

ANALISI DI DURABILITÀ E DI VITA UTILE DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN AMBIENTI AGGRESSIVI

*FABIO BIONDINI, Politecnico di Milano
PIER GIORGIO MALERBA, Politecnico di Milano*

SUMMARY

This paper presents a novel approach to the problem of durability analysis and lifetime assessment of concrete structures subjected to the diffusive attack from external aggressive agents. The proposed formulation mainly refers to beams and frames, but it can be easily extended also to other types of structures. The diffusion process is modeled by using an evolutionary procedure and the mechanical damage coupled to diffusion is then evaluated by introducing proper material degradation laws. Since the rate of mass diffusion usually depends on the stress state, the interaction between the diffusion process and the mechanical behavior of the damaged structure is also taken into account by a proper modeling of the stochastic effects in the mass transfer. To this aim, the nonlinear structural analyses during time are performed within the framework of the finite element method by means of a deteriorating reinforced concrete beam element. The application to a continuous Tbeam, an arch bridge, and a bridge pier with box cross-section, shows the effectiveness of the proposed methodology.

1. INTRODUZIONE

Nella valutazione della durabilità di strutture in calcestruzzo armato occorre considerare gli effetti del degrado provocato dall'interazione del sistema con l'ambiente circostante, sia dal punto di vista chimico - fisico, sia dal punto di vista meccanico. In questo ambito l'attenzione del progettista tende in genere a focalizzarsi solo sui meccanismi di degrado dei materiali senza tenere conto degli effetti che questi fenomeni locali possono avere sulle prestazioni globali della struttura. Questa visione incompleta del problema viene promossa anche a livello normativo, dove il raggiungimento di adeguati requisiti di durabilità è associato solo al controllo di qualità dei materiali ed al rispetto di alcune disposizioni costruttive locali, come ad esempio lo spessore minimo di copriferro. Un tale modo di procedere non è coerente con la reale natura del problema, in quanto lo sviluppo del degrado locale dei materiali, e con esso la conseguente evoluzione nel tempo delle prestazioni globali della struttura, dipende in modo determinante dall'effettivo stato di sforzo agente. La morfologia del sistema strutturale riveste quindi un ruolo fondamentale nel caratterizzare l'interazione fra il processo di degrado e la risposta strutturale ed occorre quindi tenerne conto per una valutazione affidabile delle prestazioni strutturali nel tempo. Ciò premesso, in questo lavoro si presenta un nuovo approccio per l'analisi di durabilità e di vita utile di strutture in calcestruzzo armato soggette all'attacco diffusivo di agenti aggressivi [01], [02]. Il metodo proposto si basa principalmente su una procedura numerica di natura evolutiva per la soluzione del problema diffusivo. Il degrado dei materiali viene descritto mediante indici di danno la cui evoluzione nel tempo è definita da opportune leggi di accoppiamento con il processo diffusivo. Sulla base di questi modelli vengono formulate le caratteristiche di un elemento finito di trave [07] in calcestruzzo armato per l'analisi non lineare di strutture intelaiate con prestazioni variabili nel tempo. Rimandando ad altri lavori per una trattazione completa degli aspetti metodologici [01], [02], con questa memoria si vogliono evidenziare le ampie possibilità applicative della formulazione proposta. Dopo aver richiamato i criteri generali adottati per la simulazione del processo diffusivo, la modellazione del degrado e la valutazione della vita utile, nel seguito si presentano quindi alcune applicazioni riguardanti una trave continua, un ponte ad arco e una pila da ponte. Si dimostra come le analisi di durabilità svolte consentano di seguire lo sviluppo temporale del processo diffusivo e la conseguente evoluzione del degrado meccanico della risposta strutturale, come anche di stimare la vita utile della struttura associata ad una assegnata domanda prestazionale e, quindi, di valutare l'opportunità e la tempistica di eventuali interventi di manutenzione e/o di riparazione dell'opera.

2. MODELLAZIONE DEL DEGRADO

2.1. Simulazione del processo diffusivo

Il meccanismo diffusivo nei sistemi solidi può essere descritto dal modello di Fick che, nel caso di diffusione di una singola sostanza in un mezzo isotropo, si traduce nella seguente equazione differenziale non lineare del secondo ordine [05]:

$$-\nabla \cdot (D \nabla C) = \partial C / \partial t \tag{1}$$

in cui $C=C(x, t)$ è la concentrazione della sostanza che si diffonde nel punto $x=(x,y,z)$ e al tempo t , $D=D(x,t)$ è il corrispondente coefficiente di diffusività del mezzo e $\nabla C = \text{grad}C$. Una soluzione analitica di questa equazione è possibile solo per problemi molto semplici. Per un approccio generale che possa tenere conto delle effettive complessità delle condizioni al contorno geometriche e meccaniche che generalmente caratterizza i problemi applicativi, occorre pertanto ricorrere a metodi numerici. In questo lavoro le equazioni della diffusione vengono risolte con l'ausilio di una speciale classe di algoritmi evolutivi denominati automi cellulari [01] , [09].

2.2. Indici di Danno

I processi di degrado che si sviluppano nelle strutture in calcestruzzo armato soggette all'azione diffusiva di agenti aggressivi sono, in generale, molto complessi e, per molti aspetti, ancora poco noti [04]. Nonostante le molteplici complessità che il problema presenta, per una valutazione affidabile delle prestazioni strutturali nel tempo può essere tuttavia sufficiente riferirsi a modelli semplificati.

Nel seguito il danneggiamento viene modellato come un progressivo degrado delle proprietà meccaniche dei materiali che rende il sistema meno adatto a sostenere i carichi applicati. Si assume in particolare che le aree resistenti della matrice di calcestruzzo, $A_c=A_c(t)$, e delle barre di acciaio, $A_s=A_s(t)$, si riducano nel tempo in funzione con l'evolvere del processo diffusivo:

$$dA_c = [1 - \delta_c(t)] \cdot dA_{c0} \tag{2}$$

$$dA_s = [1 - \delta_s(t)] \cdot dA_{s0} \tag{3}$$

rispettivamente per calcestruzzo e acciaio, dove il pedice "0" denota la situazione iniziale integra per $t=t_0$, e le funzioni $\delta_c = \delta_c(t)$ e $\delta_s = \delta_s(t)$ rappresentano degli indici di danno adimensionali che forniscono una misura diretta del degrado nell'intervallo [0; 1]. La Figura 1.a mostra un tipico andamento nel tempo degli indici di danno.

