

Domenico D'Olimpio,

Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'architettura, Sapienza Università di Roma, Italia

domenico.dolimpio@uniroma1.it

Abstract. Spesso la progettazione esecutiva assolve al suo compito di definire "compiutamente ed in ogni particolare architettonico, strutturale ed impiantistico l'intervento da realizzare", ma risulta carente della consapevolezza dei molteplici agenti di degrado e dei possibili fattori di alterazione che possono interferire, agendo sull'opera edilizia finale e in esercizio, sui suoi livelli prestazionali, sulla sua durabilità e sulla qualità edilizia più in generale. Il risultato di tali carenze informative del progetto esecutivo è, molto spesso, quello di una carenza nella qualità tecnica del progetto. Tale situazione determina, inevitabilmente, una non qualità edilizia, soprattutto in riferimento al mantenimento, nel tempo, dei livelli prestazionali, che andranno a decadere in funzione di processi di invecchiamento patologico del tutto incongruenti con la vita economica dei manufatti edilizi in questione. Occorre pertanto definire specifici approcci metodologici per l'individuazione delle correlazioni tra agenti di degrado – condizioni di degrado e guasto – opzioni tecnico-costruttive.

Parole chiave: Patologia edilizia; Qualità edilizia; Agenti di degrado; FMEA; Risk Management.

La considerazione dei possibili agenti di degrado e fattori di alterazione per l'innalzamento dei livelli prestazionali e qualitativi delle opere edilizie

Spesso la progettazione esecutiva assolve al suo compito di definire «compiutamente ed in ogni particolare architettonico, strutturale ed impiantistico l'intervento da realizzare» (D.lgs. 18 aprile 2016 n. 50; Art. 33),

costituendo di fatto l'effettiva ingegnerizzazione di tutte le lavorazioni previste, ma risulta carente della consapevolezza dei molteplici agenti di degrado e dei possibili fattori di alterazione che possono interferire, agendo sull'opera edilizia finale e in esercizio, sui suoi livelli prestazionali, sulla sua durabilità e sulla qualità edilizia più in generale. La conoscenza delle variazioni fisiche e chimiche alle quali l'opera edilizia e i suoi componenti possono essere soggetti, anche in tempi differiti e in ragione della loro interazione con lo specifico contesto ambientale di

riferimento, è spesso sottovalutata in rapporto soprattutto alle sue *potenzialità informative* in relazione al progetto esecutivo, che potrebbero assicurare una più adeguata scelta dei materiali e delle soluzioni costruttive. Del resto, «nel progetto non può essere dato per scontato il momento costruttivo, meramente rinviandolo ai processi tradizionalmente acquisiti» (La Creta, 1994) e l'individuazione di specifiche soluzioni tecnico-costruttive in grado di tener conto dei fattori di possibile degrado e alterazione del manufatto costruito e dei suoi componenti diviene una tematica di assoluta rilevanza, anche nell'ottica di una effettiva sostenibilità economica e gestionale dell'opera edilizia.

Il risultato di tali carenze *informative* del progetto esecutivo è, molto spesso, quello di una carenza nella *qualità tecnica* del progetto, laddove, in particolare, ci si rapporta all'ambito delle «tecniche materiali, riferito specificamente alla costruzione nei suoi diversi aspetti: strutturali, di scelta [...] dei materiali, della loro messa in opera» (Gregotti, 2002). Tale situazione determina, inevitabilmente, una *non qualità edilizia*, soprattutto in riferimento al mantenimento, nel tempo, dei livelli prestazionali, che andranno a decadere in funzione di processi di invecchiamento patologico del tutto incongruenti con la *vita economica* dei manufatti edilizi in questione.

Qualità del progetto e qualità del prodotto edilizio

La «qualità complessiva del prodotto architettonico non può prescindere, comunque, dalla stretta rispondenza delle scelte tecniche all'idea informatrice del progetto» (La Creta, 1994), ma ciò non è sufficiente per assicurare una reale ed elevata qualità del prodotto edilizio. Il progetto esecutivo deve necessariamente in-

La «qualità complessiva del prodotto architettonico non può prescindere, comunque, dalla stretta rispondenza delle scelte tecniche all'idea informatrice del progetto» (La Creta, 1994), ma ciò non è sufficiente per assicurare una reale ed elevata qualità del prodotto edilizio. Il progetto esecutivo deve necessariamente in-

Executive project and building pathology

Abstract. Often the executive design performs its task of defining "completely and in every architectural, structural and plant detail the intervention to be carried out", but it is lacking in the awareness of the multiple agents of degradation and Possible factors of alteration that can interfere, acting on the construction work final and in operation, on its performance levels, on its durability and on the quality of building more generally. The result of these information deficiencies of the Executive project is, very often, that of a deficiency in the technical quality of the project. This situation inevitably determines a non-quality of construction, especially in reference to the maintenance, over time, of the performance levels, which will decay in function of processes of pathological ageing completely inconsistent with life of the building artifacts in question. It is therefore necessary to define specific methodological approaches for the identifi-

cation of correlations between degradation agents – conditions of degradation and failure – technical-constructive options.

Keywords: Building pathology; Building quality; Degradation agents; FMEA; Risk Management.

The consideration of possible agents of degradation and factors of alteration for the raising of the performance and qualitative levels of the building works

Often the executive design performs its task of defining "completely and in every architectural, structural and plant detail the intervention to be carried out" (D.lgs. 18 April 2016 n. 50; Art. 33), constituting the actual engineering of all the planned processes, but it is lacking in the awareness of the multiple degradation agents and

the possible factors of alteration that may interfere, acting on the final building work and in exercise, on its performance levels, on its durability and on the building quality more generally. The knowledge of the physical and chemical variations to which the construction work and its components can be subject, even in deferred times and because of their interaction with the specific environmental context of reference, is often underestimated in reference, above all, to its informative potential in relation to the executive project, which could ensure a more appropriate choice of materials and constructive solutions. Moreover, «in the project it cannot be taken for granted the constructive moment, merely postponing it to the traditionally acquired processes» (La Creta, 1994) and the identification of specific technical-constructive solutions able to take into

