

# First elements of a research on the analysis of water leakage risk in discontinuous roofing: the calculation of vulnerability

Emanuele Zamperini\*

---

## Highlights

The practice of refurbishment after decay occurred is being replaced by planned conservation. Water leakages from the roof is one of the most common cause of decay in buildings. The study of the risk of water leakage from roofing is essential for the definition of good practices of planned conservation. This risk could be analysed with a numerical method that take in account geometry and construction techniques.

---

## Abstract

In recent decades the practice of operating after damage occurred has been replaced by planned and preventive maintenance also in building sector. In the field of built heritage management the culture of planned conservation has spread. Since water leakage from roof is one of the most common causes of damage to buildings, the study of roofing is essential. The paper presents the first elements of a research aimed at the definition of a numerical method for the analysis of the risk of water leakage from discontinuous roofing. After a general introduction to the concept of risk in this field, the general principles of the method are defined.

---

## Keywords

Planned conservation, Discontinuous roofing, Water leakages from roofing, Risk analysis

---

## 1. PLANNED CONSERVATION: PRINCIPLES AND APPLICATION PROBLEMS

In the last two decades – at least at the level of theoretical elaborations – a gradual shift occurred in the management of built assets from acting when damage already occurred to plan preventive maintenance activities [1], according to an old consolidated practice, which progressively fell into disuse. Although this trend is present in the management of both recent building and built heritage, in this second area the gradual affirmation of a conservative approach has made programmed maintenance assume peculiar characteristics, so that it has been renamed *planned conservation*, a phrase first proposed by Giovanni Urbani in 1976 [2]. This approach requires timely repair and preservation works, instead of the systematic and periodic replacement of

### Emanuele Zamperini

DICAr – Dipartimento di  
Ingegneria Civile e Architettura,  
Università di Pavia, via A.  
Ferrata 1, Pavia, 27100, Italia

\* Corresponding author  
Tel.: +39-0382985597;  
Fax: +39-0382985589;  
e-mail: emanzamp@yahoo.com

damaged or decayed elements, and of those which are deemed close to these conditions on the basis of the programmed obsolescence theory.

The specific nature of conservation works on the historical built heritage requires a careful knowledge of the constructive elements on which we must operate and more generally of the building technological system in of which they are a part. An accurate preliminary study is therefore essential for the preparation of a planned conservation plan; in fact, it is necessary to break down the entire technological system of the building (or its sub-system) into the individual technical elements that compose it. Specific investigations are also necessary for the knowledge of the individual technical elements. The degree of deepening of such investigations must be sufficient to provide the information necessary to estimate the risk of damage or deterioration of the element itself. This is necessary in order to define the periodicity and type of checks and maintenance activities to be carried out on each technical element. At a theoretical level this approach should be applicable only to a technological system (or sub-system) that is in optimal conservation status. The start of a planned conservation process would therefore be extremely critical: in addition to the necessary investment in knowledge, an even greater investment would be essential for the general refurbishment of the building.

In order to implement a planned conservation plan for buildings that are not in optimal conditions, however, a different approach has already been proposed [3]. Instead of requesting a building in perfect state of preservation – condition to be maintained over time – sub-optimal starting conditions are accepted and the planned conservation plan is divided into two phases: in the “start-up” phase, ordinary activities must be associated with a planned series of extraordinary activities, in order to gradually recover the performance deficit in the parts that present critical issues of various kinds; in the “steady-state” phase, it will therefore be possible to operate on a building in optimal conditions.

In order to implement this method, it is therefore necessary to study the building in a sufficiently detailed manner, identifying criticalities in progress and classifying them according to three levels of severity, which can be highlighted with a different colour: green for minor problems; yellow for issues of medium criticality; red for major issues. The graduation of critical issues therefore allows to define a scale of priorities for extraordinary maintenance works to be associated with ordinary maintenance in the short and medium term; this strategy is particularly significant for institutions that own large building complexes or numerous buildings in order to guarantee a correct allocation of resources.

#### **I. CONSERVAZIONE PROGRAMMATA: PRINCIPI E PROBLEMATICHE APPLICATIVE**

*Negli ultimi due decenni – almeno a livello di elaborazioni teoriche – nella gestione del patrimonio edilizio si è gradualmente passati dall'intervento a danno avvenuto ad attività manutentive programmate e preventive [1], secondo una prassi anticamente consolidata, ma progressivamente caduta in disuso. Sebbene questa tendenza sia comune alla gestione tanto del patrimonio edilizio recente, quanto di quello più antico, in questo secondo ambito la graduale affermazione di un approccio conservativo ha fatto assumere alla manutenzione programmata caratteri peculiari, tanto che si è preferito denominarla conservazione programmata, riprendendo un'espressione proposta da Giovanni Urbani nel 1976 [2]. Questo approccio prevede interventi puntuali di riparazione e conservazione, al posto della sistematica e periodica sostituzione degli elementi danneggiati, degradati, o ritenuti prossimi a tali condizioni sulla base della teoria dell'obsolescenza programmata.*

*La specificità degli interventi conservativi sul patrimonio edilizio storico richiede un'attenta conoscenza degli elementi costruttivi sui quali si deve operare e più in generale del sistema tecnologico edilizio in cui si inseriscono. Un accurato studio preliminare è quindi indispensabile per la redazione di un piano di conservazione programmata; è infatti necessario giungere alla scomposizione dell'intero sistema tecnologico dell'edificio (o di un suo sottosistema) nei singoli elementi tecnici che lo compongono.*

*Specifiche indagini conoscitive sono inoltre necessarie per la conoscenza dei singoli elementi tecnici. Il grado di approfondimento di tali indagini deve essere quello sufficiente a fornire le informazioni necessarie alla stima del rischio di danneggiamento o deterioramento dell'elemento stesso, al fine di definire per ciascun elemento tecnico la periodicità e il tipo dei controlli e delle attività manutentive.*

*Questo approccio sarebbe applicabile solo a un sistema (o sub-sistema) tecnologico edilizio che si trovi in condizioni ottimali di conservazione. L'avvio di un processo di conservazione programmata risulterebbe quindi estremamente critico: oltre al necessario investimento in conoscenza, sarebbe infatti indispensabile un ancora maggiore investimento per la generale riqualificazione dell'immobile.*

*Per rendere implementabile un piano di conservazione programmata anche per immobili che non siano in condizioni ottimali si è però già in passato proposto un differente approccio [3]. Invece di richiedere un immobile in perfetto stato di conservazione – da mantenere nel tempo – si accettano le condizioni di partenza sub-ottimali e si scandisce il*

Priority must be given to areas in which major criticalities have been identified (red colour), in which in the start-up phase of the planned conservation plan, works must be carried out for performance recovery. During these extraordinary works, medium level criticalities (yellow colour) will have to be resolved, while in principle minor problems (green colour) must be tolerated; indeed, from the point of view of the authenticity of historical matter, their resolution could lead to excessive and unjustified sacrifices, coming into conflict with an approach aimed at maximizing the conservation of material data. In the start-up phase of the planned conservation plan, it will not be necessary to plan extraordinary maintenance activities in areas where there are medium-level criticalities only (yellow colour); however, specific checks must be made to verify that these critical issues do not progressively evolve towards more serious conditions; only if a pejorative evolution is detected, extraordinary interventions must be planned.

