

PROGETTO OTTIMALE DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO SOGGETTE A DEGRADO

Lorenzo Azzarello¹, Fabio Biondini², Alessandra Marchiondelli¹

¹ Ingegnere in Milano

² Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

SOMMARIO

La memoria è dedicata alla ricerca della soluzione progettuale di minimo costo nell'arco della vita di servizio attesa di strutture in calcestruzzo armato esposte ad ambienti aggressivi. La formulazione proposta si basa su un nuovo approccio al progetto ottimale di sistemi strutturali soggetti a degrado. Il danneggiamento della struttura viene modellato mediante un'opportuna legge di degrado delle proprietà dei materiali, calcestruzzo e acciaio, e l'analisi strutturale viene svolta a differenti istanti temporali al fine di seguire l'evoluzione delle prestazioni del sistema nel corso della sua vita di servizio. I vincoli di progetto sono espressi mediante limiti sullo stato di sforzo e sullo stato di spostamento, entrambi variabili nel tempo. La funzione obiettivo viene definita tenendo conto sia del costo iniziale della struttura, sia dei costi degli interventi di manutenzione, opportunamente attualizzati e assunti proporzionali all'effettivo livello di degrado. L'ottimizzazione nel tempo di un telaio in calcestruzzo armato soggetto a condizioni di carico multiple dimostra l'efficacia della formulazione proposta. I risultati ottenuti mostrano in particolare come sia le dimensioni delle sezioni, sia i quantitativi e la distribuzione delle armature che caratterizzano la soluzione ottimale dipendano fortemente dallo scenario di degrado.

SUMMARY

The minimum lifetime cost design of reinforced concrete structures exposed to aggressive environments is presented. The proposed formulation is based on a novel conceptual approach to optimal design of deteriorating structural systems. The structural damage is modeled by introducing a proper degradation law for both materials, concrete and steel, and the structural analysis is carried out at different time instants in order to assess the time evolution of the system performance. The design constraints are related to the time-variant stress and displacement state. The objective function is formulated by accounting for both the initial cost of the structure, given by the sum of the costs of the component materials, and the costs of possible maintenance interventions, that are properly discounted over time and assumed to be proportional to the actual level of structural damage. The effectiveness of the proposed formulation is shown through the lifetime structural optimization of a reinforced concrete frame under multiple loading conditions. The obtained results show that the optimal dimensions of the cross-sections, as well as the optimal amount and distribution of reinforcement, strongly depend on the prescribed damage scenario.

1. INTRODUZIONE

Nell'approccio classico all'ottimizzazione strutturale non si tiene conto dell'evoluzione temporale delle prestazioni indotte dal progressivo degrado delle proprietà del sistema, ma si concentra l'attenzione solo sulla configurazione iniziale, in cui la struttura risulta ancora integra. Questo modo di procedere non è però coerente con la reale natura del problema progettuale, che dovrebbe invece orientarsi verso strutture che risultino in grado di soddisfare le prestazioni richieste non solo all'atto della loro realizzazione, ma anche durante l'intera vita di servizio attesa, prendendo in considerazione il degrado indotto dalle inevitabili fonti di danneggiamento. Inoltre, nella selezione della soluzione ottimale si dovrebbe considerare anche il costo del degrado, ovvero degli eventuali interventi di manutenzione, la cui entità risulta a sua volta strettamente legata alle scelte operate in sede di progetto.

Per superare le incoerenze della impostazione classica è stata di recente proposta una nuova formulazione del problema progettuale orientata all'ottimizzazione di strutture con prestazioni variabili nel tempo, sia con approccio matematico [1], sia con approccio evolutivo [4]. La formulazione proposta, inizialmente sviluppata per strutture composte da aste di materiale omogeneo, viene presentata nel seguito per il caso di strutture in calcestruzzo armato esposte ad ambienti aggressivi [2]. Si focalizza in particolare l'attenzione sui meccanismi di danno associati all'azione diffusiva di agenti esterni aggressivi, come solfati e cloruri, che possono causare degrado del calcestruzzo e corrosione delle armature [6]. Il danno indotto da questi agenti viene modellato mediante un'opportuna legge di degrado delle proprietà dei materiali, calcestruzzo e acciaio, e l'analisi strutturale viene svolta a differenti istanti temporali per seguire l'evoluzione delle prestazioni del sistema nel corso della sua intera vita di

servizio. I vincoli di progetto sono espressi mediante limiti sullo stato di sforzo e sullo stato di spostamento, entrambi variabili nel tempo. La funzione obiettivo viene definita tenendo conto sia del costo iniziale della struttura, sia dei costi degli interventi di manutenzione, opportunamente attualizzati e assunti proporzionali all'effettivo livello di degrado.

L'ottimizzazione nel tempo di un telaio in calcestruzzo armato soggetto a condizioni di carico multiple prova infine l'efficacia della formulazione proposta. I risultati ottenuti mostrano in particolare come sia le dimensioni delle sezioni, sia i quantitativi e la distribuzione delle armature che caratterizzano la soluzione ottimale dipendano fortemente dallo scenario di degrado. La variabilità delle prestazioni nel tempo e l'attuazione di un piano di manutenzione possono quindi intervenire in modo determinante nel definire la soluzione di minimo costo, che in generale non coincide più con quella di minimo volume, come risulterebbe trascurando il degrado.

2. MODELLAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO

Il danneggiamento strutturale viene considerato come un degrado delle proprietà meccaniche che rende la struttura meno idonea a sostenere i carichi applicati. Con riferimento al caso di strutture intelaiate in calcestruzzo armato, si assume che il degrado interessi l'area $A=A(t)$, il modulo elastico $E=E(t)$ e la resistenza $\bar{\sigma}=\bar{\sigma}(t)$ di calcestruzzo e acciaio:

$$A_c(t)=[1-\delta_{c,A}(t)]A_{c,0} \quad A_s(t)=[1-\delta_{s,A}(t)]A_{s,0} \quad (1)$$

$$E_c(t)=[1-\delta_{c,E}(t)]E_{c,0} \quad E_s(t)=[1-\delta_{s,E}(t)]E_{s,0} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_c(t)=[1-\delta_{\bar{\sigma},c}(t)]\bar{\sigma}_{c,0} \quad \bar{\sigma}_s(t)=[1-\delta_{\bar{\sigma},s}(t)]\bar{\sigma}_{s,0} \quad (3)$$

dove $\delta_A, \delta_E, \delta_{\bar{\sigma}}$, sono indici di danno adimensionali che forniscono una misura diretta del livello di degrado nell'intervallo $[0; 1]$. Opportune leggi di correlazione possono essere introdotte fra l'area e le altre caratteristiche sezionali, come ad esempio il momento di inerzia.

L'evoluzione temporale degli indici di danno $\delta=\delta(t)$ dipende dalla fisica del processo di degrado, che in genere risulta influenzata dallo stato tensionale $\sigma=\sigma(t)$ (Figura 1.a). Pertanto, una valutazione affidabile del decadimento delle prestazioni strutturali nel tempo richiede la formulazione di modelli di danno che siano in grado di descrivere l'effettiva evoluzione del degrado e la sua interazione con il comportamento strutturale [3]. Nonostante la complessità delle leggi che governano i fenomeni di degrado, per operare una efficace classificazione gerarchica delle possibili alternative

progettuali risulta in genere sufficiente il ricorso a modelli di danneggiamento semplificati [4].

Pertanto, ancora per semplicità e senza restrizione di generalità, si assume che tutte le proprietà dei materiali subiscano lo stesso processo di degrado, ovvero $\delta_A=\delta_E=\delta_{\bar{\sigma}}\equiv\delta$. Inoltre, l'indice di danno $\delta=\delta(t)$ viene correlato al comportamento meccanico mediante il seguente legame tra velocità di degrado e sforzo $\sigma=\sigma(t)$ (Figura 1.b):

$$\frac{d\delta(t)}{dt}=\frac{1}{T_\delta}\left[\frac{\sigma(t)}{\bar{\sigma}_0}\right]^\alpha \quad \bar{\sigma}_0=\begin{cases} \bar{\sigma}_0^+ & \text{se } \sigma \geq 0 \\ \bar{\sigma}_0^- & \text{se } \sigma < 0 \end{cases} \quad (4)$$

dove $\bar{\sigma}_0^-$ e $\bar{\sigma}_0^+$ sono rispettivamente la minima e la massima tensione ammissibile al tempo iniziale $t=t_0$, $\alpha \geq 0$ è un opportuno coefficiente e T_δ rappresenta il periodo di tempo necessario a raggiungere lo stato di completo degrado per uno sforzo costante $\sigma(t)=\bar{\sigma}_0$ (Figura 1.c). Come condizione iniziale di innesco si assume infine $\delta(t_{cr})=0$ con $t_{cr}=\max\{t \mid \sigma(t) \leq \sigma_{cr}\}$, essendo $\sigma_{cr} \leq \bar{\sigma}_0$ una soglia critica di sforzo.

L'indice δ descrive compiutamente l'evoluzione del degrado in ogni punto della struttura. La sua natura locale lo rende però di difficile impiego ai fini progettuali. Una più sintetica misura globale di degrado può essere ottenuta a differenti livelli di scala operando una media pesata dell'indice δ su una predefinita porzione di struttura [5]. Per un sistema composto da p elementi è così possibile definire un indice di danno globale $\hat{\delta}=\hat{\delta}(t)$ come segue:

$$\hat{\delta}(t)=\sum_{i=1}^p \hat{\delta}_i(t)=\sum_{i=1}^p \int_{V_i} w_i \delta_i(t) dV \quad \sum_{i=1}^p \int_{V_i} w_i dV=1 \quad (5)$$

in cui w_i sono opportuni pesi e le integrazioni sono svolte sul volume composto $V_i=V_{c,i}+V_{s,i}$ di ogni elemento i , con V_c e V_s volumi rispettivamente di calcestruzzo e acciaio. Possibili scelte per i pesi sono ad esempio $w_i=1$ o $w_i=V_i$.

3. CRITERI DI OTTIMALITÀ

3.1. Costo Strutturale

Sono molti gli indicatori delle prestazioni strutturali che possono essere scelti come obiettivi da minimizzare o massimizzare per una progettazione ottimale. Nell'approccio proposto in questo lavoro si assume come funzione obiettivo il costo totale C della struttura durante la sua vita di servizio T_S .