dividuare le specificità fisico-costitutive, nonché tecnico-realizzative, dell'opera edilizia, e tale funzione non può essere solamente correlata agli obiettivi di assicurazione del rispetto di requisiti di ordine esclusivamente funzionale, architettonico, economico, o di risposta alle differenti normative di settore, ma dovrebbe necessariamente contemplare gli aspetti tecnico-previsionali dell'interazione tra il manufatto costruito e il contesto ambientale, di ordine naturale e antropico, nel quale andrà ad inserirsi. Più in generale, nella progettazione esecutiva, dovrebbero essere necessariamente considerati aspetti, problematiche, fattori, relativi all'intero ciclo di vita del manufatto edilizio. Pertanto, una progettazione, per quanto corretta e accurata, che consenta di ottenere una elevata qualità di prodotto al tempo *zero*, ovvero a conclusione di un corretto ed efficace processo tecnico-realizzativo, non è affatto sinonimo di una qualità edilizia che potrà essere mantenuta nel tempo. La non qualità dell'opera edilizia al tempo "x", problematica diffusa e in grado di generare, da un lato, conseguenze economiche anche rilevanti sulle fasi di manutenzione e gestione del prodotto edilizio, dall'altro, pressioni e impatti sull'ambiente a differenti livelli, è il risultato di una non qualità di processo, nell'ambito del quale, il momento della progettazione esecutiva, assume un ruolo sostanziale. Per tali motivazioni, le discipline della "qualità", anche nel settore dell'edilizia e della sua progettazione in particolare, stanno sviluppando ricerca, metodologie e norme per l'analisi del costo del ciclo di vita (LCC) delle opere di progetto e dei loro componenti; basti pensare ad esempio alle norme ISO 15686¹, che si occupano specificamente della pianificazione della durata di servizio allo scopo di garantire che la vita in opera effettiva di un edificio o di suoi componenti abbia una risposta congruente con la vita di servizio stimata, nonché definita dai quadri esigenziali e specifici-

camente tecnico-progettuali. Per tali fini, l'adeguatezza e l'efficacia delle scelte proprie soprattutto della fase di progettazione esecutiva, rivestono un ruolo assolutamente fondamentale per l'intero ciclo di vita dell'edificio, assumendo una particolare importanza in funzione della qualità del prodotto edilizio.

La considerazione dei possibili agenti di degrado delle opere edilizie nel progetto esecutivo: riferimenti operativi

La selezione e la scelta dei materiali e delle soluzioni tecnico-realizzative dei componenti costitutivi di un organismo edilizio, operata in sede di progettazione esecutiva, deve tenere in

debita considerazione tutti i possibili fattori e agenti di degrado in grado di condizionarne la vita utile e le performance tecniche e che potrebbero, anche in archi temporali incongruenti con le condizioni di invecchiamento naturale e quindi con il fisiologico decadimento fisico e prestazionale dei materiali, dare luogo a problematiche funzionali, a condizioni di degrado e di guasto. In altri termini, scelte inappropriate in sede di progettazione esecutiva, effettuate al di fuori di una scientifica considerazione e valutazione degli agenti e dei fattori di degrado che potrebbero interferire con la durabilità e con il mantenimento di efficienti livelli prestazionali dei materiali e dei componenti, possono condurre a situazioni di patologia edilizia, nell'ambito della quale il fisiologico invecchiamento naturale diviene invecchiamento patologico e in cui gli agenti e i meccanismi di alterazione generano difetti in grado di attivare, anche in tempi relativamente rapidi, una condizione di guasto con conseguenti esigenze di riparazione, sostituzione e ripristino delle condizioni di funzionalità. Ai fini di chiarire e classificare gli agenti che possono interveni-

account the factors of possible degradation and alteration of the constructed artefact and its components becomes a theme of absolute relevance, also in the perspective of an effective economic and managerial sustainability of the construction work.

The result of these information deficiencies of the executive project is, very often, that of a deficiency in the technical quality of the project, where, in particular, is referenced to the scope of *material techniques*, referred «specifically to the construction in its Different aspects: structural, of choice... of the materials, of their implementation» (Gregotti, 2002). This situation inevitably determines a non-quality of construction, especially in reference to the maintenance, over time, of the performance levels, which will decay in function of processes of pathological ageing completely inconsistent with

life of the building artefacts in question.

Quality of the project and quality of the building product

The «overall quality of the architectural product cannot, anyway, regardless of the close conformity of the technical choices to the idea of the project» (La Creta, 1994), but this is not sufficient to ensure a real and high quality of building product. The executive project must necessarily identify the physical-constitutive and technical-implementing specificities of the construction work, and this function cannot only be correlated to the objectives of ensuring compliance with the types requirements exclusively functional, architectural, economical, or response to the different regulations of the sector, but should necessarily contemplate, in its physical-constitutive

and technical-constructive choices that ensure the constructability, the aspects technical-forecasting of the interaction between the constructed artefact and the environmental context, natural and anthropic, in which it will be inserted. More generally, in the executive planning, they should therefore necessarily be considered aspects, problems, factors, relating to the entire life cycle of the building artefact. Therefore, a design, however correct and accurate, that allows obtaining a high quality product at zero time, or at the conclusion of a correct and effective technical-realization process, is not at all synonymous with a quality of construction that can be maintained over time.

The non-quality of the construction work at the time "x", a very widespread problem and able to generate, on the one hand, also relevant economic con-

sequences on the maintenance and management of the building product, on the other, pressures and impacts on the environment to Different levels, is the result of a non-quality process, within which the moment of the executive design takes a substantial role. For these reasons, the disciplines of "quality", also in the construction sector and its design in particular, are developing research, methodologies and standards for the analysis of the cost of the life cycle (LCC) of project works and their components; It is sufficient to think for example ISO 15686¹, which deal specifically with the planning of service life in order to ensure that the actual life of a building or its components has a congruent response to the life of service assessed and defined by the specific technical and design frameworks. For these purposes, the adequacy and effectiveness of the

re nell'alterazione prestazionale dei materiali e dei componenti dell'edificio, la norma ISO 6241:1984 *Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered* (sostituita dalla norma ISO 19208:2016), forniva delle specificazioni in questo senso individuando, più specificamente, un elenco degli agenti in grado di condizionare sensibilmente un edificio e i suoi materiali e componenti. Attualmente può essere considerata, a tale scopo, la norma UNI 8290-3:1987 *Edilizia residenziale. Sistema Tecnologico. Analisi degli Agenti*, che riprende i contenuti della norma ISO 6241, sviluppandoli per quanto riguarda le definizioni degli agenti, riportando un elenco dei principali agenti che sollecitano il sistema tecnologico, come classificato nella norma UNI 8290-1. Di tali agenti sollecitanti, alcuni rivestono un ruolo particolarmente rilevante: La tabella in fig.1 evidenzia tali fattori e le interrelazioni tra le due norme citate. L'ASTM International² va a specificare i differenti fattori di degrado che condizionano la vita utile di materiali e componenti edilizi con la norma E632-82 (1996) *Standard Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials* (Fig. 2).