The technological unit “superior closures” (UNI 8290-1:1981) is particularly significant from the point of view of planned conservation. The roof is the part of the building system most exposed to possible decay due to atmospheric agents and at the same time it is the part mainly designed to protect the building from the agents themselves. The roof therefore constitute a preferential starting point for many of the possible decay processes that affect the whole building technological system. In addition, roofs are usually not directly accessible to users – neither to the extrados (roofing) nor to the intrados (attic) – and therefore they are less controlled; any damage to the watertight layer could therefore go unnoticed for a long time, gradually giving rise to a critical situation. To these intrinsic factors we must add the fact that (due to lack of maintenance) in existing buildings roofs are often in a deficient condition – both in the roofing and in the structural system – and therefore a systematic recognition of their conservation status is necessary to identify critical issues and define priority actions.

## 2. GENERAL ASPECTS OF THE ANALYSIS OF THE RISK OF INFILTRATION IN DISCONTINUED COVERINGS

Regarding the interaction between rainwater removal system and building system is instead proposed a parametric method for assessing the risk of rainwater infiltration [The method was developed during the period in which the author held a post doc research grant at the University of Pavia (Oct. 2015 - Sept. 2016, professor responsible for the research: Prof. Marco Morandotti)]. In the first instance, this method is designed to form the basis for defining the

*piano di conservazione programmata in due fasi: nella fase “di avvio” alle attività ordinarie dovrà essere associata una serie pianificata di attività di tipo straordinario, al fine di recuperare gradualmente il deficit prestazionale nelle parti che presentavano criticità di vario genere; nella fase “di regime” ci si troverà quindi ad operare su un edificio in condizioni ottimali.*

*Per poter attuare questo metodo è quindi necessario studiare l'edificio in maniera sufficientemente approfondita, individuando le criticità in atto e classificandole in funzione di tre livelli di gravità, evidenziabili con un differente colore: verde per criticità di lieve entità; giallo per criticità di media entità; rosso per criticità di entità maggiore. La graduazione delle criticità consente quindi di definire una scala di priorità per gli interventi di manutenzione straordinaria da associare alla manutenzione ordinaria nel breve e medio periodo; questa strategia è particolarmente significativa per enti proprietari di grandi complessi edilizi o di numerosi edifici al fine di garantire una corretta allocazione delle risorse.*

*La priorità dovrà essere data alle aree in cui sono state rilevate criticità di entità maggiore (colore rosso), nelle quali nella fase di avvio del piano di conservazione programmata dovranno essere svolti lavori di recupero prestazionale. Durante queste operazioni di tipo straordinario dovranno essere risolte anche le criticità di media entità (colore giallo), mentre dovranno in linea di massima essere tollerate le criticità minori (colore verde), la cui risoluzione potrebbe portare a sacrifici eccessivi e non motivati da un punto di vista dell'autenticità della materia storica entrando in conflitto con un approccio volto a massimizzare la conservazione del dato materiale. Nella fase di avvio del piano di conservazione programmata non sarà invece necessario pianificare attività manutentive straordinarie nelle aree in cui sono presenti solo criticità di entità media (colore giallo); dovranno però essere previsti specifici controlli puntuali per verificare che tali criticità non evolvano progressivamente verso condizioni di maggiore gravità; solo se si dovesse rilevare una evoluzione peggiorativa dovranno essere pianificati interventi di tipo straordinario.*

*L'unità tecnologica delle chiusure superiori (UNI 8290-1:1981) è particolarmente significativa dal punto di vista della conservazione programmata. Le coperture sono la parte del sistema edilizio più esposta a possibili degradi dovuti ad agenti atmosferici e al tempo stesso sono la parte principalmente deputata alla protezione dell'edificio dagli agenti stessi. Le coperture costituiscono quindi una via preferenziale di partenza di molti dei possibili processi di degrado che riguardano l'intero sistema tecnologico edificio. Inoltre abitualmente le coperture non sono accessibili direttamente agli utenti – né all'estradosso (manto),*

periodicity and accuracy of controls, but it can also be conveniently used to compare the effectiveness of various design solutions in risk reduction.

Before entering into the details of the proposed system, it is worth recalling some general definitions concerning the concept of risk and understanding how these can be adapted to the assessment of the risk of infiltration in the roofing.

The risk is defined as «the probability that certain social, economic and cultural consequences of the actions – that will affect a building stock within a certain reference time – will reach or exceed certain thresholds» [4]. This definition can be conceptually summarized in the following equation:

$$R = H \times V \times E \quad (1)$$

In which:

- R it's the risk
- H it's the hazard of actions
- V it's vulnerability of the building
- E it's the exposure of users

Explicating the application of these concepts to the case of roofing systems, we can say that the risk is the probability that in a certain period of time a damage to material goods or people will occur due to atmospheric actions (rain, snow, etc.), from which the roof is designed to protect the building.

In our case, the *hazard* of actions can be defined as the probability that within a given time the atmospheric actions will exceed established values; it is quantifiable through the combination of two factors: frequency (i.e. the return period) and magnitude of the action (e.g. intensity of the rain or height of the snow layer).

If we want to compare the risk of separate buildings, it will be possible to define one or more parameters that quantify the greater or smaller hazard of the actions that affect each building. This will be significant if the buildings are in significantly different climatic or micro-climatic conditions due to a different climatic setting, different altitudes, different wind exposures (significant aspect, for example also for the way in which snow settles on the roof). However, if you compare only buildings located in the same town or even different parts of the same building, with rare exceptions the variability of the hazard of actions can be considered negligible and therefore the definition of specific parameters for the quantification of the hazard can be neglected.

