Descrizione elemento 1	Frequenza di controllo 1	Costi di controllo (€) 1	Tipi di manutenzione 1	Descrizione intervento 1	Frequenza di manutenzione 1	Costi di manutenzione 1 (€) 1	Modalità di rilievo	Modalità di intervento	Schede analisi prezzi		
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te
01.11.01.C01	Controllo superficiale	Ogni 2 anni	01.00	01.11.01.01	Ripristino superficiale	Quando occorre	50,90	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te	C:\Users\lcaud\alGoogle Drive (clouda paria (bunkare i)Te

that links the Master Database, external to the software, and the Revit BIM model (Fig. 15)

By importing the data from the Master Database into the Revit BIM model it is possible to query each technical element individually (Fig. 15) or to create abacuses that group together in a single table the information that has been collected during the inspections and imported into the BIM model through the script in Dynamo (Fig.16a and 16b).

A	B	C	D	E	F	G	H	I
ID_Elemento	Area	Tipo di degrado (UNI 11182)	Id	PERCENTUALE AREA DEGRADATA (%)				
				Alt.cromatica (%)	Esfoliazione (%)	Disgregazione (%)	Erosione (%)	Distacco (%)
01.11.01.01 Colonna	2.54 m ²	Alterazione cromatica, esfoliazione, erosione	23%	25%	25%	0%	2%	0%
01.11.01.02 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	32%	0%	17%	0%	5%	33%
01.11.01.03 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	27%	0%	17%	0%	5%	33%
01.11.01.04 Colonna	2.54 m ²	Alterazione cromatica Esfoliazione Erosione Distacco	29%	25%	33%	0%	1%	0%
01.11.01.05 Colonna	2.54 m ²	Alterazione cromatica Esfoliazione Erosione	15%	25%	17%	0%	1%	0%
01.11.01.06 Colonna	2.54 m ²	Alterazione cromatica Erosione Distacco	21%	0%	0%	0%	15%	17%
01.11.01.07 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	23%	0%	0%	0%	15%	17%
01.11.01.08 Colonna	2.54 m ²	Erosione	5%	0%	0%	0%	5%	0%
01.11.01.09 Colonna	2.54 m ²	Erosione	5%	0%	0%	0%	5%	0%
01.11.01.10 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Disgregazione	27%	0%	25%	10%	0%	0%
01.11.01.11 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco Disgregazione	23%	0%	25%	10%	25%	8%
01.11.01.12 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	27%	0%	25%	0%	5%	0%
01.11.01.13 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	25%	0%	25%	0%	15%	8%
01.11.01.14 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	21%	0%	25%	0%	10%	5%
01.11.01.15 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	20%	0%	25%	0%	5%	5%
01.11.01.16 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Distacco	34%	0%	25%	0%	0%	15%
01.11.01.17 Colonna	2.54 m ²	Erosione	5%	0%	0%	0%	5%	0%
01.11.01.18 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	21%	0%	17%	0%	10%	0%
01.11.01.20 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	31%	0%	25%	0%	15%	0%
01.11.01.21 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	10%	0%	8%	0%	5%	0%
01.11.01.22 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	16%	0%	12%	0%	10%	0%
01.11.01.23 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione	27%	0%	25%	0%	5%	0%
01.11.01.24 Colonna	2.54 m ²	Alterazione cromatica Esfoliazione	12%	25%	8%	0%	0%	0%
01.11.01.25 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	22%	0%	25%	0%	5%	8%
01.11.01.26 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	32%	0%	25%	0%	25%	8%
01.11.01.27 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	56%	0%	40%	0%	40%	0%
01.11.01.28 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	42%	0%	25%	0%	5%	40%
01.11.01.29 Colonna	2.54 m ²	Erosione Distacco	35%	0%	0%	0%	25%	25%
01.11.01.30 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	15%	0%	10%	0%	15%	8%
01.11.01.31 Colonna	2.54 m ²	Erosione Distacco	28%	0%	25%	0%	5%	0%
01.11.01.32 Colonna	2.54 m ²	Esfoliazione Erosione Distacco	16%	0%	12%	0%	10%	10%
Totale generale: 32								

Figure 16a - Revit Abacus - 01.11.01. Facing stone column.

1.01 Colonne in pietra...											
1.01 Colonne in pietra facciavista>											
J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
AREA DEGRADI (MQ)					COSTI UNITARI MACRO-INTERVENTI (€/MQ)			COSTI TOTALI MACRO-INTERVENTI (€)			Costo totale manutenzione ET
Alt. cromatica	Esfoliazione	Disgregazione	Erosione	Distacco	Consolidamento	Pulizia semplice	Integrazione	Pulizia semplice	Integrazione	Consolidamento	
0.64 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.05 m ²	0.00 m ²	410.72€	27.72€	63.09€	17.63€	3.21€	261.10€	291.99€
0.00 m ²	0.43 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.84 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	522.31€	530.34€
0.00 m ²	0.43 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.84 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	522.31€	530.34€
0.64 m ²	0.84 m ²	0.00 m ²	0.03 m ²	0.00 m ²	410.72€	27.72€	63.09€	17.63€	1.80€	344.73€	363.96€
0.64 m ²	0.43 m ²	0.00 m ²	0.03 m ²	0.00 m ²	410.72€	27.72€	63.09€	17.63€	1.80€	177.59€	196.82€
0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.38 m ²	0.43 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	24.07€	177.59€	201.66€
0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.38 m ²	0.43 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	24.07€	177.59€	201.66€
0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	0.00€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	0.00€	8.02€
0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	0.00€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	0.00€	8.02€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.25 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	16.05€	261.10€	277.20€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.25 m ²	0.64 m ²	0.20 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	56.10€	344.73€	400.89€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	261.10€	269.18€
0.00 m ²	1.27 m ²	0.00 m ²	0.76 m ²	0.41 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	48.14€	689.45€	737.59€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.25 m ²	0.13 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	16.05€	313.39€	329.43€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.13 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	313.39€	321.41€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.38 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	0.00€	417.85€	417.85€
0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	0.00€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	0.00€	8.02€
0.00 m ²	0.43 m ²	0.00 m ²	0.25 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	16.05€	177.59€	193.63€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.38 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	24.07€	261.10€	285.23€
0.00 m ²	0.20 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	83.57€	91.59€
0.00 m ²	0.31 m ²	0.00 m ²	0.25 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	16.05€	125.36€	141.40€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	261.10€	269.18€
0.64 m ²	0.20 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	410.72€	27.72€	63.09€	17.63€	0.00€	83.57€	101.20€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.20 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	344.73€	352.75€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.64 m ²	0.20 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	40.12€	344.73€	384.84€
0.00 m ²	1.02 m ²	0.00 m ²	1.02 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	64.10€	417.85€	482.04€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	1.02 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	679.01€	687.03€
0.00 m ²	0.00 m ²	0.00 m ²	0.64 m ²	0.64 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	40.12€	261.10€	301.27€
0.00 m ²	0.25 m ²	0.00 m ²	0.38 m ²	0.20 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	24.07€	169.03€	212.10€
0.00 m ²	0.64 m ²	0.00 m ²	0.13 m ²	0.00 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	8.02€	261.10€	269.18€
0.00 m ²	0.31 m ²	0.00 m ²	0.25 m ²	0.25 m ²	410.72€	0.00€	63.09€	0.00€	16.05€	229.82€	245.86€
2.54 m ²	14.40 m ²	0.51 m ²	7.86 m ²	8.31 m ²				70.50€	527.92€	8503.25€	9101.66€

Figure 16b - Revit Abacus - 01.11.01. Facing stone column.

Figures 16a and 16b show an abacus of the Cloister's columns with an indication of the type of degradation affecting the columns, the percentage and the square metres of degradation. The maintenance/restoration costs refer to the square metre of degradation present (parametric costs) which in turn were determined through the analysis of the Regional Price Schedules for the maintenance and restoration of cultural heritage. The procedures refer to the best practices of the restoration and maintenance manuals for cultural heritage (Musso, 2013).

6.2.3 Optimisation of maintenance costs of the Cloisters

In order to optimise maintenance costs and easily identify priorities for intervention within the cloister, the degradation level index I_d was parameterised according to the colour scale in table 4 using a script in Dynamo (Fig. 17).

Figure 17 - Parameterisation of the I_d indicator.

The index of the level of degradation allows to easily identify the technical elements with a generalized state of degradation ($I_d \geq 45\%$) and gives a support to the technicians to easily identify the priorities of intervention. In the specific case of the Cloister, the greatest degradation is in the arches and the overlying coats of arms (Fig. 18).

Figure 18 - Technical elements with I_d 45% in the four elevations.

The matrix of technological and operational connections between the maintainable elements of the Cloisters makes it possible to identify cost-effective maintenance operations of opportunity (group maintenance) (Fig. 19).

Technological and Operational Connection Matrix	Stone walls	Stone vaults	Wooden structures	Plastering	Painting walls	Doors	Gutters and downpipes	Roof tile sealing layer	Facing stone columns	Stringcourse frames	Arches	Stone coats of arms	Facing stone portals	Facing stone walls	Terracotta flooring	Stone flooring
Stone walls																
Stone vaults																
Wooden structures																
Plastering																
Painting walls																
Doors																
Gutters and downpipes																
Roof tile sealing layer																
Facing stone columns																
Stringcourse frames																
Arches																
Stone coats of arms																
Facing stone portals																
Facing stone walls																
Terracotta flooring																
Stone flooring																

Figure 19 - Technological and operational connections of the Cloister.

Since arches and coats of arms are two maintainable elements made of the same material, affected by the same degradation (exfoliation and erosion) and located at the same work level, it is economically convenient to carry out maintenance/restoration activities on both and

at the same time. Moreover, since the fixed costs of site organisation and labour are the same, it is possible to decide, depending on the available budget, whether to intervene at the same time on the four elevations of the Cloister or only on one part (Fig. 20).

<Z_CME_01.11.05 Id 45>					
A	B	C	D	E	F
ID_Elemento	Costo manutenzione per ET	Costi fissi di cantiere	Costo totale di manutenzione	PED	EG
01.11.05.24 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.25 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.26 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.27 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.29 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.30 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.31 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
Totale generale: 7	5129.07€		7072.06€		1409.17€

<Z_CME_01.11.06 Id 45>					
A	B	C	D	E	F
ID_Elemento	Costo manutenzione per ET	Costi fissi di cantiere	Costi totali di manutenzione	PED	EG
01.11.06.25 Stemma	189.52€	277.57€	467.09€	59%	112.62€
01.11.06.26 Stemma	214.75€	277.57€	492.32€	56%	121.08€
01.11.06.27 Stemma	189.52€	277.57€	467.09€	59%	112.62€
Totale generale: 3	593.79€		1426.50€		346.32€

Figure 20 - Maintenance costs and economic gains (Abaco Revit software).

Table 5 shows the total costs of maintenance (CTM) and the economic gains (EG) that can be derived from the opportunity to intervene simultaneously on maintainable elements, such as arches and coats of arms, located in the four elevations.

Tabella 5 - Schedule of opportunity maintenance costs

Prospetto	CMP	EG	CTM
Nord-Est	5.998,20 €	1.197,21 €	4.800,99 €
Sud-Ovest	1.211,21 €	92,52 €	1.118,69 €
Sud-Est	5.176,14 €	1.016,96 €	4.159,18 €
Nord-Ovest	8.980,60 €	2.033,06 €	6.947,54 €
Totale	21.366,15 €	4.339,75 €	17.026,40 €

7. CONCLUSION AND FUTURE PERSPECTIVE

Digitisation of cultural heritage seems to have become increasingly crucial for its care and re-use. For this reason, it is necessary to increase knowledge about the built heritage to support sustainable maintenance and conservation strategies through the development of user-friendly resource management tools. This also supports decision-making towards a preservation strategy that is accessible to all stakeholders.

The maintenance of historic buildings can be seen as a complex decision-making problem due to the limited availability of economic resources. In decision-making processes, it is important to have a method that follows standard procedures that support technicians and managers.

This research aimed to standardise procedures in order to optimise the management and minimise maintenance costs of heritage buildings.

The method here described is based on Building

[

Condition Assessment (BCA) techniques integrated with Building Information Modeling (BIM) methodologies.

The method was applied creating a BIM model of a case study, the Brunelleschi Cloister, monitoring and tracking its deterioration, collecting and classifying different data that coexist in a cultural asset model.

The data for the model is directly managed by a purpose-built Revit-Dynamo system that directly links a Master database in Excel spreadsheets and the BIM model in Revit to create a “digital dossier” of the state of affairs and the design of maintenance works.

The Revit-Dynamo system provided qualitative feedback (by means of a chromatic scale representing the state of deterioration of the technical elements) and quantitative feedback (numerical values of the index of deterioration of the technical elements). Thus,

technicians can identify the elements having the greatest need for intervention. In addition, the system is able to analyse the economics of maintenance works, identifying the economic gain (EG) possible by applying opportunity maintenance (group maintenance) instead of individual maintenance for technical elements.

However, there are limitations to the system. In fact, the use of external databases, such as Excel spreadsheets or even Access databases, linked to the BIM model through Dynamo must be located in a single server without undergoing directory changes, as this could result in input/output information not being read/written.

The main difficulties for technicians, however, may be the lack of familiarity with BIM methodologies and the still high costs of using BIM Authoring Software.

* **Giovanna Acampa**, aculty of Engineering and Architecture, Kore University of Enna, Italy
e-mail: giovanna.acampa@unikore.it

** **Claudia Mariaserena Parisi**, Faculty of Engineering and Architecture, Kore University of Enna, Italy
e-mail: claudia.parisi@unikore.it

Bibliography

ABBOTT G.R., MC DULING J. J., PARSONS S. and C. SCHOEMAN J., *Building condition assessment: A performance evaluation tool towards sustainable asset management*, in CIB World Building Congress 2007.

ACAMPA G. and GRASSO M., *Heritage Evaluation: restoration plan through HBIM and MCDA*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 949: 012061, 2020.

ACAMPA G. and PARISI C.M., *Management of Maintenance Costs in Cultural Heritage*, in Appraisal and Valuation (MORANO P., OPPIO A., ROSATO P., SDINO L. and TAJANI F., eds.), *Green Energy and Technology*, Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 195–212.

ACAMPA G., MARINO G. and PARISI C.M., *Social Network as Tool for the Evaluation of Sustainable Urban Mobility in Catania (Italy)*, in New Metropolitan Perspectives (BEVILACQUA C., CALABRÒ F. and DELLA SPINA L., eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies*. vol. 178. Springer International Publishing, Cham, 2021a, pp. 243–253.

ACAMPA G., GRASSO M., MARINO G. and PARISI C.M., *Tourist Flow Management: Social Impact Evaluation through Social Network Analysis*, Sustainability. 12: 731, 2020.

ACAMPA G., BATTISTI F., DI PIETRO G. and C.M. PARISI C.M., *City information model for the optimization of urban maintenance cost*. P. 090002. Crete, Greece, 2021b.

AHMED E., *An Integrated Condition Assessment Model for Educational Buildings Using BIM*, Doctoral Thesis, Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, 2012, p. 284.

