



## consulta il dossier sull'efficienza energetica

Home

### Come scegliere l'intervento manutentivo più appropriato per i rivestimenti intonacati

Maurizio Nicoella - Professore nell'Università degli Studi di Napoli Federico II Alessio Pino - Ingegnere 30/03/2018 373

#### Analisi multi-criteria per la manutenzione di rivestimenti intonacati

Il problema della più appropriata **scelta di strategia manutentiva** è di **complessa risoluzione**, in quanto coinvolge diversi aspetti, concomitanti ma tuttavia spesso contrastanti:

- **quello economico "assoluto"**, secondo il quale si tenderebbe ad eseguire quanto meno interventi possibile;
- **quello economico "relativo"**, secondo il quale attuare interventi di piccola entità ma più spesso, evita di dovere poi eseguire opere di maggiore impegno, che finiscono per coinvolgere anche altri componenti per i cosiddetti "guasti a catena";
- **quello della sostenibilità**, secondo il quale alla scelta di materiali dal punto di vista di eco-compatibilità, non si deve evitare di abbinare considerazioni in termini di durabilità;
- **quello della sicurezza**, che porterebbe ad evitare che nel ciclo di vita si raggiungano valori di prestazione

#### Il Magazine



Sfogliate la rivista online

Calcolo strutturale GRATIS  
Richiedi  
**PRO\_SAP**  
e-TIME 2018

# Analisi multi-criteria per la manutenzione di rivestimenti intonacati

---

AUTORI: Maurizio Nicolella, Professore nell'Università degli Studi di Napoli Federico II – Alessio Pino, Ingegnere

## ABSTRACT

Il problema della più appropriata scelta di strategia manutentiva è di complessa risoluzione, in quanto coinvolge diversi aspetti, concomitanti ma tuttavia spesso contrastanti:

- quello economico “assoluto”, secondo il quale si tenderebbe ad eseguire quanto meno interventi possibile;
- quello economico “relativo”, secondo il quale attuare interventi di piccola entità ma più spesso, evita di dovere poi eseguire opere di maggiore impegno, che finiscono per coinvolgere anche altri componenti per i cosiddetti “guasti a catena”;
- quello della sostenibilità, secondo il quale alla scelta di materiali dal punto di vista di eco-compatibilità, non si deve evitare di abbinare considerazioni in termini di durabilità;
- quello della sicurezza, che porterebbe ad evitare che nel ciclo di vita si raggiungano valori di prestazione troppo vicini al valore minimo ammissibile;
- quello della disponibilità, secondo il quale una rarefazione dell'attività manutentiva è meglio sopportata dai committenti/utenti, e dunque deve esistere un giusto rapporto fra ciclo di vita e durata dell'intervento manutentivo.

Tante e così diverse variabili in gioco determinano una complessità che può essere adeguatamente affrontata e risolta solo con analisi multicriteriali.

Nell'articolo si mettono a confronto 4 diverse strategie per la manutenzione di rivestimenti intonacati, mediante diversi metodi di analisi multi-criteria (TOPSIS, WSM, WPM, VIKOR), pervenendo a risultati di indubbio interesse per orientare le scelte di tecnici e proprietari di immobili.

## INTRODUZIONE

Oltre 20 anni dopo la nascita del piano di manutenzione, all'interno della legge-quadro italiana sui lavori pubblici, il nuovo codice del 2016 sottolinea con forza il riferimento al ciclo di vita, sia dal punto di vista della programmazione degli interventi (un aspetto di tipo tecnologico) che – grande novità – dal punto di vista del costo (un aspetto di tipo economico).

L'art. 96, in particolare, si sofferma su questa rilevante questione, ed entra anche nel merito delle valutazioni che le stazioni appaltanti dovranno utilizzare per valutare il costo del ciclo di vita in base a quanto i partecipanti alla gara indicheranno nelle loro offerte.

*“1. I costi del ciclo di vita comprendono, in quanto pertinenti, tutti i seguenti costi, o parti di essi, legati al ciclo di vita di un prodotto, di un servizio o di un lavoro:*

*a) costi sostenuti dall'amministrazione aggiudicatrice o da altri utenti, quali:*

*1) costi relativi all'acquisizione;*

*2) costi connessi all'utilizzo, quali consumo di energia e altre risorse;*

*3) costi di manutenzione;*

4) costi relativi al fine vita, come i costi di raccolta, di smaltimento e di riciclaggio;

b) costi imputati a esternalità ambientali legate ai prodotti, servizi o lavori nel corso del ciclo di vita, purché il loro valore monetario possa essere determinato e verificato.

Tali costi possono includere i costi delle emissioni di gas a effetto serra e di altre sostanze inquinanti, nonché altri costi legati all'attenuazione dei cambiamenti climatici”.

Come si vede dallo stralcio riportato, in effetti si sta evidenziando quello che i propugnatori della manutenzione programmata vanno predicando da tempo, ovvero che i costi di un'opera, tradizionalmente intesi come quelli di costruzione, hanno nella fase di gestione l'aliquota di gran lunga più rilevante, e che comunque ogni ragionamento in termini economici va fatto considerando il cosiddetto “costo globale”.

Va, poi, adeguatamente sottolineato come persino il “costo globale” abbia subito significative evoluzioni, considerando ormai come aliquota decisamente non trascurabile i costi che in qualche modo sono ricollegabili al concetto di sostenibilità, a cui – evidentemente – allude il su citato articolo 96, non solo allorquando si riferisce a fine vita, raccolta, smaltimento e riciclaggio di edificio e componenti, ma anche quando tira in ballo “esternalità ambientali” e più oltre riporta l'espressione “consumo di risorse”.

Non di minore portata è, poi, la definizione di ciclo di vita che si legge all'art. 3, in quanto essa estende l'ampiezza del concetto rispetto a quello puramente durabilistico a cui ci si è ormai abituati: “tutte le fasi consecutive o interconnesse, compresi la ricerca e lo sviluppo da realizzare, la produzione, gli scambi e le relative condizioni, il trasporto, l'utilizzazione e la manutenzione, della vita del prodotto o del lavoro o della prestazione del servizio, dall'acquisizione della materia prima o dalla generazione delle risorse fino allo smaltimento, allo smantellamento e alla fine del servizio o all'utilizzazione”.

Approfondendo la portata di questa definizione, si può ritenere che le valutazioni strategiche sulla gestione della vita di un componente edilizio non siano più da condurre banalmente rapportando il costo di manutenzione (visto come il costo per ripristinare una prestazione ad un valore vicino a quella iniziale) al cosiddetto Mean Time Between Failures, ma bensì prevedendo, anche in termini di sostenibilità, quelle che saranno le scelte più appropriate: il che non vuol dire, come pure ritengono in molti, semplicemente utilizzare materiali naturali in luogo di quelli che lo sono meno o per niente, ma bensì tenere conto di quanti interventi si faranno nel ciclo di vita del componente, del consumo di energia non rinnovabile, della regionalità, e di ogni altra questione che riguarda il rapporto opera-ambiente.



Figure 1-2 – esempi di degrado delle superfici intonacate

L'articolo propone l'utilizzo di diverse metodologie di analisi multicriteria al fine di fornire a progettisti, tecnici in generale e gestori di patrimoni immobiliari, la possibilità di prendere in considerazione scelte più razionali e consapevoli in termini economici, valutando le più appropriate sulla scorta – per l'appunto – di metodologie che consentono di prendere in considerazione simultaneamente i più diversi aspetti.

Di particolare interesse è stata ritenuta un'applicazione sui rivestimenti intonacati, in quanto le modalità di gestione del degrado possono portare ad interventi significativamente differenti dal punto di vista del costo.

## IL DEGRADO DEGLI INTONACI

Il decadimento prestazionale degli intonaci rappresenta un classico esempio di complessità di valutazione, in quanto questo componente è tipicamente caratterizzato da un funzionamento non del tipo on-off.

E se, ad esempio, l'indagine termografica può rappresentare quanto meno un aiuto alla esecuzione di rilievi dalle risultanze non soggettive, analoga complessità caratterizza l'individuazione dello stato di guasto. Gli intonaci, per quanto non siano elementi strutturali, possono determinare, ad un certo punto del loro decadimento prestazionale, uno stato di pericolo, e dunque è importante fissare uno stato di conservazione (corrispondente ad un determinato livello prestazionale) al quale associare la fine del ciclo di vita.

