

Riccardo Pollo, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino

riccardo.pollo@polito.it

**Abstract.** Il contributo descrive un lavoro di ricerca per lo sviluppo di una procedura sperimentale di valutazione probabilistica della durabilità basata sulla FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), che la norma ISO 15686-1 pone tra i metodi per la valutazione della durabilità degli edifici e sull'uso dei BIM (Building Information Modeling). Il lavoro illustra e discute la metodologia, applicata a un caso studio, evidenziando l'utilità della FMEA e le difficoltà insite nell'uso di dati eterogenei per elaborare modelli e previsioni. Allo scopo di orientare le scelte progettuali, le informazioni della letteratura, dei produttori di materiali e componenti, dell'esperienza dei progettisti e gestori su soluzioni, materiali e componenti, sono elaborate da parte degli esperti definendo modelli di funzionamento e di degradamento. Il confronto con le reali condizioni di impiego, le scelte architettoniche, gli agenti ambientali e l'abilità delle imprese, definiti dal progettista, permette di valutare la probabilità di successo della soluzione adottata. I risultati derivanti dalla sperimentazione si sono mostrati realistici e coerenti con le indicazioni delle buone pratiche progettuali incoraggiando lo sviluppo della ricerca in tal senso.

**Parole chiave:** Durabilità, Ciclo di vita, FMEA, Progetto

## Premessa

Il contributo analizza un'esperienza progettuale in cui all'uso di un diffuso software BIM è stata associata una procedura sperimentale di valutazione della durabilità e del ciclo di vita basata sulla FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) e sulle tecniche dell'analisi di affidabilità. L'adozione di tecniche previsionali che consentano di valutare in fase di progetto la durabilità di soluzioni progettuali, sia nel riuso di manufatti edilizi esistenti, come nel caso oggetto dello studio, sia in edifici di nuova costruzione, rappresenta uno strumento per l'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse, ambientali, energetiche ed economiche. L'obiettivo generale di questo lavoro è, pertanto, quello di contribuire al migliore uso e risparmio di risorse. Tale obiettivo si inquadra nella tendenza a progettare e costruire in un'ottica di valutazione dei costi,

## Building Design, Durability, Maintenance: Methodology for the Durability Forecasting

**Abstract.** The paper describes a research based on the use of the software BIM (Building Information Modeling) which is associated with an experimental procedure of the evaluation of durability and the life cycle based on FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), one of the methods for durability assessment indicated by the ISO 15686-1 standard. The study shows the methodology and develops a case study on the refurbishment of an old building and discusses its outcome. The experiment on one side illustrates the utility of the analytical approach of FMEA and on the other side the difficulty to use different data and information to be considered in the durability evaluation carried out by the designer based on the expert assessment. The role of the experts is to design a model and to assess the criticality of each event and to define the relationship between the causes and effects on building elements function. The designer

ambientali ed economici, nell'intero ciclo di vita del manufatto, allo scopo di minimizzarli e di giungere, in ultima istanza, a una economia che, analogamente ai cicli naturali, preservi l'equilibrio tra società umana e ambiente. L'obiettivo specifico è quello di sviluppare una procedura semplificata e parzialmente automatizzabile che permetta al progettista, sulla base delle proprie scelte, dei profili ambientali del sito e della qualità delle maestranze, di valutare le diverse opzioni utilizzando le conoscenze disponibili sul comportamento in servizio di specifiche soluzioni tecnologiche. La procedura elaborata è stata applicata, al fine di valutarne limiti e potenzialità, ad un caso concreto per confrontare scelte progettuali in relazione ai principali meccanismi di degradamento e al rischio che la loro attivazione conduca a una vita di servizio sensibilmente inferiore a quella di progetto. In particolare sono state simulate in una chiusura esterna verticale, costituita da una muratura in mattoni pieni intonacati, la penetrazione di acqua, meteorica, di risalita e di ruscellamento superficiale.

## Costruire e mantenere per il Ciclo di vita

L'ambiente costruito, il cui impatto in termini di consumi energetici ed emissioni è ben noto, rappresenta l'ambito fondamentale di un nuovo approccio basato sul 'mantenere' in alternativa al 'costruire' sul 'conservare' invece che 'consumare'. La cultura della manutenzione è nel mondo contemporaneo sinonimo di mantenimento della qualità declinata nei suoi diversi aspetti, dalla funzionalità, alla sicurezza, alla tutela del paesaggio. Mantenere e conservare significa uscire dalla 'società dei rifiuti', difendere la qualità di vita, attuare, rispetto all'ambiente, un'attività che Giuseppe Ciribini avrebbe definito 'neghentropica'. In molti settori, a cominciare

has to define the environmental conditions of the site, the specifications of the material used, the skills of workmanship. The study has shown a quite realistic outcome and significant indications for the designer. Such a result suggests the development of the research.

**Keywords:** Durability, Life cycle, FMEA, Design

## Preface

The technical forecast adopted allows to evaluate durability in the design phase. Different options, in the refurbishment as well as in the new construction can be compared and evaluated in the design phase to save on the environment, energy and monetary funds. The main target of this study is to contribute to the best usage of scarce resources. This specific target is to let the designer have a simple procedure to evaluate and compare design choice durability in re-

lation to the site conditions and workmanship. In this evaluation the know-how on the technological solutions and material performance originating from other disciplines can be exploited. The procedure developed has been applied to a case study in order to evaluate the risk that the service life of building components and subsystems which are significantly shorter than the design life. In particular, we analyzed the water penetration in the brickwork, coming from rain, underground and ground surface and its consequences.

