
BMS

**Manuale
Modelli di Calcolo**

**MA.GG.03
vers. 9.1**

20 Marzo 2013

SOMMARIO

Il presente manuale rappresenta una guida generale ai modelli di calcolo del BMS della Provincia Autonoma di Trento e contiene (1) la descrizione dei modelli di calcolo utilizzati (2) una serie di istruzioni operative per la gestione dei modelli.

RIFERIMENTI

MA.GG.01: Guida generale - Sistema ispettivo
MA.GG.02: Schede elementi

**SGS/SOSF
PAT**

Sistema per la gestione dei manufatti stradali della Provincia Autonoma di Trento.
Gestione del sistema a cura del Servizio Gestione Strade / Servizio Opere Stradali e Ferroviarie e del Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento.

INDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | GENERALITÀ | 4 |
| 1.1 | PREMESSA | 4 |
| 1.2 | STRUTTURA DEL SISTEMA DI GESTIONE | 4 |
| 1.2.1 | Informazioni del sistema | 4 |
| 1.2.2 | Alimentazione del DataBase ad attori coinvolti nella gestione | 5 |
| 1.2.3 | Procedure | 6 |
| 1.2.4 | Modelli di calcolo | 6 |
| 1.3 | OGGETTO DEL MANUALE | 7 |
| 1.4 | AGGIORNAMENTI DEL PRESENTE MANUALE | 7 |
| 1.5 | RIFERIMENTI | 7 |
| 1.6 | UNITÀ DI MISURA | 7 |
| 2 | CALCOLO DEL CONDITION STATE DEL PONTE | 8 |
| 2.1 | INTRODUZIONE | 8 |
| 2.2 | ALGORITMO | 8 |
| 3 | VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI UN PONTE | 11 |
| 3.1 | MISURA DELLO STATO DI SICUREZZA DI UN PONTE | 11 |
| 3.1.1 | Probabilità di collasso | 11 |
| 3.1.2 | Indice di affidabilità | 11 |
| 3.1.3 | Moltiplicatore critico dei carichi | 12 |
| 4 | CALCOLO DELL' INDICE DI PRIORITÀ D'INTERVENTO | 14 |
| 4.1 | INDICE DI PRIORITÀ | 14 |
| 4.2 | COEFFICIENTE DI RISCHIO | 15 |
| 4.3 | MODELLO DI DEGRADO | 15 |
| 4.3.1 | Implementazione della matrice di transizione | 17 |
| 4.4 | MODELLO DI MANUTENZIONE | 18 |
| 4.4.1 | Manutenzione preventiva | 18 |
| 4.4.2 | Ristrutturazione | 19 |
| 4.4.3 | Ricostruzione | 19 |
| 4.5 | MODELLO DI COSTO | 19 |
| 4.5.1 | Costo di ricostruzione | 19 |
| 4.5.2 | Costo di ispezione | 20 |
| 4.5.3 | Costo di manutenzione preventiva | 20 |
| 4.5.4 | Costo di ristrutturazione | 20 |
| 4.5.5 | Costo di fuori-servizio | 20 |
| 4.5.6 | Costo per l'utente | 20 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.6 | PROBABILITÀ DI COLLASSO CUMULATIVA | 20 |
| 5 | CALCOLO DELL'ETÀ APPARENTE DEL PONTE | 22 |
| 5.1 | INTRODUZIONE | 22 |
| 5.2 | ALGORITMO..... | 22 |
| 6 | VALUTAZIONE AL TRANSITO DEI CARICHI ECCEZIONALI (VERIFICHE DI LIVELLO 0) | 26 |
| 6.1 | APPROCCIO..... | 26 |
| 6.1.1 | Transito libero | 27 |
| 6.1.2 | Transito al centro della carreggiata | 27 |
| 7 | GESTIONE OPERATIVA DEL SISTEMA..... | 31 |
| 7.1 | COSTO ES..... | 31 |
| 7.2 | COSTO US..... | 31 |
| 7.3 | DEGRADO | 32 |
| 7.4 | MANUTENZIONE | 32 |
| 7.5 | COEFF. RIVALUTAZIONE | 33 |
| 7.6 | PANNELLO | 33 |
| 8 | RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | 34 |
| 9 | GLOSSARIO | 35 |

1 GENERALITÀ

1.1 PREMESSA

Il presente manuale costituisce parte del sistema di gestione dei manufatti stradali della Provincia Autonoma di Trento (PAT).

Questo documento è stato redatto dal Gruppo di Lavoro BMS del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale dell'Università degli Studi di Trento nell'ambito della convenzione di ricerca con la PAT: *Sviluppo di un sistema informatizzato per la gestione dei manufatti stradali*.

Il Gruppo di Lavoro BMS è composto da: Prof. R. Zandonini, Prof. P. Zanon, Dr. D. Zonta, Dr. F. Bortot, Ing. D. Capraro, Ing. A. Lanaro, Ing. E. Debiasi. Questo manuale è stato sviluppato dagli ingegneri Capraro, Lanaro e Debiasi con la supervisione del Dr. Zonta.

Il documento è stato approvato dal Servizio Gestione Strade e dal Servizio Opere Stradali e Ferroviarie della PAT.

1.2 STRUTTURA DEL SISTEMA DI GESTIONE

Lo scopo del sistema di gestione dei manufatti stradali (o *Bridge Management System*, BMS) della PAT è fornire all'ente gestore le informazioni necessarie a programmare in maniera ottimale la manutenzione e il controllo delle strutture del patrimonio, tenendo conto dei fattori strutturali, economici e sociali. La struttura generale del BMS della PAT è rappresentata in Figura 1.1. Più in dettaglio, il sistema è basato su:

- un DataBase;
- un sistema di procedure;
- modelli di calcolo.

L'interazione fra i diversi *attori*, coinvolti nelle operazioni di gestione, e il sistema avviene in tempo reale attraverso un'applicazione web.

1.2.1 Informazioni del sistema

Le informazioni su cui si basa il funzionamento del sistema sono contenute nel DataBase informatico e comprendono:

- dati di **inventario**: comprendono l'identificazione del ponte, la sua localizzazione geografica, aspetti amministrativi, informazioni sulla costruzione e sugli interventi passati; comprendono inoltre un modello elementare del ponte (dati di II livello);
- informazioni sullo **stato di condizione** (CS): definiscono lo stato di degrado del ponte sulla base degli elementi del modello elementare;
- informazioni sull'**affidabilità**: definiscono lo stato di sicurezza del ponte e consistono in un insieme di indici di affidabilità β , ognuno associato ad uno Stato Limite Ultimo;
- dati **network-level**: si tratta di informazioni che non fanno riferimento ad un singolo ponte ma sono relative all'intero patrimonio o ad un gruppo di ponti con lo stesso schema strutturale o tecnologia costruttiva; sono dati *network-level*, per esempio, i costi unitari di costruzione e di ristrutturazione, le matrici di transizione che definiscono i modelli di degrado.