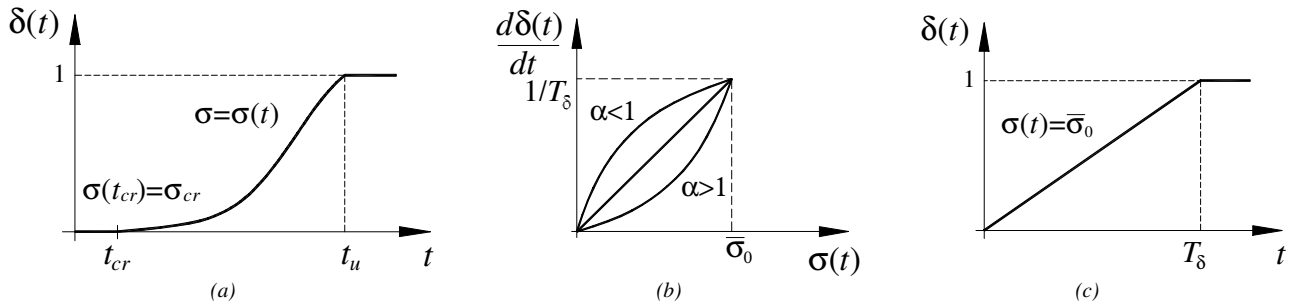


Figura 1. Modellazione del degrado strutturale: (a) evoluzione temporale dell'indice di danno $\delta=\delta(t)$; (b) legame tra velocità di degrado e livello tensionale $\sigma=\sigma(t)$; (c) significato del parametro di degrado T_δ .

Tale costo viene valutato come somma del costo iniziale C_0 e del costo di manutenzione C_m :

$$C = C_0 + C_m \quad (6)$$

Per il costo iniziale C_0 si assume:

$$C_0 = c_c V_{c,0} + c_s V_{s,0} = c_c (V_{c,0} + c V_{s,0}) = c_c V_{c,0}^* \quad (7)$$

dove $V_{0,c}$ e $V_{0,s}$ sono i volumi totali dei materiali, calcestruzzo e acciaio, c_c e c_s sono i corrispondenti costi unitari, $c = c_s/c_c$ è il rapporto dei costi e $V_{c,0}^*$ è il volume totale equivalente di calcestruzzo. Il costo di manutenzione C_m si ottiene invece come somma dei costi dei singoli interventi:

$$C_m = \sum_{k=1}^r \frac{C_m^k}{(1+\nu)^{(t_k-t_0)}} \quad (8)$$

in cui il costo C_m^k di ciascun intervento $k=1, \dots, r$ viene riferito al tempo iniziale t_0 mediante un opportuno tasso di sconto ν [7].

3.2. Scenario di Manutenzione

La definizione di costo introdotta viene ora specializzata con riferimento ad un assegnato scenario di manutenzione. Si assume di operare un intervento di manutenzione tale da ripristinare integralmente le caratteristiche iniziali del sistema dopo ogni periodo di progetto T_D , ovvero ad ogni istante $t_k = (t_0 + kT_D)$. Il numero di interventi effettuati durante la vita di servizio T_S è quindi $r = [\text{int}(T_S/T_D) - 1]$. Inoltre, è ragionevole assumere un degrado senza memoria, in modo tale che l'evoluzione temporale delle prestazioni della struttura riparata non dipenda dalla precedente storia di manutenzione. In tale ipotesi tutti gli interventi k hanno il medesimo costo $C_m^k = C_m^1$ e il costo totale di manutenzione risulta:

$$C_m = C_m^1 \sum_{k=1}^r \frac{1}{(1+\nu)^{kT_D}} = C_m^1 q \quad (9)$$

con il fattore $q = q(T_S, T_D, \nu) \leq r$ che dipende solo dai parametri preassegnati T_S , T_D e ν .

Dal momento che ciascun intervento è finalizzato a ripristinare le prestazioni strutturali iniziali, il costo C_m^1 del singolo intervento può considerarsi correlato al costo iniziale C_0 in proporzione al livello di danneggiamento cumulato nel periodo di progetto T_D . Essendo il degrado un fenomeno non reversibile nel tempo, una misura complessiva di tale danneggiamento può ottenersi dall'indice di danno globale $\hat{\delta} = \hat{\delta}(t)$ valutato alla fine del periodo di progetto T_D , ovvero:

$$\tilde{\delta} = \hat{\delta}(t_k) = \hat{\delta}(t_k + T_D), \quad k=1, \dots, r \quad (10)$$

Ciò premesso, se si esprime il costo del singolo intervento con la seguente relazione lineare:

$$C_m^1 = C_0 \tilde{\delta} \quad (11)$$

il costo totale C risulta quindi:

$$C = C_0 (1 + \tilde{\delta} q) \quad (12)$$

In questa formulazione è possibile tenere conto agevolmente anche di altri costi aggiuntivi. Si noti tuttavia che la quantità C

ha lo scopo di costituire un criterio coerente di confronto tra differenti alternative progettuali e non deve necessariamente essere interpretata come costo economico in senso stretto.