Molti ricercatori hanno cercato di stimare la durata degli intonaci con diversi approcci metodologici, anche se – rispetto al numero complessivo degli studi sulla durabilità dei componenti edilizi – con una percentuale non particolarmente elevata.

Alcuni hanno focalizzato la loro attenzione su specifiche malte (quelle a base di calce, [1] e [2]) in quanto tipiche di costruzioni antiche, con studi sulla loro durabilità, derivanti fondamentalmente da sperimentazioni di laboratorio, come anche chi ha focalizzato la sua attenzione su altri ingredienti, come ad esempio il tipo di sabbia [3].

Oltre la sperimentazione di laboratorio è andato chi ha cercato di ripercorrere l'approccio suggerito dalla norma ISO 15686-7, con una sperimentazione sul campo preceduta da una significativa campionatura di edifici in uno specifico contesto geografico, valutando lo stato di degrado attraverso ispezioni visive, stabilendo un indice numerico di gravità del degrado dei rivestimenti lapidei, allo scopo di stimare una vita utile di riferimento per questo tipo di rivestimento [4]. O, sempre partendo da una campionatura ed una prolungata osservazione sul campo, mediante:

- approfondita osservazione delle condizioni di partenza all'inizio della sperimentazione, in qualche caso mediante ispezione visiva, in altri mediante termocamera ad infrarossi;
- documentazione delle attività manutentive eseguite durante gli ultimi anni;
- osservazione della evoluzione delle condizioni di conservazione nei periodi seguenti, con ispezioni principalmente eseguite a mezzo di termocamera (v. fig. 3-4).

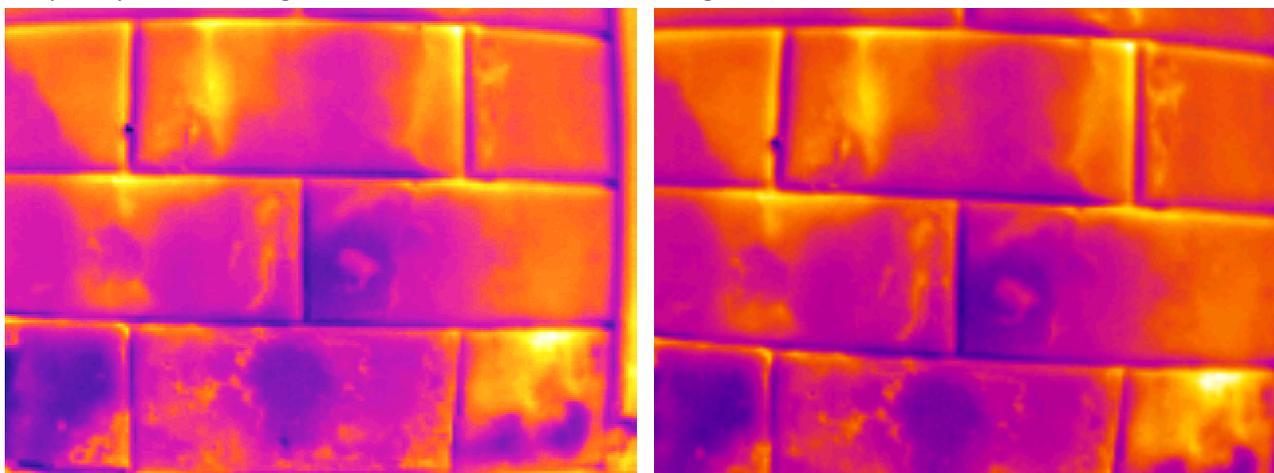


Figure 3-4 – esempio di monitoraggio eseguito con termocamera ad infrarossi in due anni successivi

L'obiettivo della sperimentazione era quello di stimare il valore della vita utile di rivestimenti intonacati, e la messa a punto del "Metodo Nick" per la stima della vita utile di componenti (in particolare rivestimenti intonacati), inserito nella norma UNI 11156:2006, che rappresenta il suo risultato finale, pubblicato e presentato in altre pubblicazioni [5] [6] [7] [8]. Questa ricerca continuò, finalizzata alla valutazione del ciclo di vita di rivestimenti intonacati mediante la costruzione di curve prestazioni/tempo, con una estensione fino a 30 anni per 53 dei 100 edifici campione iniziali, portando alla fine al raggiungimento dell'obiettivo mediante una curva inviluppo delle singole curve prestazioni/tempo. [9]

In altri casi è stato applicato il metodo fattoriale per la previsione della vita mediante dati desunti ex-post, allo scopo di superare alcuni dei suoi ben noti difetti, proponendo un'analisi di regressione lineare multipla per identificare i subfattori più rilevanti che spiegano il degrado dei rivestimenti in pietra [10].

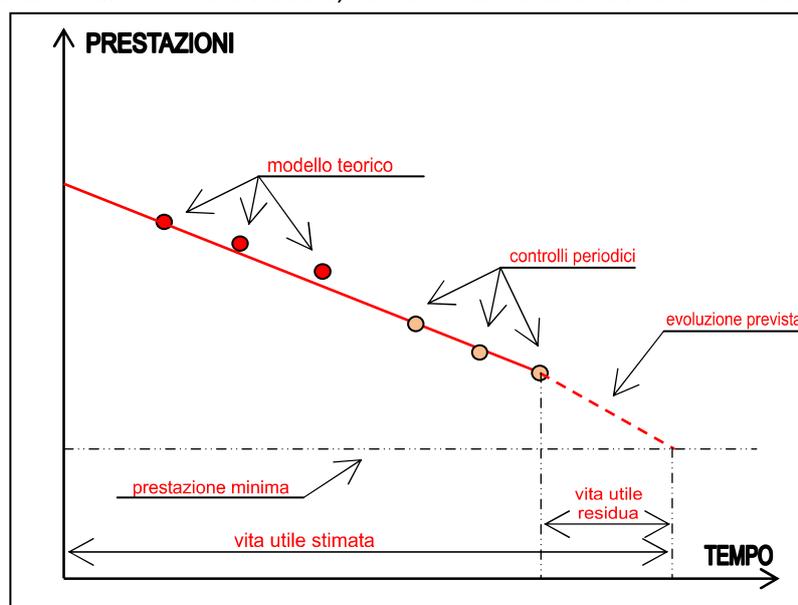
Alcuni autori hanno, infine, provato ad esplorare la possibilità di utilizzare analisi multicriteria per lo specifico problema di avere uno strumento di supporto alle decisioni per la manutenzione degli involucri esterni [11] [12], o anche con un approccio probabilistico, proponendo una metodologia per modellare e predire le prestazioni lungo il ciclo di vita delle facciate degli edifici, basandosi sulle reti stocastiche Petri.

In realtà, la stima della durata degli intonaci può essere considerato un topic di grande interesse soprattutto se, alla conoscenza della legge di decadimento prestazionale, si è in grado di associare un criterio per individuare:

- gli interventi più appropriati, in funzione del momento in cui saranno attuati;
- i tempi giusti per metterli in atto.

Il problema si sposta, quasi inevitabilmente, sulla possibilità di tracciare una curva prestazioni/tempo per lo specifico componente più vicina possibile al vero, in quanto essa consente concretamente di attuare politiche di manutenzione predittiva, che – laddove possibile – costituiscono una chance decisamente soddisfacente, quantunque sostituibile, quando necessario, dalla manutenzione secondo condizione.

Un modello di previsione interessante sarebbe proprio quello che coniuga la possibilità di esprimere ipotesi sul comportamento nel tempo del componente (ovvero valutare gli stati prestazionali a diversi step temporali), con una pianificazione di controlli che, sulla base della validazione della curva prestazioni/tempo preliminarmente individuata, consente di stimare la vita utile residua (v. figura 5).