In sede di progettazione esecutiva, nel momento in cui i materiali e i componenti costitutivi trovano specifiche formalizzazioni e definizioni, occorre considerare quali, tra i fattori e agenti di alterazione in grado di sollecitare il sistema tecnologico e quindi di condizionare i livelli prestazionali dei materiali e dei componenti edilizi, avranno la concreta possibilità di manifestarsi in funzione delle specificità intrinseche dell'edificio (funzionalità, condizioni d'uso, ecc.) ed estrinseche (contesto ambientale di riferimento, naturale e antropico) e introiettare tali informazioni nel sistema degli input assunto nel processo di progettazio-

choices, especially of the executive design phase, play an absolutely fundamental role for the entire life cycle of the building, assuming a particular importance in reference to the quality of the building product.

The consideration of possible agents of degradation of the building works in the executive project: operational references

The selection and choice of materials and technical-construction solutions of the constituent components of an organism building, operated in the executive design, must take due account all the possible factors and degradation agents able to influence their useful life and technical performance and that they could, even in incongruent temporal arcs with the conditions of natural ageing and therefore with the physiological physical and performance de-

gradation of the materials, give rise to problematic conditions of degradation and failure. In other words, inappropriate choices in the executive design, carried out outside of a scientific consideration and evaluation of agents and degradation factors that could interfere with the durability and maintenance of efficient performance levels of materials and components, can lead to situations of building pathology, in which the natural physiological ageing becomes pathological ageing and in which the agents and the mechanisms of alteration generate faults able to activate, even in relatively rapid times, a condition of failure with consequent needs of repair, replacement and restoration of the conditions of functionality. In order to clarify and classify the agents that may intervene in the performance alteration of the materials and components of the building, the

ne esecutiva. Gli agenti di degrado comportano degli effetti, sui materiali e sui componenti sensibili a tali effetti, in grado di determinare anomalie visibili/o e anomalie comportamentali percepibili a livello sensorio o strumentale. Tali anomalie andranno successivamente ad attivare specifiche forme di degrado, ovvero di guasto, con conseguenze gestionali a differenti livelli: economico, ambientale, funzionale, di sicurezza; tali da richiedere improcrastinabili e adeguati interventi di «manutenzione a guasto avvenuto, [...] tecnicamente molto più complessa rispetto alla manutenzione preventiva, che in genere opera mediante interventi conformi e ricorrenti» (Croce, 2003).

Il diagramma di flusso illustrato (Fig. 3), sintetizza le interrelazioni tra fattori/agenti di degrado e le fasi del processo edilizio dalla progettazione esecutiva alla gestione dell'opera edilizia.

Individuazione delle correlazioni tra agenti di degrado - condizioni di degrado e guasto - opzioni tecnico-costruttive: una proposta di approccio metodologico

In sede di progettazione esecutiva, a partire dagli agenti di degrado, ovvero dai fattori di alterazione individuati in funzione del contesto ambientale di riferimento e delle condizioni di esercizio delle opere edilizie, è possibile preliminarmente, sup-

posti i materiali di progetto potenzialmente sensibili a tali agenti, operare due tipologie di azioni:

- selezionare materiali e tecnologie costruttive meno sensibili ai fattori di alterazione individuati;
- individuare, qualora non sia possibile utilizzare materiali e tecnologie costruttive differenti da quelli sensibili agli agenti di degrado, soluzioni tecniche e misure di mitigazione in

standard ISO 6241:1984 *Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered* (replaced by ISO 19208:2016), it provided specifications in this sense by identifying, more specifically, a list of agents capable of appreciably affecting a building and its materials and components. At present it can be considered, for this purpose, the norm UNI 8290-3:1987 *Residential building. Technological system. Analysis of the agents*, which incorporates the contents of the standard ISO 6241, developing them with regard to the definitions of the agents, reporting a list of the main agents that solicit the technological system as classified in standard UNI 8290-1. Of these soliciting agents, some play a particularly important role: the table in Fig. 1 highlights these factors and the inter-relations between the two standards cited. The ASTM

International² specifies the different degradation factors that affect the useful life of building materials and components with the standard E632-82 (1996) *Standard Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials* (Fig. 2).

In the executive design, when the constituent materials and components find specific formalizations and definitions, it is necessary to consider which of the factors and agents of alteration able to solicit the technological system and therefore to condition the performance levels of the building materials and components, they will have the concrete possibility to manifest themselves according to the specificities intrinsic (functionality, conditions of use, etc.) and extrinsic (environmental context of reference, natural and anthropic) and introject this informa-

Standard ISO 6241:1984 (withdrawn 27 October 2016) Main factors and agents That condition a building		Norma UNI 8290-3:1987 Fattori prevalentemente considerati nell'edilizia per l'individuazione degli agenti che sollecitano il sistema tecnologico
Category and nature of the agents		
		Acustici
		Atmosferici
		Idrici
		Ignei
		Luminosi
Organic	plants and microorganisms	Biologici
	Animals	
Chemical	Water and solvents	Chimici
	Oxidants	
	Reduced	
	Acids	
	Bases	
	Salts	
	Chemically neutral substances	
Electromagnetic	Radiation	Elettrici ed elettromagnetici
	Electricity	
	Magnetism	
Mechanical	Weight	Meccanici
	Forces and imposed deformations	
	Kinetic energy	
	Vibrations and noises	
Thermal		Termici
Combined		

grado di prevenire/mitigare le possibili anomalie e le situazioni di guasto ad esse correlate.