## Building and maintenance for the Life Cycle

The built environment has a deep impact on Energy consumption, emissions and sustainability. A new approach based on maintenance and conservation has to be adopted instead of consumption and waste. We need a true

da quelli in cui le problematiche di sicurezza ed affidabilità sono più rilevanti, quali il nucleare e l'aerospaziale, le discipline della qualità hanno sviluppato gli aspetti progettuali analizzando le variabili di affidabilità, manutenibilità e sicurezza. Tali metodologie sono state in seguito impiegate in molti altri ambiti produttivi sino all'analisi dei servizi sociali. Nell'ambito dell'edilizia il tema è stato al centro di programmi di ricerca internazionali<sup>1</sup> e di produzioni normative, quali le norme della serie ISO 15686 "Buildings and constructed assets - Service life planning". L'impatto sull'ambiente della produzione dei componenti edilizi, dell'attività manutentiva in sé stessa, nonché l'influenza della manutenzione sia dell'involucro sia degli impianti sui consumi energetici e sulle emissioni in opera è innegabile. In altri termini, un ritmo di sostituzione dell'edificio e delle sue parti sempre più sostenuto o una elevata inefficienza per carenze manutentive sono in grado di indurre significative pressioni sull'ambiente. La correttezza delle scelte effettuate nelle fasi di progetto e costruzione, evitando gli errori, riveste quindi una fondamentale importanza per il ciclo di vita dell'edificio<sup>2</sup>.

## Durabilità e progetto

Uno degli obiettivi più importanti che ci troviamo di fronte è, quindi, quello di migliorare la nostra attività di progettazione, di ridurre gli errori, di adottare le soluzioni migliori, con il minore impatto sull'ambiente. Nell'ambito della tecnologia dell'architettura, della scienza dei materiali, dell'ingegneria civile e delle discipline del restauro si è registrata nell'arco dei decenni un'intensa attività di ricerca sui temi della durabilità e delle patologie edilizie. In particolare, sono state sviluppate ricerche sulla durabilità del calcestruzzo nelle opere di genio civile e sul degrado

culture of maintenance of our environment aimed to save the quality of our life, our safety and landscapes. This vision would have been defined in the 80's by Giuseppe Ciribini as 'neghentropic'. In many industrial sectors such as nuclear and aerospace where the reliability and safety issues are more relevant, the quality disciplines have developed the forecasting in design phase of durability. Maintainability, reliability and availability concepts come from these engineering fields. These methods were later applied in many fields in manufacturing and also in the services fields. In the construction field, many international researches<sup>1</sup> have been carried out and International standards such as ISO 15686 series "Buildings and constructed assets - Service life planning" have been created. The great impact on the environment of building sector and building operation and its use is to be

considered. A more durable building and a more efficient maintenance of HVAC systems is highly sustainable. To reach this goal in the whole building life cycle, we have to design better and to avoid design and construction errors<sup>2</sup>.

### Design and durability

Therefore the main goal for the designer is to choose the best solutions to prevent errors that can reduce the impact on environment. In the architectural technology field as well as civil engineering, the building material science technology, the durability and the building pathology are deeply studied. In particular, the scientists are devoted to studies on the concrete durability and stone deterioration. At the end of the past century mainly in Great Britain and France, a building maintenance discipline was established. Building defects, maintenance management were investigated

delle superfici lapidee naturali e artificiali dei manufatti edilizi storici. Alla fine del secolo scorso, soprattutto in Gran Bretagna e in Francia si sono condotte numerose ricerche su vasta scala inerenti la durabilità dei manufatti edilizi, i difetti della costruzione e i casi di guasto. In anni più recenti è stato tentato lo sviluppo di metodologie e applicazioni della FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) all'analisi del comportamento in servizio di manufatti edilizi. In particolare, sono state condotte ricerche sul tema da parte del CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, che ha sviluppato un programma sull'uso della FMEA in edilizia e sono in corso esperienze in ambito statunitense che, all'interno del vasto ambito di ricerche sull'interoperabilità dei dati e sul BIM, sviluppano il tema dell'analisi di affidabilità in relazione alla simulazione del progetto e alla *pre-occupancy evaluation*<sup>3</sup>. È evidente, tuttavia, un'oggettiva difficoltà ad applicare ai diversi comportamenti in servizio riscontrabili negli edifici modelli e metodologie. I dati che intervengono nella definizione di un progetto sono, infatti, molteplici ed eterogenei per carattere e provenienza. Il quadro degli agenti è variabile così come la domanda è parcellizzata e le tecnologie sono numerose e articolate, anche per il carattere eminentemente locale del settore edile. Il nodo consiste nel rendere comunicanti settori del sapere e della prassi ancora oggi separati. Abbiamo, infatti, molte conoscenze sul comportamento in servizio degli edifici e sull'interazione tra agenti esterni e sistema degli spazi e tecnologico/edilizio, che spesso non sono condivise da tutti gli operatori.

## La sperimentazione

L'obiettivo della sperimentazione condotta consiste nella definizione di una metodologia di valutazione quali-quantitativa

and a rich literature and practice was developed. The FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) and probabilistic approach have been suggested by many authors. In particular, research has been carried out on the issue by the CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, which has developed a program on the use of the FMEA in construction. In the U.S. the reliability analysis and the FMEA has been proposed in the pre-occupancy evaluation, within the broad field of research on data interoperability<sup>3</sup>. Nevertheless, the efforts show the difficulty of the models to describe the real behaviour of building systems and components. The environmental profiles are very different from one another, also the building elements characteristics vary so much from an area to the other and, nevertheless, the quality of the work in site of construction is not like the work in a factory. The

core of the problem is the communication between the subjects of the building process. Researchers and academics, designers, developers and clients do not speak the same language and they do not share the knowhow.