3.3. Ruolo del Costo di Manutenzione

Al fine di evidenziare il ruolo svolto da un predefinito programma di manutenzione nella progettazione ottimale di una struttura soggetta a degrado, si studiano nel seguito costi e prestazioni dell'asta tesa a sezione circolare mostrata in Figura 2. Con riferimento al modello di costo introdotto ed indicando con d_0 il diametro della sezione non danneggiata, il costo totale dell'asta durante la sua vita di servizio T_S risulta:

$$C = C_0 (1 + \tilde{\delta} q) = c A_0 L (1 + \tilde{\delta} q) = c \frac{\pi d_0^2 L}{4} (1 + \tilde{\delta} q) \quad (13)$$

con $\tilde{\delta} = \tilde{\delta}(d_0)$. Il diametro d_0 deve essere scelto in modo tale che la tensione agente $\sigma = \sigma(t)$ non superi lo sforzo ammissibile $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(t)$ durante il periodo di progetto T_D , ovvero:

$$\sigma(t) \leq \bar{\sigma}(t) \quad \forall t \in [t_0; t_0 + T_D] \quad (14)$$

dove:

$$\sigma(t) = \frac{F}{A(t)} = \frac{F}{A_0 [1 - \delta(t)]} = \frac{4F}{\pi d_0^2 [1 - \delta(t)]} \quad (15)$$

$$\bar{\sigma}(t) = \bar{\sigma}_0 [1 - \delta(t)] \quad (16)$$

e con $\delta(t) = \delta(d_0, t)$. Nel caso in cui non si consideri il danneggiamento ($\delta = \tilde{\delta} = 0$), la soluzione di minimo costo d_0^* corrisponde alla soluzione di minimo volume, ovvero al minimo valore del diametro d_0 che soddisfa la precedente limitazione tensionale:

$$d_0^* = d_{0,\min} = \sqrt{\frac{4F}{\pi \bar{\sigma}_0}} \quad (17)$$

con:

$$C^* = C(d_0^*) = C_0(d_0^*) = c \frac{FL}{\bar{\sigma}_0} \quad (18)$$

Se invece si tiene conto del danneggiamento, la soluzione di minimo costo d_0^* non risulta più associata in generale al diametro minimo $d_{0,\min}$. Infatti, la necessità di conseguire un equilibrio fra la limitazione del costo di manutenzione e lo sviluppo del danneggiamento totale può portare a valori ottimali d_0^* più elevati.

Questi aspetti sono chiariti in Figura 2, dove si mostrano costi e prestazioni dell'asta al variare del diametro d_0 per diversi valori del parametro di degrado $\theta = T_S/T_D$ con riferimento al caso seguente: $F=70$ kN, $T_S=100$ anni, $T_D=10$ anni, $\bar{\sigma}_0=100$ MPa, $\sigma_{cr}=0$, $\alpha=1$ e $\nu=0$ ($q=r$). I diagrammi di Figura 2 si riferiscono in particolare alle seguenti quantità:

$$\chi_0^* = C_0/C^* \quad \chi_m^* = C_m/C^* \quad (19)$$

$$\chi^* = \chi_0^* + \chi_m^* \quad (20)$$

$$\rho = \sigma(T_D) / \bar{\sigma}(T_D) \quad (21)$$

dove C^* indica il costo totale in assenza di degrado ($\theta=0$).