AMASUOMO T.T., ATANDA J. and BAIRD G., *Development of a Building Performance Assessment and Design Tool for Residential Buildings in Nigeria*. Procedia Engineering. 180: 221–230, 2017.

ASHRAF F. and NAGY G., *HBIM as a Tool for Branding Historical Egyptian Sites by Utilizing Augmented Reality*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 397: 012012, 2019.

ASHWORTH A., *Estimating the life expectancies of building components in life cycle costing calculations*. Structural Survey. 14: 4–8, 1996.

BARAZZETTI L., BANFI F. and BRUMANA R., *Historic BIM in the Cloud*, in Euro-Mediterranean Conference. Springer, 2016, pp. 104–115.

BARONTINI A., Alarcon C., SOUSA H.S., OLIVEIRA D.V., MASCIOTTA M.G. and AZENHA M., *Development and Demonstration of an HBIM Framework for the Preventive Conservation of Cultural Heritage*. International Journal of Architectural Heritage, 2021, pp. 1–23.

BASSIER M., HADJIDEMETRIOU G., VERGAUWEN M., VAN ROY N. and VERSTRYNCE E., *Implementation of Scan-to-BIM and FEM for the documentation and analysis of heritage timber roof structures*, in Euro-mediterranean conference. Springer, 2016, pp. 79–90.

BRUNO N. and Roncella R., *HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling*. Remote Sensing, 2019, 11: 1751.

BRUNO S. and FATIGUSO F., *Building conditions assessment of built heritage in historic building information modeling*.

International Journal of Sustainable Development and Planning, 2018, 13: 36–48.

BRUNO S., DE FINO M. and FATIGUSO F., *Historic Building Information Modelling: performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management*. Automation in Construction, 2018, 86: 256–276.

BUILDINGSMART FINLAND, *Common BIM Requirements. Series 12*. In Use of Models in Facility Management, 2012.

CABLE J.H. and DAVIS J.S., *Key Performance Indicators for Federal Facilities Portfolios*. National Academies Press, Washington, D.C., 2004, p. 44.

CHE ANI A.I., JOHAR S., MOHD TAWIL N., ABD RAZAK M.Z. and HAMZAH N., *Building Information Modeling (BIM) - Based Building Condition Assessment: a survey of water ponding defect on a flat roof*. Jurnal Teknologi 75, 2015.

CHEW M.Y.L. and DE SILVA N., *Maintainability problems of wet areas in high-rise residential buildings*. Building Research and Information, 2003, 31: 60–69.

CHIABRANDO F., LO TURCO M. and RINAUDO F., *Modeling the decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 42, 2017.

DEJACO M.C., RE CECCONI F. and MALTESE S., *Key Performance Indicators for Building Condition Assessment*. Journal of Building Engineering, 2017, 9: 17–28.

DI CASTRI G., *Project management per l'edilizia: ingegneria economica: applicazioni e sviluppo*. Flaccovio, Palermo, 2009.

DI PIETRO G., RINNONE F., PARISI C.M., CAPRÌ S. and BIANCO G., *STATUS App: A Mobile Data Collection Tool for Buildings Adjacent to Tunneling Works*. Buildings, 2020, 10: 7.

DORE C. and MURPHY M., *Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites*, in 2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 2012, pp. 369–376.

ENSHASSI A.A. and EL SHORAFI F., *Key performance indicators for the maintenance of public hospitals buildings in the Gaza Strip*. Facilities, 2015.

FERRETTI V., BOTTERO M. and MONDINI G., *Decision making and cultural heritage: An application of the Multi-Attribute Value Theory for the reuse of historical buildings*. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15: 644–655.

FORTE C., *Valore di scambio e valore d'uso sociale dei beni culturali immobiliari*. Restauro, Napoli, 1977, p. 21.

FORTE F., *Historic, Artistic and Cultural Patrimony for a "Habitable City": Incentives for Care*, in Integrated Evaluation for the Management of Contemporary Cities (MONDINI G., FATTINANZI E., OPIPO A., BOTTERO M. and STANGHELLINI S., eds.), Green Energy and Technology. Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 233–243.

FRANCESCHINI F., *Designing Performance Measurement Systems: Theory and Practice of Key Performance*

Indicators. Springer Berlin Heidelberg, New York, NY., 2018.

HOLY FATHER FRANCIS, 2015, *Laudato si'*. Available at http://www.vatican.va/content/francesco/en/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html, Accessed April 18, 2021.

ISHIZUKA Y., *The degradation and Prediction of Service Life of Building Component*, in Second International Conference on Durability of Building Materials and Components, September 14-16, 1981: Preprints, vol. 13, p. 69, US Department of Commerce, National Bureau of Standards.

JOUAN P. and HALLOT P., *Digital twin: Research framework to support preventive conservation policies*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9: 228.

KENSEK K., *Visual programming for building information modeling: energy and shading analysis case studies*. Journal of Green Building, 2015, 10: 28–43.

KENSEK K.M., *Integration of Environmental Sensors with BIM: case studies using Arduino, Dynamo, and the Revit API*. Informes de La Construcción, 2014, 66: e044.

LEITE F.M., VOLSE R.A., ROMAN H.R. and SAFFARO F.A., *Building condition assessment: adjustments of the Building Performance Indicator (BPI) for university buildings in Brazil*. Ambiente Construído, 2020, 20: 215–230.

LIN Y.-C. and SU Y.-C., *Developing Mobile- and BIM-Based Integrated Visual Facility Maintenance Management System*. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 1–10.

LINGGAR S., AMINULLAH A. and TRIWIYONO A., *Analysis of building and its components condition assessment case study of dormitory buildings*. MATEC Web of Conferences, 2019, 258: 03003.

LÓPEZ F., LERONES P., LLAMAS J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J. and ZALAMA E., *A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)*. Multimodal Technologies and Interaction, 2018, 2: 21.

MARMO R., NICOLELLA M., POLVERINO F. and TIBAUT A., *A Methodology for a Performance Information Model to Support Facility Management*. Sustainability, 2019, 11: 7007.

MARMO R., POLVERINO F., NICOLELLA M. and TIBAUT A., *Building performance and maintenance information model based on IFC schema*. Automation in Construction, 2020, 118: 103275.

MATOS R., RODRIGUEZ F., RODRIGUES H. and COSTA A., *Building condition assessment supported by Building Information Modelling*. Journal of Building Engineering, 2021, 38.

MESSNER J., ANUMBA C., DUBLER C., GOODMAN S., KASPRZAK C., KREIDER R., LEICHT R., SALUJA C. and ZIKIC N., *BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.2*. Computer integrated Construction Research Program, Penn State, 2019.

MOGHIMI S., MAT S., LIM C.H., ZAHARIM A. and SOPIAN K., *Building energy index (BEI) in large scale hospital: case study of Malaysia*. in 4th WSEAS International Conference on Recent Reseaches in Geography Geology, Energy,

Environment and Biomedicine, Corfu Island, Greece, 2011.

MOHD NOOR S., SHING MEI C., SYAHRIZAL IBRAHIM I., NABILAH SARBINI N., HANIM OSMAN M. and AZEYAH KHIYON N., *Heritage building condition assessment: a case study from Johor Bahru, Malaysia*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 220: 012024.

MORETTI N. and RE CECCONI F., *A Cross-Domain Decision Support System to Optimize Building Maintenance*. Buildings, 2019, 9: 161.

MURPHY M., MCGOVERN E. and PAVIA S., *Historic building information modelling (HBIM)*. Structural Survey, 2009, 27: 311–327.

MUSSO S.F., editor, *Trattato di restauro architettonico*. 13: *Tecniche di restauro: aggiornamento / diretto da Stefano Francesco Musso*. UTET, Torino, 2013, p. 372.

NICOLAI R.P. and DEKKER R., *Optimal Maintenance of Multi-component Systems: A Review*, in *Complex System Maintenance Handbook*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer London, London, 2008, pp. 263–286.

NICOLELLA M., *Programmazione degli interventi in edilizia*. Guida al libretto di manutenzione del fabbricato, 2003.

NOUSIAS S., ARVANITIS G., LALOS A.S., PAVLIDIS G., KOULAMAS C., KALOGERAS A. and MOUSTAKAS K., *A saliency aware CNN-Based 3D Model simplification and compression framework for remote inspection of heritage sites*. IEEE Access, 8: 169982–170001, 2020.

OPPIO A., BOTTERO M., FERRETTI V., FRATESI U., PONZINI D. and PRACCHI V., *Giving space to multicriteria analysis for complex cultural heritage systems: The case of the castles in Valle D'Aosta Region, Italy*. Journal of Cultural Heritage, 16: 779–789, 2015.

ORENI D., KARIMI G. and BARAZZETTI L., *Applying BIM to built heritage with complex shapes: The ice house of Filarete's Ospedale Maggiore in Milan, Italy*, 2017.

PAESAGGIO E PATRIMONIO CULTURALE - ISTAT, *Rapporto Bes 2020: il benessere equo e sostenibile in Italia*. ISTAT Ist. Naz. Stat. Available at <https://www.istat.it/it/archivio/254761>. Accessed March 29, 2021.

PAS 1192:2014, *Specification for Information Management for the Operational Phase of Assets Using Building Information Modelling: Incorporating Corrigendum No. 1*. BSI Standards Limited: London, UK, 2014.

PIAIA E., MAIETTI F., DI GIULIO R., SCHIPPERS-TRIFAN O., VAN DELFT A., BRUINENBERG S. and OLIVADESE R., *BIM-based Cultural Heritage Asset Management Tool. Innovative Solution to Orient the Preservation and Valorization of Historic Buildings*. International Journal of Architectural Heritage, 2020, pp. 1–24.

POCOBELLI D.P., BOEHM J., BRYAN P., STILL J. and GRAU-BOVÉ J., *BIM for heritage science: a review*. Heritage Science, 6: 30, 2018.

RE CECCONI F., MALTESE S. and DEJACO M.C., *Leveraging BIM for digital built environment asset management*. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2: 14.

RE CECCONI F., MORETTI N. and CLAUDIO DEJACO M., *Measuring the performance of assets: a review of the facility condition index*. International Journal of Strategic Property Management, 2019a, 23: 187–196.

RE CECCONI F., MORETTI N., MALTESE S. and TAGLIABUE L.C., *A BIM-Based Decision Support System for Building Maintenance*. in *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering* (I. MUTIS and T. HARTMANN, eds.). Springer International Publishing, Cham, 2019b, pp. 371–378.

RICS, *Stock condition surveys*. Available at https://www.isurv.com/directory_record/2975/stock_condition_survey. Accessed January 17, 2021. RICS, 2005.

SADEGHI M., ELLIOTT J.W., PORRO N. and STRONG K., *Developing building information models (BIM) for building handover, operation and maintenance*. Journal of Facilities Management, 2019, 17: 301–316.

SINGH AHLUWALIA S., *A framework for efficient condition assessment of the building infrastructure*, 2008.

STANDARD & POOR'S, 1995, *Standard & Poor's Property Condition Assessment Criteria*. Partn. Eng. Sci. Inc. Available at <https://www.partneresi.com/resources/library/standard-and-poors-property-condition-assessment-criteria>. Accessed January 17, 2021.

STRAUB A., *Dutch standard for condition assessment of buildings*. Structural Survey, 2009, 27: 23–35.

SU Y.C., LEE Y.C. and LIN Y.C., *Enhancing Maintenance Management Using Building Information Modeling in Facilities Management*. Seoul, Korea, 2011.

TOTARO G. and GASPAROLI P., *Sui processi di manutenzione del patrimonio costruito storico tutelato. Convenienze economiche, sviluppi occupazionali e altre esternalità positive*, in *Lo Stato dell'Arte* 12, 2014, pp. 743–750.

UNI 11337-4:2017. *Building and civil engineering works - Digital management of the informative processes - Part 4: Evolution and development of information within models, documents and objects*. Available at http://store.uni.com/catalogo/uni-11337-4-2017?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_option&josso_partnerapp_host=store.uni.com. Accessed March 15, 2020.

UNI EN 15341. 2019. *UNI EN 15341:2019 Maintenance - Key Performance Indicators*. Available at <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-15341-2019>. Accessed October 6, 2020.

U.S. GENERAL SERVICE ADMINISTRATION PUBLIC BUILDINGS OFFICE OF DESIGN AND CONSTRUCTION. 2011. *GSA Building Information Modeling Guide Series: 08—GSA BIM Guide for Facility Management*; General Services Administration: Washington, DC, USA.

UZARSKI D.R., GRUSSING M.N. and CLAYTON J.B., *Knowledge-based condition survey inspection concepts*. Journal of Infrastructure Systems, 2007, 13: 72–79.

VILLA V., EASTMAN C. and DI GIUDA G.M., *Il BIM: Guida Completa al Building Information Modeling per Committenti, Architetti, Ingegneri, Gestori Immobiliari e*

Imprese. Hoepli, Milano, 2016.

YACOB S., ALI A.S. and PENG A.-Y.C., 2016. *Building Condition Assessment: Lesson Learnt from Pilot Projects*. MATEC Web of Conferences, 2016, 66: 00072.

YANG X., LU Y.-C., MURTIYOSO A., KOEHL M. and GRUSSENMEYER P., *HBIM modeling from the surface mesh and its extended capability of knowledge representation*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8: 301.

La gestione del patrimonio culturale: ottimizzazione delle procedure e dei costi di manutenzione

Giovanna Acampa*,
Claudia Mariaserena Parisi**

parole chiave: patrimonio culturale,
gestione della manutenzione, manutenzione di opportunità,
BCA, BIM, ottimizzazione dei costi

Abstract

La natura complessa, incerta e dinamica della gestione delle attività di manutenzione è fonte di continua preoccupazione per i facility managers che operano nel settore del patrimonio edilizio esistente. In particolare, nel campo dei beni culturali, la tutela, conservazione e valorizzazione sono una priorità per preservare il valore artistico-culturale dei beni storici alle generazioni future. Purtroppo, alla complessa gestione della manutenzione si aggiungono problemi relativi alle risorse economiche sempre più limitate. In questa situazione infatti, sembra essere diventato uno standard comune intervenire solo quando si presentano effettivi casi di emergenza, causando così inefficienze nella pianificazione delle attività del Facility Management e, conseguentemente, un aumento dei costi. Questo paper espone un metodo per supportare le scelte decisionali dei gestori nelle attività di manutenzione attraverso i processi di Building Condition Assessment (BCA) integrati ai sistemi di Building Information Modeling (BIM). L'obiettivo principale è sviluppare una strategia di gestione, dando ai tecnici il necessario supporto per

individuare le priorità di intervento in modo pratico, semplice e automatizzato al fine di ottimizzare procedure e costi della manutenzione. Per raggiungere questo obiettivo, il metodo propone un processo di BCA che utilizza i seguenti strumenti: 1) scomposizione dell'edificio secondo la norma UNI 8290 adattata agli edifici storici; 2) un indice del livello di degrado e una matrice di connessione tecnologica e operativa per valutare manutenzioni di opportunità; 3) ispezioni in situ e raccolta dei dati su fogli di calcolo Excel che fungono da Database esterno; 4) gestione dei dati in ambiente BIM utilizzando Revit come BIM Authoring Software e scripts in Dynamo come linguaggio di programmazione visiva per il collegamento tra Database esterno e modello BIM. I risultati della ricerca evidenziano l'importanza del BIM nel Facility Management degli edifici di pregio storico-culturale consentendo l'aggiornamento permanente delle informazioni in un unico modello mostrando un grande potenziale per il supporto dei facility managers nella gestione delle attività di manutenzione degli edifici e nell'ottimizzazione dei costi.

