

*Metodi probabilistici in Ingegneria Civile:
da un concetto all'uso corrente*

Introduzione

Le *Scienze dell'Ingegneria* sono tradizionalmente annoverate tra le *Scienze esatte*: ad ogni problema “ben formulato” corrisponde una ben determinata soluzione.

Eppure in pratica non è mai stato così: né il “sistema”, né le “azioni” che su di esso agiscono, né tanto meno il “modello” con il quale l'ingegnere effettua i suoi calcoli, sono immuni da “incertezze”, che tradizionalmente sono coperte mediante coefficienti di sicurezza, chiamati anche - e non a torto - “coefficienti di ignoranza”.

Il tentativo di affrontare con procedimenti scientifici la questione della “sicurezza” e della “affidabilità” dei sistemi di ingegneria (in particolare dei sistemi di ingegneria strutturale) risale a pochi decenni or sono, ed ha coinvolto l'uso delle metodologie probabilistiche e, soprattutto negli ultimi anni, le analisi di rischio.

Eppure, tuttora la maggior parte degli ingegneri ritiene che la probabilità e la statistica siano discipline che rientrano nelle competenze specifiche dei matematici.

Questa convinzione è anche giustificata dalla carenza di corsi specifici nei Corsi di Laurea in Ingegneria.

Tuttavia l'ingegnere, nella sua attività di progettazione, è sempre impe-

gnato ad operare una scelta tra soluzioni alternative ed adotterà quella a cui attribuisce il grado di fiducia più elevato.

Ma il grado di fiducia nel realizzarsi di un evento è proprio la misura della probabilità soggettiva di verificarsi di quell'evento (secondo l'impostazione di Bayes, De Finetti, etc.). Quindi l'ingegnere opera sempre, sia pure talvolta inconsciamente, in un contesto probabilistico: e la progettazione può essere vista come un processo che implica un insieme di decisioni sotto incertezza. E per formalizzare i percorsi decisionali, è indispensabile l'impiego di metodi probabilistici.

L'incertezza è riconducibile a diversi fattori: l'incertezza intrinseca (relativa alla caratterizzazione di azioni, parametri geometrici, caratteristiche meccaniche e fisico-chimiche dei materiali); l'incertezza statistica; l'incertezza di modello; gli errori di misura; l'errore umano.

Il problema di come tenere conto di queste incertezze su basi scientifiche fu affrontato nei primi studi di Mayer (1926), Wierbicky (1936), Prot (1936) e in quelli successivamente sviluppati, negli anni '40, da Pugsley (1942), Freudenthal (1945), Levy (1949), Torroja (1948), Streletsky (1947), Rhianitsjn (1949), Johnson (1953) ed altri. Tuttavia questi studi, pur gettando

le basi per una nuova concezione della sicurezza strutturale fondata su basi probabilistiche, restavano praticamente confinati nell'ambito accademico.

I primi approcci per sviluppare in forma organizzata moderni concetti di analisi della sicurezza e introdurli nella pratica tecnica furono quindi esperiti da una Commissione insediata per iniziativa della Institution of Structural Engineering di Londra, e presieduta da sir Alfred Pugsley (1955). Successivamente possono ricordarsi la Commissione dell'A.S.C.E. (American Society of Civil Engineers), presieduta da O.G. Julian e da A.M. Freudenthal (1957), e la Commissione dell'International Council for Building Research, presieduta da Torroja (1958).

Un contributo fondamentale fu anche dato dai lunghi anni di insegnamento di A.M. Freudenthal alla Columbia University. Alla Scuola di Freudenthal si possono infatti attribuire alcuni dei maggiori studiosi ancora attivi nel settore: A.C. Cornell, M. Shinozuka, G.I. Schuëller, e molti altri. Più o meno contemporaneamente, un'altra importante Scuola si sviluppava in Russia, sotto la guida di V.I. Bolotin.