Il legame fra gli indici di danno $\delta_c = \delta_c(x, t)$ e $\delta_s = \delta_s(x, t)$ nel punto x ed il processo diffusivo viene introdotto assumendo un legame lineare fra la velocità di degrado e la concentrazione $C = C(x, t)$ dell'agente aggressivo (Figura 1.b):

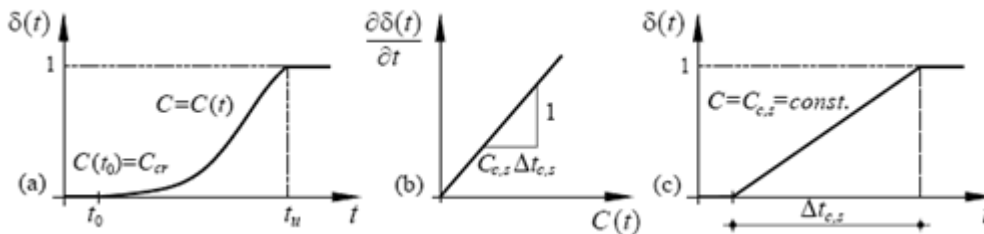


Figura 1. Modellazione del degrado. (a) Evoluzione nel tempo degli indici di danno. (b) Legame lineare tra velocità di degrado e concentrazione dell'agente aggressivo. (c) Evoluzione degli indici di danno per concentrazione costante.

$$\partial \delta_c(x,t) / \partial t = C(x,t) / C_c \Delta t_c \tag{4}$$

$$\partial \delta_s(x,t) / \partial t = C(x,t) / C_s \Delta t_s \tag{5}$$

con C_c e C_s valori di concentrazione costante che causano il completo degrado dei materiali dopo un periodo rispettivamente pari a Δt_c e Δt_s (Figura 3.c). Per le condizioni

iniziali di degrado si assume $\delta_c(x, t_0) = \delta_s(x, t_0) = 0$, con $t_0 = \max\{t \mid C(x, t) \leq C_{cr}\}$ e C_{cr} soglia critica di concentrazione (Figura 1.a) [01].

3. VALUTAZIONE DELLA VITA UTILE

3.1. Formulazione Deterministica

Una struttura si considera sicura se gli effetti S delle azioni sono non maggiori della corrispondente resistenza R , ovvero se $R \geq S$. A causa del degrado le quantità $S=S(t)$ e $R=R(t)$ variano nel tempo. Lo stato limite $R(t)=S(t)$ viene quindi raggiunto dopo un periodo di tempo definito vita utile T :

$$T = \min\{(t - t_0) \mid R(t) \geq S(t), t \geq t_0\} \quad (6)$$

dove t_0 denota l'istante iniziale di costruzione.

3.2. Formulazione Probabilistica

A causa delle incertezze nella determinazione dei vari parametri che definiscono il problema, le quantità R ed S devono considerarsi variabili aleatorie. Indicando con r ed s singole realizzazioni di R ed S , la probabilità di crisi può essere valutata integrando la funzione di densità di probabilità congiunta $f_{R,S}(r,s)$ nel dominio $D = \{r, s \mid r < s\}$:

$$P_F = P(R < S) = \int_D f_{R,S}(r,s) dr ds = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

dove Φ è la funzione di distribuzione cumulata normale standard e β un indice di affidabilità che, nello spazio delle variabili normali standard (valore medio nullo e scarto quadratico unitario), rappresenta la minima distanza dall'origine della retta che definisce lo stato limite $r=s$. In particolare, ad un determinato istante $t=t_k$ risulta:

$$\beta(t_k) = (\mu_{R,k} - \mu_{S,k}) / (\sigma_{R,k}^2 + \sigma_{S,k}^2 - 2\rho_k\sigma_{R,k}\sigma_{S,k})^{1/2}, \quad (8)$$

dove μ e σ denotano rispettivamente il valore medio e lo scarto quadratico medio, mentre ρ è il coefficiente di correlazione fra R e S . Dato che le distribuzioni di R e di S sono incognite, si opera per via numerica con il metodo Monte Carlo.

In un contesto probabilistico si definisce quindi vita utile il periodo di tempo durante il quale la probabilità di crisi P_F , ovvero l'indice di affidabilità β , non supera una soglia limite P_F^* , ovvero β^* :

$$T = \min\{(t - t_0) \mid P_F \leq P_F^*\} = \min\{(t - t_0) \mid \beta \geq \beta^*\} \quad (9)$$

3.3. Scelta del Piano di Manutenzione

I risultati di una analisi di durabilità possono essere impiegati anche per definire un eventuale piano di manutenzione della struttura. Nell'ipotesi che l'indice di affidabilità $\beta(t)$ possa essere ottenuto per sovrapposizione del valore iniziale $\beta_0(t)$ e dei suoi incrementi $\Delta\beta_i(t)$ associati ai successivi interventi di manutenzione $i = 1, \dots, n$, si ha [06]:

$$\beta(t) = \beta_0(t) + \sum_{i=1}^n \Delta\beta_i(t) \quad (10)$$

Il conseguimento di un assegnato valore di vita utile si può ottenere in molti modi attraverso una serie di interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria caratterizzati ciascuno da un $\Delta\beta_i(t)$. La scelta dello scenario di manutenzione si può effettuare mediante un confronto in termini di costi. Per un dato scenario il costo totale C è dato dalla somma dei costi C_i dei singoli interventi:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+v)^{(t_i-t_0)}} = \sum_{i=1}^n C_{0i} \quad (11)$$

dove il costo C_i dell'intervento i è stato riferito al tempo iniziale t_0 mediante un tasso di sconto v . Da un confronto dei costi di manutenzione associati a differenti scenari è così possibile definire la strategia di riabilitazione più conveniente.

4. APPLICAZIONI

4.1. Valutazione Deterministica della Vita Utile di una Trave Continua

Si considera la trave continua mostrata in Figura 2.a, con $L = 3.00$ m e $g = 10$ kN/m, avente la sezione trasversale in Figura 2.b, con $H = 0.40$ m, $h = 0.25$ m, $B = 0.40$ m e $b = 0.15$ m. Il calcestruzzo si considera a comportamento elastico lineare con modulo $E_c = 35$ GPa in compressione e con resistenza nulla in trazione. Per l'acciaio si considera un comportamento elastico lineare con modulo $E_s = 206$ GPa. Si assume un coefficiente di diffusività $D = 1.37 \times 10^{-11}$ m²/sec e si ipotizza che l'agente aggressivo sia disposto sul perimetro della sezione come mostrato in Figura 3.a con concentrazione costante $C(t) = C_0$. Per il modello di degrado si assume infine $C_{cr} = 0.30C_0$, $C_c = C_s = C_0$, $\Delta t_c = 30$ anni e $\Delta t_s = 40$ anni.