1. INTRODUZIONE

“Il benessere di una società si riflette nel suo modo di abitare il territorio e di prendersi cura della propria eredità culturale” (ISTAT, 2021). Nella Enciclica Laudato si', Papa Francesco ha definito il patrimonio storico, artistico e culturale come *“parte dell'identità condivisa di ogni luogo e fondamento su cui costruire una città abitabile”* (cap. IV, Ecologia integrale; punto 143) (Holy Father Francis, 2015). Inoltre, il senso del valore sociale *“ci spinge a concepire strategie più ampie per fermare il degrado ambientale e per incoraggiare una “cultura della cura” che permei tutta la società”* (cap. VI, Educazione ecologica e spiritualità; punto 231) (2015).

La disciplina estimativa e valutativa è sempre stata vicina al tema del patrimonio culturale abbracciando l'argomento sia da un punto di vista economico che sociale. Le prime riflessioni in questo contesto sono state di Carlo Forte (1977), il quale ha ampliato il concetto di valore economico dei beni culturali attraverso la formulazione del valore d'uso sociale (Forte, 1977). Ci troviamo dunque davanti ad un tema che tratta allo stesso tempo di cultura, economia e significato del valore sociale (Forte, 2018).

In Italia, per ragioni storiche, questi aspetti assumono una speciale rilevanza, tanto che la tutela del paesaggio e del patrimonio storico e artistico è menzionata anche come principio fondamentale all'art. 9 dalla Costituzione Italiana¹.

Nonostante la consapevolezza della straordinaria ricchezza del patrimonio culturale italiano², della sua importanza come identità sociale di un Paese e della testimonianza unica di eventi storici che può trasmettere alle generazioni future, negli ultimi decenni si sono registrate delle contraddizioni negli investimenti pubblici italiani che risulta tra le meno generose d'Europa nella gestione del patrimonio culturale (Paesaggio e patrimonio culturale - ISTAT, 2021). L'analisi condotta sui dati dei Bilanci dello Stato per la missione³ “tutela e valorizzazione del patrimonio culturale e delle attività paesaggistiche” ha mostrato un decremento degli investimenti pubblici in

questo settore di oltre il 40% (Fig. 1). Ciò rende il tema proposto di rilevante importanza per i soggetti che si occupano della gestione e manutenzione dei beni culturali dello Stato e di proprietà privata.

Figura 1 - Finanziamenti del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo (2010-2020) (Acampa and Parisi, 2021).

La natura complessa, incerta e dinamica della conservazione del patrimonio culturale è fonte di continua di preoccupazione per i facility managers, i quali, in una situazione di crisi economica in cui le risorse sono sempre più limitate, si trovano a dover prendere decisioni su quali siano le azioni di manutenzione di prioritaria importanza e quali possano essere rimandate. Pertanto, la manutenzione di emergenza sembra essere diventata uno standard comune che causa inefficienze nella pianificazione delle attività del Facility Management e, conseguentemente, un aumento dei costi della manutenzione.

Vi è dunque la necessità di supportare i gestori nella tutela e conservazione dei beni culturali ottimizzando procedure e costi della manutenzione privilegiando metodi di prevenzione così come suggerito dallo stesso “Codice dei beni culturali e del paesaggio” (D.Lgs. 42/2004). La manutenzione preventiva⁴ ha infatti lo scopo di contrastare il degrado cui sono soggetti tutti gli edifici con azioni semplici, continue nel tempo, a basso costo e con un’alta efficacia preventiva che consentirebbe così un più proficuo impiego delle risorse su un più vasto assets di beni (Totaro and Gasparoli, 2014).

¹ Art. 9 della Costituzione italiana «La Repubblica promuove lo sviluppo e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione».

² L'Italia possiede il maggior numero di beni culturali presenti sul territorio con 55 siti iscritti alla lista UNESCO. Un patrimonio culturale che è gestito dal Ministero della Cultura (ex MiBACT) che esercita la funzione di tutela, gestione e valorizzazione dei beni culturali e ambientali dal 1998 e che applica un principio di programmazione (art. 1, comma 1, D. Lgs 20 ottobre 1998, n. 368). Tale principio è stato confermato nel Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D. Lgs. n.42/2004) con il termine di conservazione programmata con il quale si assicura che la conservazione del patrimonio culturale avviene mediante attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro.

³ La legge di contabilità e finanza pubblica n. 196 del 31 dicembre 2009 individua tre livelli di aggregazione (missioni, programmi e

azioni) nel bilancio dello Stato al fine di consentire una maggiore conoscenza delle scelte allocative. Le missioni sono “le principali funzioni e obiettivi strategici di spesa”, a cui possono concorrere più amministrazioni. In altre parole, le missioni rappresentano i principali obiettivi perseguiti attraverso la spesa pubblica. La legge di bilancio dello Stato per il triennio 2019-2021 ha fissato 34 missioni. La missione 21 riguarda “tutela e valorizzazione del patrimonio culturale e delle attività paesaggistiche”

⁴ Dalle norme UNI 9910 per la manutenzione preventiva viene fornita la seguente definizione: la manutenzione eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un'entità.

Il Codice degli Appalti Pubblici (D.Lgs. 50/2016) parla di piani di manutenzione⁵ da redigere in fase di esecuzione (art. 147, c. 3) e di “curare la costante verifica di validità del programma di manutenzione, dei manuali d’uso e dei manuali di manutenzione, modificandone e aggiornandone i contenuti a lavori ultimati” (art. 101, c. 3, lett. b). Allo stesso tempo l’art. 23 comma 13, recependo la direttiva europea sugli appalti pubblici (2014/24/UE), apporta una notevole innovazione nel campo delle costruzioni suggerendo l’uso di metodi e strumenti elettronici specifici utilizzando piattaforme interoperabili che permettano il coinvolgimento di specifiche progettualità tra i progettisti.

Dunque, tenendo conto della sempre più pressante richiesta di recupero e conservazione degli edifici esistenti e della necessità di dover adeguare metodi, processi e strumenti elettronici di progettazione alle nuove direttive entro pochi anni (DM 560/2017)⁶, i progettisti/valutatori non possono più prescindere dall’utilizzo dei sistemi di Building Information Modeling (BIM).

1.1 Obiettivo della ricerca

Durante il loro ciclo di vita, gli edifici del patrimonio esistente sono costantemente minacciati dal deterioramento naturale e antropico (Che Ani et al., 2015). Sebbene ogni edificio abbia una vita utile limitata nel tempo, per i beni storico-culturali non è lo stesso. I gestori devono far fronte alle difficoltà di conservazione fisica e prestazionale del bene culturale il più a lungo possibile per preservare e valorizzare le testimonianze storiche alle generazioni future. Purtroppo però, i budget sempre più limitati non aiutano in questa missione.

Il paper ha l’obiettivo principale di mostrare un metodo per ottimizzare le procedure e i costi della manutenzione del patrimonio culturale attraverso un sistema di supporto alle decisioni basato su BIM. In particolare, il metodo propone un processo di *Building Condition Assessment (BCA)* applicato al *Facility Management* degli edifici storico-culturali in ambiente BIM. Tale obiettivo viene raggiunto attraverso la definizione di alcuni obiettivi specifici:

- Definizione degli *strumenti* più idonei per integrare i processi di BCA in ambiente BIM.
- Definizione delle *procedure* operative per migliorare la collaborazione e l’interoperabilità tra i diversi stakehol-

ders che prendono parte ai processi di manutenzione secondo metodologie BIM;

- Definizione di un *metodo* che tenga conto degli aspetti tecnici-economici-organizzativi attraverso la realizzazione di un *Maintenance Workflow Management*.

Il metodo della presente ricerca è applicato al Chiostro del Brunelleschi al fine di rispondere alle esigenze dei gestori dell’Opera di Santa Croce, i quali esprimono la necessità di un sistema di supporto alle decisioni che utilizzi nuove tecnologie per ottimizzare la gestione delle procedure e dei costi di manutenzione degli edifici del patrimonio culturale di loro competenza⁷.

Il sito culturale è anche oggetto di indagine nell’ambito di un progetto finanziato dall’UE (WARMEST⁸) insieme ad altri 2 siti: il Patio de Los Leones (Patronato de la Alhambra y Generalife, Granada, Spagna) e il sito archeologico sottomarino di Marzamemi (Museo subacqueo Marzamemi, Sicilia, Italia).

2. STATO DELL’ARTE

In letteratura esistono diversi studi che hanno affrontato il tema della manutenzione, del restauro e del riuso degli edifici storici. Molti ricercatori hanno utilizzato tecniche di analisi multicriteriali per supportare i gestori nelle scelte decisionali in funzione a diversi criteri e alternative (Ferretti et al., 2014; Oppio et al., 2015; Acampa and Grasso, 2020). Altri autori invece hanno volutamente semplificare le procedure dei progettisti e dei tecnici, utilizzando gli ormai noti sistemi di Building Information Modeling per la valutazione delle condizioni dell’edificio per indagare sullo stato di conservazione e facilitare le scelte decisionali per la manutenzione (Piaia et al., 2020; Barontini et al., 2021).

Come è noto, il BIM si è affermato come processo collaborativo tra gli stakeholders di un progetto di costruzione

⁵ La Legge Merloni (L.109/94) e il successivo Regolamento di Attuazione (D.P.R. 554/99) parlarono per la prima volta di Piani di Manutenzione come “il documento complementare al progetto esecutivo che prevede, pianifica e programma, tenendo conto degli elaborati progettuali esecutivi effettivamente realizzati, l’attività di manutenzione dell’intervento al fine di mantenerne nel tempo la funzionalità, le caratteristiche di qualità, l’efficienza ed il valore economico”, che “assume contenuto differenziato in relazione all’importanza e alla specificità dell’intervento” (Nicolella, 2003).

⁶ Decreto Ministeriale n.560 del 01 Dicembre 2017 “Decreto BIM”

⁷ Tesi di dottorato in “Infrastrutture Civili per il Territorio” (Ciclo XXXIII) presso l’Università degli Studi di Enna “Kore”; Autore: PhD Ing. Claudia Mariaserena Parisi, Tutor: Prof.ssa Arch. Giovanna Acampa, Co-Tutor: Prof. Ing. Maurizio Nicoletta; SSD: ICAR/22; Titolo della tesi: “BIM-based support system per l’ottimizzazione dei costi di manutenzione del patrimonio culturale: il caso del Chiostro del Brunelleschi a Santa Croce, Firenze (Italia), A.A. 2019-2020.

⁸ WARMEST (LoW Altitude Remote sensing for the Monitoring of the state of cultural hEritage Sites: building an inTegrated model for maintenance). Si tratta di un progetto Horizon 2020 Marie Curie Research and Innovation Staff Mobility Project (H2020-Marie Skłodowska-Curie Actions-RISE-2017) che ha avuto inizio a Dicembre 2017. Il suo obiettivo è quello di analizzare il degrado dei monumenti a causa di fattori come il cambiamento climatico e il crescente numero di turisti, creare un modello per descrivere e anticipare il fenomeno, e mettere in atto un sistema di supporto decisionale di facile utilizzo che aiuterà nella creazione di piani di manutenzione preventiva. Sito web: <https://warmestproject.eu/>

per lo scambio di informazioni attraverso un unico modello per migliorare la qualità progettuale e risparmiare costi e tempi in fase di esecuzione dei lavori. Negli ultimi decenni, numerosi studi hanno dimostrato come la soluzione BIM per la modellazione parametrica 3D del patrimonio culturale sia in grado di supportare anche le fasi di conservazione (Jouan and Hallot, 2020).

In una revisione della letteratura sul BIM applicato al patrimonio culturale, Pocobelli et al., ma anche López (López et al., 2018; Pocobelli et al., 2018) osservano che il patrimonio costruito è caratterizzato da una morfologia complessa e da caratteristiche non omogenee, che si scontrano con le procedure standardizzate. Alcuni ricercatori hanno affrontato il problema della complessa geometria degli elementi tecnici del patrimonio culturale attraverso la modellazione "Scan-to-BIM" che permette di migliorare l'efficienza dei processi di ricostruzione 3D, tempi e costi. (Barazzetti et al., 2016; Oreni et al., 2017; Yang et al., 2019; Nouisias et al., 2020). Altre ricerche hanno affrontato il problema dell'uso dei modelli HBIM per la diffusione dei dati e la collaborazione tra le parti interessate attraverso applicazioni Web, Realtà Aumentata e Realtà Virtuale (Ashraf and Nagy, 2019), l'interoperabilità tra soluzioni BIM e GIS (Acampa et al., 2021b), la valutazione delle condizioni e analisi strutturale nell'ambiente BIM (Bassier et al., 2016; Chiabrando et al., 2017).

2.1 Building Condition Assessment (BCA)

Il BCA (valutazione delle condizioni di un edificio) è un processo di valutazione che ha lo scopo di raccogliere quante più informazioni possibili sullo stato fisico-prestazionale di un edificio. La sua corretta programmazione è importante per aiutare i tecnici ad avere una migliore comprensione delle criticità e dei comportamenti che può avere un edificio, facilitando le scelte decisionali nell'ambito delle attività di manutenzione (Re Cecconi et al., 2017). Il BCA è utile per classificare le priorità di intervento e la quantità di riparazioni e di costi necessari.

Il BCA è un processo importante non solo per supportare il sistema decisionale ma anche per il raggiungimento degli standard qualitativi del servizio di manutenzione. Infatti, un basso livello di prestazioni dell'edificio può avere un impatto negativo sull'organizzazione e comporta un aumento dei costi operativi.

Le tecniche BCA sono state elaborate a partire dalla fine degli anni 90' principalmente per la necessità di comprendere le prestazioni degli asset (Standard & Poor's, 1995; RICS, 2005; Singh Ahluwalia, 2008) e mantenerle il più efficienti possibili.

Secondo Ahluwalia (2008), il processo di BCA si suddivide in quattro fasi (Fig. 2):

Figura 2 - Quattro fasi del processo valutazione delle condizioni (Singh Ahluwalia, 2008).