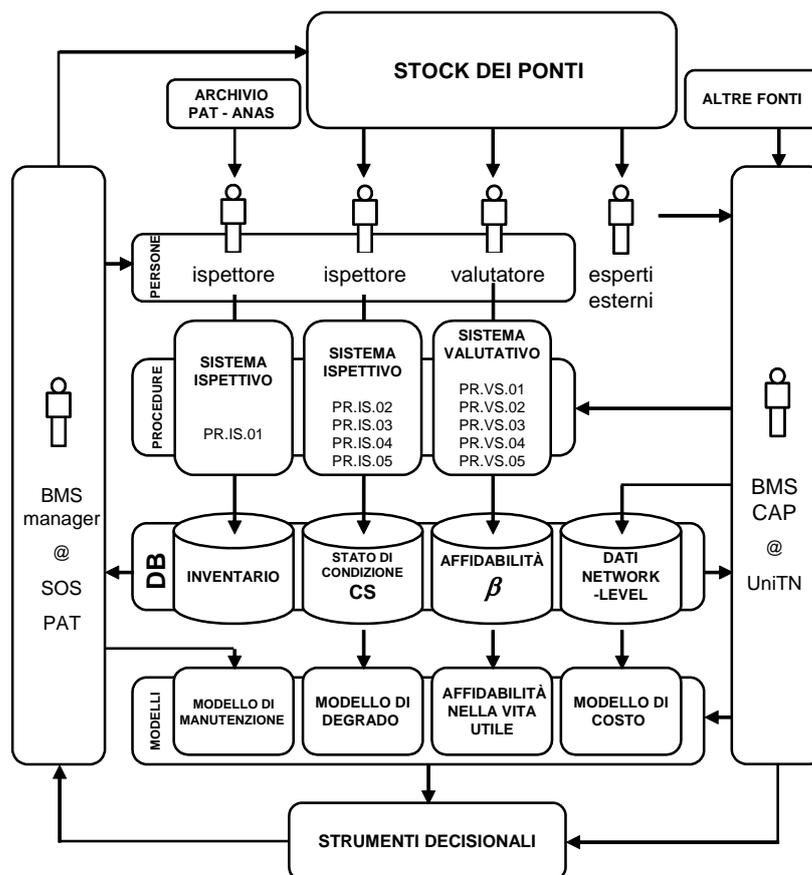


Figura 1.1. Struttura del sistema di gestione dei manufatti stradali della PAT.

1.2.2

Alimentazione del DataBase ad attori coinvolti nella gestione

I dati vengono aggiornati all'interno del DataBase attraverso processi esecutivi regolati da procedure e supportati da strumenti informatici. Il BMS distingue in dettaglio i seguenti sottosistemi di aggiornamento delle informazioni:

- **sistema ispettivo** per l'**inventario** dei ponti: regola l'accatastamento di ponti nuovi o esistenti; l'attore incaricato dell'inserimento dei dati di inventario nel DataBase è genericamente indicato come *ispettore*;
- **sistema ispettivo** per la valutazione dello **stato di condizione** dei ponti: è basato su ispezioni visive, di norma periodiche, che mirano a definire in maniera qualitativa e quantitativa lo stato di degrado delle opere; anche l'attore incaricato della valutazione dello stato di condizione è genericamente indicato come *ispettore*;
- **sistema valutativo**: regola la valutazione formale dello stato di sicurezza e della capacità portante dei ponti; la valutazione formale è non periodica e viene attivata dal Manager del sistema solo quando questo risulta necessario o opportuno (per esempio quando lo stato di condizione del ponte evidenziato nel corso di un'ispezione periodica fa sorgere dubbi sulla sicurezza dell'opera); l'attore incaricato della valutazione è genericamente indicato come *valutatore*.

Il *Manager* del sistema sovrintende a tutte le operazioni decisionali, determina l'esistenza dei ponti all'interno del BMS, attiva e valida le ispezioni e le valutazioni, definisce i parametri di calcolo nei modelli decisionali.

L'aggiornamento delle procedure e dei modelli di calcolo è attualmente svolto dal *Centro di Aggiornamento Permanente* dell'Università di Trento.

1.2.3

Procedure

Il funzionamento del sistema di gestione è basato su un insieme di procedure che comprende manuali generali e specifiche procedure esecutive legate ai processi descritti al punto 1.2.2. I manuali generali includono:

- MA.GG.01: Guida generale - Sistema ispettivo
- MA.GG.02: Schede elementi
- MA.GG.03: Modelli di calcolo
- MA.GG.04: Modalità operative per la gestione del sistema

Le procedure del sistema ispettivo per l'inventario dei ponti includono:

- PR.IS.01: Esecuzione ispezioni d'inventario

Le procedure del sistema ispettivo per la valutazione dello stato di condizione includono:

- PR.IS.02: Esecuzione ispezioni superficiali
- PR.IS.03: Esecuzione ispezioni principali
- PR.IS.04: Esecuzione ispezioni principali approfondite
- PR.IS.05: Esecuzione ispezioni speciali
- PR.PS.01: Norme generali per l'esecuzione di prove di caratterizzazione sperimentale di ponti esistenti

Le procedure del sistema valutativo includono:

- PR.CE.01: Valutazione della capacità al transito di carichi eccezionali su ponti a travata: livelli 1, 2 e 3
- PR.CE.02: Valutazione della capacità al transito di carichi eccezionali su ponti ad arco

Il sistema prevede inoltre le procedure per la gestione dell'inventario che includono:

- PR.GS.01: Gestione dell'inventario

1.2.4

Modelli di calcolo

Gli strumenti decisionali del sistema forniscono al Manager informazioni sull'opportunità e la convenienza economica di un intervento, attraverso il calcolo di *indici di priorità* α . La valutazione della priorità di intervento è basata su modelli di calcolo, che fanno uso delle informazioni registrate nel DataBase. I modelli implementati nel BMS sono:

- modello di **degrado**: predice lo stato di condizione futuro dei ponti;
- modello di **manutenzione**: definisce il piano di manutenzione degli elementi strutturali;
- modello di **costo**: stima i costi di manutenzione, ristrutturazione e ricostruzione;
- modello di **affidabilità**: predice l'evoluzione dello stato di sicurezza dei ponti sulla base del degrado e del piano di manutenzione.