L'evoluzione del processo diffusivo è descritto nelle Figure 3.b e 3.c, che mostrano le mappe di concentrazione $C(x,t)/C_0$ dell'agente aggressivo nella sezione B dopo 4 e 30 anni. Il degrado conseguente al processo diffusivo è descritto nelle Figure 4.a e 4.b, che mostrano l'evoluzione degli indici di danno δ_c e δ_s in tre punti (celle) della matrice di calcestruzzo e per tre barre di armatura.

L'accoppiamento tra il processo diffusivo e lo stato fessurato della struttura conducono ad una distribuzione non uniforme del degrado lungo la trave. Di conseguenza, nel tempo si verifica una ridistribuzione delle sollecitazioni ed il diagramma dei momenti flettenti evolve come mostrato in Figura 2.c. Nelle Figure 4.c e 4.d viene operato un confronto tra l'evoluzione nel tempo dei momenti agente M_S e resistente M_R , quest'ultimo valutato con le effettive resistenze dei materiali, nelle sezioni rispettivamente A e B della trave.

Tale confronto consente di valutare i valori di vita utile associati alla verifica di resistenza $M_S \leq M_R$ nelle due sezioni considerate e mostra che nelle analisi di durabilità non possono limitarsi a considerare il degrado locale dei materiali, ma devono essere svolte a livello globale, tenendo conto del ruolo fondamentale dello schema strutturale.

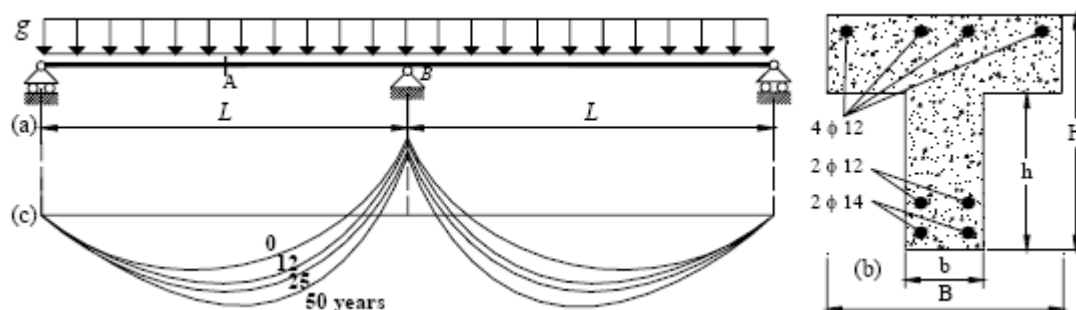


Figura 2. Trave continua. (a) Modello e condizione di carico. (b) Geometria della sezione trasversale e disposizione delle armature. (c) Evoluzione nel tempo del diagramma del momento flettente.

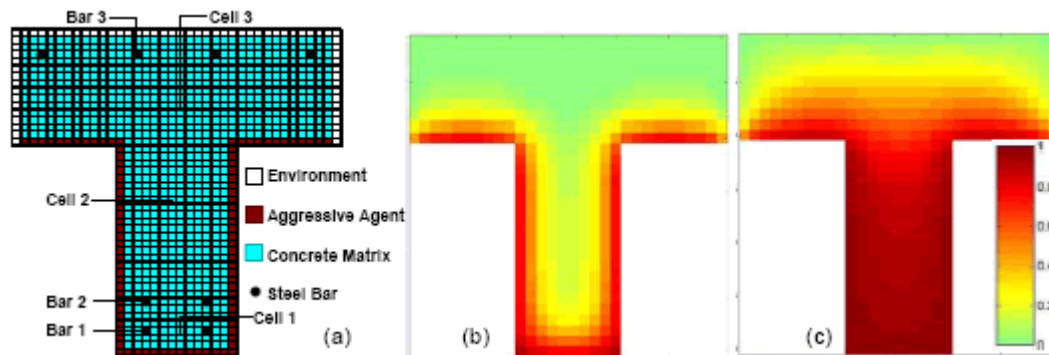


Figura 3. (a) Griglia dell'automata cellulare per la simulazione del processo diffusivo e posizione dell'agente aggressivo. Mappe della concentrazione $C(x,t)/C_0$ dell'agente aggressivo nella sezione B (Figura 2) dopo (b) 4 e (c) 30 anni.

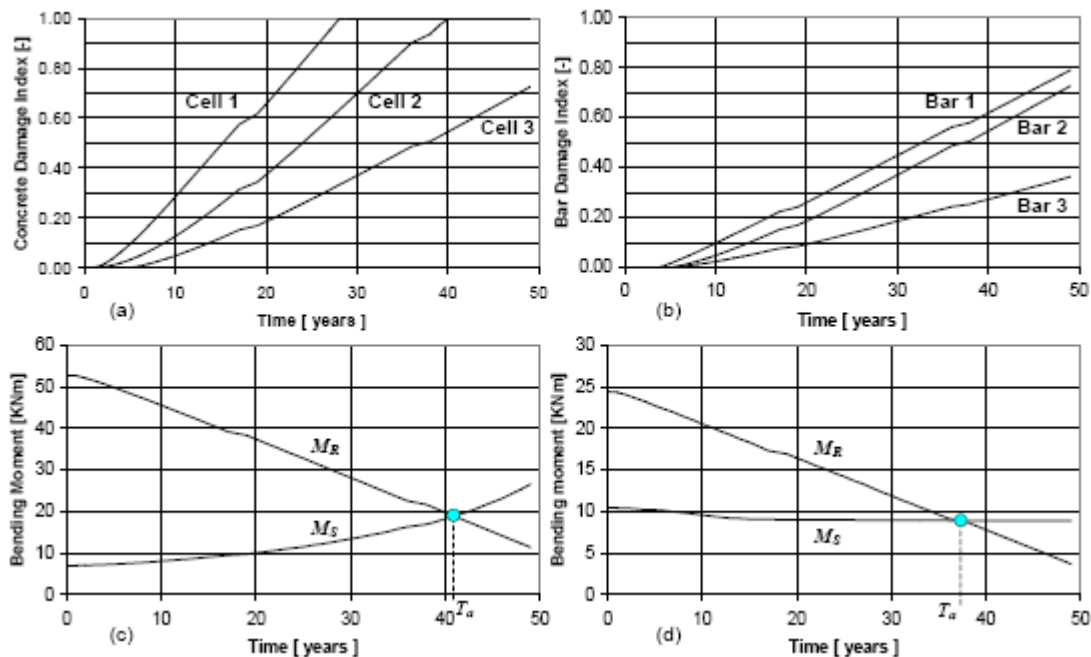


Figura 4. Evoluzione nel tempo degli indici di danno (a) in tre punti (celle) della matrice di calcestruzzo e (b) per tre barre di armatura nella sezione B (Figura 2.a e 3.a). Confronto tra l'evoluzione nel tempo dei momenti flettente agente M_S e resistente M_R (c) nella sezione A e (d) nella sezione B della trave (Figura 2.a).