On the other hand, *vulnerability* is a characteristic of the building – in this case

*né all'intradosso (sottotetto) – e risultano quindi meno controllate; un eventuale danno dallo strato di tenuta all'acqua potrebbe quindi passare inosservato per lungo tempo, dando gradualmente origine a una situazione critica. A questi fattori intrinseci si aggiunge il fatto che per mancanza di manutenzione negli edifici esistenti le coperture si trovano spesso in condizioni deficitarie – tanto nello strato di tenuta, quanto nel sistema strutturale – ed è necessaria quindi una sistematica ricognizione del loro stato di conservazione finalizzata alla individuazione delle criticità e alla definizione degli interventi prioritari.*

## **2. ASPETTI GENERALI DELL'ANALISI DEL RISCHIO DI INFILTRAZIONI NELLE COPERTURE DISCONTINUE**

*Per quanto riguarda l'interazione tra sistema di allontanamento delle acque meteoriche e sistema edilizio si propone, invece, un metodo parametrico di valutazione del rischio di infiltrazioni di acque meteoriche [Il metodo è stato elaborato durante il periodo di attività di ricerca svolto come assegnista presso l'Università di Pavia (ottobre 2015 – settembre 2016, docente responsabile dell'assegno: prof. Marco Morandotti)]. In prima istanza questo metodo è ideato per costituire la base per la definizione della periodicità e dell'accuratezza dei controlli, ma può essere convenientemente impiegato anche per confrontare l'efficacia di varie soluzioni progettuali nella riduzione del rischio.*

*Prima di entrare nel merito del sistema proposto, è opportuno ricordare alcune definizioni generali riguardanti il concetto di rischio e comprendere come queste possano essere adattate alla valutazione del rischio di infiltrazioni nelle coperture.*

*Il rischio è definito come «la probabilità che certe conseguenze sociali, economiche, culturali delle azioni che entro un certo tempo di riferimento potranno colpire un patrimonio edilizio raggiungano o superino certe soglie» [4]. Tale definizione può essere concettualmente riassunta nella seguente equazione:*

$$R = P \times V \times S \text{ (o } E) \quad (1)$$

*Nella quale:*

*R è il rischio*

*P è la pericolosità delle azioni*

*V è la vulnerabilità della costruzione*

*S (o E) è la sensitività (o esposizione) dell'utente*

*Esplicitando l'applicazione di questi concetti al caso dei sistemi di copertura, possiamo dire che il rischio è la probabilità che in un determinato periodo di tempo si verifichino danni a beni materiali o persone dovuti alle azioni atmosferiche (pioggia, neve, ecc.) dalle quali il sistema di copertura è destinato a proteggere l'edificio. Nel nostro caso, la pericolosità delle azioni può essere definita come la*



of the roofing system – and it can be defined as the probability that in case of certain atmospheric actions there will be water infiltrations. Regarding the seismic vulnerability Doglioni and Petrini [5] have introduced some concepts, subsequently by the same Doglioni better explained [6]; in analogy to the concepts introduced by them, we can define two classes of vulnerability: typical vulnerability and specific vulnerability. In the case of seismic risk, typical vulnerability depends on the plano-volumetric configuration of the building, while specific vulnerability depends on the constituent materials and on any local weakness factors.

In analogy, in the case of the risk linked to the infiltration of water from roofs we can define: typical vulnerability as dependent on the configuration of the roof fields (presence of lines of the valley, hip, ridge, rake, etc.); while specific vulnerability will depend on the type of roofing elements and on laying techniques (elements laid on a plane surface, on timber laths parallel or perpendicular to the ridge, fixed with mortar, roof tiles fixed with metal hooks, etc.), on the presence of additional waterproofing layers (bituminous fibrocement undulated sheets, bituminous membranes, impermeable sheets, continuous decking in wooden planks or flat bricks, etc.), and on the possible presence of discontinuities in roofing layers (due to chimney pots, antennas, etc.).

Exposure quantifies the extent of the possible damage to things or people. In the specific case of water leakage in discontinuous roofing, in the short term usually possible damages to people are almost negligible and limited to inconveniences connected to the alteration of internal microclimate or to the temporary unavailability of premises, however – if leakages protract in the long term or if structures are especially vulnerable to water – it's possible that water leakages can also endanger human life by causing partial collapses in roof or attic structures.

The aspects that must be taken into account in the definition of exposure parameters are therefore related to the damage to structures (wooden roofs, vaults, etc.), decorative apparatuses (stuccos, wall paintings, decorated wooden decks, tapestries, boiseries, etc.), furniture (furniture, bookcases, etc.) and objects (books, paintings, historical objects or instruments, etc.). In particular – as mentioned above – two aspects must be taken into account when assessing the damage to structures: on the one hand the loss of cultural value (which grows as the relevance of the structure itself grows), that constitutes a damage by itself; on the other hand the eventual loss of structural safety (which grows as the speed of decay of the structure in event of water leakage grows), that can cause damage to people and goods.

*probabilità che entro un tempo dato le azioni atmosferiche superino valori stabiliti; essa è quantificabile attraverso la combinazione di due fattori: periodo di ritorno e violenza dell'azione (e.g. intensità della pioggia o altezza dello strato di neve). Volendo valutare comparativamente il rischio di edifici distinti sarà possibile definire uno o più parametri che quantifichino la maggiore o minore pericolosità delle azioni che interessano ciascun edificio. Ciò sarà significativo se gli edifici si troveranno in condizioni climatiche o microclimatiche significativamente differenti per effetto di differenti ambiti climatici, differenti altitudini, differenti esposizioni ai venti (aspetto significativo ad esempio anche per il modo di deposizione della neve). Tuttavia, se si considerano comparativamente solo edifici siti nello stesso centro abitato o addirittura differenti parti dello stesso edificio, salvo rare eccezioni la variabilità della pericolosità delle azioni potrà essere considerata trascurabile e quindi potrà essere trascurata la definizione di specifici parametri per la quantificazione della pericolosità.*