2.1.1 Asset Hierarchy – Gerarchizzazione degli asset

La *gerarchizzazione degli asset* in una scomposizione dell'organismo edilizio nelle sue componenti elementari. La norma ISO 12006-2:2015¹⁰, sebbene non sia del tutto completa, definisce un quadro di riferimento per lo sviluppo dei sistemi di classificazione dell'ambiente costruito. La Tabella 1 mostra che a livello internazionale esistono diverse classificazioni:

Tabella 1 - Sistemi di classificazioni internazionali

Sistema di classificazione	Nazione
OmniClass	(Nord America)
MasterFormat	(Stati Uniti e Canada)
UniFormat II	(USA e Canada)
UniClass NBS	(UK)
European CEEC building classification	(Europa)
Canadian CIQS classification	(Canada)
CoClass	(Svezia)
CCS	(Danimarca)
TALO 2000	(Finlandia)
UNI 8290	(Italia)

2.1.2 Evaluation Mechanism - Meccanismo di valutazione

Gli studi sulle metodologie di valutazione delle condizioni dell'edificio sono da sempre indirizzati verso criteri

⁹ Scan to BIM è il processo che cattura l'ambiente costruito utilizzando la tecnologia di scansione laser 3D e lo trasforma in un modello BIM integrato anche se ad oggi in modo non automatizzato.

¹⁰ ISO 12006-2:2015 (International Organization for Standardization) - "Building construction - Organization of information about construction works Part 2: Framework for classification".

di determinazione delle prestazioni delle componenti edilizie (Ashworth, 1996; Chew and De Silva, 2003). In letteratura si trovano diversi studi sulle tecniche di valutazione delle condizioni (Tab. 2):

Tabella 2 - Sistemi di classificazioni internazionali

Metodi di valutazione	Autore
Dutch standard	(Straub, 2009; Yacob et al., 2016)
Distress method and Direct-condition rating survey	(Linggar et al., 2019)
JKR 21602-0004-13	(Mohd Noor et al., 2019)
National Health Facilities Audit	(Abbott et al., 2007)
BREEAM and LEED	(Amasuomo et al., 2017)
Key Performance Indicators (KPIs)	(Franceschini, 2018; Marmo et al., 2019, 2019, 2020; UNI EN 15341, 2019)
BUILDER RECAP TOBUS	(Singh Ahluwalia, 2008)

La normativa UNI EN 15341 definisce le Key Performance Indicators (KPI) della Funzione di Manutenzione e fornisce le linee guida per definire un set di indicatori idonei per valutare e migliorare l'efficacia, l'efficienza e la sostenibilità nella manutenzione degli asset fisici esistenti siano essi impianti industriali, infrastrutture, impianti civili, edi-

fici o sistemi di trasporto, ecc. nel quadro dei fattori di influenza esterni ed interni.

Dunque, le KPIs potrebbero essere un valido strumento per monitorare le condizioni dell'edificio nel tempo, ancora meglio se i controlli sono pianificati periodicamente attraverso il ciclo di vita del bene (Dejaco et al., 2017). Secondo Dejaco et al. (2017) e Marmo et al. (2019), i KPIs sono il modo migliore per misurare le prestazioni degli edifici permettendo di avere informazioni accessibili e utili sugli edifici e sulle loro parti (Dejaco et al., 2017; Marmo et al., 2019).

Inoltre, Cable e Davis (2004) affermano che la misurazione delle prestazioni utilizzando i KPIs stabiliti aiuta il team di senior management a prendere decisioni strategiche (Cable and Davis, 2004). La Tabella 3 mostra un elenco di KPIs usati nelle valutazioni delle condizioni degli edifici:

2.1.3 Field Inspection - Ispezioni in campo

L'ispezione in campo è il momento più importante del processo in quanto il tecnico deve essere in grado di raccogliere le informazioni necessarie all'applicazione del metodo di valutazione delle condizioni dell'edificio. Le ispezioni però spesso causano un eccesso di costi se non sono organizzate in modo efficiente e devono essere pianificate considerando le caratteristiche del bene (Uzarski et al., 2007). La documentazione e la registrazione dello stato attuale del patrimonio è il primo passo verso un efficace sviluppo dei processi di gestione, conservazione e/o restauro. Pertanto, la raccolta sistematica, l'archiviazione e l'elaborazione di tutti i tipi di informazioni disponibili sugli edifici sono azioni fondamentali per determinarne le caratteristiche geometriche e lo stato fisico attuale, i difetti o le patologie, lo stile architettonico, le diverse fasi di costruzione, nonché le circostanze storiche e culturali di quando sono stati concepiti (Bruno and Fatiguso, 2018; Bruno et al., 2018; Bruno and Roncella, 2019). Per standardizzare il processo, molti altri ricercatori, anche in settori diversi da quelli dei beni culturali, hanno sviluppato liste di controllo in formato sia cartaceo che elettronico¹¹. Inoltre, sono stati utilizzati anche sistemi di raccolta dati su dispositivi digitali appositamente realizzati per digitalizzare le informazioni direttamente in situ senza la necessità di rielaborarli a posteriori (Di Pietro et al., 2020).

Tabella 3 - Sistemi di classificazioni internazionali

Categoria	Indicatori
Economic	FCI (Facility Condition Index) (Moretti and Re Cecconi, 2019; Re Cecconi et al., 2019a)
	AME (Annual Maintenance Expenditure)
	MEI (Maintenance Efficiency Indicator) (Enshassi and El Shorafa, 2015)
Technical	BPI (Building Performance Indicator) (Leite et al., 2020)
	BEI (Building Efficiency Index) (Moghimi et al., 2011)
	A (Degradation Index) (Ishizuka, 1981)
Functional	O (Action KPI)
	Document index (Dejaco et al., 2017)
User satisfaction	I _{ins} (Dissatisfaction index) (Acampa et al., 2020, 2021a)

¹¹ Molti ricercatori, invece, cercano di automatizzare il processo di ispezione utilizzando robot, immagini, tecnologia satellitare, dispositivi automatizzati e/o sensori intelligenti. Molti programmi e tecniche sviluppati in letteratura (Singh Ahluwalia, 2008) possono essere classificati in quattro gruppi principali: (1) Ispezione visiva; (2) Metodi fotografici e ottici; (3) Metodi di valutazione non distruttivi; (4) Sensori intelligenti.

2.1.4 Condition Analysis - Analisi delle condizioni

La fase di analisi delle condizioni consiste nell'applicazione del metodo di valutazione scelto per lo studio delle condizioni dell'edificio. Poiché i dati forniti dal processo di ispezione sono raccolti sotto forma di misurazioni del danno di un componente, è necessario effettuare un'attenta analisi per tradurre queste misurazioni in un valore qualitativo e/o quantitativo delle condizioni.

2.2 BIM-based BCA per il Facility Management (FM)

Le ISO 41011:2017 definiscono il Facility Management come la *"organizational function which integrates people, place and process within the built environment with the purpose of improving the quality of life of people and the productivity of the core business"*. Mentre l'IFMA (International Facility Management Association) lo definisce come *"the design, implementation and control process through which the facilities (the buildings and services necessary to support and facilitate the company's activity) are identified, specified, found and supplied in order to provide and maintain those levels of service able to meet business needs, creating a quality work environment with a cost as low as possible"*.

La gestione della manutenzione degli edifici è una delle maggiori sfide del Facility Management e la sua chiave di successo è proprio la conoscenza accurata delle condizioni dell'edificio (Lin and Su, 2013). Tuttavia, un limite del BCA è la procedura ormai obsoleta di raccolta dati, registrazione e reporting delle informazioni memorizzati su carta e raramente collegate al modello as-built. Ciò causa la potenziale perdita di informazioni e quindi il superamento delle prestazioni e dei costi. In questo senso, non si può ignorare la potenzialità di integrare il processo di BCA con il *Building Information Modeling* (BIM). Infatti, le metodologie BIM risolvono il problema di raccolta e gestione dei dati sulle condizioni dell'edificio implementandoli direttamente all'interno di un unico modello digitale. Si tratta di un modello as-built dell'edificio dotato di oggetti "intelligenti" che contengono oltre ad informazioni grafiche tridimensionali anche informazioni semantiche (non geometriche) aggiornabili infinite volte e interrogabili in qualsiasi momento durante l'intero ciclo di vita dell'edificio. Nella specifica fase di uso e gestione dell'edificio, il ruolo principale del BIM è quello di avere sempre un modello as-built che includa un database che migliori i processi di manutenzione e gestione dell'edificio e faciliti il lavoro dei gestori (Su et al., 2011). Il BIM permette al personale addetto alla manutenzione di accedere e rivedere il proprio edificio digitalizzato per aggiornare o interrogare i registri di manutenzione.

L'utilizzo del BIM si è ormai consolidato nel corso degli anni in relazione alle fasi di progettazione e costruzione degli edifici e delle infrastrutture, ma è un concetto relativamente nuovo nell'ambito del Facility Management so-

prattutto quando si tratta di edifici già esistenti e ancor più se hanno un carattere storico-culturale. Infatti, in questi ultimi casi, l'implementazione di procedure di Facility Management basate sul BIM richiede uno sforzo maggiore per raccogliere dati corretti su quantità, dimensioni, materiali e tecnologie (a causa della comune mancanza di documenti aggiornati as-built). Da un'analisi della letteratura è emerso che l'ambito di ricerca che riguarda l'integrazione del FM ai sistemi BIM nel patrimonio culturale (noto come HBIM¹²) inizia nel 2012 (Fig. 3).

Figura 3 - Tendenza della ricerca bibliografica su "HBIM e Facility Management".

Le difficoltà di implementazione di un processo di gestione patrimoniale in ambiente BIM sono dovute principalmente (Villa et al., 2016):

- All'identificazione delle informazioni necessarie e sufficienti alle operazioni di gestione e manutenzione.
- Alla gestione di tali informazioni su piattaforme che siano interoperabili con quelle proprie del FM.
- Alla riduzione dello sforzo di aggiornamento del modello.

La metodologia BIM migliora il modo attuale di lavorare e di condividere i dati tra professionisti, utenti e clienti. Basti pensare alla quantità di documenti cartacei da conservare in un archivio di asset, con tutti i problemi legati all'acquisizione e all'aggiornamento dei dati; con il BIM, i dati sono

¹² L'applicazione del BIM al patrimonio storico costruito è stata inizialmente identificata come Historic Building Information Modeling (HBIM) da (Murphy et al., 2009) (da non confondere con Heritage-BIM che tratta in generale degli edifici esistenti non appartenenti al patrimonio storico-culturale). Tuttavia, secondo la loro ricerca, il concetto di gestione delle informazioni (complementare a quello di modellazione) è escluso; si parla infatti solo di nuove procedure di acquisizione di dati per la ricostruzione tridimensionale dei beni costruiti. Questo processo si differenzia dal classico BIM per il tipo di informazioni da elaborare e per la loro acquisizione. Il modello digitale dell'edificio storico utilizza oggetti BIM raramente importati dai cataloghi dei costruttori, ma per lo più modellati individualmente dopo un'indagine (rilievi fotogrammetrici, LIDAR, ecc.) e integrati successivamente con dati parametrici.

conservati in un database, quindi la carta è fortemente ridotta, con maggiori benefici in termini di sforzo di aggiornamento. Queste informazioni digitalizzate possono essere utilizzate per pianificare ed eseguire ulteriori lavori di manutenzione, come la manutenzione preventiva, le riparazioni o gli aggiornamenti a seconda delle condizioni dell'edificio (Che Ani et al., 2015).

In letteratura solo negli ultimi anni sono state effettuati degli studi che riguardano l'integrazione del BCA in ambiente BIM. Si tratta per lo più di studi che hanno come oggetti i campus universitari (Re Cecconi et al., 2017, 2019b; Matos et al., 2021) e gli ospedali (Ahmed, 2012; Marmo et al., 2019, 2020).

Per quanto riguarda l'ambito dei beni culturali, non vi è una vasta letteratura. Infatti tra le ultime pubblicazioni scientifiche rinvenute vi sono quelle di (Bruno and Fatiguso, 2018; Bruno et al., 2018; Bruno and Roncella, 2019). Gli autori hanno proposto l'implementazione dell'approccio HBIM per la ristrutturazione e la conservazione degli edifici storici. La comunità scientifica e tecnica ha confermato l'efficacia degli strumenti BIM per la gestione e la condivisione della conoscenza, rilevando ancora una limitata ricerca di BCA in HBIM.

La letteratura analizzata evidenzia che negli ultimi anni non solo è incrementato il numero di studi che integrano i processi di BCA in ambiente BIM, ma sempre più spesso gli autori hanno dovuto ampliare le loro competenze nel settore informatico, sviluppando piattaforme web o plugin in linguaggio .net per aggiungere ulteriori funzionalità ai BIM Software Authoring già esistenti (Re Cecconi et al., 2017; Bruno and Roncella, 2019; Marmo et al., 2019; Matos et al., 2021). Ciò al fine anche di agevolare tecnici, utenti e gestori nella consultazione del modello BIM dell'edificio. Questo significa che, ad oggi, le software house stanno commercializzando dei prodotti che non solo non sono accessibili a tutti per l'elevato costo di acquisto, ma che hanno la necessità di essere integrati con strumenti user-friendly per far in modo che i modelli BIM siano davvero accessibili a tutti.

3. STRUMENTI

Il metodo della ricerca consiste nell'integrare i processi di Building Condition Assessment in ambiente BIM per la gestione delle attività di manutenzione del patrimonio culturale. Ciò significa che tecnici e gestori dovranno utilizzare *specifici strumenti BIM* e una particolare *procedura* affinché l'interoperabilità e la collaborazione tra i diversi stakeholders che prendono parte al processo sia efficace.

3.1 Scomposizione dell'edificio - UNI 8290

Per la scomposizione dell'edificio (o Work Breakdown Structure - WBS)¹³ è stato utilizzato il sistema proposto dalla normativa italiana UNI 8290. Il suo scopo è quello di unificare la terminologia da utilizzare nelle attività normative, di programmazione, di pianificazione, operative e di

comunicazione. La UNI 8290 si presenta come una struttura gerarchica enumerativa basata sulla scomposizione dell'edificio in classi di unità tecnologiche; ogni classe di unità tecnologica è a sua volta scomposta in unità tecnologiche; ogni unità tecnologica è a sua volta scomposta in classi di elementi tecnici¹⁴. I tre livelli principali, a cui se ne possono aggiungere ulteriori, come ad esempio gli elementi tecnici, corrispondono a un criterio che è di tipo *funzionale* anche se, apparentemente potrebbe sembrare *per oggetti*¹⁵. Ogni livello è caratterizzato da un codice numerico che identifica i requisiti e/o sistemi di requisiti che sono attribuiti a quello specifico elemento tecnico. Grazie a questo codice è anche possibile tornare ai tre livelli precedenti a cui appartiene l'elemento tecnico. Inoltre, aggiungendo ulteriori codici nelle successive posizioni si potrà caratterizzare l'elemento tecnico con ulteriori informazioni. La codifica ha lo scopo di identificare in modo univoco le componenti dell'edificio e di consentire la registrazione di tutte le informazioni disponibili o generate nel tempo, sia in fase di manutenzione che di ispezione. L'attribuzione del codice avviene attraverso la compilazione di una tabella di sintesi cui vengono attribuite delle schede di dettaglio per ciascun elemento tecnico. Gli ulteriori livelli di dettaglio della scomposizione dell'edificio fanno riferimento agli elementi tecnici, alle peculiarità di posizione e materiale di cui sono composti, variabili che descrivono lo stato di degrado e le informazioni relative al Piano di Manutenzione (controlli e interventi).