### The experiment

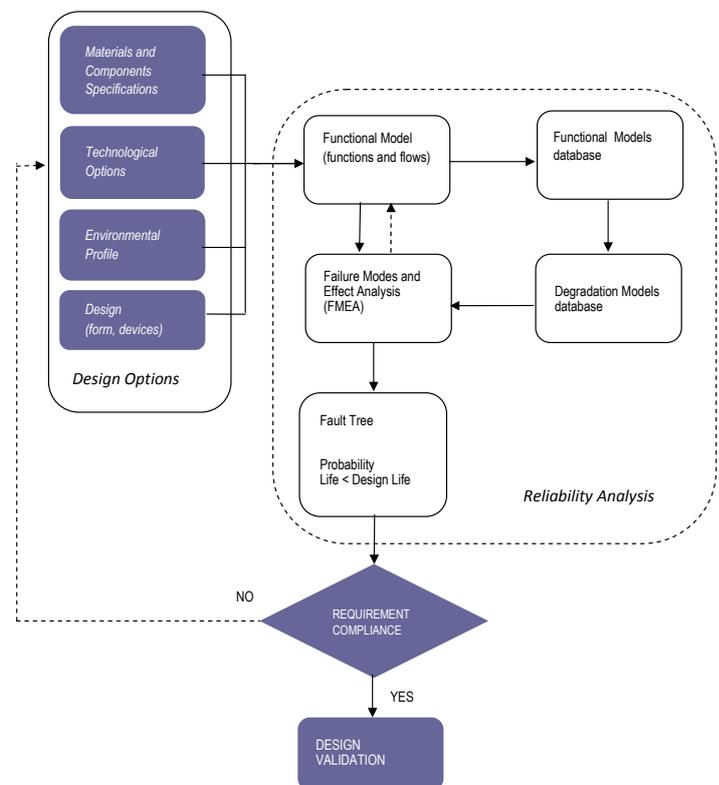
The goal of the experimentation is the development of a qualitative-quantitative method to assess the building sub-systems durability in the design stage. The methodology can be a part of a software design tool for design for durability. The software, developed by specialist in reliability analysis and building pathology and maintenance as well, will be used by the designer of the building to optimise the design solution and the choices of materials and components. The use of the software by the architect must be very simple and fast and its use only requires the informa-

adottabile a livello progettuale, con un valore di orientamento delle scelte tecnologiche del progettista. Il suo utilizzo deve essere semplice e basarsi su informazioni acquisibili dall'architetto nell'ambito delle usuali indagini e attività. L'analisi permette, attraverso l'individuazione del modello funzionale di una parte essenziale del sistema tecnologico, le chiusure esterne verticali opache, di simularne il comportamento in servizio valutandone la durabilità. Il modello funzionale mette in relazione i diversi strati individuando le cause di guasto a partire dalla conoscenza consolidata sui degradi e le patologie. In relazione ai meccanismi considerati viene valutata la probabilità che essi si attivino determinando la probabilità di guasto del sistema. Il metodo proposto non sostituisce, tuttavia, le indagini che devono essere comunque condotte in tutti i casi in cui si presentino problemi di particolare entità o manufatti edilizi di valore storico documentale. Esso può costituire uno strumento di orientamento nelle scelte e una linea guida nella considerazione dei problemi correnti che condizionano il comportamento in servizio di un sistema edilizio. I requisiti principali che il metodo deve rispettare sono, come accennato, la semplicità di applicazione e un grado sufficiente di affidabilità dei risultati. Nell'ambito del processo progettuale l'analisi si colloca in una fase di progettazione del sistema tecnologico dalle prime ipotesi alla definizione di tutte le variabili del sistema e può essere condotta prendendo in considerazione le classi di elementi tecnici, quali le chiusure verticali esterne, le coperture, le pavimentazioni. Le scelte tecnologiche possono essere valutate individuando nei principali elementi tecnici i sottosistemi da analizzare e descrivere mediante modelli funzionali specifici nei quali i fenomeni di degradamento assumono forme peculiari. La procedura progettata si basa sull'associazione di un modello fun-

tion about the site, the materials and components technical specifications, the type of sub-system (i.e. double layered external wall by bricks), the form of the building and the interfaces with other sub-systems and components (i.e. structure, gutters, water pipes etc.). In the experimentation we analyze an external wall, a basic part of the building which is particularly exposed to agents such as the weather and use. First of all, the functional model of the sub-system must be clearly identified by the designer. We must assume that many functional models must be developed in relationship with the specific behaviour of any technical solution (i.e. a ventilated facade has a different way to control the daily heat flux through the wall and the water protection by a one layer brickwork). The knowledge by the building pathology experts and analysts is embedded in the software for the par-

ticular functional model. The role of the architect is to input the data referred to his options, materials and the components technological characteristics. The output of the software is a probabilistic estimation of durability referred to the particular design solution. However, this method has to be considered only as a design tool giving the architect a rough evaluation of durability. All the investigations aimed to acquire the knowledge about the building conditions (i.e. chemical analysis, thermal analysis and other surveys) are still required, above all in the case of restoration of historical buildings. A single layer external brickwork wall, with a thickness of about 50 cm, is analysed in the methodology developed. Its functional model set up and probability calculations are carried out in two different designs. The environmental profile (weather data, ground characteristic,