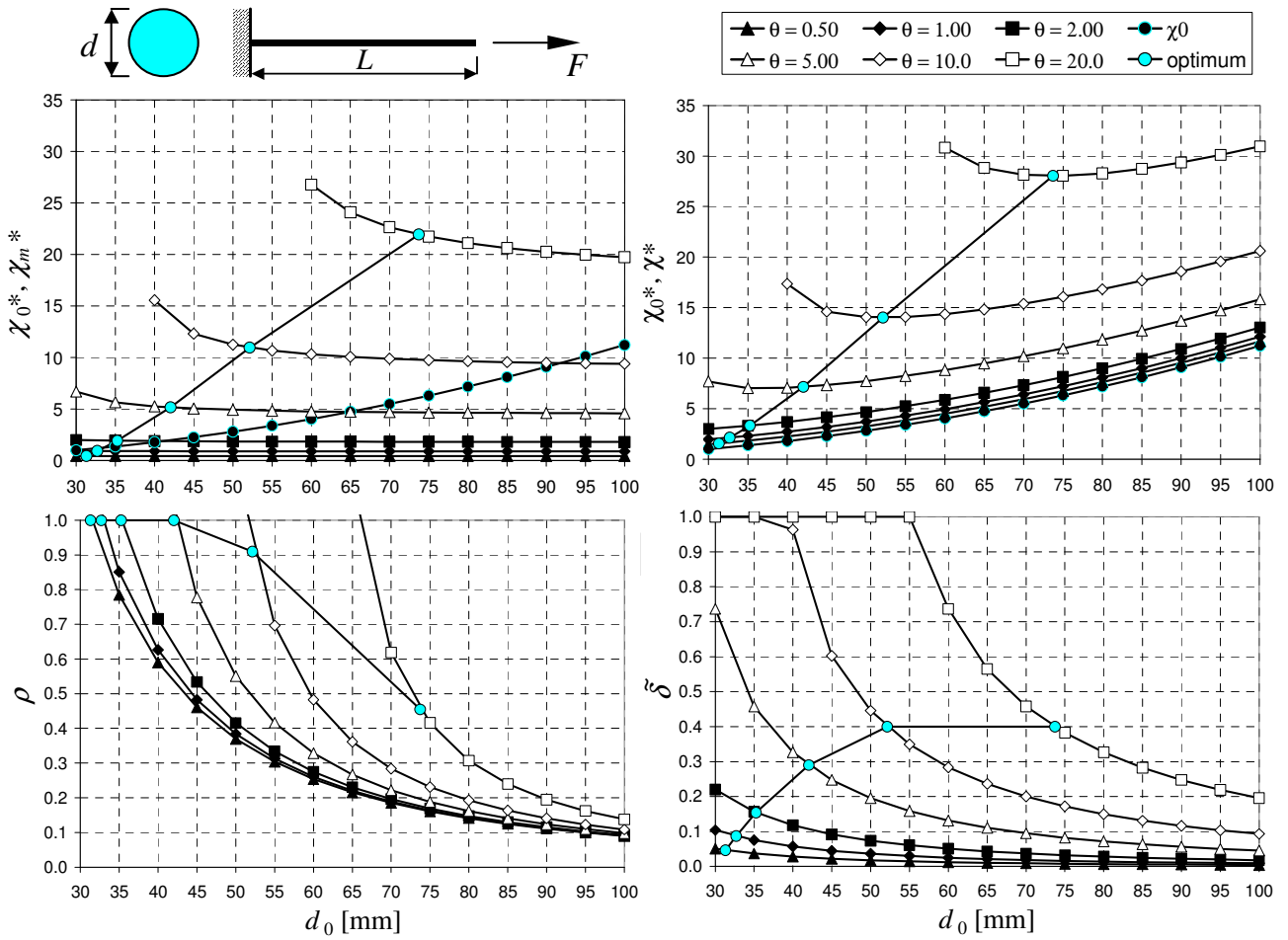


Figura 2. Costi e prestazioni di un'asta tesa al variare del diametro della sezione e per diversi livelli di degrado.

Si osserva quanto segue:

- Il minimo diametro ammissibile in assenza di degrado è $d_{0,\min}=29.9$ mm. Il suo valore aumenta con θ .
- Al crescere di d_0 il costo iniziale χ_0^* aumenta e il costo di manutenzione χ_m^* diminuisce. Per un assegnato valore di d_0 , il costo di manutenzione χ_m^* aumenta con θ .
- Il costo totale χ^* presenta un minimo per $d_0 \geq d_{0,\min}$ e il diametro ottimale d_0^* aumenta con θ .
- Il rapporto tensionale ρ diminuisce con d_0 e aumenta con θ . Alla fine del periodo di progetto T_D il materiale della soluzione ottimale d_0^* può non essere pienamente sfruttato ($\rho^* \leq 1$).
- L'indice di danno cumulato $\tilde{\delta}$ diminuisce con d_0 e aumenta con θ . Per la soluzione ottimale questa quantità tende a saturare per valori elevati di θ .

Risultati analoghi si ottengono al variare di T_D . Pertanto, per strutture omogenee soggette a degrado la soluzione ottimale può dipendere fortemente dall'evoluzione delle prestazioni nel corso della vita di servizio. E tale dipendenza non riguarda solo il proporzionamento delle singole membrature, come nel caso appena esaminato, ma anche la definizione della morfologia ottimale del sistema strutturale, come ad esempio mostrato in [1] e [4]. Gli sviluppi presentati nel seguito mostrano che questi risultati si estendono anche al caso di strutture non omogenee.

4. OTTIMIZZAZIONE NEL TEMPO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

4.1. Formulazione del Problema

Lo scopo di una ottimizzazione mono-obiettivo nel tempo è determinare un vettore di variabili di progetto $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$ che minimizzi il valore di una funzione obiettivo $f(\mathbf{x})$ nel rispetto di limiti diretti inferiori \mathbf{x}^- e superiori \mathbf{x}^+ e di limiti indiretti $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \leq \mathbf{0}$ sulle prestazioni nel tempo:

$$\min_{\mathbf{x} \in D} f(\mathbf{x}) \quad (22)$$

$$D = \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x}^- \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^+, \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \leq \mathbf{0} \} \quad (23)$$

Con riferimento ai concetti introdotti, la funzione obiettivo $f(\mathbf{x})$ da minimizzare può essere correlata al costo strutturale totale C della struttura composta come segue:

$$f(\mathbf{x}) \equiv C(\mathbf{x})/c_c = V_{c,0}^*(\mathbf{x})[1 + \tilde{\delta}(\mathbf{x})q] \quad (24)$$

I vincoli prestazionali $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \leq \mathbf{0}$ devono tenere conto della risposta della struttura ad ogni istante $t \in [t_0; t_0 + T_D]$. Focalizzando l'attenzione sulla verifica delle prestazioni per gli stati limite di esercizio (SLE), tali vincoli possono essere

espressi per ogni condizione di carico ℓ con riferimento sia agli sforzi nelle fibre più sollecitate di calcestruzzo $\sigma_{c,i,\ell} = \sigma_{c,i,\ell}(t)$ e nelle barre di acciaio $\sigma_{s,i,\ell} = \sigma_{s,i,\ell}(t)$ di ogni elemento i , sia agli spostamenti $u_{j,\ell} = u_{j,\ell}(t)$ di ogni nodo j , come segue:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_{c,i,\ell}^-(\mathbf{x},t) \leq \sigma_{c,i,\ell}^-(\mathbf{x},t) \leq \bar{\sigma}_{c,i,\ell}^+(\mathbf{x},t) \\ \bar{\sigma}_{s,i,\ell}^-(\mathbf{x},t) \leq \sigma_{s,i,\ell}^-(\mathbf{x},t) \leq \bar{\sigma}_{s,i,\ell}^+(\mathbf{x},t) \end{cases} \quad (25)$$