1.3 OGGETTO DEL MANUALE

Il presente manuale rappresenta una guida generale ai modelli di calcolo del BMS della Provincia Autonoma di Trento e contiene:

1. la descrizione dei modelli di calcolo utilizzati;
2. una serie di istruzioni operative per la gestione dei modelli.

1.4 AGGIORNAMENTI DEL PRESENTE MANUALE

Il presente manuale è soggetto a periodici aggiornamenti. E' responsabilità dell'utilizzatore verificare che la presente versione sia la più aggiornata.

La versione più aggiornata è quella disponibile nelle pagine iniziali del sito del sistema di gestione dei manufatti stradali della PAT, in particolare all'interno della sezione *Procedure*. Le procedure possono essere visualizzate e stampate con Acrobat Reader®.

1.5 RIFERIMENTI

MA.GG.01: Guida generale - Sistema ispettivo
MA.GG.02: Schede elementi

1.6 UNITÀ DI MISURA

Se non diversamente specificato si utilizzano le unità di misura del Sistema Internazionale (SI).

2 CALCOLO DEL CONDITION STATE DEL PONTE

2.1 INTRODUZIONE

Il sistema informatico calcola, in modo automatico, il *condition state* di un ponte (CSponte) per il quale sia disponibile il risultato di un'ispezione principale.

Il condition state (o stato di condizione) di un ponte viene indicato da un numero che può variare da un valore minimo di 1.0 ad un valore massimo di 5.0. I valori limite denotano rispettivamente l'ottimo stato di condizione e il pessimo stato di condizione del ponte.

Durante un'ispezione principale vengono assegnati gli stati di condizione (CS) ad ogni elemento standard del ponte (si vedano i manuali e le procedure d'ispezione). Il sistema utilizza un algoritmo che si basa sui valori dei CS assegnati agli elementi standard nell'ultima ispezione. I parametri che regolano il calcolo del CSponte sono modificabili dall'utente.

2.2 ALGORITMO

Il CSponte è rappresentativo della condizione generale del ponte. Esso dà un giudizio immediato e intuitivo sulla condizione complessiva degli elementi strutturali che lo compongono. Il CSponte assieme all'età apparente della struttura e alle anomalie (principali e secondarie) costituisce un parametro chiave per stimare l'andamento del degrado, lo stato di condizione futuro e la pericolosità del ponte nei confronti degli utenti. Il calcolo di questo parametro si basa sul CS assegnato ad ogni elemento standard nell'ultima ispezione, tenendo conto, con opportuni coefficienti, dell'influenza che ogni elemento ha sulla condizione generale della struttura.

Il CSponte è rappresentato da un numero (con una cifra decimale) che varia da 1.0 a 5.0 a seconda che lo stato di conservazione della struttura sia buono o cattivo. Il numero dopo la virgola ha il solo compito di evidenziare quale sia l'andamento del numero principale.

| Tipo Struttura | Descrizione | Considerato | Non Considerato |
|----------------|---|-------------|-----------------|
| 1 | Elementi del piano viabile (soletta, giunti, ecc) | x | - |
| 2 | Elementi principali sovrastruttura (travi, archi, volte) | x | - |
| 3 | Elementi principali sottostruttura (pile, spalle) | x | - |
| 4 | Elementi secondari (travi secondarie, controventi di costruzione) | x | - |
| 5 | Accessori (parapetti, guardrail, ecc) | - | x |

L'algoritmo per il calcolo del CS_{ponte} attualmente utilizzato dal sistema prevede quattro step:

Primo step

Per ogni elemento standard del ponte si calcola un CS normalizzato rispetto al CS massimo scelto per il ponte (5 per tutti i ponti).

$$CS_N = \left[\frac{(CS - 1)}{(CS_{max} - 1)} \cdot (CS_{ponte\ max} - 1) \right] + 1$$

$$CS_{ponte\ max} = 5$$

Secondo step

Per ogni elemento standard si determina il tipo di struttura al quale l'elemento appartiene. Per ogni gruppo di elementi appartenenti alla struttura di tipo *i* si calcola il massimo CS normalizzato.

$$CS^{tipo_i}_{NMax} = \max \{ CS_{ESN_1}, \dots, CS_{ESN_n} \} \quad i = 1, \dots, 5$$

Terzo step

Ad ogni tipo di struttura viene assegnato un peso il cui valore varia a seconda dell'importanza che il tipo di struttura ha rispetto alla sovra- e sottostruttura del ponte (si veda tabella sottostante).

| Sovrastruttura | |
|----------------|---------------------------|
| Tipo Struttura | Coefficiente d'importanza |
| 1 | 25,00% |
| 2 | 70,00% |
| 3 | 0,00% |
| 4 | 5,00% |
| 5 | 0,00% |

| Sottostruttura | |
|----------------|---------------------------|
| Tipo Struttura | Coefficiente d'importanza |
| 1 | 25,00% |
| 2 | 0,00% |
| 3 | 70,00% |
| 4 | 5,00% |
| 5 | 0,00% |

Si calcolano il CS della sovrastruttura e il CS della sottostruttura secondo le seguenti formule:

$$CS_{sovrastuttura} = \sum_1^4 CS_{Nmax}^i \cdot \%^i_{sovrastuttura}$$

$$CS_{sottostruttura} = \sum_1^4 CS_{Nmax}^i \cdot \%^i_{sottostruttura}$$

dove CS_{Nmax}^i e $\%^i$ indicano il massimo stato di condizione normalizzato per il tipo di struttura *i* e il corrispondente coefficiente di importanza.

Il CS della sovrastruttura è riferito agli elementi principali della sovrastruttura (travi, volte, ecc); il CS della sottostruttura è riferito agli elementi principali della sottostruttura (pile, spalle, ecc).

Quarto step

Si calcola il CS_{ponte} come valore massimo tra i due CS della sovrastruttura e della sottostruttura.

$$CS_{ponte} = \max \{ CS_{sovrastuttura}; CS_{sottostruttura} \}$$

3 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI UN PONTE

3.1 MISURA DELLO STATO DI SICUREZZA DI UN PONTE

3.1.1 Probabilità di collasso

Lo stato di sicurezza di una struttura, secondo i recenti sviluppi della ricerca in campo di affidabilità strutturale, è misurato in termini probabilistici attraverso il calcolo della *probabilità di collasso* P_F , ovvero della probabilità di superamento di un dato stato limite Z .