**Figura 5** – la manutenzione predittiva può essere vista anche come combinazione di manutenzione ciclica e manutenzione secondo condizione, fino a pervenire alla previsione della vita utile residua

## STATI DI DEGRADO

Nel corso di una sperimentazione sul campo, condotta con riferimento alla norma ISO 15686-7, dapprima dal 1988 al 2000, e poi fino al 2016, fu possibile pervenire ad una serie di curve tendenziali di decadimento prestazionale, la cui media può essere considerata attendibile solo per gruppi di edifici di campionatura aventi un certo tipo di caratteristiche omogenee. In tal senso, scelto con adeguata attenzione il campione significativo (100 edifici nell'ambito del comune di Napoli), è stato possibile costruire una curva involucro di tutte quelle dei singoli edifici. La sperimentazione era riferita ad una tipologia di intonaco ben definita, con una finitura ben identificata, secondo la seguente stratigrafia

FUNZIONE	MATERIALE
supporto	muratura in tufo / tamponatura in laterizio
rivestimento	intonaco in malta comune
regolarizzazione	rasante in malta comune fine
finitura	pittura silossanica

Per la valutazione delle prestazioni, individuate preliminarmente tipologie di intervento per lo specifico componente (nel caso in esame, l'intonaco rivestito con pittura) si sono identificati i livelli di degrado corrispondenti (ovvero le condizioni in esercizio rilevabili, sempre specificamente), con riferimento a quelli suggeriti dalla norma ISO 15686-7, a cui, a loro volta, corrispondono livelli di prestazione (v. figura 6).

La tabella di corrispondenza è di seguito riportata:

INTERVENTI DI MANUTENZIONE	LIVELLO DI DEGRADO (condizioni in sito per rivestimenti intonacati)	LIVELLO DI PRESTAZIONE (secondo la norma ISO 15686-7)
Nessuno	Nessun decadimento prestazionale	0 – Nessun sintomo
Parziale rifacimento + tinteggiatura (I <sub>1</sub> )	Esfoliazioni incipienti e bollature – evidenti alterazioni cromatiche	1 – Leggeri sintomi
Rasatura + tinteggiatura (I <sub>2</sub> )	Esfoliazioni accentuate e bollature – microfessurazioni o inizio di distacchi esteso a meno del 30% della superficie	2 – Medio
Parziale rifacimento dell'intonaco + rasatura + tinteggiatura (I <sub>3</sub> )	Esfoliazioni accentuate e bollature – microfessurazioni o inizio di distacchi esteso a più del 30% della superficie	3 – Sintomi evidenti
Totale rifacimento dell'intonaco + rasatura + tinteggiatura (I <sub>4</sub> )	Distacco parziale/totale	4 – Del tutto inaccettabile, compreso collasso e malfunzionamento

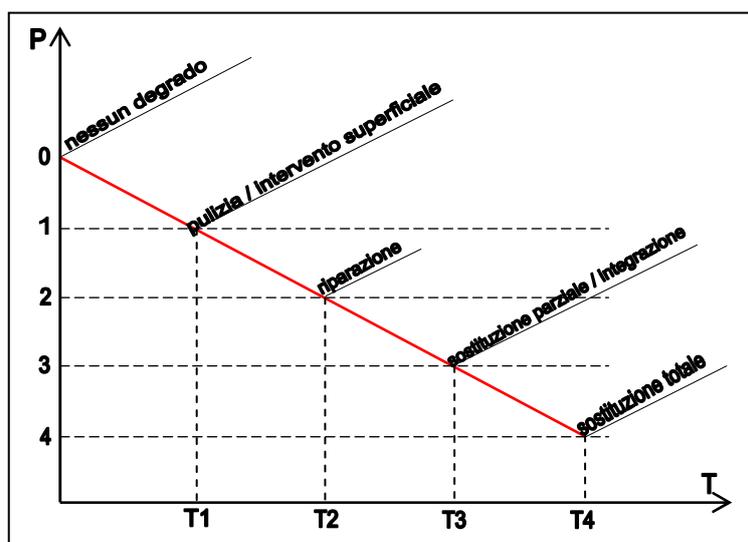


Figura 6 – nella curva di decadimento prestazionale si possono identificare i livelli che corrispondono a specifici interventi di manutenzione, in corrispondenza di determinate soglie temporali

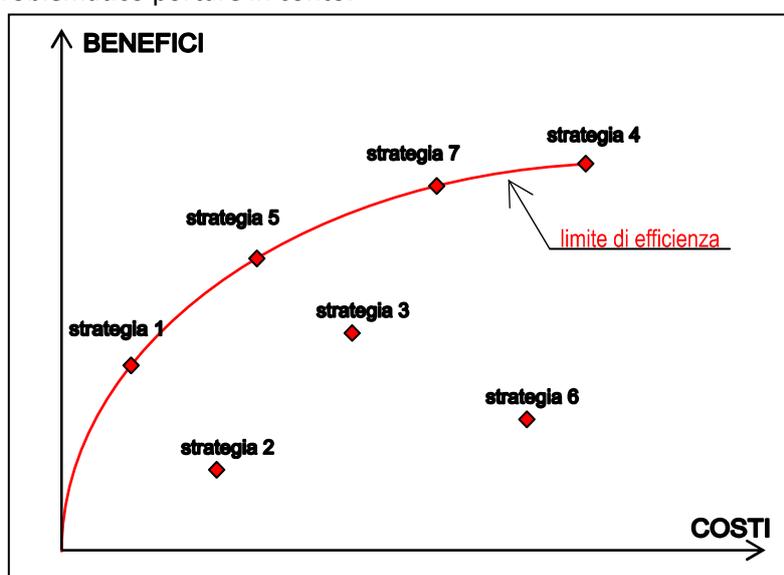
Allo scopo di confrontare diverse scelte di gestione, corrispondenti a strategie manutentive, si sono considerate le seguenti:

- I. consumo della prestazione durante il suo ciclo di vita, con assenza di interventi manutentivi;
- II. rifacimenti parziali e opere di finitura sull'intera superficie;
- III. protezione dell'intonaco dagli agenti atmosferici, mediante il ripristino degli strati di finitura con periodici rifacimenti parziali;
- IV. rimozione frequente delle anomalie, con interventi superficiali fino alla necessità di rifacimenti parziali.

Dal punto di vista della programmazione, considerando un arco di tempo di 30 anni (corrispondente alla durata della sperimentazione di cui sopra), si è considerata la seguente cronologia, scaturita dalle osservazioni condotte in sito:

	5	10	15	20	25	30
Strategia 1						
Strategia 2			$I_3$			$I_3$
Strategia 3				$I_2$		$I_3$
Strategia 4		$I_1$		$I_1$		$I_3$

Rispetto ad alcuni approcci, da ritenersi comunque interessanti ma di tipo più che altro qualitativo (cfr. figura 7), si è scelto, mediante differenti metodologie di analisi multicriteria, di pervenire alla quantificazione del rapporto benefici/costi connesso a ciascuna strategia, per fornire un supporto decisionale che possa guidare verso quella più opportuna, tenendo conto dei diversi parametri in gioco, che altrimenti sarebbe problematico portare in conto.



**Figura 7** – diverse strategie di gestione danno in genere differenti risultati in termini di costi e benefici: il limite di efficienza evidenzia quali sono quelle da mettere a confronto in termini quantitativi, per valutare la più appropriata.

## STATO DELL'ARTE E METODOLOGIA DELLA RICERCA

I metodi decisionali multi-criterio sono uno strumento diffuso per valutare le decisioni più adatte in contesti di vario genere, attribuendo a ciascuna alternativa punteggi in base ai criteri scelti per poi confrontarle. In questo campo sono stati sviluppati molti metodi, e alcuni di questi sono già stati usati nel campo della valutazione della strategia manutentiva ottimale. A proporre l'idea di queste applicazioni fu

Triantaphyllou [14], che suggerì i criteri da adottare per realizzare queste valutazioni, individuando in particolare il costo, la riparabilità, l'affidabilità e la disponibilità. Mostrò anche un'applicazione dell'uso dell'AHP (Analytical Hierarchy Process) per questo tipo di scelta.

In seguito, molti altri autori sperimentarono sullo stesso tema l'utilizzo di combinazioni tra i diversi metodi: fra gli altri, Bevilacqua [15] integrò l'AHP con la ricerca operativa per determinare la migliore tipologia di manutenzione in una raffineria petrolifera; Ilankumaran [16] propose una combinazione di AHP e TOPSIS, per selezionare la migliore strategia manutentiva per un'industria tessile. Ghosh [17] introdusse un'integrazione di AHP, ricerca operativa e logica fuzzy; Chen [18] provò ad utilizzare l'AHP, il TOPSIS e il GRA (Grey Relational Analysis) per stimare le prestazioni e stabilire le migliori strategie manutentive in modo più preciso ed efficace per una compagnia di semiconduttori. Oltre a costoro, Vahdani [19] utilizzò il VIKOR per la selezione di una strategia manutentiva, e più tardi Ahmadi [20] utilizzò per lo stesso scopo una combinazione di VIKOR, AHP e TOPSIS.