A.M. Freudenthal fu anche il promotore della prima *International Conference on Structural Safety and Reliability* (ICOSSAR), che si svolse a Washington, USA, nel 1969. Da questa ebbe origine una serie di Conferenze Mondiali, che dal 1977 si svolgono regolarmente ogni 4 anni in varie parti del mondo. L'ultima ICOSSAR si è tenuta a Roma nel Giugno 2005 (Presidente G.

Augusti; Segretario tecnico M. Ciampoli); la prossima si svolgerà a Osaka, Giappone, nel 2009.

Un'altra serie di Conferenze, ancora a ritmo quadriennale ed intervallate con le ICOSSAR, sono le *International Conference on Applications of Probability and Statistics* (ICASP), iniziate a Hong Kong nel 1971, di cui l'ultima ha avuto luogo a San Francisco nel 2003.

Le Conferenze ICOSSAR e ICASP raccolgono un numero sempre crescente di studiosi e di ingegneri; i volumi dei loro Atti sono testi fondamentali per seguire l'evoluzione e gli ultimi risultati delle trattazioni probabilistiche nell'ingegneria civile.

Ma ICOSSAR ed ICASP non sono le uniche Conferenze espressamente dedicate ai metodi probabilistici: ad esempio, si possono citare le *Probabilistic Mechanics Conference*, che di solito si svolgono in un'isola greca, le *Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability* dell'ASCE, e le *Working Conference* del Gruppo di Lavoro WG7.5 dell'IFIP.

Esistono inoltre varie riviste internazionali dedicate specificamente all'applicazione dei metodi probabilistici in ingegneria civile: tra esse, *Structural Safety*, *Probabilistic Engineering Mechanics* e, più di recente, *Structure & Infrastructure Engineering*. Le metodologie probabilistiche sono tanto più essenziali quanto più incerte sono le azioni: ecco perché sono fondamentali in Ingegneria Sismica ed Ingegneria del Vento, e trovano grande spazio nei relativi Congressi e riviste specializzate.

Gli studiosi italiani, e tra loro gli autori di questa comunicazione, sono stati sempre molto presenti ed attivi nello sviluppo del settore. Oltre alla organizzazione di una ICASP (Firenze, 1982) e di una ICOSSAR (Roma, 2005), si ricorda il volume *Probabilistic Methods in Structural Engineering* pubblicato nel 1984 da G. Augusti, A. Baratta e F. Casciati, tuttora molto citato in letteratura.

È infine da notare che i principi ed i metodi probabilistici sono stati inseriti negli ultimi anni, a diverso livello di sofisticazione, in tutte le nuove normative sulle costruzioni: un esempio è rappresentato dall'insieme degli *Structural Eurocodes* (EN 1990 - EN 1999), nei quali si stanno finalmente concretizzando le pionieristiche intuizioni di F. Levi, J. Ferry-Borges ed altri.

In questa memoria, nella impossibilità di riassumere tutti i recenti sviluppi delle applicazioni probabilistiche e dello studio dei rischi in ingegneria, si illustrano alcuni argomenti che si ritengono particolarmente significativi ed aperti a importanti sviluppi.

Dinamica Stocastica

Sin dai primi tentativi di impostare il problema della sicurezza delle strutture su base probabilistica, la Dinamica Stocastica si è evidenziata come uno strumento di modellazione ed analisi insostituibile in tutti i casi in cui l'evoluzione della struttura nel tempo dipende da eccitazioni variabili nel tempo ed interagisce con queste. Negli ultimi cinquanta anni, la tematica si è evoluta

ampiamente, estendendosi dalla Meccanica alla Ingegneria, e contribuendo, oramai in modo decisivo, all'analisi ed alla soluzione di una vasta gamma di problemi normativi, progettuali e di verifica, che spaziano dalla Ingegneria Sismica, all'Ingegneria del Vento, all'Ingegneria delle Vibrazioni.