4.2. Identificazione degli Elementi Critici in un Ponte ad Arco Esistente

Si considera il ponte ad arco sul fiume Breggia a Cernobbio (Como) mostrato in Figura 5. Il ponte si considera soggetto ad un carico $g = 50 \text{ kN/m}$ uniforme sull'impalcato. Si fa riferimento ad un comportamento elastico lineare con modulo $E_c = 35 \text{ GPa}$. Per il coefficiente di diffusività si assume $D = 1.37 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{sec}$ e si ipotizza che l'agente aggressivo sia disposto sull'intero perimetro delle sezioni degli archi e dei tiranti e sulla superficie di intradosso dell'impalcato con concentrazione $C(t) = C_0$. Per il modello di degrado si assume $C_{cr} = 0.30C_0$, $C_c = C_0$, $\Delta t_c = 20$ anni.

L'evoluzione nel tempo del degrado si evince dalla Figura 6, che mostra l'evoluzione delle mappe di concentrazione $C(x,t)/C_0$ dell'agente aggressivo negli archi, nei tiranti e nell'impalcato in corrispondenza della mezzeria del ponte. Nella stessa Figura le mappe sono poste a confronto con immagini che descrivono lo stato di danneggiamento effettivo della struttura, caratterizzato da un rilevante degrado del calcestruzzo con espulsione del copriferro e dalla corrosione delle barre di armatura. Questo confronto conferma l'efficacia della metodologia proposta che, attraverso una valutazione della distribuzione del degrado e la corrispondente individuazione degli elementi più critici (i tiranti), consente di calibrare eventuali interventi di riabilitazione.

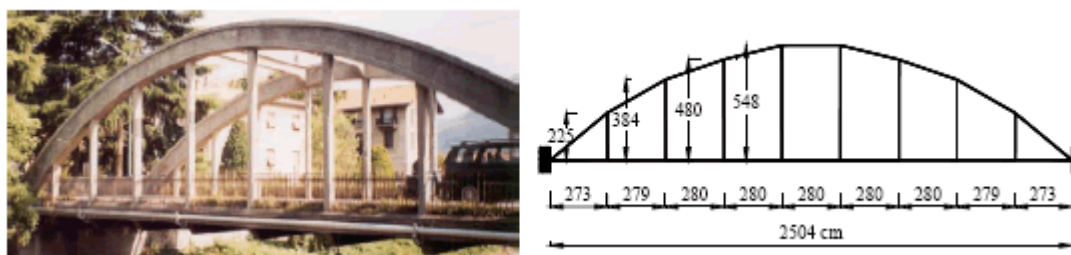


Figura 5. Ponte ad arco sul fiume Breggia (Como). Vista, dimensioni e schema statico.

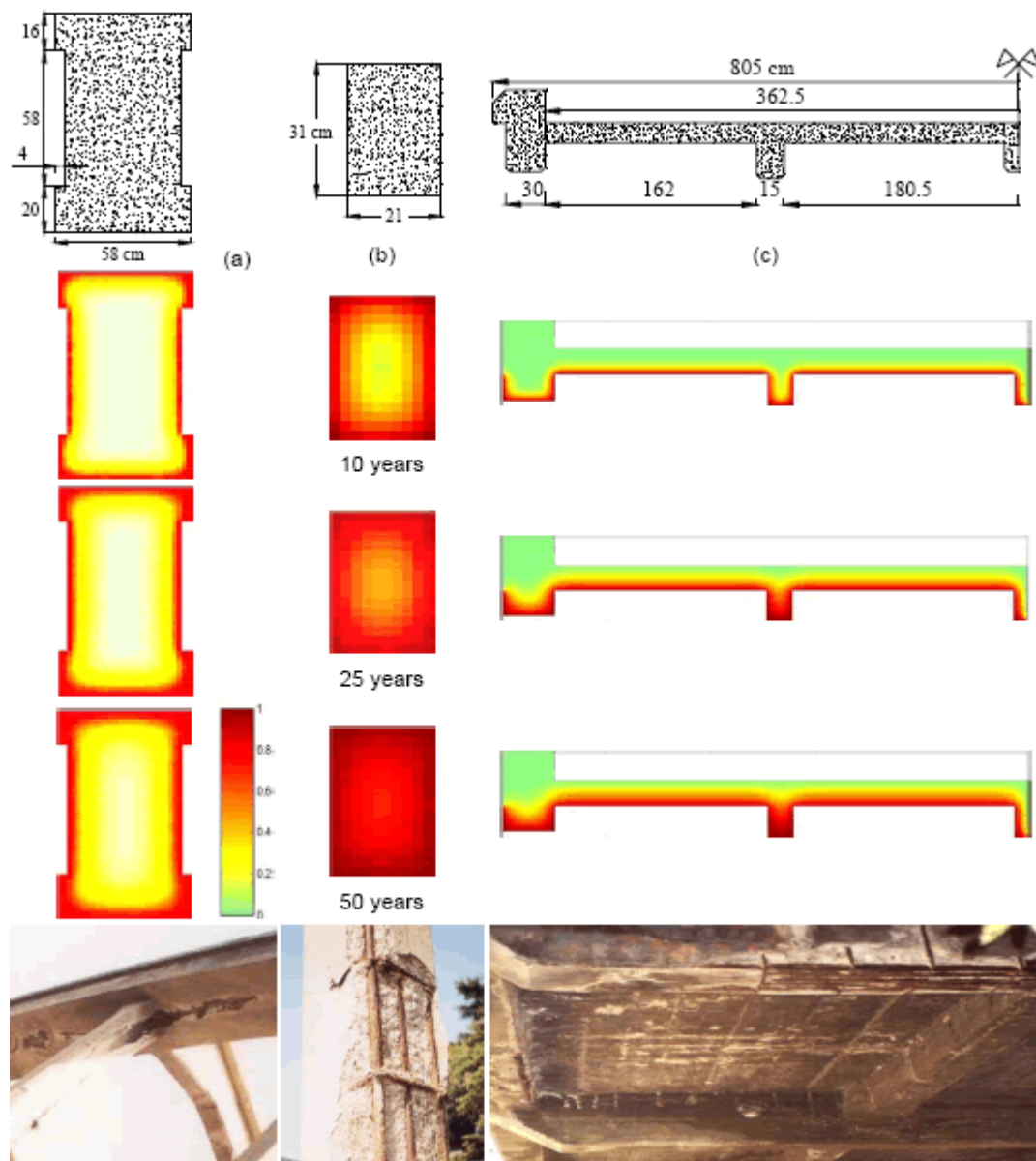


Figura 6. Caratteristiche geometriche, mappe di concentrazione $C(x,t)/C_0$ dell'agente aggressivo dopo 10, 35 e 50 anni e confronto con l'effettivo stato di degrado per la sezione di (a) archi, (b) tiranti e (c) impalcato nella mezzeria del ponte.