In questo articolo, vengono applicate le metodologie TOPSIS, WSM, WPM e VIKOR per valutare la strategia manutentiva ottimale. Tra queste quattro, due (WPM e WSM) sono relativamente più semplici, quindi il TOPSIS è più articolato, e infine il VIKOR è ben più complesso. C'è, chiaramente, una ragione dietro l'uso di due metodi più intuitivi all'interno della metodologia di scelta, che risiede nel dimostrare che più metodi concorrono a dare un risultato univoco; il VIKOR di per sé non rende possibile ciò, in quanto il risultato delle valutazioni effettuate con questo metodo dipende da un parametro aleatorio (incertezza finale), e pertanto su di esso si svolgerà un'analisi più approfondita, in particolare riguardo:

- il modo migliore di attribuire un valore a tale parametro, in modo da ottenere il risultato già provato dagli altri tre;
- le possibilità di uso del metodo VIKOR per la valutazione di una strategia manutentiva ottimale in edilizia.

## TOPSIS

La *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* è un metodo decisionale multicriterio sviluppato inizialmente da Hwang e Yoon nel 1981, poi successivamente rielaborato da Yoon nel 1987, quindi da Hwang, Lai e Liu nel 1993. Il TOPSIS si basa sul concetto secondo cui l'alternativa scelta deve avere la minore distanza geometrica dalla soluzione positiva ideale e la maggiore distanza geometrica dalla soluzione negativa ideale. È un metodo di aggregazione compensativa che confronta una serie di alternative definendo dei pesi per ciascun criterio, normalizzando i punteggi per ciascun criterio e calcolando la distanza geometrica tra ciascuna alternativa e l'alternativa ideale, che è costituita dall'insieme dei migliori punteggi per ogni criterio. Tutti i criteri devono essere strettamente crescenti o decrescenti.

In questa applicazione, il primo passo è quello di definire le alternative ( $A_i, i = 1, 2, \dots, m$ ) e i criteri ( $C_j, j = 1, 2, \dots, n$ ) di valutazione delle alternative. Quindi, un peso ( $W_j, j = 1, 2, \dots, n$ ) deve essere attribuito a ciascun criterio, positivo o negativo. Una volta che sono stati attribuiti i punteggi a ciascuna alternativa e secondo ciascuno dei criteri, di solito in una scala da 1 a 10 assegnati da più soggetti detti *decision makers*, la relativa matrice  $D$ , con  $n$  righe e  $m$  colonne, può essere creata.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \ddots & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Nella matrice  $D$ , chiamata matrice decisionale fuzzy,  $x_{ij}$  rappresenta il punteggio assegnato all' $i$ -esima alternativa relativamente al  $j$ -esimo criterio. Quindi, i valori  $x_{ij}$  nella matrice vengono normalizzati, con l'equazione:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, m$$

Ne risulta la matrice decisionale fuzzy normalizzata.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & \ddots & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

Quindi, i pesi  $W_j$  che sono stati stabiliti all'inizio per i criteri devono essere trasportati sulla matrice, moltiplicando ogni valore per il peso normalizzato  $w_j$  del relativo criterio. Si ottengono così i valori  $t_{ij}$  che compongono la matrice  $T$ .

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & \ddots & \dots & t_{2n} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \dots & \dots & t_{mn} \end{bmatrix}$$

A questo punto, per eseguire la valutazione, le alternative ideali negativa ( $A_w$  o NIS) e positiva ( $A_b$  o PIS) devono essere determinate come di seguito:

$$A_w = \{t_{wj} = \langle \min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j: w_j > 0) \rangle, \langle \max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j: w_j < 0) \rangle\}$$

$$A_b = \{t_{bj} = \langle \max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j: w_j > 0) \rangle, \langle \min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j: w_j < 0) \rangle\}$$

Quindi, per ciascuna delle alternative, le distanze da  $A_w$  e  $A_b$  possono essere calcolate nella forma di  $d_{iw}$  e  $d_{ib}$  rispettivamente.

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

Il parametro finale del metodo TOPSIS può così essere infine calcolato, e consiste in  $s_{ib}$ , in base a cui, dal valore più alto al più basso, le alternative possono così essere classificate.

$$s_{ib} = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}}$$

## WSM

Nella teoria delle decisioni, il *Weighted Sum Model (WSM)* è probabilmente il metodo decisionale più semplice per valutare alternative  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) in base a criteri  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). Lo svolgimento di questa metodologia consiste nel sommare i prodotti tra i punteggi  $a_{ij}$  e i pesi  $w_j$  dei rispettivi criteri, per ciascuna delle alternative. Questa sommatoria, per ciascuna alternativa  $A_i$ , si definisce come *somma ponderata* o *weighted sum model score* ( $A_i^{WSM-score}$ ).

$$A_i^{WSM-score} = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij}$$

In questo modello, l'alternativa migliore è quella con la somma ponderata più alta. Dev'essere però notato che, se i criteri non adoperano tutti la stessa scala, è necessaria una fase di normalizzazione prima di passare allo svolgimento del metodo.

## WPM

Il *Weighted Product Model (WPM)* è in parte simile al *WSM*, ma anziché la somma fa utilizzo della moltiplicazione. Una differenza significativa risiede nella modalità in cui viene fornito il risultato finale: anziché svolgere il calcolo di un solo valore complessivo per ciascuna strategia, si confrontano a due a due tutte le  $n$  alternative: l'alternativa migliore è quella che risulta essere migliore in tutti i confronti.

Considerando alternative  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) e criteri  $c_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), il punteggio per un'alternativa  $i$ -esima secondo il  $j$ -esimo criterio è  $a_{ij}$  e la formula che mostra lo svolgimento del confronto tra un'alternativa  $A_K$  e un'alternativa  $A_L$  è:

$$P(A_K/A_L) = \prod_{j=1}^m (a_{Kj}/a_{Lj})^{w_j}$$

Se il rapporto  $P(A_K/A_L)$  è maggiore di 1, allora  $A_K$  è più desiderabile di  $A_L$ . Se non ci sono alternative identiche, l'unica alternativa  $A_K$  caratterizzata da soli valori maggiori di 1 risulterà essere la migliore alternativa.

In questo metodo, non è richiesta alcuna normalizzazione preliminare prima di eseguire i confronti, in quanto i rapporti sono tra punteggi relativi agli stessi criteri.

## VIKOR

Il metodo *VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*, in Serbo Ottimizzazione Multi-Criterio e Soluzione di Compromesso) è stato sviluppato come metodo decisionale multi-criterio per risolvere una problema decisionale discreto caratterizzato da criteri non commensurabili e in conflitto. Questo metodo si basa sulla classificazione e selezione di una serie di alternative, quindi sulla determinazione di soluzioni di compromesso per un problema con criteri in conflitto, che possano aiutare i decisori a raggiungere un accordo finale. Qui, la soluzione di compromesso è una soluzione fattibile vicina all'ideale, intendendo il compromesso come accordo stabilito tramite concessioni reciproche.

Definendo alternative  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) e criteri  $c_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), prima di tutto, per ogni criterio vengono individuati i punteggi migliori e peggiori, indicati rispettivamente con  $f_j^*$  e  $f_j^\wedge$ . Quindi, per ciascuna alternativa si calcolano due valori caratteristici:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^\wedge}$$

$$R_i = \max_j \left( w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^\wedge} \right)$$

Ogni alternativa può essere classificata in base ad entrambi i valori, ed in entrambe le classificazioni l'alternativa migliore è caratterizzata dal valore più basso. E' necessaria una spiegazione riguardo questi due valori. Infatti,  $S_i$  è più basso – quindi migliore - per alternative caratterizzate da buoni punteggi secondo più criteri, mentre  $R_i$  è migliore per alternative che hanno un punteggio particolarmente positivo anche se in un solo criterio. Ciò vuol dire che, se ci sono differenze nelle classifiche delle alternative secondo i due valori, ciò è dovuto al fatto che:

- alternative che si classificano meglio secondo  $S_i$  piuttosto che secondo  $R_i$  sono alternative più bilanciate, con buoni punteggi secondo più criteri;

- alternative con una classificazione migliore secondo  $R_i$  piuttosto che secondo  $S_i$  sono contraddistinte da un punteggio molto buono in alcuni criteri, ma peggiori negli altri.