zionale di parete perimetrale pluristrato, a stratigrafia compatta, predisposto dagli esperti sulla base delle conoscenze scientifiche correnti, con i dati e le caratteristiche dello specifico progetto che vengono definiti dal progettista architetto. La metodologia prevede di sottoporre a valutazione, nel corso della progettazione, soluzioni alternative, sia nella scelta dei materiali sia nell'adozione di accorgimenti progettuali, fornendo una previsione probabilistica della propensione del sistema ad adempiere le funzioni richieste per il tempo previsto, in presenza di una manutenzione preventiva corrente. Si intende valutare la probabilità, associata a condizioni ambientali e scelte progettuali specifiche, che la durata di vita del sistema parete sia minore della vita di progetto assegnata (*design life*). In altri termini, che la perdita di prestazioni della parete avvenga prima di quanto previsto dal progetto. La valutazione dei potenziali meccanismi di degradamento e delle loro conseguenze viene condotta mediante le metodologie della FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) e della FTA (Fault Tree Analysis). Nella figura 1 viene illustrato il processo di progettazione e di valutazione degli elementi del sistema tecnologico. I blocchi evidenziati in grigio rappresentano le variabili controllate dal progettista, quelli in bianco le fasi elaborate dal sistema di valutazione che sono predisposte dagli analisti sulla base delle conoscenze sul comportamento in servizio del sistema.



02 | Abaco delle caratteristiche tecnologiche dei materiali della muratura nel software BIM

*The material dataset in the BIM software*

03 | Dettaglio dell'abaco delle caratteristiche tecnologiche dei materiali della muratura nel software BIM. Viene evidenziato l'assorbimento d'acqua per capillarità secondo la UNI EN 1015-18

*The material dataset of the BIM software showing the plaster water absorption as defined according to the UNI EN 1015-18 standard*

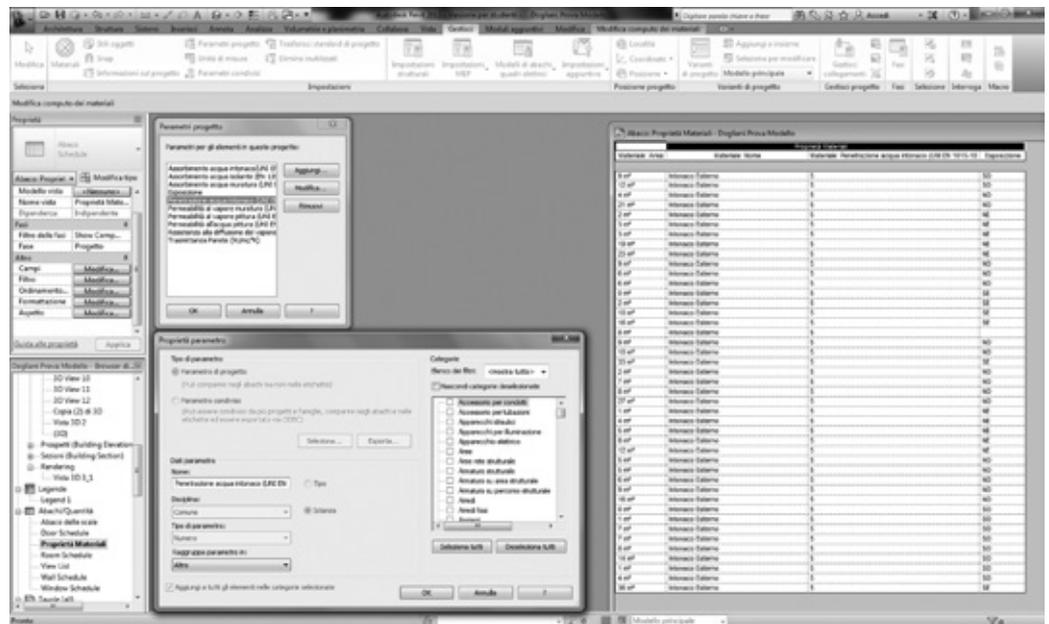
L'individuazione dei fenomeni è stata fatta sulla base della letteratura scientifica. I fenomeni presi in esame vengono considerati in grado di indurre nel sistema decadimenti delle funzioni richieste definibili come guasti<sup>4</sup>. Di questi si intende stimare, in relazione alle caratteristiche specifiche del progetto, la probabilità di accadimento. Tale probabilità viene espressa come probabilità che il sistema, nel caso analizzato la parete perimetrale, riduca la sua vita utile rispetto a quella stimata in fase di progetto ad un valore minore, che può essere individuato dall'analista in base all'esperienza. I diversi guasti, in relazione alla specifica riduzione della durata di vita che determinano, contribuiranno alla riduzione della vita di servizio del sottosistema parete nel suo complesso. Tale riduzione, stimata in modo probabilistico, darà al progettista un'indicazione sulla bontà della soluzione adottata in relazione ai fattori considerati. Si ritiene, inoltre, che l'uso nella progettazione di strumenti quali i BIM (Building Information Modeling), in grado di simulare allo stato di progetto la configurazione, la stratigrafia ed un modello, in prima istanza grafico e spaziale, aderente a quanto verrà costruito, possa permettere, analogamente a quanto già avviene per il comportamento termo-igrometrico, di simulare anche l'evoluzione nel tempo della qualità del sistema e dei singoli componenti. Nelle figure 2 e 3 sono riportate le maschere e gli abachi del software BIM<sup>5</sup>.