4.3. Valutazione Probabilistica della Vita Utile e Scelta Ottimale dello Scenario di Manutenzione per una Pila da Ponte

L'applicazione fa riferimento al ponte in Figura 7 [08]. La sezione a cassone delle pile mostrata in Figura 7.a è caratterizzata dalle dimensioni principali $d_y=8.20$ m e $d_z=9.00$ m ed è armata con $160 + 248 = 498$ barre di acciaio di diametro rispettivamente pari a $\varnothing=18$ mm e $\varnothing=30$ mm, come mostrato nella Figura 7.b. Per quanto riguarda il calcestruzzo, il diagramma sforzi-deformazioni è descritto dalla legge di Saenz in

compressione e da un modello elastico perfettamente plastico in trazione, con i seguenti parametri nominali: resistenza a compressione $f_c = -30$ MPa; resistenza a trazione $f_{ct} = 0.25|f_c|^{2/3}$ modulo elastico iniziale $E_{c0} = 9500|f_c|^{1/3}$; deformazione di picco in compressione $\epsilon_{c0} = -0.20\%$; deformazione ultima in compressione $\epsilon_{cu} = -0.35\%$; deformazione ultima in trazione $\epsilon_{ctu} = 2f_{ct}/E_{c0}$. Per l'acciaio, il diagramma sforzi-deformazioni è descritto da un modello elastico perfettamente plastico in trazione e in compressione, con i seguenti parametri nominali: tensione di snervamento $f_{sy} = 500$ MPa; modulo elastico $E_s = 206$ GPa; deformazione limite $\epsilon_{su} = 1.00\%$. Si considera un coefficiente nominale di diffusività $D = 10-11$ m²/sec. L'agente aggressivo si assume posizionato lungo il perimetro libero della sezione con concentrazione $C(t) = C_0$ sul bordo esterno e $C(t) = \frac{1}{2}C_0$ sul bordo interno, come mostrato in Figura 9.a. Per il modello di degrado si assume $C_{cr} = 0$, $C_c = C_s = C_0$, $\Delta t_c = 5$ anni e $\Delta t_s = 7.5$ anni.

Si esegue dapprima un'analisi deterministica. Il processo diffusivo per lo scenario nominale è descritto in Figura 9.b, che mostra la mappa di concentrazione $C(x,t)/C_0$ dell'agente aggressivo dopo 50 anni. Il conseguente degrado prestazionale è evidenziato in Figura 10, che mostra l'evoluzione nel tempo dei domini di resistenza $m_z - m_y$ dei momenti flettenti adimensionali $m_z = M_z / (|f_c| A_{c0} d_y)$ e $m_y = M_y / (|f_c| A_{c0} d_z)$ per una azione assiale $N = -100$ MN, ovvero $n = N / (|f_c| A_{c0}) = -0.122$.

Nel modello probabilistico si considerano come variabili aleatorie le resistenze dei materiali f_c e f_{sy} , le coordinate (y_p, z_p) dei punti nodali $p = 1, 2, \dots$ che definiscono la geometria del modello della sezione di calcestruzzo, le coordinate (y_m, z_m) e il diametro ϕ_m delle barre di armatura $m = 1, 2, \dots$, la diffusività D , le velocità di degrado $q_c = (C_c \Delta t_c)^{-1}$ e $q_s = (C_s \Delta t_s)^{-1}$. Le distribuzioni adottate sono elencate in Tabella 1 insieme ai relativi parametri statistici (media μ e deviazione standard σ).



Figura 7. Ponte a travata continua con pile a cassone [08].

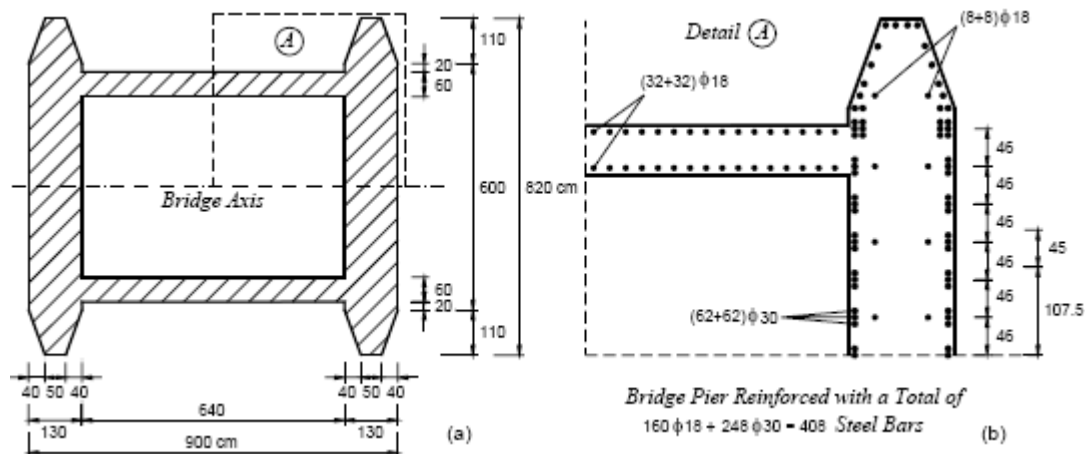


Figura 8. Sezione a cassone di una pila da ponte. (a) Caratteristiche geometriche e (b) disposizioni di armatura.