Nell'ipotesi in cui la funzione di stato limite possa essere espressa come differenza fra capacità R (per esempio una resistenza) e domanda S (per esempio una condizione di carico), la probabilità di collasso si ottiene integrando la densità di probabilità congiunta f_{RS} associata a tutte le possibili situazioni per cui $R < S$:

$$P_F = \iint_{[R < S]} f_{RS}(R, S) dR dS$$

Il calcolo della probabilità di collasso P_F di una struttura viene normalmente effettuato considerando carichi con un periodo di ritorno paragonabile alla vita utile t_L della struttura, di solito posto pari a 50 anni. Durante questo periodo di tempo la struttura è soggetta ad un processo di degrado, del quale non si tiene normalmente conto nel calcolo probabilistico, assumendo che la struttura conservi nel tempo le caratteristiche di resistenza accertate al momento della valutazione.

3.1.2 Indice di affidabilità

Esprimendo la funzione di stato limite come differenza fra capacità e domanda ($Z=R-S$) e assumendo che R e S siano due variabili aleatorie con distribuzione normale, anche la funzione stato limite avrà una distribuzione normale i cui parametri (media e scarto) sono dati da:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S; \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

In questo caso la probabilità di collasso si può esprimere come:

$$P_F = P(Z < 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta)$$

essendo Φ la distribuzione cumulata normale standard e avendo definito l'indice di affidabilità β come il rapporto tra la media e lo scarto di Z .

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

Questo indice è un valore indipendente dall'unità di misura scelta per R e S ed è direttamente legato alla probabilità di collasso secondo le espressioni:

$$P_F = \Phi(-\beta); \quad \beta = -\Phi^{-1}(P_F)$$

Esiste pertanto una correlazione biunivoca tra l'indice di affidabilità β e la probabilità di collasso P_F . La tabella seguente riporta alcuni valori assunti da queste due quantità.

| β | P_F |
|---------|-----------------------|
| 0.00 | $5.00 \cdot 10^{-01}$ |
| 0.25 | $4.01 \cdot 10^{-01}$ |
| 0.50 | $3.09 \cdot 10^{-01}$ |
| 0.75 | $2.29 \cdot 10^{-01}$ |
| 1.00 | $1.59 \cdot 10^{-01}$ |
| 1.25 | $1.06 \cdot 10^{-01}$ |
| 1.50 | $6.68 \cdot 10^{-02}$ |
| 1.75 | $4.01 \cdot 10^{-02}$ |
| 2.00 | $2.28 \cdot 10^{-02}$ |
| 2.25 | $1.22 \cdot 10^{-02}$ |
| 2.50 | $6.21 \cdot 10^{-03}$ |
| 2.75 | $2.98 \cdot 10^{-03}$ |
| 3.00 | $1.35 \cdot 10^{-03}$ |
| 3.25 | $5.77 \cdot 10^{-04}$ |
| 3.50 | $2.33 \cdot 10^{-04}$ |
| 3.75 | $8.84 \cdot 10^{-05}$ |
| 4.00 | $3.17 \cdot 10^{-05}$ |
| 4.25 | $1.07 \cdot 10^{-05}$ |
| 4.50 | $3.40 \cdot 10^{-06}$ |
| 4.75 | $1.02 \cdot 10^{-06}$ |
| 5.00 | $2.87 \cdot 10^{-07}$ |

Per ogni ponte il sistema stima automaticamente l'indice di affidabilità per diversi stati limite. L'indice di affidabilità del ponte è definito come il minimo indice di affidabilità stimato per quel ponte.

Nel caso in cui le condizioni della struttura siano tali da richiedere una verifica più approfondita, il valutatore esegue una analisi della capacità portante e calcola l'indice di affidabilità del ponte seguendo la procedura del sistema valutativo PR.PS.05.

3.1.3

Moltiplicatore critico dei carichi

Una misura alternativa dell'affidabilità strutturale può essere effettuata attraverso il moltiplicatore critico dei carichi.

Per moltiplicatore critico dei carichi si intende il fattore di amplificazione θ dei carichi accidentali che porta la struttura al raggiungimento dello stato limite considerato. Esprimendo la funzione di stato limite come combinazione lineare dei carichi di progetto e della resistenza di calcolo, il moltiplicatore critico dei carichi può essere ricavato dalla seguente espressione:

$$R_d = \gamma_G G_k + \theta \gamma_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \theta \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ik}$$

dove G_k e Q_k rappresentano rispettivamente i carichi permanenti e i carichi accidentali, mentre γ e ψ sono i coefficienti di sicurezza e i coefficienti di combinazione dei carichi.

Esiste una correlazione tra il moltiplicatore critico dei carichi θ e l'indice di affidabilità β ottenuto dalla valutazione di sicurezza. L'indice di affidabilità è correlato al *fattore di sicurezza centrale*:

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S}$$

attraverso l'espressione:

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \cdot \gamma_0^2 + V_S^2}}$$

dove V_R e V_S rappresentano i coefficienti di variazione della resistenza R e della sollecitazione S .

Il fattore di sicurezza centrale γ_0 è correlato al *fattore di sicurezza caratteristico* γ_k attraverso l'espressione:

$$\gamma_0 = \frac{1 + kV_S}{1 - kV_R} \gamma_k$$

dove $k=1.645$ per distribuzioni normali. Il fattore di sicurezza caratteristico γ_k dipende da θ e dai coefficienti di sicurezza parziali. Sfortunatamente la relazione tra queste quantità non è diretta e la formulazione cambia a seconda della funzione di stato limite. Assumendo che lo stato limite possa essere formulato come $R_k / \gamma_R = \gamma_G G_k + \theta \gamma_Q Q_k$, una stima di γ_k si ottiene da:

$$\gamma_k = \gamma_R \cdot \gamma_Q \cdot \theta \cdot \left(\frac{\frac{\gamma_G G_k}{\theta \gamma_Q Q_k} + 1}{\frac{G_k}{Q_k} + 1} \right)$$

4 CALCOLO DELL' INDICE DI PRIORITÀ D'INTERVENTO

4.1 INDICE DI PRIORITÀ

A livello di network, le azioni di manutenzione sullo stock di ponti vengono ordinate per priorità di intervento.

La priorità di intervento viene assegnata automaticamente dal sistema al ponte che presenta l'indice di priorità maggiore. L'indice di priorità è formulato come:

$$\alpha = \frac{\Delta P_X(t_L)}{\Delta C} = \frac{P_{X|a}(t_L) - P_X(t_L)}{\Delta C}$$

dove $P_X(t_L)$ è la probabilità cumulata di accadimento di un evento inaccettabile X nello stock nel periodo $(0, t_L]$, a è la specifica azione effettuata sulla struttura (ristrutturazione o ricostruzione), ΔC è il costo cumulato attualizzato associato all'implementazione dell'azione a .