$$\bar{u}_{j,\ell}^- \leq u_{j,\ell}(\mathbf{x},t) \leq \bar{u}_{j,\ell}^+ \quad (26)$$

dove $\bar{\sigma}_{i,\ell}^- = \bar{\sigma}_{i,\ell}^-(t)$ e $\bar{\sigma}_{i,\ell}^+ = \bar{\sigma}_{i,\ell}^+(t)$ indicano rispettivamente la minima e la massima tensione ammissibile dei materiali e $\bar{u}_{j,\ell}^-$ e $\bar{u}_{j,\ell}^+$ sono preassegnati valori limite di spostamento.

Anche se non considerati nell'applicazione che segue, è possibile tenere conto agevolmente anche altri vincoli di progetto, ad esempio associati alla verifica delle prestazioni per gli stati limite ultimi (SLU) e/o finalizzati alla limitazione dello stato di degrado locale e globale.

4.2. Ottimizzazione nel Tempo di un Telaio in C.A.

La formulazione proposta viene applicata all'ottimizzazione nel tempo del telaio in calcestruzzo armato mostrato in Figura 3.a. Pilastri e trave hanno sezione di forma rettangolare.

Con riferimento alle Figure 3.a e 3.b, il problema di ottimizzazione è definito da $n=9$ variabili di progetto:

$$\mathbf{x} = [b \ h_1 \ h_2 \ | \ A_1 \ A_2 \ A_2' \ A_3 \ A_3' \ | \ d]^T \quad (27)$$

con i seguenti limiti diretti:

$$b \geq 300 \text{ mm} \quad 1 \leq h_1/b \leq 2, \quad i=1,2 \quad (28)$$

$$A_i \geq 2\phi 12 \quad A_i' \geq 2\phi 12, \quad i=1,2,3 \quad (29)$$

$$0.10 \leq d/L \leq 0.50 \quad (30)$$

Si considerano le 3 condizioni di carico mostrate in Figura 3.c. Facendo riferimento agli stati limite di esercizio, i valori di sollecitazioni e spostamenti sono valutati nel tempo assumendo un modello di analisi elastico lineare. Gli sforzi nei materiali si ricavano poi a livello sezionale in regime elastico fessurato trascurando la resistenza a trazione del calcestruzzo ($\bar{\sigma}_c^+ = 0$) con i moduli $E_c=30 \text{ GPa}$ e $E_s=15E_c$. L'indice di danno cumulato $\tilde{\delta}$ viene valutato con media aritmetica ($w_i=1$).

Si assumono gli stessi vincoli di progetto per tutte le condizioni di carico. Gli sforzi nei materiali vengono verificati con riferimento ai seguenti limiti ammissibili iniziali per calcestruzzo e acciaio:

$$-\bar{\sigma}_{c,0}^- = 15 \text{ MPa} \quad (31)$$

$$\bar{\sigma}_{s,0}^+ = -\bar{\sigma}_{s,0}^- = 180 \text{ MPa} \quad (32)$$

Si considerano inoltre per l'intera vita di servizio i seguenti limiti sugli spostamenti u_x e u_y indicati in Figura 3.a:

$$u_x \leq 20 \text{ mm} \quad u_y \leq 10 \text{ mm} \quad (33)$$

Le prestazioni strutturali nel tempo sono definite dai seguenti parametri: vita di servizio $T_S=100$ anni; periodo di progetto $T_D=10$ anni; rapporto di costo $c=20$; tasso di sconto $v=3\%$; velocità di degrado $\theta=T_S/T_D=10$, con $\sigma_{cr}=0$ e $\alpha=1$. Al fine di studiare l'influenza della distribuzione del degrado, si considerano inoltre i 6 scenari di danno elencati in Tabella 1.