*La vulnerabilità è invece una caratteristica propria della costruzione – in questo caso del sistema di tenuta all'acqua – e può essere definita come la probabilità che in presenza di determinate azioni atmosferiche si verifichino infiltrazioni di acqua. In analogia ai concetti introdotti da Doglioni e Petrini [5] e successivamente meglio esplicitati dallo stesso Doglioni [6] per la vulnerabilità sismica, possiamo definire due classi di vulnerabilità: vulnerabilità tipica e vulnerabilità specifica. Nel caso del rischio sismico, la vulnerabilità tipica dipende dalla configurazione plano-volumetrica dell'edificio, mentre la vulnerabilità specifica dipende dai materiali costituenti e da eventuali fattori di debolezza locale. In analogia, nel caso del rischio legato all'infiltrazione di acqua dalle coperture possiamo quindi definire la vulnerabilità tipica come dipendente dalla configurazione delle falde (presenza di linee di compluvio, displuvio, bordo, ecc.), mentre la vulnerabilità specifica sarà dipendente dal tipo di manto e dalle tecniche di posa in opera (elementi poggianti su impalcato piano, su listelli paralleli o perpendicolari alla linea di gronda, fissaggio con malta, presenza di ganci ferma coppo, ecc.), dalla presenza di elementi aggiuntivi di tenuta all'acqua (lastre ondulate sottomanto bituminose o fibrocementizie, membrane bituminose, teli impermeabili, impalcato continuo in tavolato ligneo o tavelloni laterizi, ecc.) e dalla eventuale presenza di discontinuità negli strati di tenuta (dovuti a comignoli, antenne, ecc.). La sensitività o esposizione quantifica invece l'entità del danno a cose o persone. Nel caso specifico della tenuta all'acqua delle coperture, nel breve periodo i possibili danni alle persone sono in genere trascurabili e ridotti a disagi connessi all'alterazione del microclima*

### 3. ANALYSIS OF THE VULNERABILITY OF SYSTEMS FOR PROTECTION FROM WATER

As already written, the vulnerability of a roofing can be divided in two components: typical vulnerability and specific vulnerability. The proposed method allows two different levels of analysis of vulnerability: the first stops at the synthetic evaluation of typical vulnerability and therefore the knowledge of the geometric conformation of the fields of the roof is sufficient for its application; the second method goes into more detail and integrates the typical and specific vulnerability parameters into a single calculation to obtain a more detailed vulnerability evaluation.

When it is necessary to make a comparative vulnerability assessment of various roofs (or various parts of a single roof) made with the same construction techniques and with a fairly uniform amount of punctual critical issues (chimney pots, antennas, etc.), synthetic and detailed evaluation will give very similar results.

### 4. SYNTHETIC EVALUATION OF TYPICAL VULNERABILITY

Depending solely on the configuration of the fields of the roof, typical vulnerability can be evaluated on the basis of a planimetric scheme in which all the elements necessary for defining the shape of the roof are identified clearly. The idea behind the definition of typical vulnerability of a roofing is that – abstracting from every consideration on construction techniques – roofs with different shapes have different vulnerabilities, that is, they are differently predisposed to rainwater infiltrations over time.

In a pitched roof, the most critical parts are valley lines (in particular horizontal ones), because on the same line water converge from a large roof surface; at progressively decreasing levels of criticality we can put: hip lines, ridge lines, rake lines, and eaves line. Therefore we can define a different parameter – called  $\alpha$  – for each type of line (fig. 3), which grows as the vulnerability of the roof element increases. Since no scientific study exist which can help in defining the greater or lesser predisposition of roof lines to water infiltration, the values of the parameter  $\alpha$  were empirically defined on the basis of author's experience; in particular, being the edge line outside the building plan, it was considered that its contribution to vulnerability could be neglected. The product between the parameter  $\alpha$  and the length  $\ell$  of the considered line (expressed in metres) defines the contribution that the line provides to the

*interno o alla temporanea inagibilità di locali, tuttavia – se le infiltrazioni si protraggono nel lungo periodo o se le strutture sono particolarmente vulnerabili agli effetti dell'acqua – è possibile che infiltrazioni di acqua possano anche mettere a repentaglio la vita umana causando crolli parziali di strutture di copertura o di sottotetto.*

*Gli aspetti di cui si deve tenere conto per definire i parametri di esposizione sono quindi relativi al danno a strutture (coperture lignee, volte, ecc.), apparati decorativi (stucchi, pitture murali, impalcati lignei decorati, tappezzerie, boiserie, ecc.), arredi (arredi mobili, librerie, ecc.) e suppellettili (libri, quadri, oggetti o attrezzature storici, ecc.). Per quanto accennato sopra, nella valutazione del danneggiamento delle strutture si dovranno tenere in conto due aspetti: da un lato la perdita di valore culturale (tanto maggiore quanto maggiore è la rilevanza della struttura stessa) che costituisce danno in sé, dall'altro la possibile perdita di efficienza strutturale (tanto maggiore quanto maggiore è la rapidità con cui la struttura può perdere resistenza a parità di quantità di acqua infiltrata) che può causare danni ad altre cose o a persone.*

#### 3. ANALISI DELLA VULNERABILITÀ DEI SISTEMI DI TENUTA ALL'ACQUA

*Come scritto la vulnerabilità di una copertura può essere suddivisa in due componenti: vulnerabilità tipica e vulnerabilità specifica. Il metodo proposto consente due livelli di analisi della vulnerabilità: il primo si ferma alla valutazione sintetica della vulnerabilità tipica e quindi per applicarlo è sufficiente la conoscenza della conformazione geometrica delle falde; il secondo entra più nel dettaglio e integra in un unico calcolo i parametri di vulnerabilità tipica e specifica per ottenere una valutazione più dettagliata. Qualora si debba fare una valutazione comparativa di vulnerabilità di varie coperture (o varie parti di una unica copertura) realizzate con le medesime tecniche costruttive e con una quantità di criticità puntuali (comignoli, antenne, ecc.) abbastanza uniforme, valutazione sintetica e quella dettagliata daranno risultati molto simili.*

#### 4. VALUTAZIONE SINTETICA DELLA VULNERABILITÀ TIPICA

*Dipendendo esclusivamente dalla configurazione delle falde, la vulnerabilità tipica può essere quantificata sulla base di uno schema planimetrico nel quale siano chiaramente individuati tutti gli elementi per definire la forma del tetto. L'idea che sta alla base della definizione della vulnerabilità tipica di una copertura è che – astraendo da qualsiasi considerazione sulle tecniche costruttive – tetti con forme differenti abbiano differente vulnerabilità, ovvero siano diversamente predisposti ad andare*

typical vulnerability of the roof.

For a roof (or part of a roof) the total typical vulnerability  $V_{tt}$  is given by the sum of the contributions provided by all the lines that define the fields of the roof. The unitary typical vulnerability  $V_{tu}$  is given by the ratio between the total typical vulnerability and the roof area (expressed in square metres) and it can be calculated with the following formula:

$$V_{tu} = V_{tt} / A = (\sum_i \alpha_i \cdot \ell_i) / A \quad (2)$$

In which:

- $\alpha_i$  is the vulnerability parameter for the  $i^{\text{th}}$  line which define the fields of the roof
- $\ell_i$  is the length of the  $i^{\text{th}}$  line which define the fields of the roof
- A is the total area of the considered roof (or part of a roof).