Dal punto di vista ingegneristico, un collasso strutturale è tipicamente un evento inaccettabile. In questo caso $P_X(t_L)$ coincide con la probabilità di collasso $P_F(t_L)$ cumulata nel tempo. In generale, però, la definizione dell'evento inaccettabile spetta al proprietario della struttura e dipende dalla propria politica di gestione.

Assumendo che i possibili modi di collasso F_i siano eventi tra loro non correlati, la probabilità cumulata di accadimento di un evento inaccettabile può essere valutata con la seguente espressione:

$$P_X(t_L) = \sum_i P_{X|F_i} P_{F_i}(t_L)$$

essendo $P_{X|F_i}$ la probabilità di accadimento di un evento inaccettabile condizionata all'accadimento del tipo di collasso F_i . $P_{X|F_i}$ può essere considerato come un coefficiente di rischio proprio della struttura.

Per il calcolo dell'indice di priorità, il sistema definisce due diversi programmi di manutenzione:

- Programma A: viene eseguita un'azione di ristrutturazione all'istante attuale;
- Programma B: viene eseguita un'azione di ricostruzione all'istante attuale.

In entrambi i programmi, la manutenzione ordinaria viene eseguita periodicamente, con frequenza assegnata dal manager.

Per ogni programma di manutenzione viene calcolato il corrispondente indice di priorità (α_A e α_B). L'indice di priorità del ponte è definito come il massimo tra α_A e α_B .

$$\alpha = \max(\alpha_A, \alpha_B)$$

La stima dell'indice di priorità richiede la definizione di modelli di degrado, di manutenzione e di costo per calcolare i parametri $P_F(t_L)$, $P_{X|F_i}$ e ΔC per ogni tipo di azione.

4.2

COEFFICIENTE DI RISCHIO

Il coefficiente di rischio $P_{X|Fi}$ dipende dalle conseguenze del collasso ed ha un significato analogo a quello del coefficiente di importanza nei metodi di calcolo semiprobabilistici. Esso è definito in funzione dell'area di impalcato, del numero di veicoli giornalieri che percorrono la struttura e del tipo di collasso.

Nel caso in cui il collasso avvenga nella struttura principale, il coefficiente di rischio assume i valori riportati nella tabella seguente:

| Struttura Principale | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Area [m²] | Numero di veicoli | | | |
| | 1000 | 10000 | 20000 | 30000 |
| 500 | 0.0027 | 0.0048 | 0.0070 | 0.0093 |
| 1000 | 0.0055 | 0.0095 | 0.0140 | 0.0185 |
| 5000 | 0.0273 | 0.0475 | 0.0700 | 0.0925 |
| 10000 | 0.0545 | 0.0950 | 0.1400 | 0.1850 |
| 15000 | 0.0818 | 0.1425 | 0.2100 | 0.2775 |

Nel caso in cui il collasso avvenga nella struttura secondaria, il coefficiente di rischio assume i valori riportati nella tabella seguente:

| Struttura Secondaria | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Area [m²] | Numero di veicoli | | | |
| | 1000 | 10000 | 20000 | 30000 |
| 500 | 0.0007 | 0.0012 | 0.0018 | 0.0023 |
| 1000 | 0.0014 | 0.0024 | 0.0035 | 0.0046 |
| 5000 | 0.0068 | 0.0119 | 0.0175 | 0.0231 |
| 10000 | 0.0136 | 0.0238 | 0.0350 | 0.0463 |
| 15000 | 0.0204 | 0.0356 | 0.0525 | 0.0694 |

4.3

MODELLO DI DEGRADO

Lo stato di condizione di un ponte (CSponte) viene valutato sulla base degli stati di condizione (CS) assegnati agli elementi standard che lo compongono. Lo stato di condizione tuttavia può cambiare nel tempo a causa del degrado.

Il modello di degrado adottato dal sistema informatico è un modello probabilistico definito a livello di elemento standard (ES). Per ogni ES viene definita una matrice **D** di transizione di stato e il sistema calcola automaticamente il corrispondente processo Markoviano.

Un processo markoviano (o Catena di Markov) è un processo stocastico ad intervalli temporali discreti, nel quale le probabilità di transizione da uno stato all'altro dipendono solo dallo stato del sistema immediatamente precedente e non da come si è giunti a tale stato. La matrice di transizione **D** contiene le probabilità di transizione associate a tutte le possibili combinazioni di stati di condizione, per cui la sua dimensione dipende dal numero massimo di CS (CS_{max}) definito per uno specifico elemento standard, e varia da 3 a 5. Per un elemento standard con $CS_{max}=5$ (ad esempio la soletta in cemento armato) la generica matrice di transizione di stato si scrive:

$$D = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} \end{bmatrix}$$

In particolare, l'elemento p_{ij} della matrice di transizione rappresenta la probabilità che l'elemento ha di passare allo stato di condizione i nell'anno $n+1$, condizionata al fatto che all'anno n l'elemento sia in stato j :

$$p_{ij} = P(CS(n+1) = i \mid CS(n) = j)$$

È ragionevole assumere che se non vengono effettuate azioni di manutenzione, il processo di deterioramento sia unidirezionale: lo stato di un elemento si può muovere dallo stato i allo stato $i+n$ e non viceversa. La matrice D risulta quindi triangolare inferiore.

Inoltre nei modelli stocastici di degrado viene generalmente assunto che il deterioramento di un elemento strutturale possa avvenire solo da uno stato a quello successivo in un'unità di tempo. Con questa ulteriore ipotesi la matrice di degrado risulta bidiagonale inferiore:

$$D = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{43} & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{54} & p_{55} \end{bmatrix}$$

Il vettore delle probabilità di stato Cs è definito come quel vettore colonna i cui elementi sono le probabilità di trovarsi in un determinato stato.

$$Cs = [CS1 \ CS2 \ CS3 \ CS4 \ CS5]^t$$

Il vettore Cs è funzione del tempo e varia dopo m anni secondo l'espressione:

$$Cs(n+m) = D(m)Cs(n)$$

dove

$$D(m) = D \cdot D(m-1) = D \cdot D \cdot D(m-2) = \dots = D^m$$

Attualmente il sistema implementa matrici di transizione omogenee, non dipendenti dall'età del ponte.

4.3.1

Implementazione della matrice di transizione

L'algoritmo per il calcolo delle probabilità di transizione in uso dal sistema prevede due step:

Primo step

Per ogni elemento standard viene assegnato un tempo di servizio t_S (espresso in anni) definito come il periodo di tempo trascorso dalla messa in opera dell'elemento all'anno in cui la probabilità che l'elemento sia ancora in servizio è 0.50, nell'ipotesi che non venga effettuata sull'elemento nessuna azione di manutenzione.