03 |

02 |

exposure etc.) is the same in the two designs compared in the evaluation but different materials and devices (such as drainage, gap in between ground and foundations etc.) are considered. The durability assessment takes account of a regular preventative maintenance such as cleaning, external painting replacement and consider a fixed design life. The evaluation will be the probability of serious failure before the end of design life. In this way the design features are related to the sub system durability in the particular environment. The assessment has been developed according to the FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) and FTA (Fault Tree Analysis) procedures. In the following figure (Fig. 1) the whole evaluation process is showed. The gray blocks are referred to the design and are the architect duties. The white ones are the software functions. The data, calcula-



I dati derivanti dal BIM vengono esportati nel software per la definizione della probabilità di riduzione della vita prevista. Le altre informazioni più qualitative, come l'esposizione e il clima locale, vengono imputate dall'architetto sulla base di una scala di valori proposta dall'analista consentendo il calcolo automatico della probabilità dell'evento. La relazione tra i valori e i punteggi avviene sulla base della conoscenza di ciascun processo di degradamento (quali la penetrazione dell'acqua, la distruzione dovuta al gelo ecc.) da parte dell'analista. La valutazione finale della durabilità dipenderà, quindi, dal modello e dai punteggi assegnati a ogni causa.

Occorre ricordare che le analisi probabilistiche condotte si basano su conoscenze ormai consolidate delle dinamiche dei degradi e delle patologie edilizie e sull'elaborazione dell'esperienza concreta. Su questa base è possibile ipotizzare, operando sulla probabilità delle singole cause, indicazioni sulla strategia migliore da adottare allo scopo di ottimizzare la durabilità evitando sia errori nella progettazione sia l'adozione di soluzioni e accorgimenti non necessari.

Nella valutazione condotta sono stati presi in considerazione:

- gli agenti esterni specifici del contesto d'uso del manufatto;
- le condizioni di uso;
- le prestazioni dei materiali e componenti impiegati risultanti dalla documentazione tecnica o assimilabili ai valori tipici delle prestazioni indicati dalla letteratura;
- la forma del sistema, cioè la relazione tra le diverse parti nel suo funzionamento;
- le variabili del progetto in grado di influenzare il comportamento del sistema: la forma dell'edificio, i dettagli costruttivi e le interfacce con altri sottosistemi.

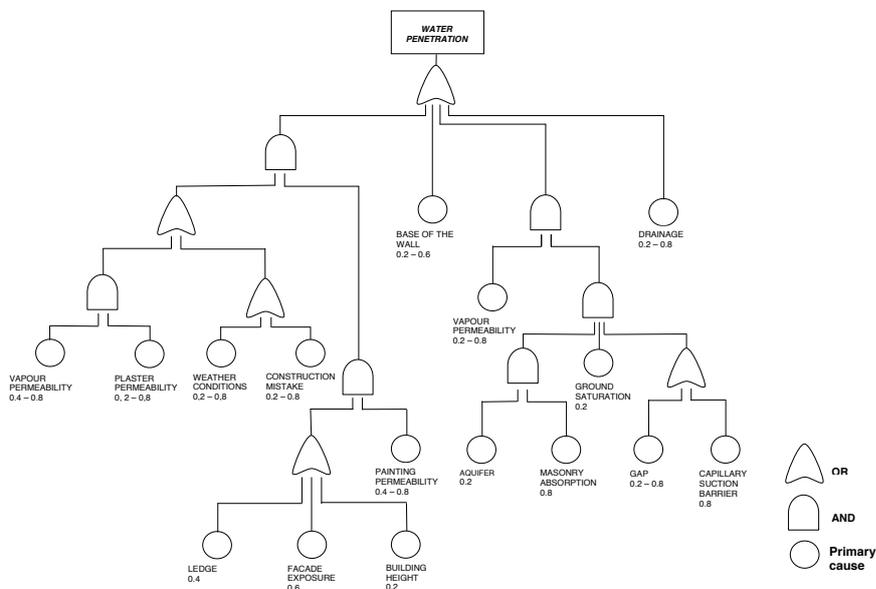
È stato condotto uno studio dei meccanismi di degradamento legati a:

- penetrazione di acqua nella muratura;
- fessurazione;
- gelività;
- sporcabilità;
- dilavamento.

Tale studio ha portato all'elaborazione di un'analisi dei modi di guasto e allo sviluppo di alberi di guasto che mettono in relazione le cause, di diversa natura, influenti sulla determinazione della probabilità che i diversi fenomeni di degradamento intervengano riducendo la durata attesa del sistema rispetto a quella prevista. La valutazione probabilistica viene condotta considerando le connessioni fisiche tra le parti del sistema, quali intonaco, pittura, supporto murario, terreno, fondazioni ecc. e la loro interazione funzionale. La stima delle probabilità di ciascun evento, che dà origine alla stima della probabilità della riduzione della vita di servizio, viene condotta a partire da giudizi di esperti elaborati sulla base della letteratura e dell'esperienza. Nella figura 4 riportiamo l'albero di guasto che descrive il rischio di mancato controllo della penetrazione di acqua nella muratura. Le cause degli eventi, definiti quali guasti del sistema, sono tra loro correlate attraverso le porte logiche "AND" e "OR" che rappresentano la connessione degli eventi causali a seconda che richiedano il verificarsi di entrambe le condizioni o che sia sufficiente una di esse per determinare l'evoluzione di un processo di degradamento quale la penetrazione e il ristagno di acqua, meteorica, di risalita o di ruscellamento. Le caratteristiche tecnologiche dei materiali impiegati sono registrate negli abachi del software BIM in modo da essere importabili nel modello per il calcolo e la valutazione delle probabilità di guasto.

04 | Albero di guasto rispetto all'evento  
Penetrazione di acqua nella muratura.  
Sono indicate le probabilità di  
accadimento dell'evento causale della  
progressione verso il guasto delle due  
soluzioni alternative  
*Fault tree of the event Water penetration  
in masonry. The event probability towards  
the system failure of the design options  
is shown*

04 |



Quale caso studio, allo scopo di contestualizzare la metodologia, è stato esaminato un intervento di recupero di un edificio rurale risalente alla seconda metà dell'ottocento.