In riferimento alla prima tipologia di azioni, occorre osservare che «ogni materiale da costruzione ha in sé una minore o maggiore attitudine, in particolari condizioni di esercizio, ad essere aggredito da agenti patologici o a deteriorarsi non naturalmente» (Lauria, Azzalin, De Blasi, 2003). La stessa affermazione è estensibile alle tecnologie costruttive: la «necessità di distinguere il materiale dalla tecnologia adottata per la sua messa in opera è dettata dal diverso comportamento in servizio tra edifici realizzati, pur in epoche diverse, con gli stessi materiali» (Manfron, 1998). Di fatto, la scelta degli specifici materiali e delle tecnologie costruttive da utilizzare andrebbe sempre posta in relazione con le specificità del contesto di riferimento (ambientale, funzionale), cercando di individuare le possibili cause, i meccanismi, le azioni che risultano fondamentali nella determinazione dei fenomeni di degrado, meccanismi e azioni sostanzialmente riconducibili a variazioni fisiche, variazioni chimiche, effetti indotti dal carico, effetti indotti dai suoli (assestamenti, cedimenti, azioni sismiche, ecc.), vibrazioni. Solo in tale maniera sarà possibile operare scelte fisico-costitutive e tecnico-costruttive in grado di contemplare materiali e tecnologie compatibili e poco sensibili ai meccanismi e alle azioni di degrado che caratterizzano, o potrebbero caratterizzare, significativamente il contesto in oggetto. In relazione alla seconda tipologia di azioni occorrerà individuare specificamente, per ciascuno dei materiali o dei componenti edilizi di progetto, la particolare gamma di difetti e anomalie correlata ai potenziali agenti di attivazione del degrado, nonché le specifiche condizioni di degrado e di guasto a loro volta connesse a questi. La scheda riportata in figura 4 sintetizza un possibile criterio di approc-

tion into the input system taken in the executive design process. Degradation agents involve effects, materials and components susceptible to such effects, which can determine visible anomalies/or and behavioural anomalies perceptible at the sensorial or instrumental level. These anomalies will subsequently activate specific forms of degradation, or failure, with of management consequences at different levels: economical, environmental, functional, safety; such as to require decisions and appropriate interventions of «maintenance to failure occurred, è [...] technically much more complex than preventive maintenance, which generally works by means of compliant and recurrent interventions» (Croce, 2003).

The flowchart illustrated (Fig. 3) summarises the interrelationships between degradation factors/agents and the

phases of the building process from the executive design to the management of the construction work.

Identification of correlations between degradation agents - conditions of degradation and failure - technical-constructive options: a proposal for a methodological approach

In the executive design, starting from the agents of degradation, or the factors of alteration identified according to the environmental context of reference and the conditions of operation of the building works, it is possible to preliminarily, defined the project materials potentially susceptible to such agents, operate two types of actions:

- select materials and construction technologies less sensitive to the altered factors identified;
- identify, if it is not possible to use

materials and constructive technologies different from those sensitive to degradation agents, technical solutions and mitigation measures capable of preventing/mitigating possible anomalies and failure situations related to them.

In reference to the first type of action, it should be noted that «every building material has a lesser or greater aptitude, under particular operating conditions, to be assaulted by pathological agents or to deteriorate not of course» (Lauria, Azzalin, De Blasi, 2003). The same statement is extensible to the constructive technologies: the «necessity to distinguish the material from the technology adopted for its implementation is dictated by the different behaviour in service between buildings realized, even in different eras, with the same materials» (Manfron, 1998).

The choice of the specific materials and construction technologies to be used should always be related to the specificities of the reference context (environmental, functional), trying to identify the possible causes, the mechanisms, the actions which are fundamental in the determination of degradation phenomena, mechanisms and actions substantially related to physical variations, chemical variations, load-induced effects, effects induced by soils (settling, sagging, actions seismic, etc.), vibrations. Only in such a way will it be possible to make physical-constitutive and technical-constructive choices able to contemplate materials and technologies compatible and not very sensitive to the mechanisms and the actions of degradation that characterize, or could characterize, significantly the context in the subject. In relation to the second type of action it will be

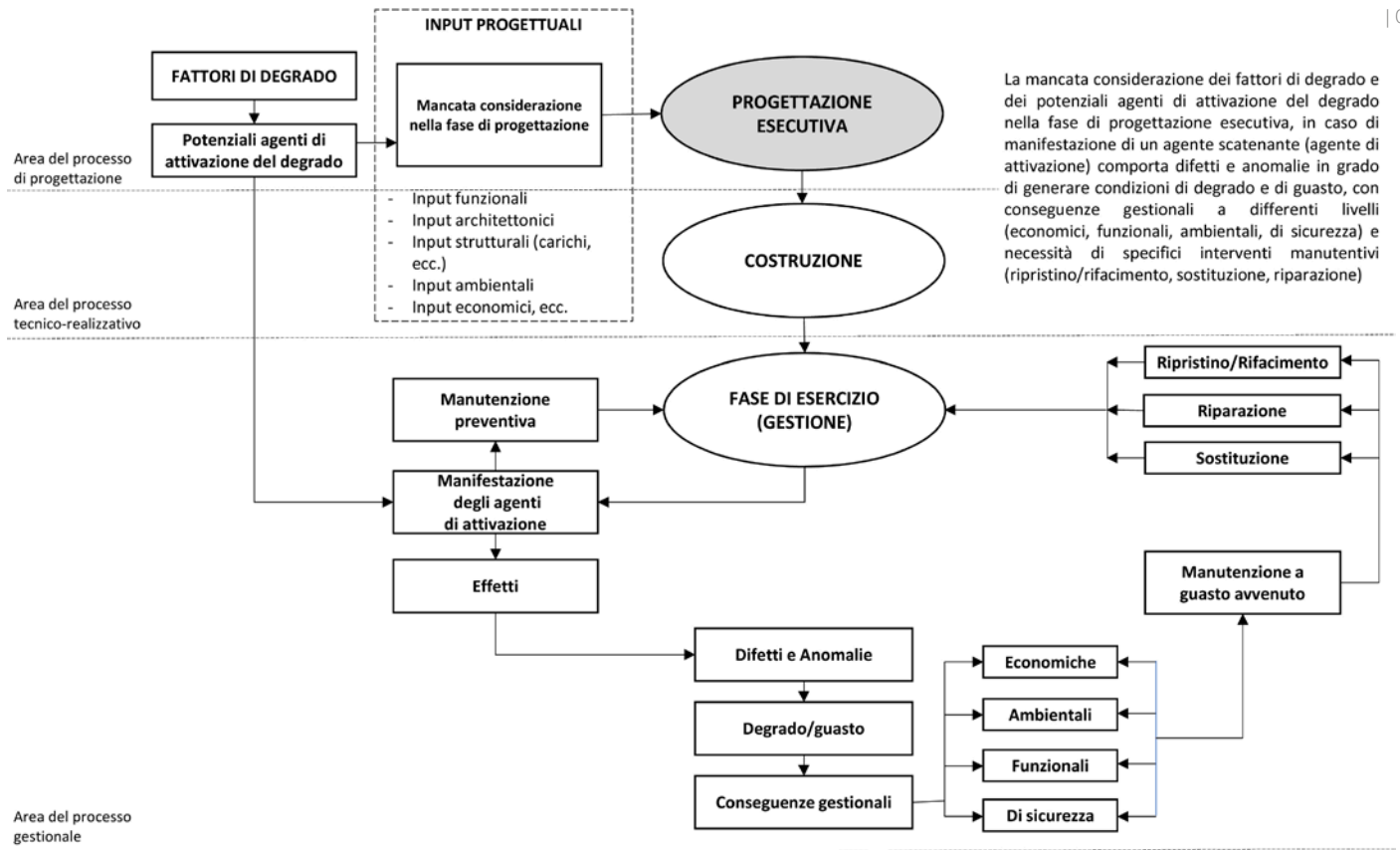
cio metodologico per tale fine, attraverso un esempio relativo alla progettazione di elementi strutturali in calcestruzzo armato (materiale che, in linea di principio, può essere correlato univocamente alla seconda tipologia di azioni, a meno di cambiamenti radicali nell'impostazione progettuale di livello strutturale). Tale tipologia di approccio risulta particolarmente utile nell'informare e orientare le scelte progettuali e il processo di progettazione esecutiva, anche in considerazione dell'attuale ricchezza delle opzioni disponibili, in termini di materiali, componenti e soluzioni tecniche, offerte dall'innovazione tecnologica e in grado di dare concrete risposte nei confronti dell'azione dei fattori e degli agenti di degrado potenzialmente in grado di creare condizioni di guasto.