In particolare, la capacità di applicazione della metodologia probabilistica a problematiche fino a qualche decennio fa impenetrabili alla modellazione aleatoria, quali i problemi caratterizzati da non linearità significative (in particolare i modelli di comportamento elasto-plastici che sono essenziali nell'analisi delle strutture dell'ingegneria civile), ha reso possibile formulare - e quindi risolvere - in maniera più corretta molte questioni, la cui trattazione in ambito deterministico non può per sua natura fornire risposte soddisfacenti.

Un contributo notevole alla soluzione di tali problematiche proviene dallo sviluppo dei metodi di simulazione, a partire dal classico Metodo MonteCarlo, che consentono di costruire scenari evolutivi probabili dei fenomeni considerati; si tratta comunque di metodi che sono di portata più generale e non specifici della Dinamica Stocastica.

Volendo sintetizzare le metodologie di base attualmente disponibili, da quella storicamente più consolidata relativa all'analisi del comportamento lineare delle strutture, alle metodologie più recenti tendenti alla risoluzione di modelli non lineari e isteretici, si può fare riferimento, per semplicità, ad un oscillatore ad un grado di libertà (SDOF); la

forzante sarà individuata in una funzione aleatoria $\tilde{a}(t)$ di secondo ordine, cioè completamente descritta dalle funzioni di valor medio e di autocorrelazione.

Se si risolve l'equazione del moto di un sistema SDOF lineare, soggetto alla forzante $\tilde{a}(t)$, con condizioni iniziali deterministiche, si rileva che l'aleatorietà della risposta è tutta concentrata nell'integrale particolare.

La soluzione dell'equazione del moto si identifica dunque nella caratterizzazione di tale funzione aleatoria, le cui caratteristiche di secondo ordine sono immediatamente note in funzione delle corrispondenti caratteristiche della forzante.

Se la forzante è Gaussiana, la caratterizzazione al secondo ordine definisce completamente, fino ad un ordine comunque grande, sia la forzante che la risposta, che è anch'essa Gaussiana. In caso contrario, dovendo la forzante stessa essere identificata in maniera più accurata, è possibile calcolare i momenti di ordine più elevato della risposta.

Nel caso di un sistema SDOF non lineare, si rileva che una classe di funzioni aleatorie molto studiata ed ampiamente applicata è quella dei processi di Markov, in cui ciò che accade ad un

$$\frac{\partial p_u(u, \dot{u}; t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \dot{u}} [p_u(u, \dot{u}; t)g(u, \dot{u}; t)] - \frac{\partial}{\partial u} [p_u(u, \dot{u}; t)\dot{u}] + \frac{1}{2} I(t) \frac{\partial^2 p_u(u, \dot{u}; t)}{\partial \dot{u}^2}$$

la cui soluzione può essere perseguita attraverso metodi numerici quali le differenze finite o gli elementi finiti, o metodi più specifici quali la *chiusura di momenti* o *cumulanti* e/o la *chiusura entropica*.

certo istante t è condizionato solo da ciò che si è verificato in un istante immediatamente precedente, e non dall'intera storia del processo.

Poiché questo è proprio ciò che accade in un fenomeno di risposta dinamica, la teoria dei processi di Markov trova un campo molto fertile proprio nei problemi di Dinamica Stocastica non lineare, allorché la forzante, debolmente autocorrelata in rapporto ai tempi di risposta del sistema SDOF (in pratica assimilabile ad uno shot-noise con funzione intensità $I(t)$ nota), giustifica l'aspettativa che la risposta sia appunto un processo Markoviano. In tal caso la densità di probabilità istantanea della risposta congiunta in spostamento e velocità, che sono le componenti di un vettore Markoviano, è ben individuata, almeno sotto il profilo formale. Detta infatti $g(u, \dot{u})$ la forza di richiamo dell'oscillatore, genericamente non lineare nelle variabili spostamento e velocità, l'equazione del moto si scrive nella forma:

$$\ddot{u} + g(u, \dot{u}) = \tilde{a}(t)$$

e la densità di probabilità istantanea al tempo t , $p_{u\dot{u}}(u, \dot{u}; t)$, è retta dall'equazione di Fokker-Planck:

Considerata la difficoltà di pervenire a soluzioni esatte nel caso di un oscillatore non lineare, spesso è necessario ricorrere a procedimenti approssimati, tra cui, principalmente, il *metodo della superficie di risposta*, la *linearizzazione*

equivalente, i metodi perturbativi. Altri metodi per la soluzione approssimata dell'equazione del moto (*stochastic averaging, chiusura dei momenti, ...*) di un oscillatore non lineare si trovano in letteratura, e richiedono trattazioni specifiche.