05 |



05 | L'edificio durante le indagini geologiche  
The building during the geotechnical investigations

Lo studio è stato preceduto da una fase di rilievo geometrico, di indagine geologica e dal rilievo dei fenomeni di degrado. Lo studio si è concentrato sulle soluzioni progettuali per le murature perimetrali. Il sottosistema della chiusura è composto da:

- murature in mattoni pieni;
- intonaco di malta di calce aerea parzialmente sostituito da un intonaco di malta a base cementizia;

tions and risk levels are defined by the experts. The architect must record the material specifications coming from the producer technical sheets, such as painting vapour permeability and water penetration, the weather conditions, coming from meteorological data, the exposure of the facades. The functional model, developed on the basis of the scientific literature on the argument, analyzes the main functions and deterioration mechanism of the wall leading to the decay of performances required. Such decays can be considered as system failures<sup>4</sup>. The aim of the model is the assessment of the probability of the failure during the design life of the sub-system of the wall. The consequence of the failure is the shortening of its lifetime from the expected value, the design life, to a reduced lifetime. The amount of such a reduction is estimated by the expert and is an output of the

software.

The combination of the model with the BIM (Building Information Modelling) comes from the character of BIM software which puts together the drawing of the building element with the technological data such as water permeability etc. In the Figures 2, 3 the input mask of the BIM software<sup>5</sup> is shown. The data is exported to the software for calculations. The other more qualitative information, such as exposure, severity level of local climate come from the architect on the basis of a scale of values given by the analyst and a score in term of probability, is automatically calculated. The relationship between values and scores is made on the knowledge of any degradation process (i.e. water penetration, expansion and destruction due to the freezing etc.) by the analyst. The durability assessment output depends on this knowhow, model and scores.

- serramenti in legno;
- sistema di smaltimento acque meteoriche composto da gronde e pluviali in acciaio zincato;
- fondazione continua in mattoni e pietra.

In relazione al progetto sono state definite le condizioni ambientali al contorno e, in particolare:

- i dati relativi al clima locale (precipitazioni, ventosità, andamento delle medie delle temperature minime, massime ed estreme);
- la profondità della falda acquifera;
- le caratteristiche di assorbimento d'acqua e di permeabilità del terreno.

I sistemi tecnologici e i manufatti presenti nelle adiacenze dell'edificio, in particolare:

- le pendenze del terreno;
- la presenza di dispositivi di smaltimento delle acque meteoriche;
- le acque superficiali.

In relazione alle caratteristiche rilevate è stata testata la metodologia in rapporto alle possibili scelte del progettista che sono state valutate comparativamente agendo su:

- la scelta dei materiali per il rifacimento degli intonaci e delle pitture;

- l'indicazione sulla strategia per la protezione dall'umidità di risalita (intercapedine perimetrale, barriera fisica, chimica ecc.);
- le eventuali misure da adottare per la protezione della facciata;
- controllo e regimentazione delle acque meteoriche superficiali.

Ai fattori ambientali quali le condizioni climatiche, l'esposizione delle strutture, la profondità di falda nonché ai caratteri architettonici dell'edificio, quali i cornicioni, e alle caratteristiche del terreno è stato assegnato un valore di probabilità comune alle

In the evaluation we have considered the following items:

- agents affecting the wall;
  - use conditions;
  - performances of materials and components coming from technical sheets or from the technical literature;
  - the sub-system form, intended as the links between the parts of the system and the type of interface;
  - the design elements affecting the sub-system behaviour such as the building form, the details of the facades, the interfaces with other sub-systems (i.e. drainage ducts, windows, structure, foundations).
- The degradation mechanisms such as that have been considered in the study are:
- water penetration in the wall;
  - wall cracking;
  - freeze Thaw destruction;
  - dirt;

- washout.

The steps of the analysis are the development of an FMEA based on literature and experts and the FTA for every degradation mechanism and failure. The causes identified in the FMEA are interrelated with the FTA and the probability of each cause assessed in the two design options. In the following Figure (Fig. 4) the water penetration is described. The values of probability, in the two design alternatives compared, are under the symbol of the primary cause described by the subtitle in the figure. Such titles are referred to cause coming from errors by workers in construction, material performances, environmental factors, design features.

The events causes are related by logic gates "AND" and "OR" showing character of the connection and the different weight in the probability assessment. In particular the behaviour of the external

alternative. Si differenziano, nelle soluzioni esaminate, le probabilità assegnate a scelte tecnologiche quali:

- la realizzazione di un'intercapedine perimetrale o di una barriera fisica alla risalita capillare attraverso la muratura;
- la presenza di una zoccolatura perimetrale a protezione della parte bassa della muratura esposta alla pioggia di rimbalzo;
- la realizzazione di canalette per la raccolta delle acque e il drenaggio del terreno.

Per la scelta dei materiali si sono esaminate le alternative tra intonaci e pitture dotate di buoni valori di impermeabilità all'acqua e permeabilità al vapore e pitture e intonaci meno traspiranti. Oltre all'esame del fenomeno di penetrazione idrica si è condotta l'analisi dei fenomeni di fessurazione del rivestimento e del rischio di gelività e sono stati analizzati gli scenari ipotizzabili giungendo all'elaborazione di punteggi che evidenziano le possibili strategie e gli errori da evitare date le condizioni del contesto.