Questo aspetto diventa molto importante nel seguito. Infatti, il passo successivo è quello di calcolare:  $S^* = \min_i(S_i)$ ,  $S^\wedge = \max_i(S_i)$ ,  $R^* = \min_i(R_i)$ ,  $R^\wedge = \max_i(R_i)$ . Questi valori sono necessari per determinare il valore ultimo del metodo, tramite:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^\wedge - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^\wedge - R^*}$$

Di questa formula, l'unico parametro che non è stato ancora descritto è  $v$ , definito *incertezza finale* o *peso della strategia della maggioranza dei criteri*. Analiticamente, al crescere di  $v$ , il peso di  $S_i$  cresce rispetto a quello di  $R_i$ . In fatti, considerando quanto detto prima, se  $v > 0,5$  l'analisi è definita *voto per maggioranza*; un'analisi in cui  $v \approx 0,5$  e, infine, se  $v < 0,5$ , è *con veto*. Dal punto di vista del decisore, se il VIKOR è *con veto*, significa che un singolo criterio – presumibilmente quello con il peso più alto – è considerato essere molto più rilevante degli altri. Se ognuno dei criteri è importante a suo modo, si dovrebbe svolgere un'analisi di *voto per maggioranza*.

## VALUTAZIONE DEI CRITERI

Si mostrerà ora, tramite le metodologie indicate di sopra, la strategia manutentiva ottimale per i rivestimenti intonacati. Le strategie manutentive che si sottoporranno a valutazione sono quelle elencate precedentemente come I, II, III e IV, da qui in poi rispettivamente  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$ ; i criteri sono invece i seguenti:

- Costo ( $C_1$ );
- Sicurezza ( $C_2$ );
- Disponibilità ( $C_3$ );
- Sostenibilità ( $C_4$ ).

In questa sezione, viene presentata la valutazione dei punteggi per ciascuno dei criteri e delle alternative.

### COSTO

Il costo è probabilmente l'elemento che influenza maggiormente la scelta delle strategie manutentive, a causa di budget poco flessibili a disposizione delle committenze. Il costo di ciascuna strategia manutentiva dipende chiaramente dai costi dei singoli interventi. Quindi, il costo totale di una strategia manutentiva è qui calcolato moltiplicando il costo unitario di ciascun intervento, dedotto dal Prezzario della Regione Campania, per una superficie di 2000 m<sup>2</sup>, che risulta essere un valore medio per gli edifici campionati dal 1988 al 2016. I costi sono quindi capitalizzati al 30° anno, secondo la programmazione degli interventi.

Poi, bisogna anche considerare che strategie manutentive diverse danno come risultato diversi valori di vita utile residua. Valori di vita utile alla fine del periodo considerato dalla strategia manutentiva più bassi del valore medio di vita utile del componente producono una detrazione economica, come evidenziato da alcuni metodi del campo estimativo, quale ad esempio *l'approccio del costo deprezzato*. Questa detrazione economica può essere stimata come la spesa futura relativa all'intervento di ricostruzione totale ( $I_4$  della relativa tabella) che sarà in ogni caso necessario per ripristinare la vita utile originaria del componente una volta che si è raggiunta la  $P_{min}$ , scontato per un numero di anni pari alla vita utile residua.

Questo valore viene quindi sommato alla capitalizzazione dei costi per i singoli interventi della strategia. Certamente la determinazione della vita utile residua, che dipende non solo dal numero di anni trascorsi dal

componente, ma anche dagli interventi che sono stati eseguiti su di esso, è preliminare all'ottenimento di tale grandezza.

	COSTO DEI SINGOLI INTERVENTI	COSTO CAPITALIZZATO	PROBABILE VITA UTILE RESIDUA	SPESA FUTURA	COSTO TOTALE
A <sub>1</sub>	0 €	0 €	0 years	141.880 €	141.880 €
A <sub>2</sub>	113.880 € 113.880 €	258.370 €	15 years	105.420 €	363.800 €
A <sub>3</sub>	85.920 € 113.880 €	211.650 €	12 years	114.540 €	326.180 €
A <sub>4</sub>	77.120 € 77.120 € 113.880 €	314.000 €	16 years	98.610 €	412.610 €

## SICUREZZA

I rivestimenti intonacati, poiché posizionati sull'involucro esterno dell'edificio, possono rappresentare uno degli elementi più pericolosi dell'edificio sia per coloro che vi risiedono, sia per i passanti. Questo è stato purtroppo dimostrato in eventi quali quello che ha avuto quattro anni fa, quando un ragazzo quattordicenne ha tragicamente perso la vita nella città di Napoli, per causa della caduta di un pezzo di intonaco di grandi dimensioni da un edificio storico, tanto importante quanto mal mantenuto. Nonostante questa tipologia di eventi si pensa totalmente esclusa se si eseguono interventi nei primi 30 anni di vita, c'è comunque tuttavia una probabilità di guasto, in quanto la vita utile è un concetto probabilistico.

Quindi chiaramente la sicurezza, qui intesa come un valore inversamente proporzionale alla probabilità di guasto nel periodo considerato dalle strategie manutentive, è un criterio di scelta particolarmente importante. Come emerge dalla medesima sperimentazione che ha portato a definire la curva prestazione-tempo di un rivestimento intonacato, risulta che per tale componente si verificano condizioni critiche:

- nel 9,4% dei casi dopo 15 anni e prima dei 20 anni;
- nel 47,1% dei casi dopo 20 anni e prima dei 22 anni;
- nel 52,8% dei casi solo dopo i 22 anni.

Quindi, sembra corretto moltiplicare tali percentuali di probabilità, a cui ovviamente il rischio di guasto è strettamente correlato, per il valore dell'area tra la curva prestazione-tempo di ciascuna strategia – modellata tramite valutazioni teoriche – e la linea orizzontale per cui  $P = P_{min}$ , calcolando prodotti diversi per ciascun intervallo temporale definito sopra. Il valore finale, costituito dalla somma dei prodotti tra l'area del grafico e tali probabilità, come dettagliato nella tabella sottostante, è in una scala omogenea ma imprecisata, problema risolto in ogni caso dalla normalizzazione.

	AREA DEL GRAFICO TRA 15 E 20 ANNI	AREA DEL GRAFICO TRA 20 E 22 ANNI	AREA DEL GRAFICO TRA 22 E 30 ANNI	SICUREZZA
A <sub>1</sub>	17	5	6	7,13
A <sub>2</sub>	53	15	29	27,4
A <sub>3</sub>	17	20	36	30,1
A <sub>4</sub>	33	28	60	48,0

## DISPONIBILITÀ

La disponibilità è la capacità di un sistema di stare in funzione durante un periodo di tempo specifico o oltre. Per valutarla, è sufficiente calcolare per ogni strategia il MTBF (*Mean Time Between Failures*, Tempo Medio di Buon Funzionamento), e il MTTR (*Mean Time To Repair*, Tempo Medio Di Riparazione), per poi applicare la ben nota formula:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$$

La durata degli interventi è stata ottenuta moltiplicando il valore unitario in h/m<sup>2</sup> riportato per ciascuna lavorazione nel Tempario della Regione Campania o, se non presente, estrapolato dal Prezzario della Regione Campania, per la superficie media di 2000 m<sup>2</sup>.

I valori molto alti della disponibilità per tutte le strategie che si leggono nella tabella sottostante non costituiscono che una prova dei benefici della manutenzione programmata, in quanto in ogni strategia si è provveduto a svolgere in uno stesso anno quanti più interventi possibile.

	PERIODI TRA GLI INTERVENTI	MTBF (anni)	DURATA DEGLI INTERVENTI	MTTR (anni)	DISPONIBILITA'
A <sub>1</sub>	29, 55 anni	29,55	5,4 mesi	0,453	0,985
A <sub>2</sub>	14,7 anni 14,7 anni	14,7	3,6 mesi 3,6 mesi	0,297	0,980
A <sub>3</sub>	19,8 anni 9,7 anni	14,75	2,25 mesi 3,56 mesi	0,242	0,984
A <sub>4</sub>	9,9 anni 9,9 anni 9,7 anni	9,85	0,8 mesi 0,8 mesi 3,56 mesi	0,144	0,986

## SOSTENIBILITÀ

Nella valutazione della sostenibilità, sarebbe ridondante tenere in conto la *sostenibilità economica*, in quanto questo tema è già strettamente legato al criterio del costo. Pertanto, si considererà la sola sostenibilità ambientale per l'attribuzione dei punteggi riguardo questo criterio.