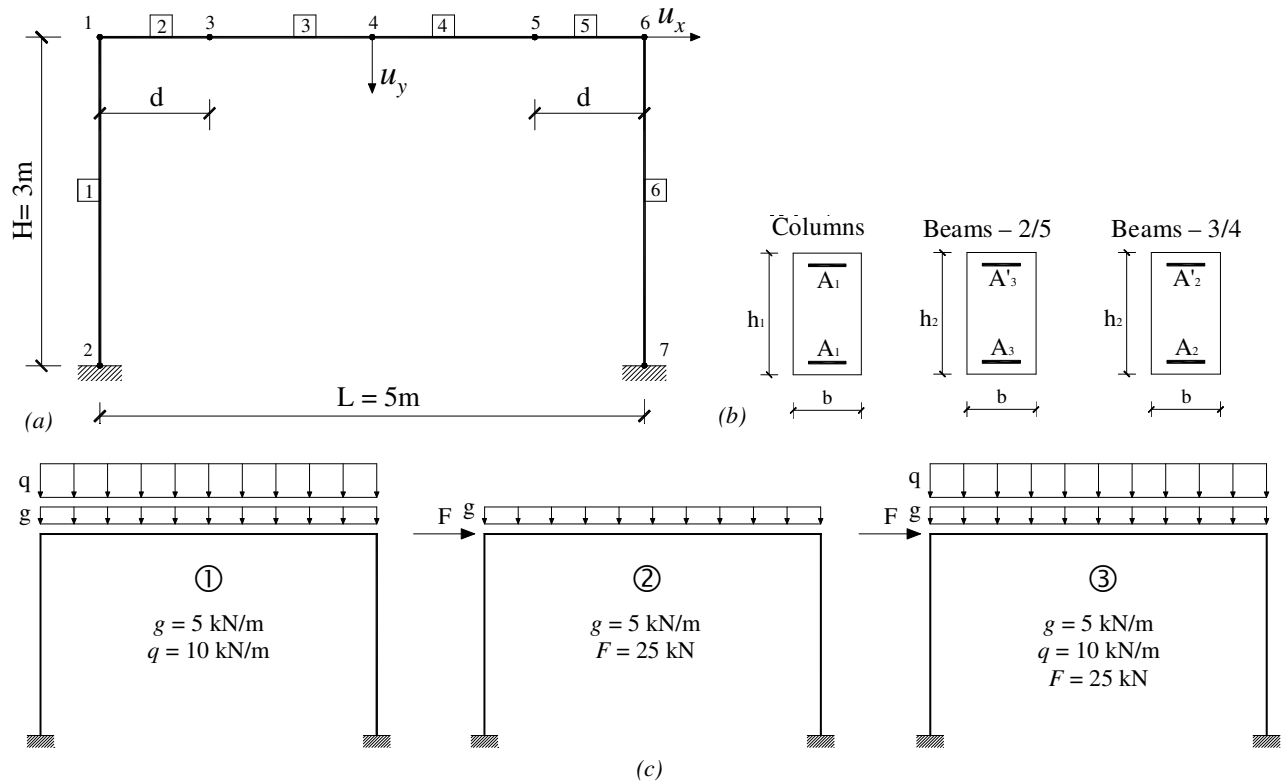


Figura 3. Telaio in calcestruzzo armato: (a) dimensioni e schema strutturale; (b) sezioni di pilastri e trave; (c) condizioni di carico.

Scenario di danno	A	B	C	D	E	F
Pilastro di sinistra	-	Degrado	-	Degrado	Degrado	-
Trave	-	Degrado	Degrado	-	Degrado	Degrado
Pilastro di destra	-	Degrado	-	Degrado	-	Degrado

Tabella 1. Scenari di danno ($\theta = T_S/T_D = 10$, $T_S = 100$ anni).