Progettazione basata sulle prestazioni

Secondo gli orientamenti più attuali, la progettazione strutturale è basata sul conseguimento di obiettivi diversificati. Nel caso, ad esempio, delle costruzioni in zona sismica, gli obiettivi possono essere: (a) prevenire il danneggiamento non strutturale, in occasione di eventi sismici di bassa intensità, che possano verificarsi di frequente durante la vita utile della struttura; (b) prevenire il danneggiamento strutturale, limitando quello non strutturale, in occasione di eventi di moderata intensità, che possano verificarsi meno di frequente; (c) scongiurare il rischio di collasso strutturale in occasione di terremoti di forte intensità, che rappresentino eventi rari ma possibili.

Se si analizzano con attenzione questi obiettivi, si riconosce che ognuno di essi associa la prescrizione di un comportamento, ovvero di una prestazione della struttura, ad un livello dell'azione sismica, quantificato da un'intensità con diversa frequenza di accadimento.

Attualmente, diverse normative antisismiche seguono questa impostazione, anche se solo in alcune di esse gli obiettivi prestazionali sono citati esplicitamente. In alcune normative, quali la EN 1998, questi obiettivi si identificano con

il rispetto di alcuni stati limite. Il metodo di progetto adottato prevede l'applicazione di coefficienti parziali di sicurezza (moltiplicatori delle azioni e divisori delle resistenze), calibrati (in teoria mediante una procedura probabilistica, ma più frequentemente tramite il giudizio di esperti) in modo da garantire determinati livelli di affidabilità.

Questo metodo, se da una parte riconosce il carattere aleatorio sia dell'azione, sia della valutazione della prestazione strutturale, dall'altra non consente al progettista di controllare - e tanto meno di comunicare al committente - il livello di protezione della costruzione nei confronti di un evento che è aleatorio nelle sue modalità, ma statisticamente certo nel suo verificarsi.

Invece, altre normative adottano esplicitamente un approccio totalmente probabilistico, la Progettazione Sismica Basata sulle Prestazioni (Performance-Based Seismic Design - PBS), che è una filosofia di progettazione che parte dalla definizione di alcuni obiettivi prestazionali (funzione della tipologia strutturale e della destinazione funzionale), e stima il livello di confidenza con il quale la struttura è in grado di raggiungere tali obiettivi.

Normative o raccomandazioni quali Vision 2000, FEMA-273, FEMA-350 tendono ad una formulazione molto spinta degli obiettivi prestazionali. Fanno riferimento infatti non più soltanto ai classici stati limite, ma ad una pluralità di stati compresi tra l'assenza di danno ed il collasso. FEMA-273, ad esempio, definisce quattro livelli di pre-

stazione dell'edificio (come combinazione di cinque livelli di prestazione strutturale e di quattro livelli di prestazione non strutturale) e quattro livelli dell'azione sismica, espressi in termini di probabilità di superamento in 50 anni (0.50; 0.20; 0.10; 0.02). Gli obiettivi prestazionali sono pertanto 16, essendo ottenuti dalla combinazione dei livelli di prestazione strutturale con i diversi livelli dell'azione sismica.