**I risultati dell'elaborazione** Il confronto tra le due soluzioni in termini di probabilità di riduzione della vita utile mostra differenze rilevanti. La variazione della probabilità di guasto rispetto alla penetrazione di acqua, con una riduzione della durata di vita attesa, appare sufficientemente significativa variando dal 98%, nel caso dell'adozione di materiali più economici e della non esecuzione dell'intercapedine di ventilazione perimetrale, al 37% raggiungibile con provvedimenti adeguati quali l'intercapedine, l'adozione di una pittura dotata di un'adeguata resistenza alla penetrazione di acqua e di un intonaco deumidificante. L'adozione di misure più impegnative, quali la barriera fisica e chimica, la protezione con cornicioni o l'adozione di pitture idrorepellenti, non appare giustificata.

wall is investigated in relation to the risk of water penetration from meteoric water, the water coming from the ground (the building hasn't any underground floor) and from the water flowing on the ground related to the slopes.

The case study is referred to a refurbishment of a rural house built in the middle of the 19th century.

In the following picture (Fig. 5) the house is shown.

Before the study, a survey on the degradation and a geological survey on the ground features was carried out.

The wall sub-system is composed of:

- brickwork;
- plaster. Partly lime and in part cement;
- foundations by bricks and stones;
- wooden windows;
- drainage and gutters by galvanized metal ducts;
- foundations in bricks and stone.

In relation to the project the environ-

mental conditions have been defined:

- climate data of the project (rain, wind, mean maximum and minimum temperatures, extreme temperatures);
- depth of underground waters (aquifer);
- water absorption and permeability of the ground.

The following elements are also taken into account

- ground slope;
- superficial waters/stormwater disposal.

The following design options have been assessed in relation to the building features and the local environment:

- materials for the external painting and plaster;
- the design strategy to prevent the water absorption of the brickwork from the ground (gap between the ground and the wall, chemical or mechanical barrier);
- the need of facade protection;

Le risultanze dell'analisi del fenomeno di penetrazione idrica sono confermate dall'esame di quelli di fessurazione e gelività.

## Conclusioni

Il metodo ipotizzato, pur richiedendo un impegno notevole a monte del suo utilizzo da parte di specialisti ed esperti, consente al progettista una rapida analisi dei problemi in gioco attraverso il rilievo degli agenti e l'imputazione con una semplice maschera. Tale meccanismo obbliga il progettista stesso a non trascurare le variabili più importanti da considerare e ad operare scelte minimamente consapevoli. Tuttavia, occorre sottolineare che, pur con l'impiego di una metodologia affidabilistica consolidata, la valutazione si basa su giudizi soggettivi degli esperti, in particolare sulla stima delle probabilità relative ai diversi eventi che influenzano la riduzione della vita utile. Tale circostanza evidenzia, da un lato, la necessità di adottare da parte dei progettisti soluzioni conformi da sottoporre a un progressivo affinamento, dall'altro, la necessità della metodologia di essere calibrata nei valori assunti grazie all'osservazione del comportamento in esercizio dei diversi sistemi e a prove in laboratorio mirate alla previsione dei fenomeni e dei fattori di degradamento. Una procedura applicativa della metodologia potrebbe essere ulteriormente sviluppata da parte di un grande ente proprietario di immobili, quali un'agenzia di edilizia residenziale pubblica che, utilizzando i dati e l'esperienza accumulata nella gestione manutentiva, adotti un software BIM. Tale prospettiva, peraltro già presente nella prassi dei paesi in cui la manutenzione è disciplina consolidata, appare a nostro avviso percorribile proseguendo nello sviluppo di quella che Gérard Blachère avrebbe definito 'scienza della durabilità'. L'uso nella progettazione di strumenti quali i BIM, la

- the control of water flowing on the ground by drainage canal.

The environmental factors such as local climate variables, wall exposure to wind and rain, depth of the underground layer water and moreover, architectural elements such as extension of ledges can be a primary cause of degradation and failures. To each of these factors a probability to cause the system failure has been applied by the analyst. In some cases, the weight of such factors can be different in different risks.

The design solutions adopted to prevent failures are the provision of:

- a gap between ground and external wall;
- an horizontal barrier inside the wall to avoid water absorption from the ground;
- a vertical barrier against the meteoric water in the lower part of the wall;
- a drainage canal to capture surface

water;

- painting with adequate vapour permeability and water tightness.

## The experiment outcomes

The two solutions analyzed are a "business as usual" design and the adoption of the best practice in the choice of materials and the adoption of devices. The difference in the probability of failure, estimated in a period of ten years, is quite different. In the best practice solution the probability of failure is about 98% but is reduced to 37% in the case of the "business as usual" solution. The outcomes for the water penetration risk have been confirmed for the cracking and destruction of plaster by the freezing. The gap between ground and wall and the drainage canal have adopted as well as a good silicate painting and a macro-porous plaster. The adoption of a horizontal mechanic barrier appears

cui diffusione potrà permettere una maggiore condivisione delle informazioni e la diffusione delle conoscenze, può costituire un valido aiuto all'assunzione di scelte consapevoli da parte dei progettisti e alla creazione di basi di dati per il miglioramento dei progetti.

#### NOTE

<sup>1</sup> Si veda la ricerca su Life Performance of Construction Material & Components, nell'ambito del 5.o programma quadro dell'Unione europea.

<sup>2</sup> Nel processo edilizio i diversi attori, committenti, progettisti ed esecutori compiono un enorme numero di scelte con numerosissime possibilità di errore.

<sup>3</sup> Interessante a questo riguardo l'esperienza del CSTB riportata nei contributi di Talon A., Boissers D. and Peyras L. (2011), in Baroth J., Breyse D. and Schoefs F. (Eds.), *Construction Reliability: Safety, Variability and Sustainability*, Wiley, 2011. Per i rapporti tra BIM e metodologie di valutazione dei requisiti si veda Shen, W. and Shen Q., "BIM - Based User Pre-occupancy Evaluation Method for Supporting The Designer - Client Communication in Design Stage", in *Proceedings of Management and Innovation for a Sustainable Built Environment*, 20 - 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands.