*incontro nel tempo a infiltrazioni d'acqua meteorica. In una copertura a falde, le parti più critiche sono le linee di compluvio (in particolare quelle orizzontali), in quanto su una stessa linea tendono a convergere le acque di un'ampia superficie di tetto; a livelli di criticità progressivamente decrescenti si trovano: le linee di displuvio, le linee di colmo e le linee di bordo, linea di gronda. Si può quindi definire un differente parametro  $\alpha$ , per ogni tipo di linea (fig. 1), crescente al crescere della vulnerabilità del componente della copertura. Non esistendo studi scientifici che possano aiutare a quantificare la maggiore o minore predisposizione ad essere soggette ad infiltrazioni delle varie linee che definiscono la copertura, i valori del parametro  $\alpha$  sono stati definiti empiricamente sulla base dell'esperienza dell'autore; in particolare per quanto riguarda la gronda si è ritenuto che trattandosi di una linea esterna al profilo dell'edificio si possa trascurare il suo contributo alla vulnerabilità. Il prodotto tra il parametro  $\alpha$  e la lunghezza  $\ell$  (espressa in metri)*

Type of line	Horizontal valley	Inclined valley	Hip	Ridge	Rake	Top abutment	Side abutment
$\alpha$	1,2	1	0,5	0,4	0,2	0,4	0,3

Figure 1. Table containing the values of the vulnerability parameter for the various types of roof line.

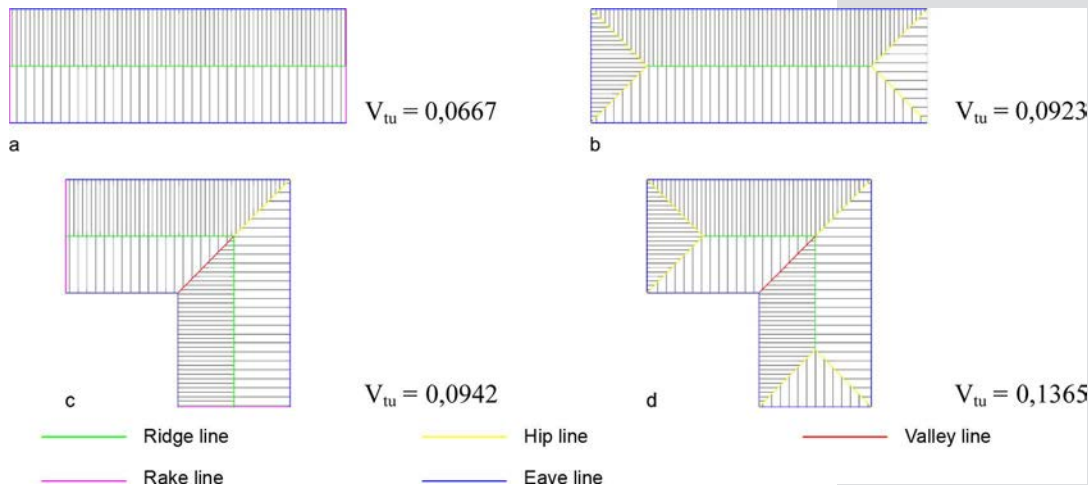


Figure 2. Schemes of simple roofs that have the same area:  
 a. Gable roof with rectangular plan, dimensions 8 m × 24 m.  
 b. Hipped roof with rectangular plan, dimensions 8 m × 24 m.  
 c. Gable roof with L-shaped plan, having major sides 16 m long, with a depth equal to 8 m.  
 d. Hipped roof with L-shaped plan, having major sides 16 m long, with a depth equal to 8 m.

By way of example, for a first evaluation of its actual validity, the proposed method has been applied to four roofs having a rather simple planimetric development and which occupy an identical area in plan, so that the values of unitary typical vulnerability of each roof are comparable to each other (fig. 2). The calculated values – shown in the figure – make it explicit that the method

*della linea considerata definisce il contributo che tale linea fornisce alla vulnerabilità tipica della copertura. La vulnerabilità tipica totale di una copertura  $V_{tt}$  è data dalla somma dei contributi forniti da tutte le linee che definiscono lo schema delle falde. La vulnerabilità tipica unitaria  $V_{tu}$  di una copertura o di una porzione di copertura è il rapporto tra la vulnerabilità tipica totale e l'area*

assigns to the roof indicated with the letter d a unitary typical vulnerability a little more than double than the unitary typical vulnerability attributed to the one indicated with the letter a.

## 5. DETAILED EVALUATION OF VULNERABILITY

As known, the watertightness of a roofing system is guaranteed by the outermost layer, that covers the fields of the roof. Generally a roof has more fields, which consist of flat surfaces that intersect each other (defining ridge lines, hip lines and valley lines) and which are perimetrated by rake lines, eave lines and ridge lines. Moreover, various punctual elements (skylights, dormers, chimneys, antennas) can be present in the various fields of a roof, and they represent weakness points for the watertightness of the roof. In light of this, the vulnerability of a roof to water leakages was broken down into three components: *surface vulnerability*, *linear vulnerability* and *punctual vulnerability*.

*Surface vulnerability* depends on the slope of the roof, on the type of water shedding material, on the technology used for its installation, on the possible presence of additional waterproofing layers and of ventilation of the roof, as well as on the run of the roof.

Therefore for the calculation of surface vulnerability the following formula is proposed:

$$V_s = V_{so} \cdot k_s \cdot k_\ell \quad (3)$$

In which:

$V_{so}$  is the reference surface vulnerability, as function of the roofing material, of its installation technique and of the slope

$k_s$  is the coefficient that takes into account any further waterproofing layer and eventual roof ventilation

$k_\ell$  is the coefficient that takes into account the run of the roof.

The values of  $V_{so}$  for roofs with curved tiles as roofing material are in the table of fig. 3. They have been empirically estimated as a function of the installation technique, of the slope of the roof, of the possible presence of elements for fixing the tiles.

In the table of fig. 4 there are the reference values of  $k_s$ , empirically estimated as a function of the type of waterproofing layer placed under the roofing material and of the possible presence of ventilation.

della copertura (espressa in metri quadri) e può essere calcolata con la seguente formula:

$$V_u = V_n / A = (\sum_i \alpha_i \cdot \ell_i) / A \quad (2)$$

Nella quale:

$\alpha_i$  è il parametro di vulnerabilità della i-esima linea che definisce lo schema delle falde

$\ell_i$  è la lunghezza della i-esima linea che definisce lo schema delle falde

A è la superficie complessiva del tetto o della porzione di tetto considerata

Per una prima valutazione dell'effettiva validità del metodo proposto – a titolo di esempio – esso è stato applicato a quattro coperture aventi uno sviluppo planimetrico con geometria piuttosto semplice e che occupano una identica superficie in pianta, effettuando il calcolo dei valori di vulnerabilità tipica unitaria per ottenere valori confrontabili fra loro (fig. 2).