Nelle procedure applicative del PBSO, il punto di partenza per verificare l'adeguatezza della struttura in riferimento agli obiettivi prestazionali è la definizione di una variabile chiave DV (*Decision Variable*), quale ad esempio il superamento di uno stato limite o il verificarsi di perdite economiche superiori ad una certa entità. L'obiettivo

$$\bar{\epsilon}(DV) = \int G(DV|DM) \cdot |dG(DM|EDP)| \cdot |dG(DM|IM)| \cdot |d\bar{\epsilon}(IM)|$$

in cui:

- $\bar{\epsilon}(IM)$ è la frequenza media annua di superamento di un dato valore della IM e rappresenta la cosiddetta curva di pericolosità sismica. La variabile IM caratterizza la capacità di un terremoto di danneggiare una struttura. Essa può essere una caratteristica del moto del suolo, quale il picco di accelerazione o l'intensità di Arias, o dipendere anche dalla risposta strutturale, come ad esempio l'accelerazione spettrale valutata in corrispondenza del periodo fondamentale della struttura. È facilmente osservabile che, nella formulazione proposta, questo termine è l'unico collegamento con l'evento sismico, per cui tutte le informazioni relative a quest'ultimo, quali la

della progettazione si orienta quindi sulla descrizione probabilistica della DV attraverso la frequenza media annua di superamento $\bar{\epsilon}(DV)$ di un dato valore di essa.

La strategia di analisi adottata, nella formulazione più generale, prevede l'introduzione di tre variabili intermedie: una misura dell'intensità dell'azione sismica, IM (*Intensity Measure*); un parametro di risposta strutturale, EDP (*Engineering Demand Parameter*); una misura del livello di danno, DM (*Damage Measure*).

$\bar{\epsilon}(DV)$ viene ricavata, sotto alcune condizioni per quanto riguarda i parametri IM, EDP e DM, mediante l'applicazione del teorema della probabilità totale (Cornell & Krawinkler, 2002), attraverso l'espressione:

- magnitudo, la distanza del sito dalla sorgente, gli effetti locali, etc., sono portate in conto da questo termine. La possibilità di caratterizzare il potenziale distruttivo di un terremoto attraverso un unico parametro rende quindi possibile disaccoppiare l'analisi strutturale dallo studio della pericolosità sismica;
- $G(EDP|IM)$ è la probabilità che il parametro rappresentativo della risposta strutturale (EDP) ecceda un determinato valore, per un dato valore di IM. EDP si può identificare, ad esempio, con lo spostamento relativo d'interpiano o l'energia dissipata in una cerniera plastica, ed è quindi direttamente ricavabile dalle analisi strutturali. La stima di questo parametro è oggetto dell'analisi pro-

probabilistica della risposta strutturale ad azioni sismiche di data intensità;

- $G(DM|EDP)$ è la probabilità che il livello di danno (DM) ecceda un determinato valore, dato il valore di EDP. La variabile DM è una misura del danneggiamento, che descrive le manifestazioni fisiche e/o le conseguenze del fatto che EDP assuma un determinato valore. La valutazione di DM è uno dei punti più delicati per l'applicazione del PBSD: è infatti molto difficile correlare gli scenari di danno e di funzionalità compromessa con i valori di EDP forniti dalle analisi strutturali;

- $G(DV|DM)$ infine è la probabilità che la variabile decisionale superi un valore specifico, per un dato valore di DM. La stima di questo termine è l'oggetto dell'analisi probabilistica delle perdite.

L'applicazione pratica del PBSD presenta tuttora notevoli ostacoli, il superamento dei quali è oggetto di molti studi in corso.

Attualmente inoltre si sta tentando di estendere la progettazione basata sulle prestazioni al caso delle strutture esposte ad altri rischi, quali il rischio eolico.

Progettazione in presenza di degrado

Il degrado strutturale, dovuto sia all'esposizione ad un ambiente aggressivo, sia all'usura, sia ad un uso o ad una manutenzione impropri, può causare significative riduzioni delle capacità prestazionali delle strutture.

Queste variazioni sono aleatorie, così come sono aleatorie le condizioni alle quali il sistema è sottoposto nel tempo. Di conseguenza, la valutazione del-

la sicurezza dei sistemi strutturali soggetti a degrado non può che essere affrontata mediante le metodologie proprie delle teorie probabilistiche.