E' conoscenza comune che gli edifici sono una delle maggiori cause di inquinamento, sia nella loro fase di costruzione, che nel soddisfacimento dei bisogni degli utenti fintantoché non si fa uso rinnovabili, che nelle attività di manutenzione. Pertanto, sembra significativamente importante ridurre l'impatto ambientale degli interventi di manutenzione.

Il materiale la cui produzione influisce maggiormente sull'ambiente è senza dubbio il cemento. Il suo impatto ambientale può essere stimato in funzione dell'energia liberata durante la sua produzione, considerando che il rapporto tra tale energia e la massa del cemento è di 4,882 MJ/kg [21], e può quindi essere calcolata convertendo il valore in volume, di semplice ottenimento, in massa, sulla base di un valore di densità del cemento di 1.360 kg/mc. Il consumo di energia causato da un intervento di ricostruzione totale è pertanto di 166.600 MJ, mentre gli interventi di ricostruzione parziale, che si considerano avvenire solo sul 50% della superficie, generano una dissipazione di 83.300 MJ. Il valore della sostenibilità è quindi valutato come inversamente proporzionale al consumo di energia.

	NUMERO DI RICOSTRUZIONI DELL'INTONACO	CONSUMO DI ENERGIA	SOSTENIBILITA'
A <sub>1</sub>	1	166.600 MJ	2
A <sub>2</sub>	2	333.200 MJ	1
A <sub>3</sub>	1,5	249.900 MJ	1,5
A <sub>4</sub>	1,5	249.900 MJ	1,5

## APPLICAZIONE DELLE METODOLOGIE

Nel seguito, si mostrerà lo svolgimento di ciascuna delle metodologie illustrate nel relativo paragrafo, considerando però di volta in volta diversi pesi dei criteri in ciascuna applicazione. Questa procedura ha lo scopo di simulare diverse condizioni estrinseche e scenari di gestione, in cui le priorità possono variare, in funzione ad esempio del budget o di particolari problematiche relative alla sicurezza.

Quindi, gli scenari sono i seguenti:

- *Scenario I*, scenario di equilibrio, con pesi uguali ( $w_1 = -0,25$ ;  $w_2 = 0,25$ ;  $w_3 = 0,25$ ;  $w_4 = 0,25$ );
- *Scenario II*, scenario a budget limitato, con un peso più alto per il costo ( $w_1 = -0,4$ ;  $w_2 = 0,2$ ;  $w_3 = 0,2$ ;  $w_4 = 0,2$ );
- *Scenario III*, scenario ad alta prevenzione dei rischi, con un peso più alto della sicurezza ( $w_1 = -0,2$ ;  $w_2 = 0,4$ ;  $w_3 = 0,2$ ;  $w_4 = 0,2$ );
- *Scenario IV*, scenario di sensibilità ambientale, in cui la sostenibilità ha un peso più alto ( $w_1 = -0,2$ ;  $w_2 = 0,2$ ;  $w_3 = 0,2$ ;  $w_4 = 0,4$ ).

La matrice dei punteggi per ciascun criterio e la relativa matrice normalizzata, che saranno adoperate in ciascuna metodologia e per tutti gli scenari, sono le seguenti – denominate *D* e *R* come nel *TOPSIS*:

$$D = \begin{bmatrix} 141880 & 7,13 & 0,985 & 2 \\ 363800 & 27,4 & 0,980 & 1 \\ 326180 & 30,1 & 0,984 & 1,5 \\ 412610 & 48,1 & 0,986 & 1,5 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0,217 & 0,112 & 0,501 & 0,649 \\ 0,555 & 0,432 & 0,498 & 0,324 \\ 0,498 & 0,475 & 0,500 & 0,487 \\ 0,630 & 0,758 & 0,501 & 0,487 \end{bmatrix}$$

## TOPSIS

La strategia ottimale è segnalata in grassetto all'interno di ciascun vettore  $s_{iw}$ .

### SCENARIO I

$$T = \begin{bmatrix} 0,054 & 0,028 & 0,125 & 0,162 \\ 0,139 & 0,108 & 0,124 & 0,081 \\ 0,124 & 0,119 & 0,125 & 0,122 \\ 0,157 & 0,190 & 0,125 & 0,122 \end{bmatrix}$$

$PIS = (0,05; 0,19; 0,12; 0,16)$   
 $NIS = (0,16; 0,03; 0,12; 0,08)$   
 $d_{iw} = (0,13; 0,08; 0,10; 0,17)$   
 $d_{ib} = (0,16; 0,14; 0,11; 0,11)$   
 $s_{iw} = (0,45; 0,36; 0,49; \mathbf{0,60})$

#### SCENARIO II

$$T = \begin{bmatrix} 0,087 & 0,022 & 0,100 & 0,130 \\ 0,222 & 0,086 & 0,100 & 0,065 \\ 0,199 & 0,949 & 0,100 & 0,097 \\ 0,251 & 0,152 & 0,100 & 0,097 \end{bmatrix}$$

$PIS = (0,09; 0,15; 0,10; 0,13)$   
 $NIS = (0,25; 0,02; 0,10; 0,06)$   
 $d_{iw} = (0,18; 0,07; 0,09; 0,13)$   
 $d_{ib} = (0,13; 0,16; 0,13; 0,17)$   
 $s_{iw} = (\mathbf{0,58}; 0,30; 0,42; 0,44)$

#### SCENARIO III

$$T = \begin{bmatrix} 0,043 & 0,045 & 0,100 & 0,130 \\ 0,111 & 0,173 & 0,100 & 0,065 \\ 0,100 & 0,190 & 0,100 & 0,097 \\ 0,125 & 0,303 & 0,100 & 0,097 \end{bmatrix}$$

$PIS = (0,04; 0,30; 0,10; 0,13)$   
 $NIS = (0,13; 0,04; 0,10; 0,06)$   
 $d_{iw} = (0,10; 0,13; 0,15; 0,26)$   
 $d_{ib} = (0,26; 0,16; 0,13; 0,10)$   
 $s_{iw} = (0,30; 0,44; 0,53; \mathbf{0,75})$

#### SCENARIO IV

$$T = \begin{bmatrix} 0,043 & 0,022 & 0,100 & 0,261 \\ 0,111 & 0,086 & 0,100 & 0,130 \\ 0,100 & 0,095 & 0,100 & 0,195 \\ 0,125 & 0,152 & 0,100 & 0,195 \end{bmatrix}$$

$PIS = (0,04; 0,15; 0,10; 0,26)$   
 $NIS = (0,13; 0,02; 0,10; 0,13)$   
 $d_{iw} = (0,15; 0,06; 0,10; 0,14)$   
 $d_{ib} = (0,13; 0,16; 0,10; 0,10)$   
 $s_{iw} = (0,54; 0,29; 0,49; \mathbf{0,58})$

#### WSM

Data la semplicità del calcolo, si riporta solo il vettore  $A_{Si}^{WSM-score}$  per ciascuno scenario, e in esso si evidenzia in grassetto la strategia che ne presenta il valore più alto.

$$A_{S1}^{WSM-score} = (0,26; 0,18; 0,24; \mathbf{0,28})$$

$$A_{S2}^{WSM-score} = (\mathbf{0,17}; 0,03; 0,09; 0,10)$$

$$A_{S3}^{WSM-score} = (0,23; 0,23; 0,29; \mathbf{0,37})$$

$$A_{S4}^{WSM-score} = (0,32; 0,20; 0,29; \mathbf{0,34})$$

## WPM

Vengono qui mostrati i prodotti comparativi  $P(A_i/A_j)$ ,  $i, j = 1, 2, 3, 4, j \neq i$  per ciascuno scenario. La strategia manutentiva ottimale  $A_i$  è in grassetto.