Specifiche metodologie di riferimento. La Failure Models and Effects Analysis (FMEA) e le sue potenzialità rispetto il progetto esecutivo

Tra le specifiche metodologie utilizzabili ai fini di orientare la fase di progettazione esecutiva nella maniera più efficace per poter prevenire ed evitare il determinarsi di condizioni di degrado e guasto, nella considerazione dei potenziali meccanismi di degrado che potrebbero interferire sul

comportamento in opera dei materiali e dei componenti edilizi, la metodologia FMEA (Failure Models and Effects Analysis) in particolare, consente di rendere maggiormente rigoroso il processo di identificazione delle possibili condizioni di guasto nei sistemi edilizi e di conseguente individuazione delle opzioni tecniche di risoluzione o mitigazione del problema, tenendone conto nella fase di progettazione esecutiva. La FMEA ha lo scopo specifico di analizzare preliminarmente un materiale o un prodotto edilizio (ma può essere estesa anche a un processo o a un sistema) proprio dal punto di vista della sua affidabilità nel tempo, identificando le possibili anomalie che potrebbero verificarsi e le modalità di guasto a queste correlate, consentendo l'individuazione delle soluzioni tecniche specifiche rivolte all'obiettivo di evitare che le condizioni di degrado più gravose e problematiche, nonché maggiormente probabili, si manifestino. L'applicazione della FMEA consente di definire l'affidabilità dei componenti edilizi di progetto e, di conseguenza, in rapporto alla definizione «secondo cui l'affidabilità di un sistema risulta essere la somma dell'affidabilità delle parti che lo compongono e delle interazioni che queste si scambiano reciprocamente fra di loro» (Nicolella, Scognamiglio, 2017), garantire l'affidabilità dell'intero organismo edilizio in oggetto.

Standard ASTM E632: 1981	
Degradation factors that affect the useful life of building materials and components	
Weathering	Radiation: - Solari - Nuclear - terrestrial Temperature: - High - Low - Thermal excursions Water: - Solid (snow, ice) - Liquid (rain, condensation, stagnant water) - Steam (eg high relative humidity) Usual air constituents: - Gas (eg nitrogen and sulfur oxides) - Mixtures (eg aerosols, salts, acids and alkalis dissolved in water) - Particulates (eg sand, dust, dirt) Frost and thaw Wind
Biological factors	Microorganisms mushrooms Bacteria
Stress factors (mechanical)	Sustained Periodicals: - Physical action of water, such as rain, hail, snow, sleet - Physical wind action - Combined water / wind action - Movements due to other factors, such as settling or vibration
Incompatibility	Chemistry Physics
Fattori d'uso	System design Installation and maintenance procedures Normal wear and tear Improper use by the inhabitants



Dal punto di vista operativo possono essere individuati cinque step:

- 1) *caratterizzazione della soluzione tecnica e delle condizioni ambientali*: basata su una precisa individuazione degli elementi funzionali che costituiscono la soluzione di progetto, delle loro caratteristiche specifiche e dell'ambiente operativo di riferimento;

- 2) *analisi funzionale*: ha la funzione di descrivere il comportamento di tutti gli elementi che definiscono la soluzione di progetto, nei confronti degli agenti di sollecitazione;
- 3) *analisi Processuale*: è condotta in relazione ai processi tecnologici che caratterizzano la fase tecnico-realizzativa ed è

necessary to identify specifically, for each of the building materials or components of the project, the particular range of defects and anomalies related to the potential agents of activation of the degradation, as well as the specific conditions of degradation and failure in turn related to these. The card shown in figure 4 summarises a possible methodological approach for this purpose, through an example concerning the design of structural elements in reinforced concrete (material which, in principle, can be correlated univocally to the second typology of actions, less than radical changes in the design approach of structural level). This type of approach is particularly useful in informing and orienting the design choices and the process of executive design, also considering the current richness of the available options, in terms of materials, compo-

nents and technical solutions, offered by technological innovation and able to give concrete answers towards the action of the factors and the agents of degradation potentially able to create conditions of failure.

Specific reference methodologies. Failure Models and Effects Analysis (FMEA) and its potential in relation to the executive project

Among the specific methodologies that can be used for the purpose of orienting the executive design phase in the most effective way to prevent and avoid the determination of conditions of degradation and failure, in the consideration of the potential mechanisms of degradation that could interfere with the behaviour of the materials and of building components, the FMEA (Failure Models and Effects Analysis) methodology in particular,

allows to making the process of identifying possible failure conditions in building systems more rigorous and thus identifying the technical options for resolving or mitigating the problem, taking it into account during the design phase Executive. The FMEA has the specific purpose to analyse beforehand a material or a building product (but it can also be extended to a process or a system) precisely from the point of view of its reliability over time, identifying the possible anomalies that could occurrence and the modalities of failure to these correlated, enabling the identification of specific technical solutions aimed at the objective of avoiding that the most difficult and problematic conditions of degradation, and more probable, are manifested. The application of the FMEA allows to define the reliability of the building components of the pro-

ject and, consequently, in relation to the definition «according to which the reliability of a system is the sum of the reliability of the parts that compose it and the Interactions that are mutually exchanging between them» (Nicolella and Scognamiglio, 2017), guarantee the reliability of the entire building organism in the question.