La necessità di considerare gli effetti del degrado, ravvisata negli ultimi decenni anche per le strutture in calcestruzzo, ha comportato rilevanti modifiche nelle più recenti impostazioni della progettazione strutturale: ai progettisti, che, sino a pochi anni fa, si riteneva esaurissero i loro compiti con il collaudo, si richiede infatti di garantire che le prestazioni richieste siano fornite in un arco di tempo economicamente vantaggioso, e quindi la valutazione della sicurezza del sistema soggetto a degrado.

Tale valutazione è particolarmente difficoltosa: l'intensità e l'evoluzione del degrado dipendono infatti da molti fattori, tra cui il progetto strutturale, la scelta dei materiali, la qualità della costruzione, la presenza e l'influenza di agenti aggressivi legati all'ambiente di esposizione ed all'esercizio, il valore di progetto della vita utile, ovvero del periodo di tempo in cui la struttura deve essere in grado di fornire le prestazioni richieste.

Per valutare gli effetti del degrado strutturale, sono stati condotti negli ultimi anni numerosi studi teorici e sperimentali, che hanno perseguito sostanzialmente due obiettivi: verificare che le strutture siano in grado di fornire le prestazioni richieste in relazione alle condizioni di esposizione e di esercizio; pianificare i programmi di manutenzione e riparazione, da ottimizzare anche rispetto alla stima dei costi associati alla

vita utile prevista. Per garantire un valore adeguato della affidabilità durante la vita utile, è possibile adottare due approcci. Il primo ha l'obiettivo di inibire lo sviluppo dei meccanismi di degrado, modificando l'ambiente di esposizione e/o adottando strategie di protezione o materiali non reattivi; il secondo quello di controllare gli effetti del degrado.

Questo secondo approccio richiede l'identificazione di obiettivi prestazionali che possono essere (I) direttamente posti in relazione ai meccanismi di degrado, definendo valori di soglia dei loro effetti, oppure (II) espressi in termini di effetti meccanici del degrado. La formulazione di stati limite correlati ad obiettivi del secondo tipo è più usuale nella progettazione corrente; tuttavia anche quella di stati limite correlati ad obiettivi del primo tipo è stata oggetto di studio ed ha fornito interessanti applicazioni (ad esempio, nell'ambito del progetto EURO Brite EuRam III *DuraCrete*, 1997/2000).

Nel valutare le prestazioni, o di una nuova costruzione con l'obiettivo di stimare il valore atteso della sua vita utile, o di una costruzione esistente con l'obiettivo di estenderne la vita utile o a seguito del manifestarsi di danni, sono stati quindi affrontati i seguenti problemi:

a) l'identificazione di modelli probabilistici dei meccanismi di degrado e dei loro effetti strutturali, in relazione alle condizioni iniziali e di esercizio, alla presenza di agenti aggressivi ed alla loro natura, ed alle azioni ambientali;

b) l'identificazione di modelli stocastici sia delle prestazioni degli elementi strutturali, sia delle azioni a cui sono soggetti;

c) la formulazione di procedure affidabilistiche per la valutazione delle prestazioni attuali e future degli elementi strutturali.

Con riferimento al punto a), si deve notare che gli effetti dei meccanismi di degrado sono tuttora noti spesso solo in termini qualitativi: sono quindi modellati attraverso relazioni semplificate, con parametri calibrati sulla base di risultati sperimentali. Tuttavia, i risultati sperimentali sono ottenuti da prove di breve durata, mentre i modelli analitici devono essere in grado di descrivere fenomeni a lungo termine; inoltre, gli effetti di interazione tra i diversi meccanismi di degrado non possono essere ancora presi in conto propriamente, se non in maniera semplificata.