### SCENARIO I

$$P(A_1/A_j) = (1,08; 0,92; 0,87), j = 2, 3, 4$$

$$P(A_2/A_j) = (0,93; 0,86; 0,81), j = 1, 3, 4$$

$$P(A_3/A_j) = (1,08; 1,17; 0,94), j = 1, 2, 4$$

$$P(A_4/A_j) = (\mathbf{1,15}; \mathbf{1,24}; \mathbf{1,06}), j = 1, 2, 3$$

### SCENARIO II

$$P(A_1/A_j) = (\mathbf{1,28}; \mathbf{1,11}; \mathbf{1,11}), j = 2, 3, 4$$

$$P(A_2/A_j) = (0,78; 0,87; 0,87), j = 1, 3, 4$$

$$P(A_3/A_j) = (0,90; 1,16; 1,00), j = 1, 2, 4$$

$$P(A_4/A_j) = (0,90; 1,16; 1,00), j = 1, 2, 3$$

### SCENARIO III

$$P(A_1/A_j) = (0,81; 0,70; 0,61), j = 2, 3, 4$$

$$P(A_2/A_j) = (1,23; 0,87; 0,75), j = 1, 3, 4$$

$$P(A_3/A_j) = (1,42; 1,15; 0,87), j = 1, 2, 4$$

$$P(A_4/A_j) = (\mathbf{1,64}; \mathbf{1,33}; \mathbf{1,15}), j = 1, 2, 3$$

### SCENARIO IV

$$P(A_1/A_j) = (1,22; 0,99; 0,95), j = 2, 3, 4$$

$$P(A_2/A_j) = (0,82; 0,82; 0,78), j = 1, 3, 4$$

$$P(A_3/A_j) = (1,01; 1,23; 0,95), j = 1, 2, 4$$

$$P(A_4/A_j) = (\mathbf{1,05}; \mathbf{1,28}; \mathbf{1,05}), j = 1, 2, 3$$

## VIKOR

Poiché nel VIKOR è presente una variabile aggiuntiva rappresentata dal parametro  $v$ , si è scelto di esplorare le possibilità da esso offerte. Infatti, per quanto in altre applicazioni di questo metodo sul tema della scelta di strategie manutentive si suole utilizzare un valore di compromesso ( $v = 0,5$ ) [22], ciò è dovuto al fatto che le ricerche in questo campo hanno riguardato il campo industriale, in cui certamente la molteplicità in interessi e *stakeholders* è inferiore rispetto al campo edile.

Perciò, l'incertezza finale potrebbe giocare un ruolo fondamentale nel risolvere disaccordi tra gli *stakeholders*, e per questa ragione si è scelto di valutare in ogni scenario, la strategia manutentiva ottimale per diversi valori di  $v$ , nello specifico facendolo variare tra 0,1 e 1. In ciascuno scenario, un diagramma mostra la relazione tra l'accordo di maggioranza  $Q_i$  e l'incertezza finale  $v$  per ogni strategia.

I seguenti vettori sono gli stessi per ogni scenario, in quanto non dipendono dai pesi.

$$f^* = (141880; 48,1; 0,986; 2)$$

$$f^\wedge = (412610; 7,13; 0,98; 1)$$

### SCENARIO I

$$S_i = (0,29; 0,83; 0,49; 0,37)$$

$$R_i = (0,25; 0,25; 0,17; 0,25)$$

$$S^* = 0,29$$

$$S^\wedge = 0,83$$

$$R^* = 0,17$$

$$R^\wedge = 0,25$$

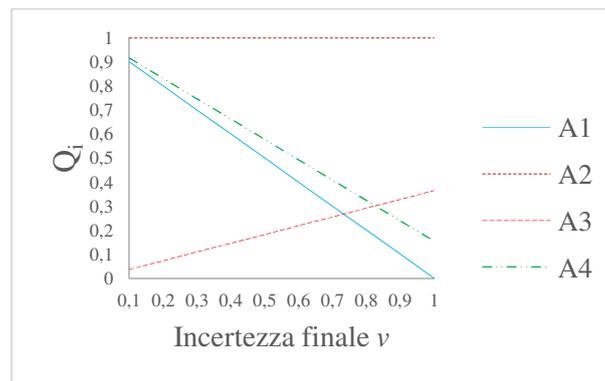


Figura 8 – curve accordo di maggioranza-incertezza finale per le quattro strategie nello Scenario I

### SCENARIO II

$$S_i = (0,23; 0,83; 0,53; 0,5)$$

$$R_i = (0,2; 0,32; 0,27; 0,4)$$

$$S^* = 0,23$$

$$S^\wedge = 0,83$$

$$R^* = 0,2$$

$$R^\wedge = 0,4$$

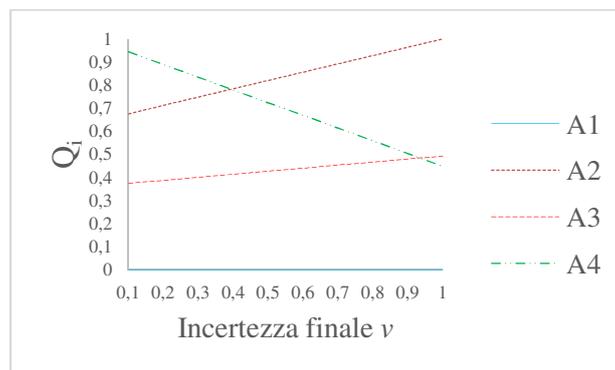


Figura 9 – curve accordo di maggioranza-incertezza finale per le quattro strategie nello Scenario II

### SCENARIO III

$$S_i = (0,43; 0,77; 0,49; 0,3)$$

$$R_i = (0,4; 0,2; 0,18; 0,2)$$

$$S^* = 0,3$$

$$S^\wedge = 0,77$$

$R^* = 0,18$   
 $R^\wedge = 0,4$

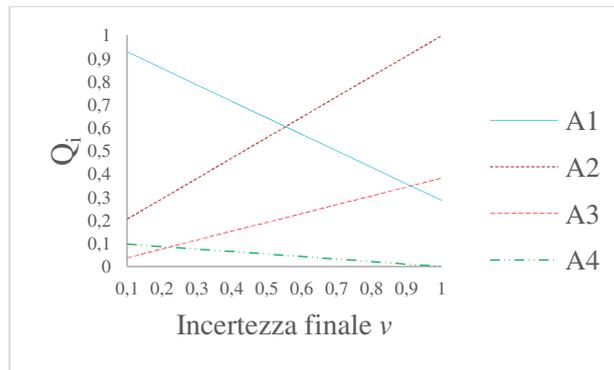


Figura 10 – curve accordo di maggioranza-incertezza finale per le quattro strategie nello Scenario III

**SCENARIO IV**

$S_i = (0,23; 0,86; 0,49; 0,4)$   
 $R_i = (0,2; 0,4; 0,2; 0,2)$   
 $S^* = 0,23$   
 $S^\wedge = 0,86$   
 $R^* = 0,2$   
 $R^\wedge = 0,4$

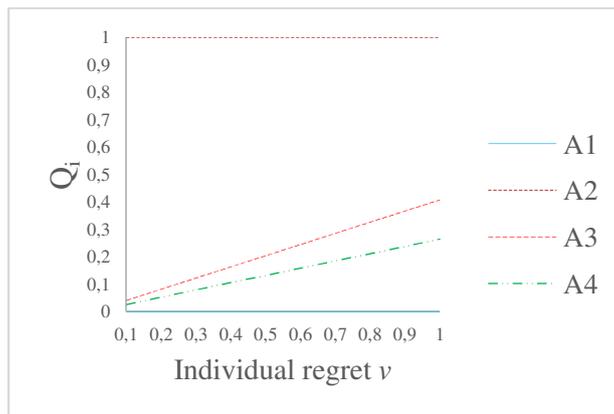


Figura 11 – curve accordo di maggioranza-incertezza finale per le quattro strategie nello Scenario IV

**SINTESI DELLE ANALISI MULTI-CRITERIA**

La tabella seguente mostra un prospetto delle strategie manutentive ottimali secondo ciascuna delle quattro metodologie adottate nell’articolo: TOPSIS, WSP, WPM e VIKOR.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
TOPSIS	$A_4$	$A_1$	$A_4$	$A_4$
WSM	$A_4$	$A_1$	$A_4$	$A_4$
WPM	$A_4$	$A_1$	$A_4$	$A_4$
VIKOR	$A_3$   $A_1$	$A_1$	$A_3$   $A_4$	$A_1$

Secondo il VIKOR, in  $S_1$  la strategia ottimale è  $A_3$  se  $v < 0,7$  o  $A_1$  se  $v > 0,7$ . In  $S_3$ , la strategia ottimale è  $A_3$  se  $v < 0,2$  o  $A_4$  se  $v > 0,2$ . Negli altri scenari, il risultato è sempre lo stesso per ogni valore di  $v$ .