From an operational point of view, five steps can be identified:

- 1) *characterization of the technical solution and the environmental conditions*: based on a precise identification of the functional elements that constitute the project solution, of their specific characteristics and of the operative environment of reference;
- 2) *functional analysis*: It has the function to describe the behaviour of all the elements that define the project solution, against the stressing agents;

rivolta all'individuazione delle possibili problematiche che potrebbero manifestarsi in tale fase;

- 4) *analisi qualitativa*: costituisce la fase centrale della metodologia ed è basata sull'individuazione dei differenti scenari di degrado, delle cause e delle azioni tecniche di correzione e mitigazione;
- 5) *Event Driven Graph*: fornisce un quadro completo di tutti i possibili scenari di degrado che sono stati individuati nell'analisi qualitativa e dei loro specifici meccanismi di azione e consente una più precisa individuazione delle azioni correttive, in termini di specifiche soluzioni tecniche e prescrizioni per la fase realizzativa).

Tra le differenti fasi, quella dell'analisi qualitativa in particolare costituisce la fase più caratterizzante, nella quale vengono individuati i possibili agenti attivatori, e valutate le possibili cause e i potenziali effetti dei guasti. Più in particolare si procede all'individuazione delle cause dei possibili guasti procedendo in ordine a tre fattori:

- *occurrence*: frequenza con cui una specifica causa (fattore e agente di degrado) del guasto si manifesterà; ovvero probabilità di accadimento (P);
- *severity*: gravità delle conseguenze (guasti) potenziali e degli effetti (G);
- *detection*: facilità di rilevazione delle possibili anomalie e dei guasti connessi; ovvero possibilità di rilevamento da parte dei controlli (R).

La metodologia di tipo quali-quantitativo, dopo aver analizzato tutte le possibili modalità di guasto (analisi qualitativa), assegna un valore numerico (da 1 a 5 oppure da 1 a 10 in funzione delle specifiche norme di riferimento) a ciascuno dei tre fattori sopracitati³, consentendo di calcolare un indice (RPN) di *priorità del*

rischio ($RPN=P \times G \times R$), attraverso il quale possono essere innanzitutto attenzionate particolari condizioni tecniche di progetto, orientando pertanto in maniera adeguata e corretta le scelte di ordine tecnico-realizzativo contenute nel progetto esecutivo, sia di prodotto che di processo.

Il caso di studio elaborato e illustrato nella scheda in figura 5 evidenzia la possibile applicazione della fase di analisi qualitativa della FMEA in rapporto alla progettazione esecutiva di una copertura a tetto. Sono riportate quelle cause di guasto, tra le possibili, caratterizzate da un indice RPN maggiore, nonché esplicitate le azioni raccomandate in sede di progettazione esecutiva. Dall'analisi emerge come le indicazioni (azioni raccomandate) per la considerazione preventiva dei potenziali meccanismi di degrado nella fase di progettazione esecutiva possano costituire un efficace orientamento per lo sviluppo della stessa e per una valutazione e riconsiderazione delle iniziali ipotesi progettuali. La metodologia FMEA è in questo caso parzializzata alla sola fase decisionale relativa alla scelta di materiali, componenti e soluzioni tecniche nell'ambito del progetto esecutivo, mentre nella sua accezione più completa contempla l'estensione alle specifiche fasi esecutive (anche di trasporto, stoccaggio e posa in opera dei materiali e componenti edilizi) e gestionali (arrivando anche a prefigurare scenari di degrado dovuti a problematiche di utilizzo scorretto), ma riesce comunque ad incidere significativamente sugli sviluppi progettuali e le modalità con le quali assicurare una sua specifica integrazione con il processo di progettazione esecutiva, integrazione che dovrebbe essere costantemente contemplata, potrebbero essere oggetto di specifici ambiti di ricerca.

Material / Building component	Conditions of use and function	Related degradation factors (Rif. UNI 8290-3; ISO 6241; ATM E632)	Degradation agents (from ISO 6241; ATM E632)	Relevance according to the specificity of the project (High, Medium, Low)	Expected effects in function of specificities of use and environmental	Related degradation and fault conditions	Technical project options
Reinforced concrete	Structural in a residential building	Weathering	Water	A	Accentuated carbonation	Surface porosity	Increased thickness of the concrete cover layer
			Air constituents (salts, acids, alkalis, chlorides, particulates)	A		Attacks from Sulfates	
			Frost and thaw	B			
		Chemists	Water	A	Chloride attacks	Micro-cracks and cracks	UHPC (Ultra High Performance Concrete) concrete with compact microstructure
			Oxidants	A		Posting of concrete covers	
			Acids	A			
	Mechanical	Salts	A	Alkali-aggregate reactions	Loss of adherence between conglomerate and reinforcement	Waterproof concretes (with the addition, for example, of waterproofing with nanocrystalline fibers)	
		Weight	B				
		Forced forces and deformations	B		Corrosion, oxidation of metal reinforcement		
	Use in an aggressive atmosphere (sea front)	Kinetic energy	-	Corrosion, oxidation of metal reinforcement	Deterioration and reduction of the diameter of the metal reinforcement with consequent decay of the static performance of the product	Protection of concrete surfaces with waterproof thixotropic mortars	
		Vibrations	-				
		Combined water-wind action	A				Reinforcements with stainless steels (ferritic, austenitic, martensitic, Duplex)