Secondo step

Nota il valore del tempo di servizio, il sistema calcola la probabilità di transizione $(1-p)$ dallo stato attuale (CS_i) allo stato immediatamente successivo (CS_{i+1}), assunta costante per tutti gli stati di condizione:

La probabilità di transizione viene calcolata imponendo che al tempo t_S , la probabilità che l'elemento sia ancora in servizio sia 0.50:

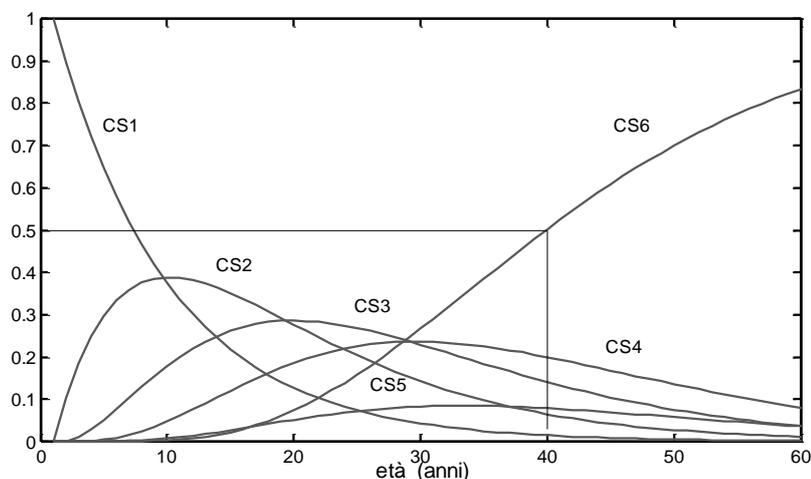
$$0.50 = \sum_1^{CS_{max}} CS_i(t_S)$$

$CS_i(t_S)$ indica la i-esima componente del vettore CS al tempo di servizio t_S .

$$CS(t_S) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-p & p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-p & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-p & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-p & 0.8p \end{bmatrix}^{t_S}$$

La definizione di tempo di servizio ha richiesto l'introduzione di uno stato di condizione aggiuntivo, $CS_{(max+1)}$, denominato "stato di fuori servizio". Ad ogni istante t , la probabilità che un elemento standard ha di trovarsi "fuori servizio", cioè la probabilità che l'elemento sia stato sostituito, viene calcolata nel modo seguente:

$$CS_{i+1}(t) = 1 - \sum_1^{CS_{max}} CS_i(t)$$



Il grafico mostra la variazione nel tempo della probabilità di trovarsi in un dato stato di condizione per un elemento standard con $CS_{max}=5$. In particolare si nota che il tempo di servizio assegnato a questo elemento è di 40 anni.

4.4

MODELLO DI MANUTENZIONE

È possibile definire una serie di azioni manutentive associate ad un determinato elemento standard. L'effetto di ciascuna azione sullo stato di condizione di un elemento è definito stocasticamente attraverso una matrice di transizione Markoviana $T(a)$. In questo caso, il generico elemento della matrice di transizione p_{ij} rappresenta la probabilità condizionata dell'elemento di passare dallo stato j allo stato i , quando si intraprende l'azione a .

I valori assunti dagli elementi della matrice di transizione $T(a)$ dipendono dall'effetto della azione considerata sul generico elemento standard. L'algoritmo utilizzato per il calcolo di $T(a)$ prevede la definizione dell'incremento α dell'età di servizio dell'elemento in seguito all'applicazione dell'azione.

Nel caso in cui a indichi un'azione di manutenzione preventiva, la cui frequenza temporale è di un anno (si veda il paragrafo successivo), la matrice $T(a)$ si ricava da:

$$T(a) \cdot D = D1$$

dove $T(a)$ è la matrice di transizione associata all'applicazione dell'azione di manutenzione preventiva, D è la matrice di degrado calcolata per un tempo di servizio t_s , $D1$ è la matrice di degrado calcolata per un tempo di servizio $(t_s + \alpha)$.

Nel caso in cui a indichi un'azione di ristrutturazione effettuata all'anno n , la matrice $T(a)$ si ricava da:

$$D(n) \cdot T(a) \cdot D(t_s + \alpha - n) = D1(t_s + \alpha - n)$$

dove $T(a)$ è la matrice di transizione associata all'applicazione dell'azione di ristrutturazione all'anno n , D è la matrice di degrado calcolata per un tempo di servizio t_s , $D1$ è la matrice di degrado calcolata per un tempo di servizio $(t_s + \alpha)$.

4.4.1

Manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva è associata ad una frequenza temporale che viene fissata dal manager. Nel modello attualmente in uso dal sistema informatico, la manutenzione preventiva viene eseguita annualmente per gli elementi del piano viabile (Tipo Struttura=1) e per gli elementi accessori (Tipo Struttura=5). Poiché l'effetto della manutenzione si ripercuote sullo stato di condizione degli elementi della sovrastruttura (Tipo Struttura=2), il sistema fissa ad un anno anche la frequenza temporale della manutenzione preventiva di questi elementi il cui costo di manutenzione è però nullo (si veda tabella).

| Tipo Struttura | Descrizione | Frequenza | Costo |
|----------------|---|-----------|-------|
| 1 | Elementi del piano viabile (soletta, giunti, ecc) | 1 anno | si |
| 2 | Elementi principali sovrastruttura (travi, archi, volte) | 1 anno | no |
| 3 | Elementi principali sottostruttura (pile, spalle) | - | - |
| 4 | Elementi secondari (Travi secondarie, controventi di costruzione) | - | - |
| 5 | Accessori (parapetti, guardrail, ecc) | 1 anno | si |

4.4.2 Ristrutturazione

La ristrutturazione è un intervento non preventivo, che mira a riportare gli elementi della struttura in CS1. In realtà l'efficacia dell'intervento è sempre parziale, per cui la ristrutturazione viene sempre modellata come processo stocastico Markoviano con una matrice di transizione $T(a)$.

4.4.3 Ricostruzione

La ricostruzione è un intervento che riporta gli elementi della struttura in CS1.