I valori calcolati – riportati in figura – rendono esplicito che il metodo attribuisce al tetto indicato con la lettera d una vulnerabilità tipica unitaria poco più che doppia di quella attribuita al tetto indicato con la lettera a.

### 5. VALUTAZIONE DETTAGLIATA DELLA VULNERABILITÀ

Come noto, la tenuta all'acqua di un sistema di copertura è garantita dal manto di copertura che ricopre le falde della copertura stessa; in genere una copertura presenta più falde, che sono costituite da superfici piane che si intersecano fra di loro (definendo linee di colmo, displuvio e compluvio) e che sono perimetrare da linee di bordo, di gronda e di colmo; inoltre nelle varie falde di un tetto possono essere presenti vari elementi puntuali (lucernari, comignoli, antenne) che costituiscono punti di debolezza per la tenuta all'acqua. Alla luce di questo, si è deciso di scomporre la vulnerabilità di una copertura alla tenuta all'acqua in tre componenti: vulnerabilità di superficie, vulnerabilità lineare e vulnerabilità puntuale.

La vulnerabilità di superficie dipende dalla pendenza di falda, dal tipo di manto di copertura, dalla sua posa in opera, dalla presenza o meno di ulteriori elementi di tenuta all'acqua, nonché dalla lunghezza della falda. Per il calcolo della vulnerabilità di superficie si propone quindi la seguente formula:

$$V_s = V_{so} \cdot k_s \cdot k_\ell \quad (3)$$

Nella quale:

$V_{so}$  è la vulnerabilità di superficie di riferimento in funzione del tipo e del modo di posa del manto

$k_s$  è il coefficiente che tiene conto di eventuali ulteriori strati di tenuta e della ventilazione sottomanto

$k_\ell$  è il coefficiente che tiene conto della lunghezza della falda.

Nella tabella di fig. 3 sono riportati i valori di  $V_{so}$  per tetti con manto di coppi, stimati empiricamente in funzione del sistema di posa in opera,



The values of  $k_t$  can be calculated with the following formulas:

$$\ell \leq 6 \text{ m} \quad k_t = 1 \quad (4)$$

$$\ell > 6 \text{ m} \quad k_t = 1 + (\ell - 6) \cdot 0,05 \quad (5)$$

Linear vulnerability depends on the type of lines which define the fields of the roof (see the previous paragraph concerning the synthetic evaluation of the typical vulnerability only), as well as the type of elements installed in order to protect that lines from the infiltration of rainwater. The values of the parameter  $\alpha$  for the different type of lines defining the roof fields and for the respective construction techniques are in the table in fig. 5.

della pendenza e della eventuale presenza di sistemi di fissaggio del manto. Nella tabella di fig. 4 sono invece riportati i valori di riferimento di  $k_s$  stimati empiricamente in funzione del tipo di strato di tenuta sottomanto e della presenza o meno di ventilazione del sottotetto.

I valori di  $k_t$  possono invece essere calcolati con le seguenti formule:

$$\ell \leq 6 \text{ m} \quad k_t = 1 \quad (4)$$

$$\ell > 6 \text{ m} \quad k_t = 1 + (\ell - 6) \cdot 0,05 \quad (5)$$

La vulnerabilità lineare dipende invece dai tipi di linee che definiscono lo schema delle falde (si veda in proposito il paragrafo precedente relativo alla valutazione della sola vulnerabilità tipica), nonché dal tipo di elementi posati in opera per proteggere le linee stesse dall'infiltrazione di acque meteoriche.

WATER SHEDDING MATERIAL: CURVED CLAY TILES			
Installation technique	Slope	Fastening	$V_{so}$
Simple laying on flat surface	15% < p < 20%	indifferent	0,12
	20% < p < 30%	indifferent	0,1
	30% < p < 45%	without fastening	0,09
		with fastening	0,085
	45% < p < 55%	without fastening	0,1
		with fastening	0,08
p > 55%	fastening is necessary	0,08	
Fresh mortar on flat surface	15% < p < 20%	without additional fastening	0,13
	20% < p < 30%		0,11
	30% < p < 45%		0,09
	45% < p < 55%		0,095
	p > 55%		0,1
Mortar battens	15% < p < 20%	indifferent	0,105
	20% < p < 30%	indifferent	0,085
	30% < p < 45%	without fastening	0,07
		with fastening	0,065
	45% < p < 55%	without fastening	0,075
		with fastening	0,06
p > 55%	fastening is necessary	0,06	
Battens parallel to eaves	15% < p < 20%	indifferent	0,1
	20% < p < 30%	indifferent	0,08
	30% < p < 45%	without fastening	0,065
		with fastening	0,06
	45% < p < 55%	without fastening	0,07
		with fastening	0,055
p > 55%	fastening is necessary	0,055	
Battens perpendicular to eaves	15% < p < 20%	indifferent	0,09
	20% < p < 30%	indifferent	0,075
	30% < p < 45%	without fastening	0,06
		with fastening	0,055
	45% < p < 55%	without fastening	0,065
		with fastening	0,05
p > 55%	fastening is necessary	0,05	
Corrugated cement or bitumen sheets	10% < p < 15%	indifferent for water shedding	0,075
	15% < p < 20%		0,06
	20% < p < 45%		0,05
	p > 45%		0,045

Figure 3. Exemplifying values of  $V_{so}$  for roofs with curved tiles installed with different laying systems and various slopes.

When curved tiles are installed without fastening, the slipping of the elements is common, this can cause the opening of a series of infiltration points along ridge and hip lines.

A similar phenomenon is also frequent when roofing elements are laid upon bituminous corrugated sheets. During spring and summer, the heat due to solar radiation warms and dilates the sheets, which therefore lengthen (the dilatation takes place mainly from the ridge towards the eaves, because a lengthening towards the ridge would lead to the raising of the tiles resting on the sheets); in addition heat softens the bitumen which can then be cut by the fastening nails. Once the temperature has become low again, the sheets will tend to regain their original length, and the shortening will take place keeping the lower end fixed, which will therefore gradually make the sheets slide towards the eaves. This phenomenon can lead to a sliding of many centimetres in a few years, this generating an almost continuous line infiltration line at ridges and hips. To take into account this quite common phenomenon, we can multiply the parameter  $\alpha$  by the coefficient  $k_v$ , to which we can attribute the values shown in the table in fig. 6.