¹³ WBS letteralmente significa Struttura di Scomposizione dei Lavori. Secondo il Project Management Book of Knowledge (PMBOK) del Project Management Institute (PMI), la WBS è definita come "a deliverable oriented hierarchical decomposition of the work to be executed by the project team" ossia come scomposizione gerarchica orientata ai risultati finali del lavoro che deve essere eseguito da team di progetto. È uno strumento gestionale di base, rappresentato secondo un diagramma gerarchico (ad albero) che supporta una scomposizione sistematica del progetto in parti raggruppate per livelli omogenei di definizione.

¹⁴ La norma UNI 8290 definisce: *Classe di unità tecnologica* gli elementi funzionali omogenei raggruppati per funzione prevalente per continuità fisica e funzionale; *Unità tecnologica* l'insieme di elementi tecnici che rappresentano funzioni volte a soddisfare le esigenze dell'utente; *Classe degli elementi tecnici* le classi di prodotti che svolgono funzioni specifiche ad una o più classi tecnologiche.

¹⁵ Un progetto complesso, come ogni sistema complesso, può essere facilmente compreso e gestito disaggregandolo nelle sue componenti. La struttura del progetto è descritta secondo un grafico gerarchico ad albero, a livello di dettaglio crescente, è determinata dal project manager all'inizio di ogni progetto e si mantiene per tutto il ciclo di vita. Le classificazioni possono essere di diverso tipo: Classificazione per fasi del progetto, Classificazione per oggetto (Work Breakdown Structure - WBS), Classificazione per azioni o funzionale (Activity Breakdown Structure - ABS), Struttura analitica dell'Organizzazione (Organization Breakdown Structure - OBS), Struttura di suddivisione delle risorse (Resource Breakdown Structure - RBS), Struttura dettaglio del costo (Cost Breakdown Structure - CBS), Classificazione per scomposizione del progetto (Project Breakdown Structure - PBS), Struttura di scomposizione dei documenti (Document Breakdown Structure - DBS), Struttura di scomposizione dei Rischi (Risk Breakdown Structure - RBS) (Di Castri, 2009).

La scomposizione dell'edificio, rispetto alla UNI 8290, è stata riadattata nelle locuzioni e nei codici numerici per adattarla meglio alle caratteristiche degli edifici storico-culturali. Inoltre, rispetto alla normativa, il nome del terzo livello è stato cambiato da "Classe di elementi tecnici" a "Elemento manutenibile". La Tabella 4 mostra l'elenco dei livelli di dettaglio della scomposizione dell'edificio:

Tabella 4 - Scomposizione dell'edificio

Livello WBS	Parametro	Gruppo di parametri
LIVELLO 1	Classe di unità tecnologica	Identificazione
LIVELLO 2	Unità tecnologica	
LIVELLO 3	Elemento manutenibile	
LIVELLO 4	ID_Elemento	
LIVELLO 5	Materiale Esposizione Posizione	
LIVELLO 6	Tipo di degrado (UNI 11182) Id Stato di conservazione	Valutazione degrado
LIVELLO 7	Tipo di controllo Descrizione controllo Frequenza di controllo Tipo di manutenzione Descrizione manutenzione Frequenza manutenzione Costi di controllo (€/h) Costi di manutenzione (€/mq)	Piano di manutenzione
LIVELLO 8	Schede di controllo Schede di intervento Schede analisi prezzi	Collegamento schede

3.2 Metodologia di valutazione del degrado e manutenzione di opportunità

3.2.1 Indice del livello di degrado i_d

Al fine di valutare lo stato di conservazione di ciascun elemento tecnico componente un edificio è stato proposto un indicatore numerico del "livello di degrado" espresso come:

$$i_d = \frac{A_d}{A_t} K_d K_c \quad (1)$$

La formulazione tiene conto di:

$\frac{A_d}{A_t}$ rapporto tra l'area del degrado e l'area totale dell'elemento tecnico;

K_d è il fattore che tiene conto del tipo di degrado¹⁶. Il suo valore varia da 1 a 4 (lieve, medio, grave e gravissimo) in funzione dei danni che può creare al materiale in termini di perdita di valore storico-culturale e rischi per l'uomo.

K_c è il fattore peso che tiene conto dell'importanza del degrado inteso come complessità delle operazioni di ripristino/manutenzione e relativi costi di intervento. Il suo valore è il rapporto tra i costi di manutenzione ordinaria (operazioni di pulizia), costi di consolidamento del materiale (recupero materiale) e i costi di completa sostituzione del materiale (ripristino delle parti mancanti o non più recuperabili).

L'indice del livello di degrado permetterà di stabilire lo stato di conservazione di ogni elemento tecnico in funzione del suo valore in termini percentuali come indicato in Fig. 4:

$i_d = 0$	Livello 0	Nessun degrado visibile
$0\% < i_d \leq 15\%$	Livello 1	Buone condizioni
$15\% < i_d \leq 30\%$	Livello 2	Degrado leggero
$30\% < i_d \leq 45\%$	Livello 3	Degrado moderato
$i_d > 45\%$	Livello 4	Degrado generalizzato

Figura 4 - Valori dell'indice del livello di degrado i_d .

3.2.2 Manutenzione di opportunità: matrice delle connessioni

Quando si parla di lavori di manutenzione, a livello tecnico e gestionale, bisogna tenere in considerazione che ogni elemento tecnico sul quale si deve intervenire entra in relazione con altri elementi. Queste relazioni possono essere di due tipi:

- **Connessioni tecnologiche** sono quelle connessioni che legano due elementi tecnici rendendo inevitabile intervenire su entrambi allo stesso tempo.
- **Connessioni operative** sono quelle connessioni in cui vi è una convenienza operativa ad associare interventi su due elementi, legata a motivi di carattere esecutivo, ovvero ad attrezzature, opere provvisorie, organizzazione di cantiere.

La Fig. 5 mostra una matrice con la quale è possibile individuare le connessioni tecnologiche e operative tra elementi tecnici. La matrice mette in correlazione fra loro gli elementi costruttivi, individuati preliminarmente secondo la classificazione dell'edificio operata secondo

¹⁶ UNI 11182:2006 – Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni. UNI 11130:2004 Degrado materiale ligneo.

le indicazioni della UNI 8290. La finalità quindi è quella di evidenziare quali siano gli elementi tecnici per i quali, attesa la rilevanza delle connessioni tecnologiche e operative, è particolarmente opportuno e conveniente far coincidere le operazioni di manutenzione. La matrice è composta da righe e colonne nelle quali sono inserite gli elementi tecnici (o eventualmente le unità tecnologiche) componenti un edificio. Ciascun quadrante derivante

dall'incrocio riga-colonna è suddivisa in quattro parti formando 4 piccoli triangoli: i triangoli superiori e inferiori fanno riferimento alle connessioni tecnologiche, mentre i triangoli di destra e di sinistra fanno riferimento alle connessioni operative. Più è forte la connessione tecnologica e operativa, maggiore sarà la convenienza economica nell'applicare manutenzioni di opportunità tra elementi tecnici.

MATRICE DELLE CONNESSIONI TECNOLOGICHE E OPERATIVE FRA ELEMENTI COSTRUTTIVI (UNITÀ TECNOLOGICHE, CLASSI DI ELEMENTI TECNICI O ELEMENTI TECNICI)	Struttura di fondazione	Struttura in elevazione verticale	Struttura in elevazione orizzontale	Pareti perimetrali verticali	Infissi esterni verticali	Coperture	Pareti interne verticali	Infissi interni verticali	Scale interne	Balconi	Scale esterne	Impianto di climatizzazione	Impianto idrosanitario	Impianto di smaltimento liquidi	Impianto di distribuzione gas	Impianto elettrico	Finiture (tinteggiate)	Finiture (rivestite in marmo)
Struttura di fondazione																		
Struttura in elevazione verticale																		
Struttura in elevazione orizzontale																		
Pareti perimetrali verticali																		
Infissi esterni verticali																		
Coperture																		
Pareti interne verticali																		
Infissi interni verticali																		
Scale interne																		
Balconi																		
Scale esterne																		
Impianto di climatizzazione																		
Impianto idrosanitario																		
Impianto di smaltimento liquidi																		
Impianto di distribuzione gas																		
Impianto elettrico																		
Finiture (tinteggiate)																		
Finiture (rivestite in marmo)																		

Assenza di connessione

Debole connessione tecnologica

Forte connessione tecnologica

Debole connessione operativa

Forte connessione operativa

Forte connessione tecnologica e operativa

Forte connessione tecnologica e debole connessione operativa

Debole connessione tecnologica e forte connessione operativa

Figura 5 - Matrice di connessione tecnologica e operativa¹⁷

La manutenzione di opportunità prevede l'effettuazione di un intervento su un determinato componente in occasione dell'esecuzione di altre attività manutentive, o perché viene – in tale eventualità – individuata una necessità, o perché era stato in precedenza programmata tale possibilità ovvero intuito il profilarsi di una impellenza (Nicoletta, 2003).

3.2.3 Ottimizzazione dei costi di manutenzione

La riduzione dei costi è una delle principali motivazioni che spingono i gestori ad effettuare manutenzioni di opportunità o di gruppo. In questa prospettiva infatti l'esecuzione di un'attività di manutenzione congiunta è più economica rispetto all'esecuzione di attività di manutenzione individuale. Secondo gli autori Nicolai e Dekker (2008), questa nozione è chiamata "dipendenza economica positiva" e si verifica grazie alle economie di

scala dell'esecuzione di attività di manutenzione di gruppo (Nicolai and Dekker, 2008). Essa rappresenta la percentuale dei costi fissi che si devono affrontare negli interventi di manutenzione e influiscono sui costi totali di manutenzione. In questo senso si può definire il guadagno economico (EG) nell'esecuzione delle attività di manutenzione di opportunità come:

$$EG = N \times PED \times C_{MP} \quad (2)$$

Dove:

- N è il numero di attività di manutenzione di gruppo tecnologicamente e operativamente convenienti (la convenienza deriva dalla matrice di connessione);
- PED è la percentuale di dipendenza economica positiva, cioè la percentuale dei costi fissi che si devono affrontare negli interventi di manutenzione e che influiscono sui costi totali di manutenzione;
- C_{MP} è il costo della manutenzione preventiva effettuata sugli elementi tecnici.

Il EG dunque sarà una riduzione del costo fisso (espressa come percentuale dei costi fissi sui costi totali della manutenzione preventiva) per ogni attività di manutenzione di gruppo. Il numero di attività di manutenzione di

¹⁷ Metodo elaborato dal Prof. Maurizio Nicoletta, docente universitario (ICAR/11), Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

[gruppo dipende dal numero di elementi tecnici sul quale è conveniente intervenire.

I costi totali della manutenzione saranno la somma dei costi totali della manutenzione preventiva sugli elementi tecnici effettuati ridotti dei guadagni economici derivanti dall'applicazione di una manutenzione di opportunità. L'equazione che descrive il fenomeno è:

$$C_{TM} = \Sigma C_{MP} - \Sigma EG \quad (3)$$

Il modello esposto permette di poter programmare degli interventi che siano economicamente convenienti tenendo conto delle connessioni tecnologiche e operative tra gli elementi tecnici di un sistema edilizio.

3.3 Ispezioni sul luogo – Schede di controllo e Database Master

L'obiettivo del processo di ispezione è quello di ottenere i dati necessari per misurare e/o calcolare le prestazioni o per valutare la condizione. L'ispezione deve essere eseguita in modo coerente, accurato e il più obiettivamente possibile.

In questo studio è stato scelto di adottare una ispezione visiva e le informazioni sono raccolte in formato elettronico con l'utilizzo del software Microsoft Excel.

3.3.1 Schede di controllo

Per la raccolta e l'analisi dei dati, sono state create delle schede di controllo su fogli di calcolo Excel¹⁸. Tali schede sono precompilate e si distinguono tre parti:

- La parte superiore della scheda contiene i dati identificativi dell'elemento tecnico. Ciascun componente avrà un codice numerico che farà riferimento alla scompo-

sizione per classi di elementi tecnici secondo una struttura simile a quella proposta dalla UNI 8290. La differenza con la normativa UNI risiede nelle diverse locuzioni. Infatti nella presente ricerca sono state utilizzate delle voci che siano più idonei agli edifici di carattere storico-culturale anziché di carattere residenziale¹⁹.

- La parte intermedia della scheda contiene informazioni relative al tipo, alla descrizione e alla frequenza di controlli e manutenzioni che vengono effettuati sull'elemento tecnico. Questa sezione è già precompilata in quanto, se esiste un piano di manutenzione, tali informazioni saranno già note. Se non si è in presenza di piano di manutenzione allora tale sezione dovrà essere compilata in situ.
- La parte inferiore della scheda contiene le informazioni relative alla valutazione del degrado. Il tecnico dovrà selezionare con il menu a tendina il tipo di degrado cui è affetto l'elemento tecnico e l'estensione in termini percentuali. In questo modo il sistema calcolerà in automatico il fattore peso Kc relativo all'importanza del degrado in termini operativi ed economici e l'indicatore Id (in percentuale) cui corrisponderà uno stato di conservazione (nessun degrado, buone condizioni, degrado leggero, moderato e generalizzato).

3.2.2 Database Master

Le schede di controllo sono poste in collegamento con un Database Master, ossia un unico foglio di calcolo Excel dove confluiscono tutti i dati delle schede di controllo. Il Database Master sarà il database principale che verrà messo in collegamento diretto con il modello BIM as-built dell'edificio. Le informazioni sono inserite in colonna e ciascuna di esse rappresenta le informazioni di ogni elemento tecnici secondo la scomposizione dell'edificio mostrata in Tab. 4.

¹⁸ I fogli di calcolo Excel sono uno strumento user-friendly per i tecnici e di facile utilizzo. Inoltre si prestano bene ai collegamenti con i modelli BIM.

¹⁹ Nella Fig. 6 ad esempio si legge la Classe di Unità Tecnologica *Elementi di pregio*, la Classe di Unità Tecnologica *Elementi Lapidei*, la classe di elementi manutenibili (o classe di elementi tecnici) *Colonna in pietra facciavista: arenaria grigia*.

]

]

]

3.4 Analisi dei dati - BIM-Dynamo-DM

3.4.1 Revit Software

Sulla base delle indagini completate nel Regno Unito (UK) da National Building Specification (NBS) nel 2014 (NBS 2014) e 2016 (NBS 2016), nonché un'indagine analoga condotta in Canada da IBC nel 2013 si è dimostrato che Revit di Autodesk è lo strumento più utilizzato.

Revit è un BIM Authoring software che offre un approccio multidisciplinare e collaborativo al processo di progettazione, costruzione e gestione dei dati di un edificio.

	UK (NBS 2016)	UK (NBS 2014)	Canada (IBC 2013)
Autodesk Revit	31%	27%	40%
Graphisoft ArchiCAD	19%	10%	0%
Nemetschek Vectorworks	15%	8%	6%
Autodesk CAD	12%	22%	43%
Autodesk CAD LT	12%	20%	3%
Other	5%	7%	6%
Bentley Microstation	3%	3%	3%
Trimble Sketchup	1%	3%	0%
Bentley Building Suite	1%	1%	0%

Figura 8 - BIM Authoring Software comunemente usati (Dore and Murphy, 2012).