4.5 MODELLO DI COSTO

Il costo cumulato nel tempo associato a ciascun ponte può essere espresso come somma di vari costi:

$$C = C_0 + C_I + C_M + C_R + C_F + C_U$$

C_0 è il costo di ricostruzione

C_I è il costo di ispezione

C_M è il costo cumulato di manutenzione preventiva

C_R è il costo di ristrutturazione

C_F è il costo di fuori servizio

C_U è il costo per l'utente

Ogni costo è riferito ad un determinato anno. La ricapitalizzazione avviene sulla base della tabella dei tassi di inflazione dell'industria delle costruzioni. I tassi possono essere effettivi (per gli anni passati) o presunti (per gli anni futuri). I tassi effettivi sono ricavati dai bollettini ufficiali PAT.

4.5.1 Costo di ricostruzione

È calcolato sulla base delle Unità Strutturali. A ciascuna unità strutturale (ad esempio impalcato in CA) è associato il costo $C_0(US)$ per unità di misura $m(US)$ (ad esempio superficie di impalcato).

$$C_0 = \sum_i m(US)C_0(US)$$

Il costo comprende il costo di progettazione.

4.5.2 Costo di ispezione

È basato sulle caratteristiche geometriche di ciascun ponte.

4.5.3 Costo di manutenzione preventiva

È basato sul tipo di elemento standard e sul suo stato di condizione. Il costo di manutenzione preventiva viene cumulato nel tempo in funzione della frequenza temporale dell'azione di manutenzione.

4.5.4 Costo di ristrutturazione

È basato sul tipo di elemento standard e sul suo stato di condizione.

4.5.5 Costo di fuori-servizio

Dipende dai costi associati al collasso della struttura e dalla probabilità di collasso della stessa, secondo la formulazione seguente:

$$C_F = \sum_i P_{Fi} C_{FF,i}$$

dove:

$$P_{F,i}(t) = \Phi(\beta_i(t))$$

indica la probabilità di collasso associato all'i-esimo stato limite. Nel sistema attualmente in uso tuttavia, il costo di fuori servizio viene stimato come una percentuale del costo di ricostruzione.

4.5.6 Costo per l'utente

È associato ai singoli elementi standard e dipende dal volume di traffico giornaliero del ponte.

4.6 PROBABILITÀ DI COLLASSO CUMULATIVA

Data un'unità strutturale e un modo di collasso, il modello prevede che il corrispondente stato limite sia controllato da una funzione di capacità variabile nel tempo secondo l'espressione:

$$R(t) = R_0 g(Cs)$$

dove R_0 è la resistenza iniziale e g è una funzione di degrado della capacità definita in termini probabilistici. La funzione di degrado g a sua volta dipende dal vettore Cs , i cui componenti indicano la probabilità di ciascun elemento standard di trovarsi in uno specifico stato di condizione. Il vettore Cs è una grandezza dipendente dal tempo ed è definita in maniera probabilistica sulla base del modello di degrado precedentemente descritto. Pertanto, anche $R(t)$ è una variabile aleatoria, caratterizzata da un valor medio $\mu_R(t)$ e una deviazione standard $\sigma_R(t)$.

Per quanto riguarda il carico agente sulla struttura è ragionevole assumere che la sua distribuzione di probabilità non vari nel tempo. Inoltre il modello assume che il carico S sia un evento caratterizzato da un prefissato tasso medio di occorrenza.

La probabilità di collasso cumulata viene calcolata in maniera automatica dal sistema utilizzando la formulazione proposta da Mori & Ellingwood (1993) che, nell'ipotesi in cui la funzione di stato limite si possa esprimere come differenza tra capacità e domanda, si scrive:

$$P_F(t_L) = 1 - \int_0^{\infty} \exp\left(-\lambda \left[t_L - \int_0^{t_L} F_S\{rg(t)\} dt \right]\right) f_{R_0}(r) dr$$

dove λ è il tasso medio di occorrenza dei carichi, t_L è la vita utile della struttura (per esempio 50 anni), g è la funzione di degrado, F_S e f_{R_0} sono le funzioni densità di probabilità del carico S e della resistenza iniziale R_0 .

5 CALCOLO DELL'ETÀ APPARENTE DEL PONTE

5.1 INTRODUZIONE

L'età apparente viene calcolata in maniera automatica dal sistema informatico per tutti i ponti per i quali sia disponibile il risultato di un'ispezione principale.

L'età apparente di un ponte è espressa in anni ed è indicata da un numero reale. Se confrontata con l'età effettiva della struttura fornisce una misura immediata dello stato di degrado e dell'affidabilità della stessa.

Il sistema utilizza un algoritmo di calcolo che si basa sui valori dei CS assegnati agli elementi standard del ponte in esame nell'ultima ispezione.

5.2 ALGORITMO

L'algoritmo per il calcolo dell'età apparente di un ponte si basa sul CS assegnato ad ogni elemento standard nell'ultima ispezione, tenendo conto come nel calcolo del CS_{ponte}, dell'influenza che ogni elemento ha sulla condizione generale della struttura. L'algoritmo prevede quattro step:

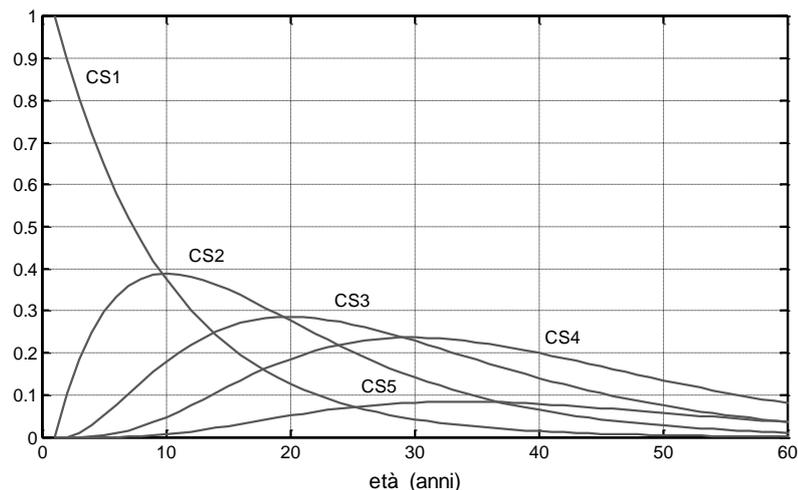
Primo step

Per ogni tipo di elemento standard viene fatta una previsione in termini probabilistici dell'andamento dello stato di condizione. Al tempo $t=0$, che corrisponde al tempo di messa in opera dell'elemento, lo stato di condizione dell'elemento standard è espresso dal vettore colonna:

$$Cs(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^t$$

Al generico istante t , il vettore stato di condizione viene calcolato utilizzando la matrice di transizione di stato D :

$$Cs(t) = D(t) \cdot Cs(0)$$



Il grafico mostra l'andamento nel tempo del vettore stato di condizione per l'elemento standard soletta in cemento armato, nell'ipotesi che non venga effettuata nessuna azione di manutenzione.