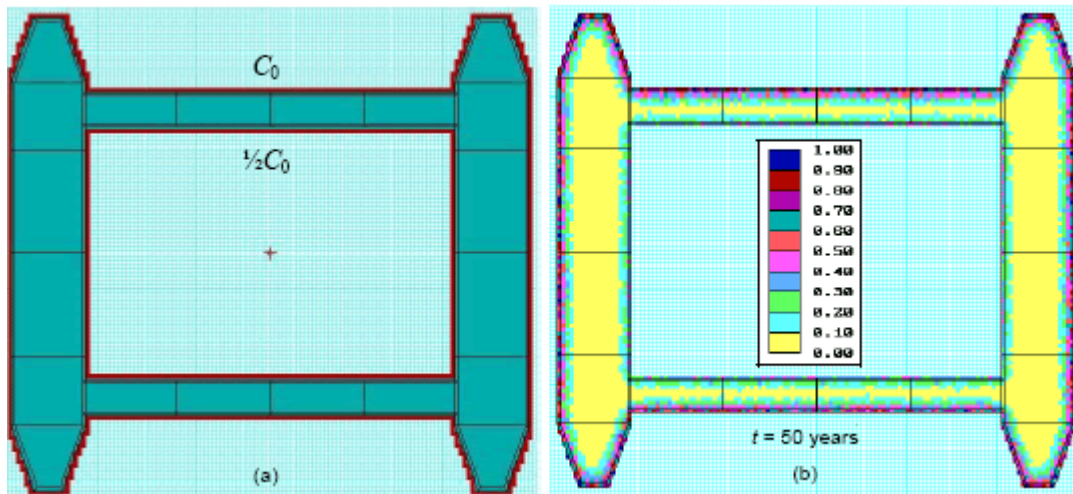


Figura 9. Sezione a cassone di una pila da ponte. (a) Griglia dell'automa cellulare e posizione dell'agente aggressivo lungo il perimetro libero esterno ed interno della sezione.
(b) Mappa di concentrazione $C(x,t)/C_0$ dopo 50 anni.

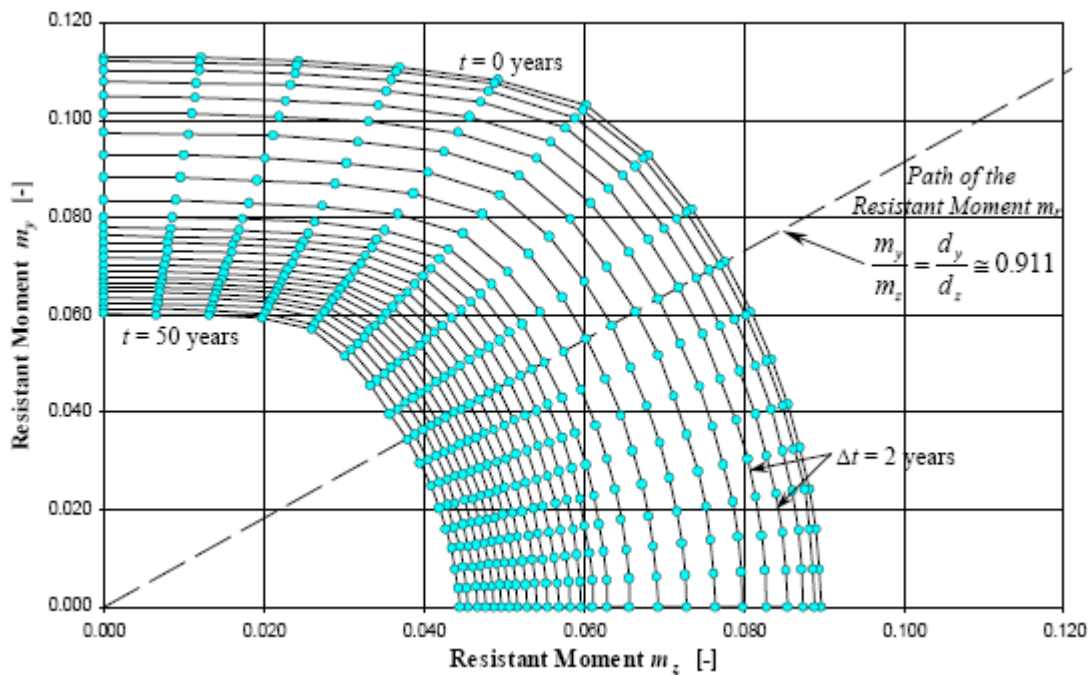


Figura 10. Sezione a cassone di una pila da ponte. Evoluzione nel tempo ($\Delta t = 2$ anni) dei domini di resistenza $m_z - m_y$ dei momenti flettenti $m_z = M_z / (|f_c| A_{c0} d_y)$ e $m_y = M_y / (|f_c| A_{c0} d_z)$ per un'azione assiale $n = N / (|f_c| A_{c0}) = -0.122$ ($N = -100$ MN).

Variabile Aleatoria ($t=t_0$)	Distribuzione	μ	σ
Resistenza del calcestruzzo, f_c	Lognormale	$f_{c,nom}$	5 MPa
Resistenza dell'acciaio, f_{sy}	Lognormale	$f_{sy,nom}$	30 MPa
Coordinate dei punti nodali, (y_i, z_i)	Normale	$(y_i, z_i)_{nom}$	5 mm
Coordinate delle barre, (y_m, z_m)	Normale	$(y_m, z_m)_{nom}$	5 mm
Diametro delle barre, \varnothing_m	(*) Normale	$\varnothing_{m,nom}$	$0.10\varnothing_{m,nom}$
Coefficiente di Diffusività, D	(*) Normale	D_{nom}	$0.10 D_{nom}$
Velocità di degrado calcestruzzo, q_c	(*) Normale	$q_{c,nom}$	$0.30 q_{c,nom}$

Velocità di degrado acciaio, q^s	(*) Normale	$q_{s,nom}$	$0.30 q_{s,nom}$
------------------------------------	-------------	-------------	------------------

Tabella 1. Distribuzioni e parametri del modello probabilistico. (*) Distribuzioni troncate.

L'analisi probabilistica viene svolta con $N = -100$ MN per i seguenti percorsi di carico: (1) $M_z \neq 0$ con $M_y=0$; (2) $M_y \neq 0$ con $M_z=0$; (3) $M_z=M_y=M_r$. Con riferimento ad un campione di 1000 simulazioni Monte Carlo, la Figura 11.a mostra l'evoluzione nel tempo dei parametri statistici (valore medio μ , deviazione standard σ , valori minimo e massimo) dei momenti flettenti resistenti adimensionali m_z , m_y e $m_r = M_r/(|f_c|A_{c0}d_r)$, con $d_r=d_z d_y [2/(d_z^2+d_y^2)]^{0.5}$. I risultati della simulazione possono essere impiegati per valutare la probabilità di crisi PF associata ad assegnati valori dei momenti flettenti agenti. Sulla base delle funzioni di probabilità $P_F=P_F(t)$, si può valutare infine la vita utile T associata ad assegnati livelli di affidabilità P_F^* , come mostrato in Figura 11.b.