Elemento edilizio Building element	Funzione e tipologia Function and type	Agenti attivatori del degrado Agents degradation activators	Effetti potenziali del guasto Potential effects of the fault	Severity	Cause potenziali del guasto Potential causes of the fault	Occurrence	Detection	RPN	Azioni raccomandate in sede di progettazione esecutiva Actions recommended at headquarters of executive planning
Copertura Cover	Tetto a falde edificio residenziale	Acqua piovana Rain water	Infiltrazioni d'acqua negli ambienti sottostanti (crescita di microrganismi sulle superfici interne, macchie, disgregazioni del rivestimento interno, ecc.) Water infiltration in the underlying environments (growth of microorganisms on internal surfaces, stains, disintegration of the internal coating, etc.)	5	Pendenza insufficiente, errata geometria delle falde Insufficient slope, incorrect ground geometry Dettagli errati dei componenti (scossaline, giunti di dilatazione, ecc.) Incorrect details of the components (flashings, expansion joints, etc.) Gelività degli elementi di tenuta Freezing of sealing elements	5	2	50	- Controlli della rispondenza della geometria e della pendenza delle falde in rapporto alla normativa tecnica ed alle caratteristiche climatiche del sito Checks of the correspondence of the geometry and the slope of the groundwater in relation to the technical regulations and the climatic characteristics of the site Verifica dei dettagli costruttivi relativi ai componenti (scossaline, giunti, ecc.) Verification of construction details relating to components (flashings, joints, etc.) - Verifica dei materiali costitutivi degli elementi di tenuta in rapporto alle specifiche condizioni climatiche Verification of the constituent materials of the sealing elements in relation to the specific climatic conditions - Previsione e progettazione, con indicazione di adeguati criteri di posa in opera di membrane di impermeabilizzazione Forecasting and planning, with indication of adequate criteria for laying waterproofing membranes - Progettazione di uno strato di microventilazione del sottomanto o di ventilazione Design of a microventilation layer of the undercoat or ventilation
	Copertura discontinua a piccoli elementi								
	Impiego in condizioni di carico neve II								
	Roof pitched residential building								
Discontinuu s small element coverage	Use in snow load conditions II	Carichi di esercizio (neve, vento) Operating loads (snow, wind)	Infiltrazioni d'acqua negli ambienti sottostanti (crescita di microrganismi sulle superfici interne, macchie, disgregazioni del rivestimento interno, ecc.) Water infiltration in the underlying environments (growth of microorganisms on internal surfaces, stains, disintegration of the internal coating, etc.)	5	Dislocabilità degli elementi di tenuta Dislocation of the sealing elements Eccessiva elasticità del supporto dell'elemento di tenuta Excessive elasticity of the seal element support Vincoli dell'elemento di tenuta insufficienti in rapporto alla pendenza Insufficient sealing element constraints in relation to slope	5	3	75	- Verifica dei materiali costitutivi, della tipologia degli elementi di tenuta e dei criteri di posa in opera previsti in rapporto alle specifiche condizioni di impiego (pendenza, ecc.) Verification of the constituent materials, of the type of sealing elements and of the installation criteria envisaged in relation to the specific conditions of use (slope, etc.)
		Acqua e umidità di condensazione Water and condensation humidity	Condensazioni superficiali, muffe Disgregazioni dei rivestimenti interni Surface condensations, molds Disruptions of the interior finishes	4	Stratigrafia errata della falda di copertura Incorrect stratigraphy of the covering layer Assenza o discontinuità degli strati di barriera al vapore Absence or discontinuity of the vapor barrier layers Ponti termici Thermal bridges	4	3	48	- Verifica e controllo della sequenza stratigrafica, diagramma di glaser con ampi margini di sicurezza nel caso di condizioni favorevoli alla condensazione interstiziale Verification and control of the stratigraphic sequence, glaser diagram with ample safety margins in the case of conditions favorable to interstitial condensation - Progettazione corretta della barriera a vapore e indicazioni per una corretta posa in opera Correct planning of the steam barrier and instructions for correct installation - Risoluzione dei ponti termici consigliata anche se non obbligatoria da normativa Resolution of thermal bridges recommended even if not mandatory by law - Progettazione di uno strato di microventilazione del sottomanto o di ventilazione Design of a microventilation layer of the undercoat or ventilation
			Condensazioni Interstiziali e riduzione prestazionale dell'isolamento termico Interstitials and performance reduction of thermal insulation	4	Stratigrafia errata della falda di copertura Incorrect stratigraphy of the covering layer Assenza o discontinuità degli strati di barriera al vapore Absence or discontinuity of the vapor barrier layers	4	4	64	- Verifica e controllo della sequenza stratigrafica, diagramma di glaser con ampi margini di sicurezza nel caso di condizioni favorevoli alla condensazione interstiziale Verification and control of the stratigraphic sequence, glaser diagram with ample safety margins in the case of conditions favorable to interstitial condensation - Progettazione corretta della barriera a vapore e indicazioni per una corretta posa in opera Correct planning of the steam barrier and instructions for correct installation

Conclusioni

In considerazione della crescente complessità dei sistemi edilizi, in cui da un lato trovano utilizzazione materiali, componenti e sistemi costruttivi in una gamma sempre più ampia, in relazione allo sviluppo dell'innovazione tecnologica, e dall'altro sistemi tecnologici e impiantistici sempre più sofisticati e complessi, il controllo della durabilità dei sistemi edilizi e dei loro componenti e materiali assume un'importanza fondamentale. La mancata considerazione, in sede di progettazione esecutiva, dei fattori e degli agenti di degrado ai quali gli specifici materiali di progetto risultano sensibili, nonché dei loro effetti e delle condizioni di guasto che potenzialmente possono indurre, comporta inevitabilmente la scelta di opzioni tecniche, sia in termini di prodotto che di processo, non in grado di garantire una qualità edilizia nel tempo. Il progetto esecutivo deve assicurare e garantire qualità edilizia al tempo zero e al tempo "x", garantendo la qualità prestazionale dell'edificio e dei suoi componenti in funzione di progressioni temporali congruenti con la vita economica media che caratterizza una determinata tipologia di prodotti edilizi e accettando un decadimento che sia solo espressione dell'*invecchiamento naturale* di materiali e componenti.

A volte, in funzione di una elevata complessità tecnico-realizzativa, la mancata considerazione anche di un solo fattore ed agente di degrado può comportare anche una non qualità al tempo zero. In tali scenari, l'adozione sistematica di specifiche metodologie operanti nell'ambito del *Risk Management* dovrebbe costituire una prassi irrinunciabile soprattutto nella fase di progettazione esecutiva di sistemi edilizi caratterizzati da una elevata complessità tecnica e tecnologica.