*La tabella di fig. 5 riporta i valori del parametro di vulnerabilità  $\alpha$  per i differenti tipi di linee che definiscono lo schema delle falde e per le relative tecniche di realizzazione.*

*Nel caso di manti realizzati senza fissaggio dei coppi sono comuni i fenomeni di scivolamento degli elementi che causano l'apertura di una serie di punti di infiltrazione lungo le linee di colmo e di displuvio. Un fenomeno simile è comune anche nel caso di manti poggiati su lastre ondulate bituminose: in periodo primaverile/estivo il calore dovuto all'irraggiamento solare riscalda e dilata le lastre che si allungano (prevalentemente dal colmo verso la gronda, perché l'allungamento verso il colmo comporterebbe l'innalzamento dei coppi poggiati sulla lastra) e inoltre rammollisce il bitume che può quindi essere tagliato dai chiodi di fissaggio; riabbassatasi la temperatura la lastra tenderà a riaccorciarsi, e l'accorciamento avverrà mantenendo fisso l'estremo inferiore della lastra che pertanto tenderà gradualmente a scivolare verso valle, spesso anche di parecchi centimetri nel corso di pochi anni dando origine a una linea quasi continua di infiltrazione in corrispondenza di colmi e displuvi.*

Underlayment	Ventilation	$k_s$
Absent	absent	1,2
	present	1
Timber boards	absent	1
	present	0,9
Simply laid flat bricks	absent	0,9
	present	0,85
Flat bricks installed with mortar	absent	0,85
	present	0,8
Simply laid hollow core flat bricks	absent	0,95
	present	0,9
Hollow core flat bricks installed with mortar	absent	0,9
	present	0,85
Reinforced concrete slab	absent	0,6
	present	0,4
Bituminous membrane	absent	0,4
	present	0,2
Waterproof and breathable non-woven fabric	absent	0,3
	present	0,2
Counter battens	—	0,9

Figure 4. Exemplifying values of the coefficient  $k_s$  for various waterproofing layers to be put under the roofing material.

When curved tiles are installed without fastening, the slipping of the elements is common, this can cause the opening of a series of infiltration points along ridge and hip lines. A similar phenomenon is also frequent when roofing elements are laid upon bituminous corrugated sheets. During spring and summer, the heat due to solar radiation warms and dilates the sheets, which therefore lengthen (the dilatation takes place mainly from the ridge towards the eaves, because a lengthening towards the ridge would lead to the raising of the tiles resting on the sheets); in addition heat softens the bitumen which can then be cut by the fastening nails. Once the temperature has become low again, the sheets will tend to regain their original length, and the shortening will take place keeping the lower end fixed, which will therefore gradually make the sheets slide towards the eaves.

*Per tenere conto di questo fenomeno piuttosto comune, in presenza di tali tipi di manti di copertura, si può moltiplicare il parametro per il coefficiente  $k_v$ , al quale si possono attribuire i valori riportati nella tabella di fig. 6.*

*In analogia a quanto già scritto a proposito della vulnerabilità tipica, il prodotto tra il parametro  $\alpha$  e la lunghezza  $l$  (espressa in metri) della linea considerata – eventualmente moltiplicato anche per il coefficiente  $k_v$  nei casi previsti – definisce il contributo che tale linea fornisce alla vulnerabilità lineare della copertura. La vulnerabilità lineare totale è la somma dei contributi di tutte le linee che definiscono le falde di una copertura. La vulnerabilità lineare unitaria è il rapporto tra vulnerabilità lineare totale e area della copertura (espressa in metri quadri) e può essere calcolata con la seguente formula:*

Type of line	Construction technique	$\alpha$
Horizontal valley	Valley metal flashing without continuous support	1,2
	Valley metal flashing with continuous support	1,15
Inclined valley	Valley metal flashing without continuous support	1
	Valley metal flashing with continuous support	0,95
Hip	Simply laid curved clay tiles	0,55
	Curved clay tiles installed with mortar	0,5
	Curved clay tiles fastened with metal hooks	0,4
	Curved clay tiles fastened with metal hooks + waterproof and breathable non-woven fabric	0,35
	Simply laid big curved clay tiles	0,5
	Big curved clay tiles installed with mortar	0,45
Ridge	Simply laid curved clay tiles	0,45
	Curved clay tiles installed with mortar	0,4
	Curved clay tiles fastened with metal hooks	0,3
	Curved clay tiles fastened with metal hooks + waterproof and breathable non-woven fabric	0,25
	Simply laid big curved clay tiles	0,4
	Big curved clay tiles installed with mortar	0,35
Rake	No particular element	0,2
	Special clay tiles fastened to the support	0,15
	Metal rake flashing	0,15
Ridge on a single slope roof	No particular element	0,7
	Curved clay tiles installed with mortar	0,5
	Curved clay tiles fastened with metal hooks	0,4
	Metal flashing	0,3
Top abutment	Bricks protruding from the wall	0,5
	First row of curved clay tiles sealed with mortar	0,45
	Bricks protruding and tiles sealed with mortar	0,4
	Metal flashing	0,3
Side abutment	Bricks protruding from the wall	0,5
	Lateral row of curved clay tiles sealed with mortar	0,45
	Bricks protruding and tiles sealed with mortar	0,4
	Metal flashing	0,35
	Lateral gutter in metal sheet	0,3
	Lateral gutter and metal flashing	0,2

Figure 5. Exemplifying values of the parameter  $\alpha$  for various types of line and for various techniques that can be used.



This phenomenon can lead to a sliding of many centimetres in a few years, this generating an almost continuous line infiltration line at ridges and hips. To take into account this quite common phenomenon, we can multiply the parameter  $\alpha$  by the coefficient  $k_v$ , to which we can attribute the values shown in the table in fig. 6.

In analogy to what has already been written about typical vulnerability, the product between the parameter  $\alpha$  and the length  $\ell$  (expressed in meters) of the considered line – possibly multiplied also by the  $k_v$  coefficient in the considered cases – defines the contribution that this line provides to the linear vulnerability of the roof.

*Total linear vulnerability* is the sum of the contribution given by all the lines which define the fields of the roof. *Unitary linear vulnerability* is the ratio between total linear vulnerability and the area of the roof (expressed in square metres), and it can be calculated with the following formula:

$$V_{lu} = V_{lt} / A = (\sum_i \alpha_i \cdot k_{vi} \cdot \ell_i) / A \quad (6)$$

*Punctual vulnerability* depends on the type, shape, and dimensions of the elements of punctual discontinuity in the water shedding layer, and on the technical solution used to guarantee water tightness. The values of punctual vulnerability for various discontinuity are shown in the table in fig. 7.