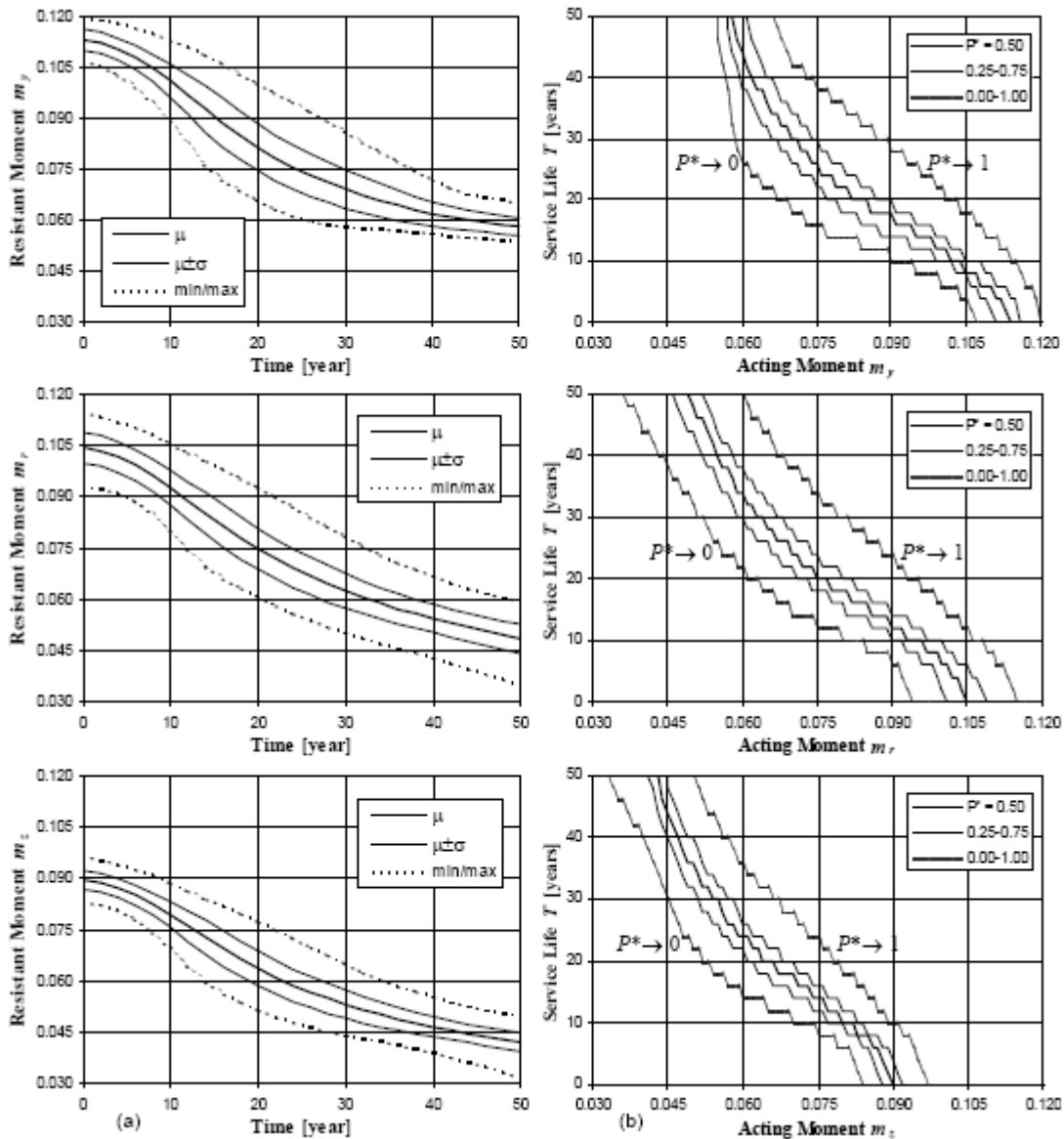


Figura 11. Sezione a cassone di una pila da ponte. (a) Evoluzione nel tempo dei momenti flettenti resistenti: valore medio μ (linea spessa), scarto quadratico medio σ (linee sottili), valori minimo e massimo (linee tratteggiate). (b) Vita utile T in funzione del momento flettente agente per assegnati livelli di probabilità di collasso P_F^* .

In alternativa, qualora la struttura non sia in grado di garantire una vita utile adeguata, l'analisi probabilistica consente anche di pianificare gli eventuali interventi di

manutenzione richiesti per il conseguimento di un dato valore di vita utile. La Figura 12.a mostra ad esempio l'evoluzione nel tempo dell'indice di affidabilità $\beta(t)$ associato ad una richiesta di momento m_z normalmente distribuito con media $\mu=0.050$, deviazione standard $\sigma=0.10\mu$, e coefficiente di correlazione $\rho=0$. Con riferimento ad una soglia minima di affidabilità $\beta^*=4.0$, la Figura 12.a propone tre diversi scenari di manutenzione che si potrebbero attuare per ottenere una vita utile di almeno 50 anni. Nel primo scenario si opera un intervento di manutenzione straordinaria ogni volta che si raggiunge la soglia β^* , restituendo alla struttura il livello di affidabilità iniziale β_0 . Nel secondo scenario si operano invece solo interventi di manutenzione ordinaria ad intervalli regolari ogni 4 anni e tali da incrementare il livello di affidabilità di $\Delta\beta = 0.55$. Il terzo scenario assume invece una strategia mista, con interventi di manutenzione ordinaria ogni 4 anni con $\Delta\beta = 0.45$ e interventi di manutenzione straordinaria ogni volta che si raggiunge la soglia β^* . La figura 12.b mostra la corrispondente evoluzione temporale dei costi cumulati C , normalizzati al costo C_p del singolo intervento di manutenzione ordinaria e valutati assumendo un rapporto fra costi di manutenzione straordinaria e ordinaria $C_E/C_p = 10$ ed un tasso di sconto $v= 0.06$. Il confronto fra i costi totali richiesti nei diversi scenari evidenzia la convenienza, peraltro attesa, di un piano di manutenzione basato solo su interventi di natura preventiva.