- 3) *process analysis*: It is conducted in relation to the technological processes that characterize the technical-realization phase and is aimed at identifying the possible problems that could occur in this phase;
 - 4) *qualitative analysis*: constitutes the central phase of the methodology and is based on the identification of the different scenarios of degradation, causes and technical actions of correction and mitigation;
 - 5) *Event Driven Graph*: provides a complete picture of all possible degradation scenarios that have been identified in qualitative analysis and their specific mechanisms of action and allows a more precise identification of corrective actions, in terms of specific solutions techniques and requirements for the realization phase).
- Among the different phases, that of the qualitative analysis in particular is the

most characterizing phase, in which the possible activators are identified, and evaluate the possible causes and the potential effects of the faults. In particular, it is possible to identify the causes of faults by proceeding in order to three factors:

- *occurrence*: Frequency with which a specific cause (factor and agent of degradation) of the fault will manifest itself; i.e. probability of occurrence (P);
- *severity*: Severity of potential consequences (failures) and effects (G);
- *detection*: Easy detection of possible anomalies and related faults; the possibility of detection by controls (R).

The type quali-quantitative methodology, after analyzing all possible failure modalities (qualitative analysis), assigns a numerical value (from 1 to 5 or from 1 to 10 according to the spe-

NOTE

¹ Le norme della serie ISO 15686, tutte attualmente ancora in vigore, a partire dalla Norma ISO 15686-3:2002 *Buildings and constructed assets - Service life planning Performance audits and reviews*, hanno avuto un recente aggiornamento nel 2017 con la norma ISO 15686-5:2017 *Buildings and constructed assets - Service life planning Life-cycle costing* e la norma ISO 15686-7:2017 *Buildings and constructed assets - Service life planning Performance evaluation for feedback of service life data from practice*.

² ASTM (American Society for Testing Materials) è un organismo di normazione statunitense ed è tra i maggiori contributori tecnici dell'ISO.

³ Ad esempio, lo standard della normativa SAE J1739 (Potential Failure and Effects Analysis for Design) utilizza una scala di valori da 1 a 5.

REFERENCES

- La Creta, R. and Truppi, C. (1994), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, Franco Angeli, Milano.
- Manfron, V. and Siviero, E. (1998), *Manutenzione delle costruzioni*, UTET, Torino.
- Gregotti, V. (2002), *Architettura, tecnica, finalità*, Laterza, Roma-Bari.
- Croce, S. (2003), "Patologia edilizia: prevenzione e recupero", in Gottfried, A. (Ed.), *La qualità edilizia nel tempo*, Ulrico Hoepli Editore. Milano.
- Lauria, M., Azzalin, M. and De Blasi, G. (2003), "Recupero e valutazione delle patologie nel moderno", in Programma di ricerca cofinanziato PRIN 2003, *Cultura tecnica, informazione tecnica e produzione edilizia nel progetto di architettura*, Venezia, Reggio Calabria, Napoli, Udine.
- Daniotti, B. (2003), *La durabilità in edilizia*, CUSL, Milano.
- Neri, P. (Ed.) (2007), *Verso la valutazione ambientale degli edifici*, Alinea, Firenze.
- De Angelis, E. and Re Cecconi, F. (2010), *Guasti in edilizia*, Maggioli Editore, Rimini.

cific reference standards) to each of the three factors mentioned above³, allowing to calculate an index (RPN) of risk priority (RPN=PxGxR) through which particular technical conditions of the project can be first watch carefully to, thus orienting in an adequate and correct way the choices of order technical-realization contained in the executive project, both of the product and of the process.

The case study developed and illustrated in the tab in fig. 5 highlights the possible application of the FMEA qualitative analysis phase in relation to the executive design of a roof covering. Are reported those causes of failure, among the possible ones, characterised by a higher RPN index, as well as the actions recommended in the executive project phase. The analysis shows that the indications (actions recommended) for the preventive consideration of

the potential degradation mechanisms during the executive design phase can constitute an effective orientation for the development of the same and for an evaluation and reconsideration of the initial design hypotheses. The FMEA methodology is in this case relating to the only decision-making phase of the choice of materials, components and technical solutions within the framework of the executive project, while in its most complete sense, it contemplates the extension at specific executive phases (also of transport, storage and installation of building materials and components) and management (also to foreshadow scenarios of degradation due to problems of improper use), but succeeds to significantly affect design developments and the ways in which to ensure their specific integration with the executive design process, integration that should

Cerutti, A. and Paganin, G. (2012), *Risk management per l'edilizia*, Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Pollo, R. (2014), "Progetto, durabilità, manutenzione: un metodo per la previsione della durabilità", *Techne, Journal of Technology for Architecture and Environment*, n. 07.

Chiarini, A. and Vicenza, M. (2014), *Strumenti statistici avanzati per la gestione della qualità. Affidabilità, FMEA, FTA, SPC, DOE*; Franco Angeli, Milano.

Nicolella, M. and Scognamillo, C. (2017), "Applicazione del metodo FMEA per la valutazione di affidabilità delle strutture", *Convegno Demolition or reconstruction?*, Ancona.

be constantly contemplated, could be the subject of specific research fields.

Conclusions

In view of the growing complexity of building systems, in which on the one hand materials, components and construction systems are used in an increasingly wide range, in relation to the development of technological innovation, and on the other, technological and plant systems increasingly sophisticated complex the control of the durability of building systems and their components and materials is of fundamental importance.

The failure to take into consideration, during the final design phase, the factors and the degradation agents to which the specific project materials are found to be sensitive, as well as their effects and the failure conditions that can potentially lead, inevitably in-

volves the choice of technical options, in terms of product and process, not able to guarantee a building quality over time. The executive project must ensure building quality at time zero and time "x", guaranteeing the performance quality of the building and its components according to temporal progressions congruent with the average economic life that characterizes a certain type of building products and accepting a decay that is only an expression of the *natural aging* of materials and components.

Sometimes, depending on a high technical-realization complexity, the lack of consideration of a single factor and degradation agent can also involve a non-quality at zero time. In such scenarios, the systematic adoption of specific methodologies operating in the field of Risk Management (4) should be an indispensable practice especially

in the phase of the executive design of building systems characterized by a high Technical and technological complexity.

NOTES

¹ The standards of the ISO 15686 series, all currently still in force, from the standard ISO 15686-3:2002 *Buildings and constructed assets-Service life planning Performance audits and reviews*, have had a recent update in 2017 with the ISO standard 15686-5:2017 *Buildings and constructed assets-Service life planning Life-cycle costing* and the standard ISO 15686-7:2017 *Buildings and constructed assets-Service life Planning Performance evaluation for feedback of service life data from practice*.

² ASTM (American Society for Testing Materials) is an American standardization body and is one of the major technical contributors to ISO.

³ For example, the standard of SAE J1739 (Potential Failure and Effects analysis for Design) uses a scale of values from 1 to 5.