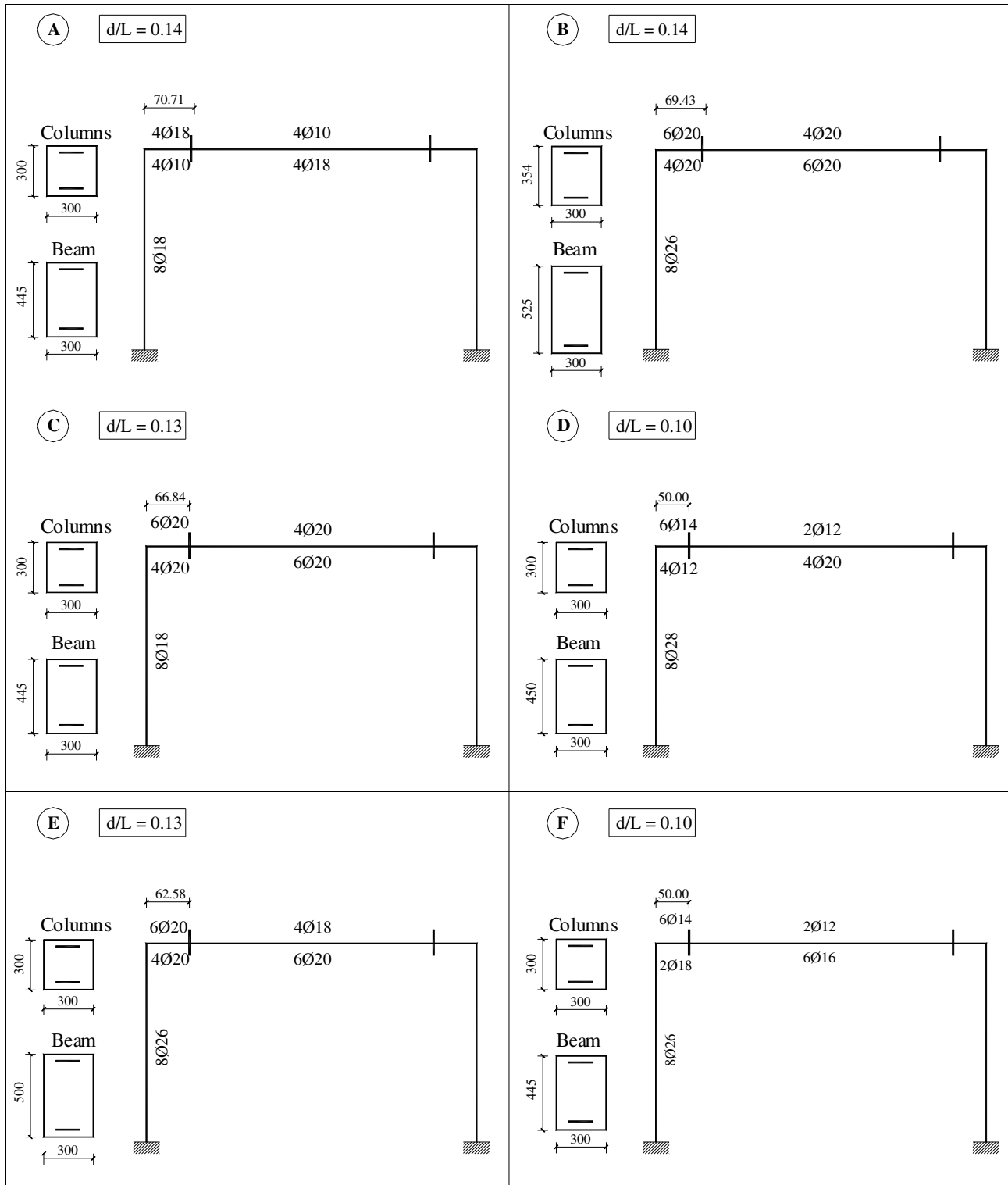


Figura 4. Soluzioni ottimali associate agli scenari di danno in Tabella 1 ($\theta = T_S/T_D = 10$, $T_S = 100$ anni, $T_D = 10$ anni, $c = 20$, $v = 3\%$).

Il problema di ottimizzazione è non lineare e viene risolto mediante un algoritmo basato sul metodo del gradiente [8]. Il confronto delle soluzioni ottimali mostrate in Figura 4 prova che le dimensioni delle sezioni, come anche i quantitativi e la distribuzione delle armature, dipendono fortemente dallo scenario di degrado. Si nota in particolare come il sovradimensionamento richiesto dal danneggiamento non interessi solo gli elementi direttamente esposti al degrado. Infatti, a causa dell'iperstaticità del sistema, il danno innesca un processo di redistribuzione nel tempo nel quale le sollecitazioni tendono progressivamente a migrare verso gli elementi meno degradati, che risultano quindi più impegnati rispetto alla situazione integra.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato un nuovo approccio al progetto ottimale di strutture in calcestruzzo armato esposte ad ambienti aggressivi. Tale approccio consente di superare le incoerenze implicite nella formulazione classica del problema progettuale, che non tiene conto della variazione nel tempo delle prestazioni strutturali indotta dal progressivo degrado delle proprietà del sistema. Con l'ausilio di adeguate leggi di danneggiamento, opportunamente differenziate per calcestruzzo ed acciaio, nella formulazione proposta i vincoli progettuali associati alle prestazioni strutturali sono infatti considerati variabili nel tempo durante l'intera vita di servizio. Inoltre, la funzione obiettivo da minimizzare risulta associata al costo totale della struttura, somma del costo iniziale dei materiali, calcestruzzo e acciaio, e del costo degli eventuali interventi di manutenzione, quest'ultimo opportunamente attualizzato e assunto proporzionale all'effettivo livello di danno.

I risultati ottenuti in ambito applicativo hanno mostrato che per le strutture in calcestruzzo armato, le dimensioni delle sezioni, come anche i quantitativi e la distribuzione delle armature, dipendono fortemente dallo scenario di danno, con sovradimensionamenti che non interessano in generale solo gli elementi direttamente esposti al degrado. Il danno tende infatti a favorire l'innesco di processi di redistribuzione nel tempo nei quali le sollecitazioni migrano progressivamente verso gli elementi meno degradati, che risultano quindi più impegnati rispetto alla situazione integra. Ciò conferma come la variabilità delle prestazioni strutturali nel tempo e l'attuazione di un assegnato piano di manutenzione possano intervenire in modo determinante nel definire il progetto ottimale di minimo costo, che in generale non coincide più con quello di minimo volume, come risulterebbe trascurando il degrado.

RINGRAZIAMENTI

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

BIBLIOGRAFIA

- [1] AZZARELLO L., BIONDINI F., MARCHIONDELLI A. (2006) – Optimal Design of Deteriorating Structural Systems. *3rd Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety, and Management (IABMAS06)*, Porto, July 16-19.
- [2] AZZARELLO L., BIONDINI F., MARCHIONDELLI A. (2006) – Lifetime Optimization of Reinforced Concrete Structures in Aggressive Environments. *5th Int. Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems (LCC5)*, Seoul, Korea, October 16-18.
- [3] BIONDINI F., BONTEMPI F., FRANGOPOL D.M., MALERBA P.G. (2004) – Cellular Automata Approach to Durability Analysis of Concrete Structures in Aggressive Environments. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **130**(11), 1724-1737.
- [4] BIONDINI F., MARCHIONDELLI A. (2007) – Evolutionary Design of Structural Systems with Time-variant Performance. Accettata per la pubblicazione in *Structure and Infrastructure Engineering*.
- [5] BIONDINI F. (2004) – A Three-dimensional Finite Beam Element for Multiscale Damage Measure and Seismic Analysis of Concrete Structures. *13th World Conf. on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 2963.
- [6] CEB (1992) – *Durable Concrete Structures – Design Guide*, Thomas Telford..
- [7] KONG J.S., FRANGOPOL D.M. (2003) – Evaluation of Expected Life-Cycle Maintenance Cost of Deteriorating Structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, **129**(5), 682-691.
- [8] VANDERPLAATS G.N. (2001) – *DOT Design Optimization Tool*, Vanderplaats Research&Development, Colorado Springs, CO, USA.