Nel Regno Unito, lo strumento utilizzato per produrre disegni è passato da Autodesk CAD/CAD LT a strumenti BIM, ovvero Revit, Graphisoft ArchiCAD e Nemetschek Vectorworks; mentre in Canada, ArchiCAD e Vectorworks hanno avuto pochissima adozione (Fig. 8). Sebbene Bentley abbia avuto pochissima adozione sia nel Regno Unito che in Canada (3%), è stato dichiarato uno strumento BIM popolare dai ricercatori negli USA.

Il problema maggiore di tutti i software sopra elencati è che i costi per l'acquisto delle licenze sono elevati. Per questo motivo, sebbene il costo per la creazione di un modello di un edificio esistente sia sempre più basso, il denaro da spendere non vale se l'unico scopo del modello è la memorizzazione dei dati BCA. Il proprietario (o gestore) del bene deve avere un piano strategico a lungo termine in cui l'uso del BIM sia vitale per tutta la gestione del bene e non solo per la valutazione. In quest'ultimo caso, ciò comporterebbe probabilmente costi di implementazione superiori ai risparmi.

Con il software Revit, così come in altri, è possibile costruire un modello BIM dell'edificio secondo i due metodi principali: "CAD to BIM" o "Scan to BIM". L'approccio "CAD to BIM" consiste nella costruzione del modello BIM per mezzo di planimetrie digitali in formato CAD. Questo metodo comporta la necessità di verificare l'effettiva corrispondenza delle geometrie con la realtà. L'approccio Scan to BIM è il processo che utilizza una qualsiasi scansione laser per creare modelli BIM 3D ad elevata precisione per progetti di riqualificazione, rinnovo e ristrutturazione. Una volta rilevata digitalmente la zona di interesse, si manipola la nuvola di punti ottenuta e si costrui-

sce il modello BIM. Questo processo è utile per intervenire in opere di interesse storico, per eseguire ristrutturazioni, per controllare lo stato di avanzamento lavori nei cantieri e per la digitalizzazione di opere esistenti (Facility Management). Sebbene gli approcci Scan to BIM siano di gran lunga più precisi a livello geometrico nella costruzione dei modelli tradizionali, gli strumenti con i quali si effettuano i rilievi e si rielaborano sono decisamente complessi e costosi, utilizzabili da personale competente. Inoltre, se non si hanno a disposizione dei devices con alte prestazioni, i tempi di elaborazione delle nuvole di punti sono decisamente elevate. Un altro limite ancora oggi non superato consiste nella conversione tra nuvola di punti e modello BIM. Infatti non esiste un software o un plug-in in grado di convertire automaticamente una mesh o una nuvola di punti in un modello 3D parametrico.

Al modello 3D vengono aggiunti parametri di progetto o parametri condivisi per inserire le informazioni semantiche (non geometriche) degli elementi tecnici componenti l'edificio. Tali parametri fanno riferimento a quelle indicate nella Tabella 4 e che sono state riportate anche nel Database Master (Fig. 7).

Le variabili di tali parametri possono essere inserite manualmente ma ciò comporterebbe dispendio di tempo e più probabilità di errori rendendo il processo inefficiente. Una alternativa è l'utilizzo di un collegamento tra Database Master e il modello BIM in Revit attraverso Script in Dynamo.

3.4.2 Dynamo

Dynamo è un linguaggio di programmazione visuale (Visual Programming Language - VPL) che consente la programmazione tramite espressioni grafiche di elementi quali nodi e frecce e non tramite sintassi scritta²¹. Questa procedura di comporre dei comandi tramite nodi e frecce è chiamato Script.

In ambiente BIM i VPL erano inizialmente conosciuti per la modellazione parametrica di oggetti complessi²². Oggi, nel campo del management delle costruzioni trova un utile impiego come un add-in per estendere la funzionalità parametrica di Revit, il recupero delle informazioni e la documentazione nella generazione dei deliverable di

²¹ Le interfacce utente sono abbastanza diverse dai linguaggi di programmazione basati sul testo, dove il codice viene digitato in un editor di testo o in un programma di editing del codice più sofisticato, per esempio BASIC, LISP, C#, Python, Java, Processing, ecc. (Kensek, 2015).

²² Nella modellazione, Grassopper e Dynamo funzionano rispettivamente per Rhino e Revit Autodesk. Le differenze però è che Rhino è un programma di modellazione tridimensionale di oggetti, mentre per Revit Autodesk si parla di modellazione parametrica per cui Dynamo non funziona esclusivamente per modellare oggetti complessi, ma viene ampiamente sfruttato per velocizzare l'immissione o l'estrazione dei dati parametrici (Kensek, 2014).

funzionamento e manutenzione nel formato richiesto dall'utente finale (Sadeghi et al., 2019).

Dynamo legge e scrive dati da e verso il database di Revit tramite l'API di Revit. Qualsiasi utente di Revit potrebbe imparare Dynamo (dal momento che usa la programmazione visuale è molto semplice da imparare) e potrebbe

accedere alle api di Revit ed eseguire semplici compiti che prima potevano essere eseguiti solo scrivendo un Add-On o scrivendo una macro con il linguaggio .net per Revit. Nella Fig. 9 si riporta una semplificazione dello script in Dynamo per l'import dei dati dal Database Master al modello BIM Revit

Figura 9 - Script Dynamo: Import dati dal Database Master al Modello BIM in Revit.

4. PROCEDURA

Una volta descritti gli strumenti operativi del metodo, è possibile mostrare il procedimento con cui gli operatori prendono parte al processo di manutenzione fin dalla fase di raccolta dati sfruttando le potenzialità degli strumenti mostrati in precedenza. La Fig. 10 mostra la procedura suddivisa in 5 fasi:

- F1 - il tecnico responsabile dell'attuazione del piano di manutenzione provvede ad ispezionare ciascun elemento tecnico componente l'edificio per determinarne lo stato di conservazione
- F2 - le annotazioni sullo stato di conservazione degli elementi sono raccolte con strumenti elettronici (esem-

pio tablet e smartphone) direttamente sulle schede di controllo su fogli di calcolo Excel

- F3 - Ciascuna scheda di controllo è trasferita in cloud al Database Master.
- F4 - Le informazioni contenute nel Database Master saranno collegate al modello BIM as-built tramite Script in Dynamo.
- F5 - Attraverso la matrice di connessione tecnologica e operativa è possibile individuare ulteriori opportuni interventi da effettuare congiuntamente alle attività di manutenzione per gli elementi con maggiore priorità.

Figura 10 - Procedura operativa.

5. METODO

5.1 Maintenance Workflow Management

La ricerca, supportata dalle linee guide nazionali e internazionali (U.S. General Service Administration Public Buildings Office of Design and Construction, 2011; BuildingSMART Finland, 2012; PAS 1192:2014, 2014; Messner et al., 2019; UNI 11337-4:2017, n.d.) e dall'analisi della letteratura sull'implementazione del BCA e del FM in ambiente BIM (Marmo et al., 2019, 2020; Re Cecconi et al., 2019b), ha permesso di individuare strumenti e procedure a supporto di un metodo che integra i processi di BCA in ambiente BIM.

La Fig. 11 mostra un *Maintenance Workflow Management* che sintetizza il metodo della ricerca e gli strumenti che sono stati utilizzati per la sua applicazione.

Il metodo proposto prevede un processo di collaborazione tra alcuni dei diversi stakeholders che prendono parte alle attività di progettazione e gestione della manutenzione.

- *FM team* sono i gestori (pubblici o privati) dell'edificio i quali definiscono le esigenze di cui ha bisogno l'edificio, ma detiene anche la contabilità del budget disponibile per tali attività. A loro competono decisioni tecnico-economiche-organizzative sulla gestione della manutenzione durante il ciclo di vita dell'edificio, per cui decidono le modalità, i criteri e i processi con cui devono essere svolte tali attività. Nella Fig. 11, la prima colonna individua il team di gestori come responsabili dell'individuazione delle esigenze di ottimizzazione dei costi di gestione della

manutenzione e decidono sulla tecnica di Building Condition Assessment più idonea al raggiungimento dell'obiettivo.

- *BIM team* è un gruppo di tecnici esperti in metodologie BIM che si occupano della raccolta dati per individuare l'obiettivo di realizzazione del modello BIM as-built dell'edificio. In particolare, per l'obiettivo di ottimizzazione dei costi di manutenzione, il team di esperti BIM definisce gli strumenti e i requisiti che deve avere il modello BIM: requisiti di FM&BCA, informazioni di input e output dal e verso il modello BIM, le modalità di interscambio dati e il livello di dettaglio (LOD) che si vuole raggiungere. Per quanto riguarda le modalità di interscambio dati, gli esperti BIM predispongono un Database in Microsoft Excel (che funge da database esterno) e Scripts in Dynamo per facilitare e velocizzare i processi di aggiornamento dei dati da e verso il modello BIM. Il team di esperti si occuperà di controllare e aggiornare il modello BIM tutte le volte che si attuerà o aggiornerà il piano di manutenzione dell'edificio.
- *Technical team* sono tecnici che si occupano della progettazione dei piani di manutenzione e dell'attuazione verificando l'effettivo funzionamento e aggiornando i dati qualora se ne richieda la necessità. I tecnici attuatori del piano di manutenzione eseguiranno dei controlli periodici sugli elementi tecnici componenti l'edificio per valutarne lo stato di conservazione. Le informazioni sono annotate durante la fase di ispezioni in situ mediante strumenti elettronici (tablet o smartphone) che supportano i sistemi di Microsoft Excel. A tecnici progettisti compete l'analisi

Figura 11 - Maintenance Workflow Management.

della valutazione delle condizioni dell'edificio e l'eventuale esecuzione di attività di manutenzione in funzione del livello di degrado dei componenti. Ai fini dell'ottimizzazione dei costi di manutenzione, in

funzione anche del budget disponibile, i tecnici prevederanno delle attività di manutenzione di opportunità da eseguire insieme alle attività di manutenzione prioritarie.

6. CASO STUDIO E RISULTATI

6.1 Chiostro del Brunelleschi

Il Chiostro del Brunelleschi o Secondo Chiostro è uno degli spazi architettonici del Complesso Monumentale di Santa Croce a Firenze²³. Il suo nome deriva dal progettista Filippo Brunelleschi, anche se l'Opera è stata terminata, nel 1453, dopo la sua morte dall'architetto Bernardo Rossellino. Un tempo era luogo di meditazione ed elevazione dello spirito a Dio. Era il fulcro della vita di comunità con le celle dei frati, la biblioteca, le stanze per il lavoro manuale. Oggi è in gran parte occupato dalla Biblioteca Nazionale.

Il Chiostro ha una forma rettangolare (31x38m) e si svolge in due ordini, di cui l'inferiore è formato da archi a tutto sesto e volte a crociera, poggianti su esili colonne di pietra serena. L'ordine superiore ha invece uno sviluppo in altezza un po' minore e la copertura a tetto ad una sola falda, ordita in legno e coperta in cotto tradizionale, poggiante su colonnine in pietra, più sottili e con lo stesso intervallo delle sottostanti (Fig. 12).

Figura 12 - Chiostro del Brunelleschi.

6.1.1 Lo stato di conservazione

Il chiostro presenta uno stato di degrado differenziato da zona a zona e meno evidente e critico dove ci sono stati interventi pregressi di restauro. Il porticato superiore, protetto dalla copertura aggettante del tetto e già restaurato in passato, si trova in buono stato di conservazione

²³ Opera di Santa Croce è suddivisa in 8 spazi architettonici per una estensione di quasi 18.000 mq. Proprietà del Fondo Edifici di Culto del Ministero dell'Interno e del Comune di Firenze, il complesso monumentale di Santa Croce è gestito dall'Opera di Santa Croce, che dal XIV secolo si occupa della tutela e della valorizzazione di questo luogo in accordo con gli enti proprietari.

soprattutto per quanto riguarda i capitelli delle colonne. Diversamente, i fusti delle stesse, più esposti all'azione dell'acqua piovana risultano esfoliati sul lato esterno e soprattutto la cimasa è interessata da numerose fratture, fessurazioni, sollevamenti e cadute di materia e i frammenti pericolanti che potrebbero distaccarsi e cadere accidentalmente. Il porticato inferiore, si trova in uno stato di degrado molto avanzato soprattutto sui due lati in prossimità dell'ingresso al chiostro.

La mancanza di una gronda di raccolta dell'acqua piovana, il particolare orientamento espositivo e la prolungata mancanza di interventi conservativi hanno sicuramente inciso pesantemente. Una corrosione diffusa interessa tutti i rilievi sia delle cornici, degli archi, degli stemmi che delle colonne intere, al punto che spesso i rilievi non sono più leggibili. La presenza di esfoliazioni, sollevamenti e soprattutto di numerosissime fessure ha causato, durante il sopralluogo, la perdita di frammenti che si sono sgretolati al solo contatto delle dita.

Sul lato più corto alla destra dell'ingresso al chiostro sono stati individuati alcuni vistosi e grossolani interventi eseguiti, in passato, con malte a base cementizia che, pur avendo momentaneamente provveduto al ripristino della superficie, con il tempo hanno peggiorato lo stato di conservazione della pietra favorendo il suo rigonfiamento superficiale e la conseguente caduta di frammenti.

A causa di un probabile cedimento strutturale, uno dei capitelli su questo lato è interessato da una frattura passante che lo divide a metà partendo dall'intradosso dell'arco, anch'esso fessurato in più punti. In passato, questa frattura era stata provvisoriamente stuccata con del cemento bianco, ma a causa di ulteriori movimenti strutturali si è di nuovo aperta. Gli altri due lati del porticato sono stati già restaurati in passato, almeno per quanto riguarda quello più lungo. Infatti, a distanza di una ventina d'anni, nonostante la perdita di piccoli frammenti e la presenza di alcune fessurazioni, la superficie risente ancora dell'efficacia dei prodotti consolidanti impiegati.

6.2 Procedura applicata al Chiostro

6.2.1 Raccolta dati e organizzazione del Database

La raccolta dati del Chiostro del Brunelleschi è iniziata nel 2018 con le attività del progetto WARMEST e sono proseguite fino al 2020, con dei rallentamenti causati dalla sopraggiunta crisi sanitaria che ha reso inaccessibili tutti i luoghi pubblici in cui poter effettuare studi (uffici, archivi, biblioteche, soprintendenze, ecc.). Presso gli uffici tecnici del Complesso Monumentale di Santa Croce sono stati raccolti documenti relativi alle planimetrie del Complesso Monumentale di Santa Croce, del Chiostro del Brunelleschi e lo stralcio del Piano di Manutenzione. Ad integrazione della raccolta dati presso gli uffici tecnici, sono state effettuate delle indagini direttamente in situ per individuare tutte le informazioni necessarie per determinare lo

nenti l'edificio per un totale di 515 schede confluite tutte nel Database Master (dimensioni 23 colonne x 515 righe) (Fig. 13).

Figura 13 - Stralcio del Database Master.