*Total punctual vulnerability* is given by the sum of the values of punctual vulnerability given for all the discontinuity present in the roof. *Unitary punctual vulnerability* is given by the ratio between total punctual vulnerability and the area of the considered roof, and it can be calculated with the following formula:

$$V_{pu} = V_{pt} / A = (\sum_i V_{pi}) / A \quad (7)$$

$$V_{lu} = V_{lt} / A = (\sum_i \alpha_i \cdot k_{vi} \cdot \ell_i) / A \quad (6)$$

La vulnerabilità puntuale dipende invece da tipo, forma e dimensioni degli elementi di discontinuità puntuale del manto e dalla soluzione tecnica adottata per la tenuta all'acqua.

I valori di vulnerabilità puntuale sono riportati nella tabella di fig. 7. La vulnerabilità puntuale totale è data dalla somma delle vulnerabilità puntuali connesse a tutti gli elementi puntuali di discontinuità del manto di copertura. La vulnerabilità puntuale unitaria è data dal rapporto tra vulnerabilità puntuale totale e area della copertura considerata e può essere calcolata con la seguente formula:

$$V_{pu} = V_{pt} / A = (\sum_i V_{pi}) / A \quad (7)$$

La vulnerabilità complessiva della copertura sarà infine calcolata come somma dei tre tipi di vulnerabilità (di superficie, lineare unitaria e puntuale unitaria) come riportato nella seguente formula:

$$V = V_s + V_{lu} + V_{pu} \quad (8)$$

Ulteriori coefficienti amplificativi della vulnerabilità potranno essere definiti per tener conto delle specifiche condizioni di degrado; a seconda dei casi e dell'approfondimento dell'indagine, tali coefficienti potranno essere applicati alle singole componenti della vulnerabilità o alla vulnerabilità complessiva della copertura.

## 5. CONCLUSIONI

Il metodo di analisi del rischio di infiltrazioni di acqua dalle coperture – qui presentato a livello generale e descritto in modo dettagliato per quanto riguarda il calcolo della vulnerabilità – ha ampie possibilità di impiego tanto per la definizione della periodicità e della ampiezza dei controlli connessi alle attività di conservazione programmata, quanto per la valutazione comparativa di varie soluzioni tecniche e quindi, di fatto, come strumento di ausilio per attività progettuali.

L'assenza di approfonditi studi relativi alla quantificazione dell'efficienza tecnologica nel

Type of line	Construction technique	$k_v$
Ridge or top abutment	Simply laid curved clay tiles with 30% < p < 45%	1,1
	Simply laid curved clay tiles with p > 45%	1,2
	Curved tiles on corrugated bituminous sheets p > 30%	1,2
Hip	Simply laid curved clay tiles with 30% < p < 45%	1,07
	Simply laid curved clay tiles with p > 45%	1,14
	Curved tiles on corrugated bituminous sheets p > 30%	1,14

Figure 7. Exemplifying values of the punctual vulnerability for chimney tops, skylights, dormers, and antennas.



Finally, the *combined vulnerability* of the roof will be calculated as the sum of the three types of vulnerability (surface, unitary linear, and unitary punctual vulnerability) as in the following formula:

$$V = V_s + V_{lu} + V_{pu} \quad (8)$$

Further amplification coefficients for vulnerability can be defined to take into account the specific decay conditions; depending on the cases and on the level of detail of the investigation, these coefficients can be applied to the individual components of vulnerability or to the combined vulnerability of the roof.

## 6. CONCLUSIONS

The method of risk analysis of water infiltration from roofs – here presented at a general level and described in detail with reference to the calculation of vulnerability – has wide possibilities of use both for the definition of the periodicity and extent of controls related to the activities of planned conservation, and for the comparative evaluation of various technical solutions for the refurbishment of a roof, and therefore as an aid tool for design activities. The absence of detailed studies concerning the quantification of the technological efficiency over time of discontinuous roofing deprive of an aid in defining the parameters necessary for the application of the method, therefore it was necessary to use qualitative judgments concerning the various construction techniques present in the technical literature, and the empirical knowledge of the phenomenology of discontinuous roofing degradation. Only an extensive application of the method will confirm the validity of the values of the parameters thus defined or suggest their modification; an application of the method is already ongoing for some historical building complexes of the University of Pavia which are characterized by a wide variety of technical solutions for roofing materials.

## 7. REFERENCES

- [1] Della Torre S., “Manutenzione” o “conservazione”? La sfida del passaggio dall’equilibrio al divenire. In: *Ripensare alla manutenzione. Ricerche, progettazione, materiali, tecniche per la cura del costruito*, Scienza e Beni Culturali, XV, a cura di G. Biscontin e G. Driussi, Arcadia Ricerche, Marghera-Venezia, 1999, p. 71-80.
- [2] Urbani G., *Intorno al restauro*. Milano: Skira, 2000.
- [3] Morandotti M., Zamperini E., Lucenti S., D’Andrea M., Expeditious survey of historic timber roofs. An applied research for Palazzo San Felice in Pavia, Italy. In: *CD-ROM Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016)*, a cura di J. Eberhardsteiner, W. Winter, A. Fadai, M. Pöll. Vienna: Vienna University of Technology, 2016, p. 3020-3029.
- [4] Corsanego A., Meccanica delle strutture e vulnerabilità delle costruzioni esistenti. In: *Tecniche della conservazione*, a cura di A. Bellini. Milano: Franco Angeli, 1990. p. 285-

*tempo delle coperture discontinue, che possano fornire un ausilio nella definizione dei parametri necessari all'applicazione del metodo, ha costretto a basarsi sui giudizi qualitativi inerenti le varie tecniche costruttive presenti nella letteratura tecnica e sulle conoscenze empiriche della fenomenologia del degrado delle coperture discontinue. Solo un'estesa applicazione del metodo – già in atto per alcuni complessi edilizi storici dell'Università di Pavia e caratterizzati da un'ampia varietà di soluzioni tecniche adottate – potrà confermare la validità dei valori dei parametri così definiti o suggerirne la modifica.*

356.

- [5] Doglioni F., Moretti A., Petrini V., *Le chiese e il terremoto*. Trieste: LINT, 1994.
- [6] Doglioni F., *Codice di pratica (linee guida) per la progettazione degli interventi di riparazione, miglioramento sismico e restauro dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigiano del 1997*. Bollettino Ufficiale della Regione Marche, a. XXXI, n. 15, 29 settembre 2000.