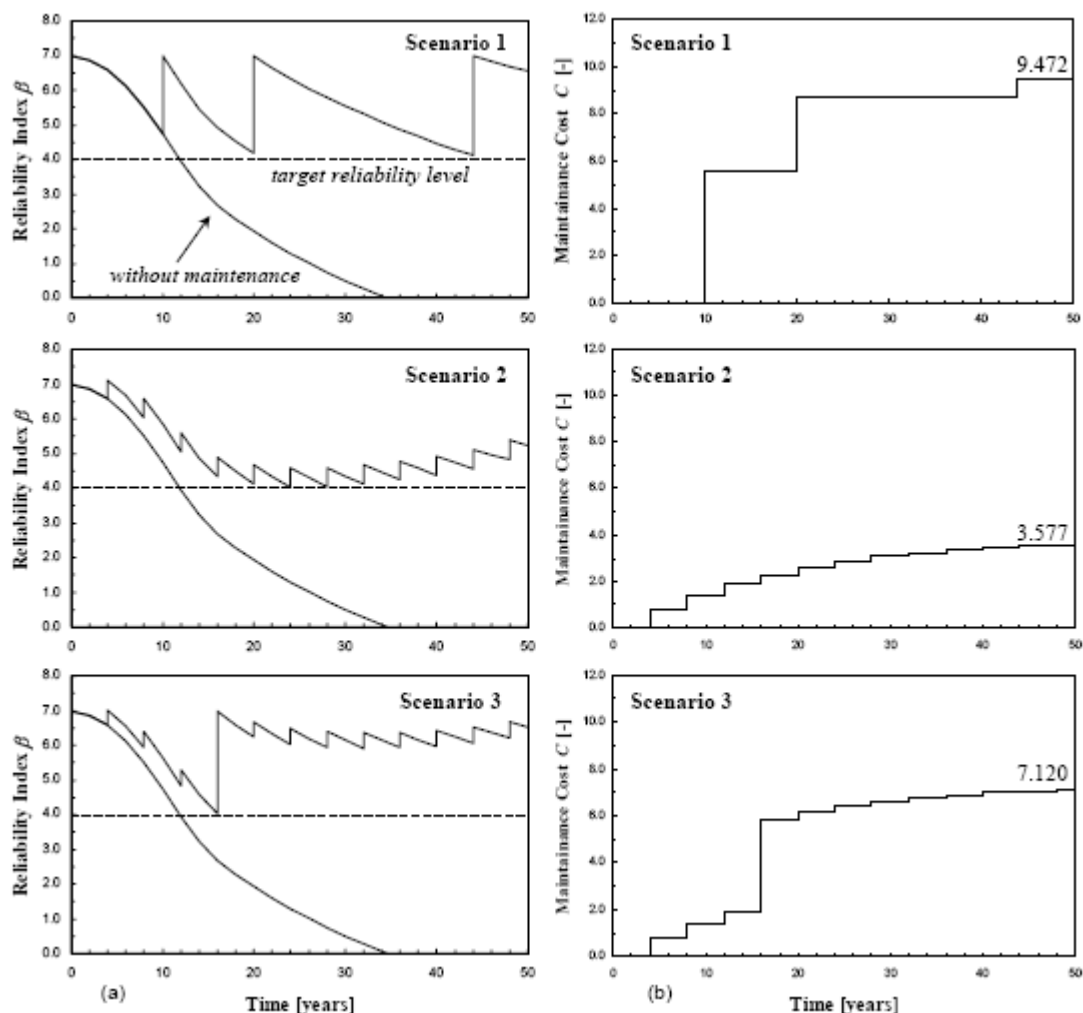


Figura 12. Sezione a cassone di una pila da ponte. (a) Evoluzione nel tempo dell'indice di affidabilità β e possibili scenari di manutenzione mirati ad ottenere una vita utile $T \geq 50$ anni (periodo di monitoraggio $\Delta t = 2$ anni). (b) Evoluzione nel tempo dei costi di manutenzione normalizzati.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro sono state dimostrate le ampie possibilità applicative di un nuovo approccio per l'analisi non lineare nel tempo di strutture in calcestruzzo armato soggette all'azione diffusiva di agenti esterni aggressivi.

Le applicazioni presentate hanno innanzitutto evidenziato come le prestazioni di durabilità non siano legate solo alla qualità dei materiali ed al rispetto di alcune disposizioni costruttive locali sui valori minimi di copriferro, come in genere assunto anche a livello normativo, ma dipendano fortemente anche dalla morfologia del sistema strutturale. Le analisi di durabilità e di vita utile devono quindi essere svolte a livello globale, tenendo conto del ruolo fondamentale dello schema strutturale, soprattutto per sistemi iperstatici dove gli effetti del degrado possono portare nel tempo a significative ridistribuzioni delle sollecitazioni.

I risultati ottenuti hanno inoltre dimostrato come il metodo proposto consenta di seguire lo sviluppo temporale del processo diffusivo e la conseguente evoluzione del degrado meccanico della risposta strutturale. In questo modo è possibile esprimere un giudizio qualitativo sulla qualità dello schema strutturale rispetto ai requisiti di durabilità, stimare la vita utile della struttura associata ad una assegnata domanda prestazionale e, quindi, valutare l'opportunità e la tempistica di eventuali interventi di manutenzione ordinaria e/o straordinaria.

Si segnala infine la capacità della procedura proposta di recepire anche le eventuali modifiche apportate alla struttura da eventuali interventi di riabilitazione, anche solo a livello locale in termini di diffusività e proprietà meccaniche dei materiali.

Un esempio si può trovare in [03], dove l'applicazione ad un ponte strallato esistente ha consentito di quantificare i notevoli effetti migliorativi in termini di durabilità di alcuni interventi manutentivi eseguiti dopo 15 anni di vita di servizio.

RINGRAZIAMENTI

La presente ricerca è stata finanziata con fondi MIUR-PRIN2004 e MIUR-PRIN2005, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano. 6.

BIBLIOGRAFIA

[01] BIONDINI F, BONTEMPI F, FRANGOPOL DM, MALERBA PG. Cellular Automata Approach to Durability Analysis of Concrete Structures in Aggressive Environments. ASCE J. of Structural Engineering, 130(11), 1724-1737, 2004.

[02] BIONDINI F, BONTEMPI F, FRANGOPOL DM, MALERBA PG. Probabilistic Service Life Assessment and Maintenance Planning of Concrete Structures. ASCE J. of Structural Engineering, 132(5), 810-825, 2006.

[03] BIONDINI F, FRANGOPOL DM, MALERBA PG. Time-variant Performance of the Certosa Cable-Stayed Bridge. Structural Engineering International, 16(3), 2006, 235-244.

[04]. CEB, Durable Concrete Structures – Design Guide, Thomas Telford, 1992.

[05]. GLICKSMAN ME, Diffusion in Solids, John Wiley and Sons, 2000.

[06]. KONG JS, FRANGOPOL DM, Life-Cycle Reliability-Based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges. ASCE J. of Structural Engineering, 129(6), 2003, 818-824.

[07] MALERBA PG, (Ed.), Analisi limite e non lineare di strutture in calcestruzzo armato. International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, 1998.

[08] MARTINEZ Y CABRERA F. Collected Papers – In memory of Francesco Martinez Y Cabrera, Politecnico di Milano, 421-426, 427-436, 2002.

[09] WOLFRAM S, Cellular Automata and Complexity – Collected Papers, Addison-Wesley, 1994.

Contatti con gli autori:

Fabio Biondini: biondini@stru.polimi.it

Pier Giorgio Malerba: malerba@stru.polimi.it