## CONCLUSIONI

Dopo aver eseguito i quattro metodi decisionali multi-criteria, è risultato che, per tutti gli scenari, 3 metodi su 4 hanno mostrato gli stessi risultati, e questa convergenza senza dubbio dimostra la validità dei risultati.

In più, in 3 scenari su 4, vale a dire in tutti i casi in cui la spesa economica non era considerata più importante di ogni altro elemento di valutazione, la quarta strategia, quella contraddistinta dal più alto numero di interventi, è risultata essere quella ottimale.

Questo risultato rispecchia perfettamente la premessa dell'articolo: nonostante fosse quella con il costo più alto, la maggior parte dei metodi afferma che essa costituisce la strategia ottimale in quanto le altre tre trascurano almeno un aspetto del ciclo di vita del componente. Infatti, strategie legate all'assenza di interventi di manutenzione dimenticano il rischio, tutt'altro che trascurabile, di un distacco imprevisto; strategie che intervengono direttamente sull'intonaco piuttosto che sugli strati di finitura sono molto meno sostenibili, a causa dell'energia consumata nella produzione del cemento. E ovviamente, questa scelta è fortemente influenzata dalla difficoltà che esiste nel valutare il contributo che un migliore stato dei strati di finitura fornisce alla durabilità dell'intonaco.

Quindi, il risultato mostra chiaramente che ridurre i costi di manutenzione tende a causare conseguenze che sono meno convenienti della riduzione della spesa, in quanto la differenza monetaria tra la quarta strategia e le altre viene 'spesa' in un maggior grado di sicurezza e in un minor impatto ambientale. A meno che, ovviamente, ridurre la spesa netta di manutenzione sia visto come la priorità assoluta, che è per l'appunto il pensiero dietro il secondo scenario.

Questa analisi, eseguita considerando diversi casi e possibilità, si può ritenere aver prodotto un risultato affidabile in termini di utilità generale, rendendosi disponibile per l'uso in casi pratici, piuttosto che come semplice applicazione esemplificativa.

Ciononostante, la differenza nei risultati del VIKOR non può essere trascurata. La causa prevalente di questo risultato risiede probabilmente nella caratteristica che ha il metodo di ingrandire le piccole differenze numeriche. Tale aspetto è stato cruciale per quanto riguarda il criterio della disponibilità, per il quale i risultati erano perlopiù identici per tutte le strategie, ma nonostante ciò il metodo ha attribuito un beneficio molto maggiore a strategie per le quali non c'era che un piccolo incremento del valore di disponibilità rispetto alle altre. In aggiunta a ciò, un altro problema del metodo è legato alla sua caratteristica di calcolare i parametri di valutazione in funzione della classificazione dei punteggi, piuttosto che in funzione della loro entità. In altre parole, il divario di sicurezza di  $A_1$  rispetto ad  $A_4$  ha circa lo stesso peso negativo dell'incremento di costo di  $A_4$  rispetto ad  $A_1$ , per quanto il primo sia molto maggiore del secondo.

Queste due problematiche sembrano portare alla conclusione che il VIKOR può essere utilizzato con maggior successo quando le differenze tra i punteggi sono più bilanciate, cioè né eccessivamente trascurabili, né troppo vistose. Questo aspetto dovrà naturalmente essere preso in considerazione per applicazioni future. In ogni caso, questo costituisce la prova che operare con più metodi multi-criteria allo stesso tempo è necessario per riconoscere i difetti che esistono in ciascun metodo.

Infine, gli interessanti risultati di questa applicazione senza dubbio incoraggiano ulteriore ricerca nel campo della durabilità, in quanto l'unico punto di partenza necessario per la valutazione numerica delle strategie era di fatto costituito dalla curva prestazione-tempo dei rivestimenti intonacati. Ciò sta a

significare che la costruzione di curve prestazione-tempo affidabili può offrire la possibilità di realizzare molti altri modelli simili a questo per le analisi multi-criteria delle strategie manutentive.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Arizzi A., Viles H., Cultrone G., Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Volume 28, Issue 1, March 2012, pp. 807-818
- [2] Izaguirre A., Lanas J., Álvarez J.I., Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Volume 40, Issue 7, July 2010, pp. 1081-1095
- [3] Kočí V., Maděra J., Fořt J., Žumár J., Pavlíková M., Pavlík Z., Černý R., Service Life Assessment of Historical Building Envelopes Constructed Using Different Types of Sandstone: A Computational Analysis Based on Experimental Input Data, *The Scientific World Journal*, Volume 2014 (2014), Article ID 802509, 12 pages.
- [4] Silva A., de Brito J., Gaspar P.L., Service life prediction model applied to natural stone wall claddings (directly adhered to the substrate), *Construction and Building Materials*, Elsevier, Volume 25, Issue 9, September 2011, pp. 3674-3684
- [5] Nicoletta M., Affidabilità e durabilità degli elementi costruttivi in edilizia – Un’ipotesi metodologica per il calcolo, CUEN, Napoli, 2000.
- [6] Nicoletta M., Components Service life: from field tests to methodological hypothesis, *Proceedings of IX International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Brisbane, 2002.
- [7] Nicoletta M., A Methodological hypothesis for estimating service life, *Proceedings of International Workshop “Management of Durability in Building Process”*, Milano, 2003.
- [8] Nicoletta M., Service life of building components. Analysis and proposals of definition in the modifying factor, *Proceedings of X International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lione, 2005.
- [9] Nicoletta M., Scognamillo C., Pino A., Predictive maintenance for monitoring performance decay of plaster coverings according to the criteria of ISO 15686-7 code, Ghent, 2017.
- [10] Silva A., de Brito J., Gaspar P.L., Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding, *Automation in Construction*, Elsevier, Volume 22, March 2012, PP. 165-174
- [11] Madureira S., Flores-Colen I., de Brito J., Pereira C., Maintenance planning of facades in current buildings, *Construction and Building Materials* 147:790-802, Elsevier, August 2017
- [12] Nicoletta M., Scognamillo C., Pino A., Multicriteria analysis for choosing maintenance strategies, *Seismic and Energy Renovation for Sustainable Cities Conference Proceedings*, Catania, 2018
- [13] C. Ferreira C., Neves, A. Silva Luis A. C., de Brito J., Stochastic Petri net-based modelling of the durability of renderings, *Automation in Construction* 87, Elsevier, December 2017
- [14] Triantaphyllou E. et al., Determining the most important criteria in maintenance decision making, *Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 16-28, 1997.
- [15] Bevilacqua M., Braglia M., The Analytic Hierarchy Process Applied to Maintenance Strategy Selection. *Reliability Engineering and System Safety*. 70, 71-83, 2000.
- [16] Ilangkumaran, M., Kumanan, S. Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach”, *Journal of Manufacturing Technology Management* ,Vol. 20 No 7, pp.1009-1022, 2009.
- [17] Ghosh D., Roy S., A decision-making framework for process plant maintenance, *European Journal of Industrial Engineering*, 4(1), 78-98, 2010.

- [18] Chen FL, Chen YC. Evaluating the maintenance performance of the semiconductor factories based on the analytical hierarchy process and grey relational analysis. American Journal of Applied Sciences; 7(4): 567-574, 2010.
- [19] Vahdani B., Hadipour H., Sadaghiani JS, Amiri M., Extension of VIKOR method based on interval-valued fuzzy sets, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 47, Issue 9-12, 1231-1239, 2010
- [20] Ahmadi, A.; Gupta, S.; Karim, R.; Kumar, U. Selection of maintenance strategy for aircraft systems using multi-criteria decision making methodologies. Int. J. Reliabil. Qual. Saf. Eng. 2010, 17, 223–243.
- [21] Struble L., Godfrey J., How Sustainable is Concrete?, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2006.
- [22] Kumanan S., Ilangkumaran M., Fuzzy VIKOR approach for selecting an optimum maintenance strategy, International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing Proceedings, Oakland, 2010