Il modello BIM è stato costruito attraverso la tecnica “CAD to BIM” sulla base delle planimetrie esistenti fornite dai tecnici dell’Opera di Santa Croce e delle fotografie scattate durante le ispezioni (Fig. 14).

Figura 14 - Modello BIM del Chiostro del Brunelleschi.

Nel modello, oltre alla rappresentazione architettonica 3D e 2D, sono presenti tutte le informazioni che il software è in grado di fornire automaticamente (calcolo superfici, volumi, quantità prodotti, ecc.) e le informazioni alfa-numeriche che sono state inserite attraverso l'uso del linguaggio di programmazione Dynamo che mette in collegamento il Database Master, esterno al software, e il modello BIM di Revit (Fig. 15).

Figura 15 - Parametrizzazione delle informazioni.

Importando i dati del Database Master nel modello BIM di Revit è possibile interrogare ciascun elemento tecnico singolarmente (Fig. 16) oppure creare degli abachi che raggruppano in una unica tabella le informazioni che sono state raccolte durante le ispezioni e importate nel modello BIM tramite lo script in Dynamo (Fig. 16a e 16b).

Le Figure 16a e 16b mostrano un abaco delle colonne del Chiostro con l'indicazione del tipo di degrado cui sono affette le colonne, la percentuale e i metri quadri di degrado. I costi di intervento di manutenzione/restauro fanno riferimento al metro quadro di degrado presente

(costi parametrici) che a loro volta sono stati determinati attraverso l'analisi dei Prezzari Regionali per la manutenzione e il restauro di beni culturali. Le procedure fanno riferimento alle best practice dei manuali di restauro e manutenzione dei beni culturali. (Musso, 2013).

A	B	C	D	E	F	G	H	I
ID Elemento	Area	Tipo di degrado (UNI 1182)	Id	PERCENTUALE AREA DEGRADATA (%)				
				Alt.cromatica (%)	Esfoliazione (%)	Disgregazione (%)	Erosione (%)	Distacco (%)
01.11.01.01 Colonna	2.54 m²	Alterazione cromatica, esfoliazione, erosione	23%	25%	25%	0%	25%	0%
01.11.01.02 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	32%	0%	17%	0%	5%	33%
01.11.01.03 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	27%	0%	17%	0%	5%	33%
01.11.01.04 Colonna	2.54 m²	Alterazione cromatica Esfoliazione Erosione Distacco	29%	25%	33%	0%	1%	0%
01.11.01.05 Colonna	2.54 m²	Alterazione cromatica Esfoliazione Erosione	15%	25%	17%	0%	1%	0%
01.11.01.06 Colonna	2.54 m²	Alterazione cromatica Erosione Distacco	21%	0%	0%	0%	15%	17%
01.11.01.07 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	23%	0%	0%	0%	15%	17%
01.11.01.08 Colonna	2.54 m²	Erosione	5%	0%	0%	0%	5%	0%
01.11.01.09 Colonna	2.54 m²	Erosione	5%	0%	0%	0%	5%	0%
01.11.01.10 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Disgregazione	27%	0%	25%	10%	0%	0%
01.11.01.11 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco Disgregazione	23%	0%	25%	10%	25%	8%
01.11.01.12 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	27%	0%	25%	0%	5%	0%
01.11.01.13 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	25%	0%	25%	0%	15%	8%
01.11.01.14 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	21%	0%	25%	0%	10%	5%
01.11.01.15 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	20%	0%	25%	0%	5%	5%
01.11.01.16 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Distacco	34%	0%	25%	0%	0%	15%
01.11.01.17 Colonna	2.54 m²	Erosione	5%	0%	0%	0%	5%	0%
01.11.01.18 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	21%	0%	17%	0%	10%	0%
01.11.01.20 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	31%	0%	25%	0%	15%	0%
01.11.01.21 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	10%	0%	8%	0%	5%	0%
01.11.01.22 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	16%	0%	12%	0%	10%	0%
01.11.01.23 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione	27%	0%	25%	0%	5%	0%
01.11.01.24 Colonna	2.54 m²	Alterazione cromatica Esfoliazione	12%	25%	8%	0%	0%	0%
01.11.01.25 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	22%	0%	25%	0%	5%	8%
01.11.01.26 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	32%	0%	25%	0%	25%	8%
01.11.01.27 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	56%	0%	40%	0%	40%	0%
01.11.01.28 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	42%	0%	25%	0%	5%	40%
01.11.01.29 Colonna	2.54 m²	Erosione Distacco	35%	0%	0%	0%	25%	25%
01.11.01.30 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	15%	0%	10%	0%	15%	8%
01.11.01.31 Colonna	2.54 m²	Erosione Distacco	28%	0%	25%	0%	5%	0%
01.11.01.32 Colonna	2.54 m²	Esfoliazione Erosione Distacco	14%	0%	12%	0%	10%	10%
Totale generale: 32								

Figura 16a - Abaco Revit - 01.11.01. Colonna in pietra facciavista.

1.01 Colonne in pietra facciavista>										
J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
AREA DEGRADI (MQ)				COSTI UNITARI MACRO-INTERVENTI (CMQ)			COSTI TOTALI MACRO-INTERVENTI (€)			
Alt. cromatica	Esfoliazione	Disgregazione	Erosione	Distacco	Consolidamento	Pulizia semplice	Integrazione	Pulizia semplice	Integrazione	Consolidamento
0.64 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.06 m²	0.00 m²	410.726	27.726	63.096	17.636	3.216	261.166
0.00 m²	0.43 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	522.316
0.00 m²	0.43 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	522.316
0.64 m²	0.84 m²	0.00 m²	0.03 m²	0.00 m²	410.726	27.726	63.096	17.636	1.606	344.736
0.64 m²	0.43 m²	0.00 m²	0.03 m²	0.00 m²	410.726	27.726	63.096	17.636	1.606	177.596
0.00 m²	0.00 m²	0.00 m²	0.38 m²	0.43 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	24.076	177.596
0.00 m²	0.00 m²	0.00 m²	0.38 m²	0.43 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	24.076	177.596
0.00 m²	0.00 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	0.006	0.006	63.096	0.006	8.026	8.026
0.00 m²	0.00 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	0.006	0.006	63.096	0.006	8.026	8.026
0.00 m²	0.64 m²	0.25 m²	0.06 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	16.056	261.166
0.00 m²	0.64 m²	0.25 m²	0.84 m²	0.20 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	56.106	344.736
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	261.166
0.00 m²	1.27 m²	0.00 m²	0.76 m²	0.41 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	48.146	689.456
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.25 m²	0.13 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	16.056	313.396
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.13 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	313.396
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.06 m²	0.38 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	0.006	417.856
0.00 m²	0.00 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	0.006	0.006	63.096	0.006	8.026	8.026
0.00 m²	0.43 m²	0.00 m²	0.25 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	16.056	193.636
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.38 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	24.076	261.166
0.00 m²	0.20 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	83.576
0.00 m²	0.31 m²	0.00 m²	0.25 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	16.056	125.306
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	261.166
0.64 m²	0.20 m²	0.00 m²	0.06 m²	0.00 m²	410.726	27.726	63.096	0.006	83.576	101.206
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.20 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	344.736	352.756
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.54 m²	0.20 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	40.126	384.846
0.00 m²	1.02 m²	0.00 m²	1.02 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	64.106	417.856
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.13 m²	1.02 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	687.016
0.00 m²	0.00 m²	0.00 m²	0.54 m²	0.64 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	40.126	261.166
0.00 m²	0.25 m²	0.00 m²	0.38 m²	0.20 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	24.076	169.006
0.00 m²	0.64 m²	0.00 m²	0.13 m²	0.00 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	8.026	261.166
0.00 m²	0.31 m²	0.00 m²	0.25 m²	0.25 m²	410.726	0.006	63.096	0.006	16.056	229.826
2.54 m²	14.40 m²	0.51 m²	7.86 m²	6.31 m²				70.506	527.926	8503.254

Figura 16b - Abaco Revit - 01.11.01. Colonna in pietra facciavista.

6.2.3 Ottimizzazione dei costi di manutenzione del Chiostro

Per ottimizzare i costi della manutenzione e individuare facilmente le priorità di intervento all'interno del Chiostro, è stato parametrizzato l'indice I_d del livello di degrado I_d secondo la scala di colori della tabella 4 attraverso uno script in Dynamo.

Parametrizzare l'indice del livello di degrado permette di individuare facilmente gli elementi tecnici con uno stato di degrado generalizzato ($I_d \geq 45\%$) e dà un supporto ai tecnici per individuare facilmente le priorità di intervento. Nel caso specifico del Chiostro il degrado maggiore è negli archi e nei soprastanti stemmi (Fig. 17 e 18).

Figura 17 - Parametrizzazione dell'indicatore I_d .

Figura 18 - Elementi tecnici con I_d 45% nei quattro prospetti.

La matrice di connessione tecnologica e operativa tra gli elementi manutenibili del Chiostro permette di individuare gli interventi di manutenzioni di opportunità (manutenzioni di gruppo) che siano economicamente convenienti (Fig. 19).

	Murature in pietra	Volte in muratura	Strutture in legno (travi e correntini)	Intonaco	Tinteggiatura	Portoni	Grondaie e pluviali	Strato di tenuta in coppi	Colonne in pietra facciavista	Cornici marcapiano	Archi	Stemmi in pietra arenaria	Portali in pietra arenaria	Muratura in pietra facciavista	Pavimentazione in cotto	Pavimentazione in pietra
Murature in pietra	■															
Volte in muratura		■														
Strutture in legno (travi e correntini)			■													
Intonaco				■												
Tinteggiatura					■											
Portoni						■										
Grondaie e pluviali							■									
Strato di tenuta in coppi								■								
Colonne in pietra facciavista									■							
Cornici marcapiano										■						
Archi											■					
Stemmi in pietra arenaria												■				
Portali in pietra arenaria													■			
Muratura in pietra facciavista														■		
Pavimentazione in cotto															■	
Pavimentazione in pietra																■

Figura 19 - Connessioni tecnologiche e operative del Chiostro.

Poiché archi e stemmi sono due elementi manutenibili composti dello stesso materiale, affetti da stesso degrado (esfoliazione ed erosione) e localizzati alla stessa quota di lavoro, risulta economicamente conveniente intervenire su entrambi allo stesso tempo con attività di manuten-

zione/restauro. Inoltre, poiché le spese fisse di organizzazione di cantiere e manodopera sono le stesse, in funzione del budget disponibile è possibile decidere se intervenire allo stesso tempo sui quattro prospetti del Chiostro o solo su una parte (Fig. 20).

<Z_CME_01.11.05 Id 45>					
A	B	C	D	E	F
ID_Elemento	Costo manutenzione per ET	Costi fissi di cantiere	Costo totale di manutenzione	PED	EG
01.11.05.24 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.25 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.26 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.27 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.29 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.30 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
01.11.05.31 Arco	732.72€	277.57€	1010.29€	27%	201.31€
Totale generale: 7	5129.07€		7072.06€		1409.17€

<Z_CME_01.11.06 Id 45>					
A	B	C	D	E	F
ID_Elemento	Costo manutenzione per ET	Costi fissi di cantiere	Costi totali di manutenzione	PED	EG
01.11.06.25 Stemma	189.52€	277.57€	467.09€	59%	112.62€
01.11.06.26 Stemma	214.75€	277.57€	492.32€	56%	121.08€
01.11.06.27 Stemma	189.52€	277.57€	467.09€	59%	112.62€
Totale generale: 3	593.79€		1426.50€		346.32€

Figura 20 - Costi di manutenzione e guadagni economici (Abaco Revit software).

La Tabella 5 mostra i costi totali della manutenzione (C_{TM}) e i guadagni economici (EG) che possono derivare dall'opportunità di intervenire in contemporanea sugli elementi manutenibili, quali archi e stemmi, posti nei quattro prospetti.

Tabella 5 - Prospetto costi di manutenzione di opportunità

Prospetto	CMP	EG	CTM
Nord-Est	5.998,20 €	1.197,21 €	4.800,99 €
Sud-Ovest	1.211,21 €	92,52 €	1.118,69 €
Sud-Est	5.176,14 €	1.016,96 €	4.159,18 €
Nord-Ovest	8.980,60 €	2.033,06 €	6.947,54 €
Totale	21.366,15 €	4.339,75 €	17.026,40 €

7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La digitalizzazione del patrimonio culturale sembra essere diventata sempre più indispensabile per la cura e il riutilizzo. Per questo motivo, è necessario aumentare la conoscenza sul patrimonio edilizio per supportare strategie di manutenzione e conservazione sostenibili attraverso lo sviluppo di strumenti di gestione delle risorse di facile utilizzo. Ciò permette anche di supportare il processo decisionale verso una strategia di conservazione accessibile da parte di tutti gli stakeholders.

La manutenzione degli edifici storici può essere vista come un problema decisionale complesso soprattutto per la scarsa disponibilità di risorse economiche. Nei processi decisionali dunque diventa importante avere un metodo che segua delle procedure standard che supportino tecnici e gestori.

La presente ricerca ha dunque l'obiettivo di standardizzare le procedure al fine ottimizzare la gestione e minimizzare i costi di manutenzione degli edifici del patrimonio culturale.

Il metodo è basato su tecniche di Building Condition Assessment (BCA) integrate a metodologie di Building Information Modeling (BIM).

Il risultato della ricerca consiste in un modello BIM del particolare caso studio del Chiostro del Brunelleschi che monitora e tenga traccia del deterioramento dell'edificio storico, raccogliendo e classificando diversi dati che coesistono in un modello di asset culturali.

I dati del modello sono gestiti direttamente da un sistema Revit-Dynamo appositamente realizzato che mette in collegamento diretto un database Master in fogli di calcolo Excel e il modello BIM in Revit per creare un "fascicolo digitale" dello stato di fatto e della progettazione degli interventi di manutenzione.

Il sistema Revit-Dynamo ha permesso di ottenere in output feedback qualitativi (mediante una scala cromatica che rappresenta lo stato di degrado degli elementi tecnici) e feedback quantitativi (valori numerici dell'Indice di de-

grado degli elementi tecnici). Grazie a questi i tecnici possono individuare gli elementi manutenibili con maggiore necessità di intervento. Inoltre, il sistema è in grado di analizzare l'aspetto economico degli interventi di manutenzione, individuando il guadagno economico (EG) possibile applicando una manutenzione di opportunità (manutenzione di gruppo) anziché una manutenzione individuale per elementi tecnici.

Tuttavia, non mancano i limiti del sistema. Infatti, l'utilizzo di database esterni, come i fogli di calcolo Excel o ancora come database Access, collegati al modello BIM attraverso Dynamo devono essere localizzate in un unico server senza subire modifiche di directory, in quanto ciò potrebbe comportare una non lettura/scrittura delle informazioni in input/output.

Le difficoltà maggiori per i tecnici però possono riguardare principalmente la mancanza di familiarità con le metodologie BIM e i costi ancora oggi elevati per l'utilizzo di BIM Authoring Software.