Con riferimento al punto b), si deve notare che le prestazioni di un elemento strutturale sono generalmente valutate confrontando il suo stato con alcuni stati limite. Pertanto la stima della affidabilità di un elemento soggetto a degrado nel tempo richiede l'identificazione di modelli stocastici almeno della resistenza e della rigidità dell'elemento. Tali caratteristiche devono essere correlate all'evoluzione del degrado attraverso relazioni appropriate allo stato limite considerato. È difficile attribuire a queste relazioni una formulazione analitica: ma questo è un vero problema, perché nella valutazione dell'affidabilità di un sistema, le pro-

prietà meccaniche sono le grandezze di interesse ingegneristico, mentre la valutazione degli effetti del degrado è solo un mezzo per determinarne la variazione. Spesso quindi, per ricavare la descrizione probabilistica della resistenza e della rigidezza di un elemento strutturale sono impiegate tecniche di simulazione MonteCarlo, eventualmente di tipo avanzato.

Infine, con riferimento al punto c), si rileva che sono disponibili alcune procedure probabilistiche che forniscono l'evoluzione nel tempo della affidabilità di un sistema. Queste procedure sono indispensabili per ottimizzare le strategie di ispezione, manutenzione e riparazione delle costruzioni esistenti.

Tali ispezioni, manutenzioni e riparazioni erano già eseguite di routine su diverse strutture soggette a degrado: negli ultimi decenni sono stati però sviluppati, in particolare per i sistemi territoriali di infrastrutture, programmi di gestione delle strutture soggette a degrado, che forniscono criteri, regole e strumenti quantitativi e permettono di stabilire gli intervalli ottimali di ispezione, manutenzione e riparazione, sulla base dei costi attesi nella vita utile e di altri requisiti.

Quando un elemento strutturale è sottoposto ad ispezione, a manutenzione o è riparato, le distribuzioni di probabilità di resistenza e rigidezza e la valutazione dell'affidabilità strutturale (tutte definite, ad esempio, sulla base della conoscenza a priori delle caratteristiche dei materiali, delle tecnologie costruttive e delle azioni agenti), pos-

sono essere aggiornate, per tenere conto delle informazioni acquisite o degli interventi attuati.

Tale aggiornamento viene eseguito nell'ambito dell'inferenza bayesiana, che permette di utilizzare informazioni derivate da fonti differenti, quali il controllo di qualità, il collaudo, le prove sperimentali, le ispezioni periodiche o il monitoraggio in continuo. L'inferenza bayesiana viene quindi applicata ad aggiornare sia direttamente la distribuzione di probabilità di una variabile, sia la stima dell'affidabilità di un elemento.

Le risorse economiche e tecniche disponibili per il programma di ispezione/manutenzione devono essere utilizzate in modo razionale, cioè ottimizzate. Per sviluppare una strategia ottimale di ispezione/manutenzione nella vita utile di esercizio, è quindi necessario valutare i costi delle ispezioni e dei possibili interventi ed i benefici che ne conseguono, in termini di affidabilità strutturale o di altre funzioni obiettivo o, meglio, in una logica multi-obiettivo.

Con riferimento alle risorse economiche per la manutenzione, ad esempio, si deve considerare il fatto che esse possono essere (I) completamente disponibili ad un certo istante della vita utile o (II) disponibili in quantità limitate ad istanti diversi. Nel secondo caso, la sequenza temporale delle spese può essere definita a priori, o risultare da un processo di ottimizzazione.

Nell'applicazione delle procedure citate sussistono alcuni problemi cruciali, a cui ancora oggi è possibile dare solo

risposte di tentativo. Tra essi, quando ritenere accettabile lo stato di una struttura, quali siano i valori ammissibili delle probabilità di superamento degli stati limite ed in quale maniera calibrare i valori ammissibili di tali probabilità, in relazione agli obiettivi della valutazione: l'estensione della vita utile, la variazione di destinazione funzionale, etc. La discussione su tali argomenti resterà aperta per molto tempo e, forse, solo una decisione "politica", supportata da studi affidabili, potrà fornire risposte adeguate.