Per le prospettive di applicazione del BIM alle valutazioni della durabilità e alla gestione della manutenzione si veda Jason D. Lucas "An Integrated BIM Framework to Support Facility Management in Healthcare Environments", PhD Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 2012

<sup>4</sup> Secondo la norma UNI 9910 il guasto è «la cessazione dell'attitudine di un'entità a eseguire la funzione richiesta».

<sup>5</sup> Il software BIM utilizzato è Revit della Autodesk Inc.

#### REFERENCES

Sarja, A. (2006), "Theory, systematics and methods", in Sarja, A. (Ed.), *Predictive and Optimised Life Cycle Management Buildings and infrastructure*, Taylor & Francis, Oxon, pp. 6-144.

not necessary and a useless expense. In the same way a more water resistant painting isn't worthy.

#### Conclusions

The method developed allows the designer to roughly and quickly evaluate the durability of a building element design option.

Nevertheless the set up of the model requires a heavy work of a team of experts and they have to analyze a huge number of functional model.

Moreover the probability of the basic events have to be estimated and the likelihood of the output depends on the accuracy of the input data. The quality of the expert judgement has to be checked by the observation of the real performance of building systems and laboratory tests can be used to deeply investigate degradation factors and probability of occurrence of the fail-

ures. In other words the data used in the models have to be calibrated. The methodology proposed could be further developed by a large owner, such as a local authority council housing, which, using data collected and experience in maintenance management adopts a BIM software in the management of facilities. On the other hand the use of the methods helps the architect to take into account all the degradation factors like a sort of check list. The experience coming from the methodology can help define a library of functional models as well as of degradation models. The huge effort on data interoperability and sharing involving all the community of BIM developers and users. This trend can also involve the durability assessment. Moreover, these kind of methods can be successfully adopted by large organisations and owners. This perspective can be a development of the attitude that

Baroth, J., Breyse, D. and Schoefs, F. (Eds.) (2011), *Construction Reliability: Safety, Variability and Sustainability*, Wiley, p. 368.

Coppola, L. (1997), "Intonaci deumidificanti e idropellenti", in *Atti del Convegno: Massetti e Intonaci nell'Edilizia*, Bologna.

Cattaneo, M., Di Sivo, M., Furlanetto, L. and Ladiana, D. (2007), *Cultura di Manutenzione*, Alinea Editrice, Firenze.

Gasparoli, P. and Talamo, C. (2002), *Manutenzione e recupero - Criteri, metodi e strategie per l'intervento sul costruito*, Alinea Editrice, Firenze, p. 320.

Jason, D. Lucas (2012), "An Integrated BIM Framework to Support Facility Management in Healthcare Environments", PhD Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.

Pollo, R. (2006), "Service Life and LCC Assessment. The use of FMEA As Design Tool", in Talon, A., Chevalier, J.L. and Hans, J. (Eds.), *CIB W080 Prediction of Service Life of Building Materials and Components*.

*State of the art Report on Failure Modes Effects and Criticality Analysis Research for and Application to the Building Domain*, CIB Publication 310, Rotterdam, p. 113-121.

Pollo, R., Levra Levron, A. and Pellerey, F. (2013), "Design Tools for Life Cycle Analysis and Durability Evaluation of Building Systems: A Research on the Building Envelope", in *Proceedings of the SB 13 Singapore-Realising Sustainability in the Tropics*, CIB, Conference Singapore, Singapore.

Shen W. and Shen, Q. (2011), "BIM - Based User Pre-occupancy Evaluation Method for Supporting The Designer - Client Communication in Design Stage", in *Proceedings of Management and Innovation for a Sustainable Built Environment*, 20 - 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands.

Sjostrom, C., Trinius, W. and Chevalier, J.L. (2005), *Life Performance of Construction Materials & Components, PeBBu Domain 1 Final Report*, CIB, Rotterdam, p. 61.

Talon, A. (2005), "Temporal Quantification Method of Degradation Scenarios Based on FMEA", in *Proceedings of the 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, 17-20 April 2005.

Gérard Blachère would defined 'science de la durabilité'. On the other hand the use of tools like BIM can help to widespread and share the knowhow helping the architects to design for the lifecycle in a conscious manner and improve the quality of the design.

#### NOTES

<sup>1</sup> Cf. Research on Life Performance of Construction Material & Components, as part of the 5th Framework Programme of the European Union

<sup>2</sup> In the building process the project stakeholders, clients, designers and performers perform a huge number of choices with many possibilities of error.

<sup>3</sup> Cf. the CSTB experience in Talon, A., Boissers, D. and Peyras L. (2011), in Baroth, J., Breyse, D. and Schoefs F. (Eds.), *Construction Reliability: Safety, Variability and Sustainability*, Wiley.

For the relationship between BIM soft-

ware and durability requirements cf. Shen, W. and Shen Q., "BIM - Based User Pre-occupancy Evaluation Method for Supporting The Designer - Client Communication in Design Stage", in *Proceedings of Management and Innovation for a Sustainable Built Environment*, 20 - 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands.

For the perspectives in BIM, data interoperability and durability, safety and maintenance assessment cf. Jason D. Lucas "An Integrated BIM Framework to Support Facility Management in Healthcare Environments", PhD Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 2012

<sup>4</sup> According to the UNI 9910 Italian standard the failure is the «cessation of the ability of an entity to perform the required function».

<sup>5</sup> The BIM software is Revit by Autodesk Inc.