* Giovanna Acampa, Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Enna "Kore", Enna, Italia
e-mail: giovanna.acampa@unikore.it

** Claudia Mariaserena Parisi, Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Enna "Kore", Enna, Italia
e-mail: claudia.parisi@unikore.it

Bibliografia

ABBOTT G.R., MC DULING J. J., PARSONS S. and C. SCHOEMAN J., *Building condition assessment: A performance evaluation tool towards sustainable asset management*, in CIB World Building Congress 2007.

ACAMPA G. and GRASSO M., *Heritage Evaluation: restoration plan through HBIM and MCDA*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 949: 012061, 2020.

ACAMPA G. and PARISI C.M., *Management of Maintenance Costs in Cultural Heritage*, in Appraisal and Valuation (MORANO P., OPPIO A., ROSATO P., SDINO L. and TAJANI F., eds.), *Green Energy and Technology*, Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 195–212.

ACAMPA G., MARINO G. and PARISI C.M., *Social Network as Tool for the Evaluation of Sustainable Urban Mobility in Catania (Italy)*, in New Metropolitan Perspectives (BEVILACQUA C., CALABRÒ F. and DELLA SPINA L., eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies*. vol. 178. Springer International Publishing, Cham, 2021a, pp. 243–253.

ACAMPA G., GRASSO M., MARINO G. and PARISI C.M., *Tourist Flow Management: Social Impact Evaluation through Social Network Analysis*, *Sustainability*. 12: 731, 2020.

ACAMPA G., BATTISTI F., DI PIETRO G. and C.M. PARISI C.M., *City information model for the optimization of urban maintenance cost*. P. 090002. Crete, Greece, 2021b.

AHMED E., *An Integrated Condition Assessment Model for*

Educational Buildings Using BIM, Doctoral Thesis, Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, 2012, p. 284.

AMASUOMO T.T., ATANDA J. and BAIRD G., *Development of a Building Performance Assessment and Design Tool for Residential Buildings in Nigeria*. Procedia Engineering. 180: 221–230, 2017.

ASHRAF F. and NAGY G., *HBIM as a Tool for Branding Historical Egyptian Sites by Utilizing Augmented Reality*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 397: 012012, 2019.

ASHWORTH A., *Estimating the life expectancies of building components in life cycle costing calculations*. Structural Survey. 14: 4–8, 1996.

BARAZZETTI L., BANFI F. and BRUMANA R., *Historic BIM in the Cloud*, in Euro-Mediterranean Conference. Springer, 2016, pp. 104–115.

BARONTINI A., ALARCON C., SOUSA H.S., OLIVEIRA D.V., MASCIOTTA M.G. and AZENHA M., *Development and Demonstration of an HBIM Framework for the Preventive Conservation of Cultural Heritage*. International Journal of Architectural Heritage, 2021, pp. 1–23.

BASSIER M., HADJIDEMETRIOU G., VERGAUWEN M., VAN ROY N. and VERSTRYNGE E., *Implementation of Scan-to-BIM and FEM for the documentation and analysis of heritage timber roof structures*, in Euro-mediterranean conference. Springer, 2016, pp. 79–90.

BRUNO N. and Roncella R., *HBIM for Conservation: A New Proposal for Information Modeling*. Remote Sensing, 2019, 11: 1751.

BRUNO S. and FATIGUSO F., *Building conditions assessment of built heritage in historic building information modeling*. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2018, 13: 36–48.

BRUNO S., DE FINO M. and FATIGUSO F., *Historic Building Information Modelling: performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management*. Automation in Construction, 2018, 86: 256–276.

BUILDINGSMART FINLAND, *Common BIM Requirements*. Series 12. In Use of Models in Facility Management, 2012.

CABLE J.H. and DAVIS J.S., *Key Performance Indicators for Federal Facilities Portfolios*. National Academies Press, Washington, D.C., 2004, p. 44.

CHE ANI A.I., JOHAR S., MOHD TAWIL N., ABD RAZAK M.Z. and HAMZAH N., *Building Information Modeling (BIM) - Based Building Condition Assessment: a survey of water ponding defect on a flat roof*. Jurnal Teknologi 75, 2015.

CHEW M.Y.L. and DE SILVA N., *Maintainability problems of wet areas in high-rise residential buildings*. Building Research and Information, 2003, 31: 60–69.

CHIABRANDO F., LO TURCO M. and RINAUDO F., *Modeling the decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 42, 2017.

DEJACO M.C., RE CECCONI F. and MALTESE S., *Key Performance Indicators for Building Condition Assessment*. Journal of Building Engineering, 2017, 9: 17–28.

DI CASTRI G., *Project management per l'edilizia: ingegneria economica : applicazioni e sviluppo*. Flaccovio, Palermo, 2009.

DI PIETRO G., RINNONE F., PARISI C.M., CAPRÌ S. and BIANCO G., *STATUS App: A Mobile Data Collection Tool for Buildings Adjacent to Tunneling Works*. Buildings, 2020, 10: 7.

DORE C. and MURPHY M., *Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites*, in 2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 2012, pp. 369–376.

ENSHASSI A.A. and EL SHORAFI F., *Key performance indicators for the maintenance of public hospitals buildings in the Gaza Strip*. Facilities, 2015.

FERRETTI V., BOTTERO M. and MONDINI G., *Decision making and cultural heritage: An application of the Multi-Attribute Value Theory for the reuse of historical buildings*. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15: 644–655.

FORTE C., *Valore di scambio e valore d'uso sociale dei beni culturali immobiliari*. Restauro, Napoli, 1977, p. 21.

FORTE F., *Historic, Artistic and Cultural Patrimony for a "Habitable City": Incentives for Care*, in Integrated Evaluation for the Management of Contemporary Cities

(MONDINI G., FATTINNANZI E., OPPIO A., BOTTERO M. and STANGHELLINI S., eds.), *Green Energy and Technology*. Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 233–243.

FRANCESCHINI F., *Designing Performance Measurement Systems: Theory and Practice of Key Performance Indicators*. Springer Berlin Heidelberg, New York, NY., 2018.

HOLY FATHER FRANCIS, 2015, *Laudato si'*. Available at http://www.vatican.va/content/francesco/en/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html, Accessed April 18, 2021.

ISHIZUKA Y., *The degradation and Prediction of Service Life of Building Component*, in Second International Conference on Durability of Building Materials and Components, September 14-16, 1981: Preprints, vol. 13, p. 69, US Department of Commerce, National Bureau of Standards.

JOUAN P. and HALLOT P., *Digital twin: Research framework to support preventive conservation policies*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9: 228.

KENSEK K., *Visual programming for building information modeling: energy and shading analysis case studies*. Journal of Green Building, 2015, 10: 28–43.

KENSEK K.M., *Integration of Environmental Sensors with BIM: case studies using Arduino, Dynamo, and the Revit API*. Informes de La Construcción, 2014, 66: e044.

LEITE F.M., VOLSE R.A., ROMAN H.R. and SAFFARO F.A., *Building condition assessment: adjustments of the Building Performance Indicator (BPI) for university buildings in Brazil*. Ambiente Construído, 2020, 20: 215–230.

LIN Y.-C. and SU Y.-C., *Developing Mobile- and BIM-Based Integrated Visual Facility Maintenance Management System*. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 1–10.

LINGGAR S., AMINULLAH A. and TRIWIYONO A., *Analysis of building and its components condition assessment case study of dormitory buildings*. MATEC Web of Conferences, 2019, 258: 03003.

LÓPEZ F., LERONES P., LLAMAS J., GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO J. and ZALAMA E., *A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)*. Multimodal Technologies and Interaction, 2018, 2: 21.

MARMO R., NICOLELLA M., POLVERINO F. and TIBAUT A., *A Methodology for a Performance Information Model to Support Facility Management*. Sustainability, 2019, 11: 7007.

MARMO R., POLVERINO F., NICOLELLA M. and TIBAUT A., *Building performance and maintenance information model based on IFC schema*. Automation in Construction, 2020, 118: 103275.

MATOS R., RODRIGUEZ F., RODRIGUES H. and COSTA A., *Building condition assessment supported by Building Information Modelling*. Journal of Building Engineering, 2021, 38.

MESSNER J., ANUMBA C., DUBLER C., GOODMAN S., KASPRZAK C., KREIDER R., LEICHT R., SALUJA C. and ZIKIC N., *BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.2*. Computer integrated Construction Research Program, Penn State, 2019.

- MOGHIMI S., MAT S., LIM C.H., ZAHARIM A. and SOPIAN K., *Building energy index (BEI) in large scale hospital: case study of Malaysia*. in *4th WSEAS International Conference on Recent Researches in Geography Geology, Energy, Environment and Biomedicine*, Corfu Island, Greece, 2011.
- MOHD NOOR S., SHING MEI C., SYAHRIZAL IBRAHIM I., NABILAH SARBINI N., HANIM OSMAN M. and AZEYAH KHIYON N., *Heritage building condition assessment: a case study from Johor Bahru, Malaysia*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 220: 012024.
- MORETTI N. and RE CECCONI F., *A Cross-Domain Decision Support System to Optimize Building Maintenance*. Buildings, 2019, 9: 161.
- MURPHY M., MCGOVERN E. and PAVIA S., *Historic building information modelling (HBIM)*. Structural Survey, 2009, 27: 311–327.
- MUSO S.F., editor, *Trattato di restauro architettonico. 13: Tecniche di restauro: aggiornamento / diretto da Stefano Francesco Musso*. UTET, Torino, 2013, p. 372.
- NICOLAI R.P. and DEKKER R., *Optimal Maintenance of Multi-component Systems: A Review*, in *Complex System Maintenance Handbook*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer London, London, 2008, pp. 263–286.
- NIOLELLA M., *Programmazione degli interventi in edilizia*. Guida al libretto di manutenzione del fabbricato, 2003.
- NOUSIAS S., ARVANITIS G., LALOS A.S., PAVLIDIS G., KOULAMAS C., KALOGERAS A. and MOUSTAKAS K., *A saliency aware CNN-Based 3D Model simplification and compression framework for remote inspection of heritage sites*. IEEE Access, 8: 169982–170001, 2020.
- OPPIO A., BOTTERO M., FERRETTI V., FRATESI U., PONZINI D. and PRACCHI V., *Giving space to multicriteria analysis for complex cultural heritage systems: The case of the castles in Valle D'Aosta Region, Italy*. Journal of Cultural Heritage, 16: 779–789, 2015.
- ORENI D., KARIMI G. and BARAZZETTI L., *Applying BIM to built heritage with complex shapes: The ice house of Filarete's Ospedale Maggiore in Milan, Italy*, 2017.
- PAESAGGIO E PATRIMONIO CULTURALE - ISTAT, *Rapporto Bes 2020: il benessere equo e sostenibile in Italia*. ISTAT Ist. Naz. Stat. Available at <https://www.istat.it/it/archivio/254761>. Accessed March 29, 2021.
- PAS 1192:2014, *Specification for Information Management for the Operational Phase of Assets Using Building Information Modelling: Incorporating Corrigendum No. 1*. BSI Standards Limited: London, UK, 2014.
- PIAIA E., MAIETTI F., DI GIULIO R., SCHIPPERS-TRIFAN O., VAN DELFT A., BRUINENBERG S. and OLIVADESE R., *BIM-based Cultural Heritage Asset Management Tool. Innovative Solution to Orient the Preservation and Valorization of Historic Buildings*. International Journal of Architectural Heritage, 2020, pp. 1–24.
- POCOBELLI D.P., BOEHM J., BRYAN P., STILL J. and GRAU-BOVÉ J., *BIM for heritage science: a review*. Heritage Science, 6: 30, 2018.
- RE CECCONI F., MALTESE S. and DEJACO M.C., *Leveraging BIM for digital built environment asset management. Innovative Infrastructure Solutions*, 2017, 2: 14.
- RE CECCONI F., MORETTI N. and CLAUDIO DEJACO M., *Measuring the performance of assets: a review of the facility condition index*. International Journal of Strategic Property Management, 2019a, 23: 187–196.
- RE CECCONI F., MORETTI N., MALTESE S. and TAGLIABUE L.C., *A BIM-Based Decision Support System for Building Maintenance*. in *Advances in Informatics and Computing (I. MUTIS and T. HARTMANN, eds.)*. Springer International Publishing, Cham, 2019b, pp. 371–378.
- RICS, *Stock condition surveys*. Available at https://www.isurv.com/directory_record/2975/stock_condition_survey. Accessed January 17, 2021. RICS, 2005.
- SADEGHI M., ELLIOTT J.W., PORRO N. and STRONG K., *Developing building information models (BIM) for building handover, operation and maintenance*. Journal of Facilities Management, 2019, 17: 301–316.
- SINGH AHLUWALIA S., *A framework for efficient condition assessment of the building infrastructure*, 2008.
- STANDARD & POOR'S, 1995, *Standard & Poor's Property Condition Assessment Criteria*. Partn. Eng. Sci. Inc. Available at <https://www.partneresi.com/resources/library/standard-and-poors-property-condition-assessment-criteria>. Accessed January 17, 2021.
- STRAUB A., *Dutch standard for condition assessment of buildings*. Structural Survey, 2009, 27: 23–35.
- SU Y.C., LEE Y.C. and LIN Y.C., *Enhancing Maintenance Management Using Building Information Modeling* in *Facilities Management*. Seoul, Korea, 2011.
- TOTARO G. and GASPAROLI P., *Sui processi di manutenzione del patrimonio costruito storico tutelato. Convenienze economiche, sviluppi occupazionali e altre esternalità positive*, in *Lo Stato dell'Arte* 12, 2014, pp. 743–750.
- UNI 11337-4:2017. *Building and civil engineering works - Digital management of the informative processes - Part 4: Evolution and development of information within models, documents and objects*. Available at http://store.uni.com/catalogo/uni-11337-4-2017?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_option_al&josso_partnerapp_host=store.uni.com. Accessed March 15, 2020.
- UNI EN 15341. 2019. *UNI EN 15341:2019 Maintenance - Key Performance Indicators*. Available at <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-15341-2019>. Accessed October 6, 2020.
- U.S. GENERAL SERVICE ADMINISTRATION PUBLIC BUILDINGS OFFICE OF DESIGN AND CONSTRUCTION. 2011. *GSA Building Information Modeling Guide Series: 08—GSA BIM Guide for Facility Management*; General Services Administration: Washington, DC, USA.
- UZARSKI D.R., GRUSSING M.N. and CLAYTON J.B., *Knowledge-based condition survey inspection concepts*. Journal of Infrastructure Systems, 2007, 13: 72–79.

[

VILLA V., EASTMAN C. and DI GIUDA G.M., *Il BIM: Guida Completa al Building Information Modeling per Committenti, Architetti, Ingegneri, Gestori Immobiliari e Imprese*. Hoepli, Milano, 2016.

YACOB S., ALI A.S. and PENG A.-Y.C., 2016. *Building Condition Assessment: Lesson Learnt from Pilot Projects*. MATEC

Web of Conferences, 2016, 66: 00072.

YANG X., LU Y.-C., MURTIYOSO A., KOEHL M. and GRUSSENMEYER P., *HBIM modeling from the surface mesh and its extended capability of knowledge representation*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8: 301.