Ottimizzazione basata sull'affidabilità

È oramai largamente riconosciuto il fatto che le conseguenze più gravi di un evento disastroso, valutate in termini sia puramente economici che di riduzione della qualità della vita, non sono (almeno in molti casi e soprattutto in ambiti fortemente antropizzati ed industrializzati) le conseguenze dirette dei danni subiti dalle costruzioni, ma piuttosto quelle indirette, legate alla interruzione, a volte protratta nel tempo, delle attività produttive e della vita sociale. Effetti di questo tipo si hanno ad esempio quando, per effetto di un evento sismico, si verifica la messa fuori servizio di un sistema territoriale di infrastrutture.

Questa considerazione ha motivato lo sviluppo di una serie di studi di ottimizzazione della progettazione sulla base di valutazioni di affidabilità.

A titolo di esempio si citano gli studi che affrontano il problema della riduzione del rischio sismico dei sistemi

territoriali di infrastrutture esistenti (in particolare, reti stradali) mediante interventi di adeguamento preventivo.

Nella programmazione di tali interventi, è necessario adottare un approccio a sistema: infatti, le conseguenze del collasso di un elemento vulnerabile di un sistema territoriale di infrastrutture dipendono dal ruolo e dall'importanza dell'elemento nella logica di funzionamento dell'intero sistema.

La riduzione del rischio sismico potrebbe essere pianificata definendo un valore di soglia della probabilità di interruzione della funzionalità del sistema, e quindi valutando il tipo di interventi di adeguamento e l'ammontare delle risorse economiche necessarie a garantire che il valore effettivo di tale probabilità sia inferiore a quello di soglia per un intervallo di tempo assegnato. Un approccio di questo tipo si adotta infatti in genere nel prescrivere e progettare gli interventi di adeguamento di singoli edifici.

Più razionalmente, il problema è stato affrontato come un problema di ottimizzazione, ovvero ricercando la distribuzione di interventi di adeguamento degli elementi vulnerabili del sistema che ottimizza una assegnata funzione obiettivo. Indicando con C_{tot} l'ammontare delle risorse economiche impiegate a tal fine (che è una quantità deterministica, una volta che sia fissata) e con G_{tot} il *guadagno* complessivo (o la riduzione delle perdite) conseguente all'esecuzione del programma di attenuazione del rischio (che è invece sempre una quantità aleatoria), l'otti-

mizzazione può essere perseguita in tre modi alternativi, ovvero:

- minimizzando la somma delle spese e delle perdite attese, ovvero minimizzando l'entità $(C_{tot} - G_{tot})$;
- massimizzando il rapporto tra il guadagno complessivo e la spesa totale G_{tot}/C_{tot} ;
- invertendo il problema, ovvero assumendo che il quantitativo di risorse a disposizione per gli interventi di adeguamento sia limitato (come accade di solito), e massimizzando il guadagno totale che si consegue per una assegnata spesa totale $(G_{tot} | C_{tot})$.

Quest'ultimo approccio, che sembra più realistico, richiede di affrontare un problema di *allocazione ottimale delle risorse economiche* disponibili per l'adeguamento sismico preventivo di un sistema territoriale di infrastrutture.

Seguendo tale linea di pensiero, alcuni ricercatori hanno affrontato il problema della scelta degli elementi vulnerabili sui quali intervenire come un problema di definizione di una scala di

priorità. Tuttavia, la priorità può cambiare sia con l'ammontare delle risorse disponibili che in relazione alla funzione obiettivo prescelta: di conseguenza, agli autori della presente memoria è sembrato che considerare l'intero sistema allo stesso tempo possa dare risultati più significativi.

Nell'ottimizzazione, sono state prese in esame diverse funzioni obiettivo: la probabilità di mantenere attiva almeno una connessione tra un sito origine ed un sito destinazione in caso di evento sismico, la capacità della rete stradale nella fase di emergenza che segue il verificarsi dell'evento, il tempo di mancato esercizio per effettuare le necessarie riparazioni.

Inoltre, poiché a questi obiettivi possono corrispondere distribuzioni di interventi differenti, è risultato necessario operare in una logica multi-obiettivo, adottando una strategia di analisi decisionale ed individuando le soluzioni che soddisfano "al meglio" tutti gli obiettivi.