Secondo step

Per ogni tipo di elemento standard il sistema calcola l'età media μ_{ES} dell'elemento per tutti i possibili stati di condizione:

$$\mu_{ES}(CS_i) = \frac{CS_i \cdot T}{\sum_t CS_i(t)}$$

dove $CS_i(t)$ è la i-esima componente del vettore CS al tempo t e T è il vettore dei tempi.

| Elemento Standard Soletta in Cemento Armato | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| | CS1 | CS2 | CS3 | CS4 | CS5 |
| Età media | 9.7 | 19.4 | 29.1 | 38.8 | 42.4 |
| Scarto | 13.0 | 15.9 | 18.4 | 18.6 | 13.0 |

Secondo questo modello, l'elemento standard soletta in cemento armato che si trova in stato di condizione 1 ha un'età media di 9.7 anni. Se lo stesso elemento si trovasse in stato di condizione 5, avrebbe un'età media di 42.4 anni.

Terzo step

Dato un ponte, per ogni elemento standard si determina l'età media μ_{ES} in funzione del CS assegnato in fase di ispezione, e il tipo di struttura al quale l'elemento appartiene.

| Tipo Struttura | Descrizione |
|----------------|--|
| 1 | Elementi del piano viabile (soletta, giunti, ecc) |
| 2 | Elementi principali sovrastruttura (travi, archi, volte) |
| 3 | Elementi principali sottostruttura (pile, spalle) |
| 4 | Elementi secondari (travi secondarie, controventi) |
| 5 | Accessori (parapetti, guardrail, ecc) |

Ad ogni tipo di struttura viene assegnato un coefficiente di importanza il cui valore varia a seconda dell'importanza che esso ha rispetto alla sovrastruttura, alla sottostruttura e al piano viabile del ponte. I valori dei coefficienti di importanza per ciascun tipo di struttura sono assegnati in modo tale che la loro somma sia sempre pari all'unità.

| Sovrastruttura | |
|----------------|---------------------------|
| Tipo Struttura | Coefficiente d'importanza |
| 1 | 25,00% |
| 2 | 70,00% |
| 3 | 0,00% |
| 4 | 5,00% |
| 5 | 0,00% |

| Sottostruttura | |
|----------------|---------------------------|
| Tipo Struttura | Coefficiente d'importanza |
| 1 | 25,00% |
| 2 | 0,00% |
| 3 | 70,00% |
| 4 | 5,00% |
| 5 | 0,00% |

| Piano Viabile | |
|----------------|---------------------------|
| Tipo Struttura | Coefficiente d'importanza |
| 1 | 30,00% |
| 2 | 0,00% |
| 3 | 0,00% |
| 4 | 0,00% |
| 5 | 70,00% |

Si calcolano le età medie della sovrastruttura, sottostruttura e del piano viabile del ponte in funzione delle età medie degli elementi standard e dei relativi coefficienti di importanza.

$$\mu_{\text{sovrastruttura}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ES}^i \cdot \%_{\text{sovrastruttura}}^i}{n}$$

$$\mu_{\text{sottostruttura}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ES}^i \cdot \%_{\text{sovrastruttura}}^i}{n}$$

$$\mu_{\text{piano_viabile}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ES}^i \cdot \%_{\text{sovrastruttura}}^i}{n}$$

dove μ_{ES}^i e $\%^i$ indicano rispettivamente l'età media dell'*i*-esimo elemento standard e il corrispondente coefficiente di importanza, e *n* indica il numero degli elementi standard del ponte.

Quarto step

Le tre età medie calcolate nel precedente step fanno riferimento a scale temporali differenti ed è pertanto necessario renderle adimensionali ai fini del calcolo dell'età apparente del ponte.

Si calcolano le età medie della sovrastruttura, sottostruttura e del piano viabile nelle due ipotesi che tutti gli elementi standard del ponte siano in stato di condizione 1 e in stato di condizione massimo.

Si calcolano le seguenti età medie adimensionali per la sovrastruttura, la sottostruttura e per il piano viabile:

$$\mu^*_{sovrastuttura} = \frac{\mu_{sovrastuttura} - \mu_{sovrastuttura}(CS1)}{\mu_{sovrastuttura}(CS_{max}) - \mu_{sovrastuttura}(CS1)}$$

$$\mu^*_{sottostruttura} = \frac{\mu_{sottostruttura} - \mu_{sottostruttura}(CS1)}{\mu_{sottostruttura}(CS_{max}) - \mu_{sottostruttura}(CS1)}$$

$$\mu^*_{piano_viabile} = \frac{\mu_{piano_viabile} - \mu_{piano_viabile}(CS1)}{\mu_{piano_viabile}(CS_{max}) - \mu_{piano_viabile}(CS1)}$$

L'età apparente del ponte viene calcolata attraverso la definizione di un indice di degrado ID , e di un intervallo temporale opportuno, in modo tale che il risultato sia confrontabile con l'età effettiva del ponte.

L'indice di degrado, che assume valori compresi fra zero e uno, è definito dalla seguente relazione non lineare:

$$ID = \sqrt[7]{0.45 \cdot \mu^*_{sovrastuttura}{}^7 + 0.40 \cdot \mu^*_{sottostruttura}{}^7 + 0.15 \cdot \mu^*_{piano_viabile}{}^7}$$

L'età apparente è definita dalla seguente funzione:

$$Età_{app} = f(ID, \mu_{sovrastuttura}(CS_{max}), \mu_{sovrastuttura}(CS1)).$$

6 VALUTAZIONE AL TRANSITO DEI CARICHI ECCEZIONALI (VERIFICHE DI LIVELLO 0)

La risposta viene fornita in base agli schemi di carico concordati con la PAT. In particolare quindi sono stati analizzati alcuni schemi di carico del mezzo eccezionale riportati di seguito:

- 13 t x 5 assi (interasse=1.3 m) = 65 tonnellate
- 12 t x 6 assi (interasse=1.3 m) = 72 tonnellate
- 13 t x 6 assi (interasse=1.3 m) = 78 tonnellate
- 13 t x 7 assi (interasse=1.3 m) = 91 tonnellate
- 13 t x 8 assi (interasse=1.3 m) = 104 tonnellate
- 13 t x 9 assi (interasse=1.3 m) = 117 tonnellate

In aggiunta in accordo con la PAT viene fornita la risposta anche per i seguenti schemi di carico:

- mezzi da 56 tonnellate

La risposta viene fornita in funzione della normativa di progetto in vigore nell'anno di costruzione del ponte.

6.1 APPROCCIO

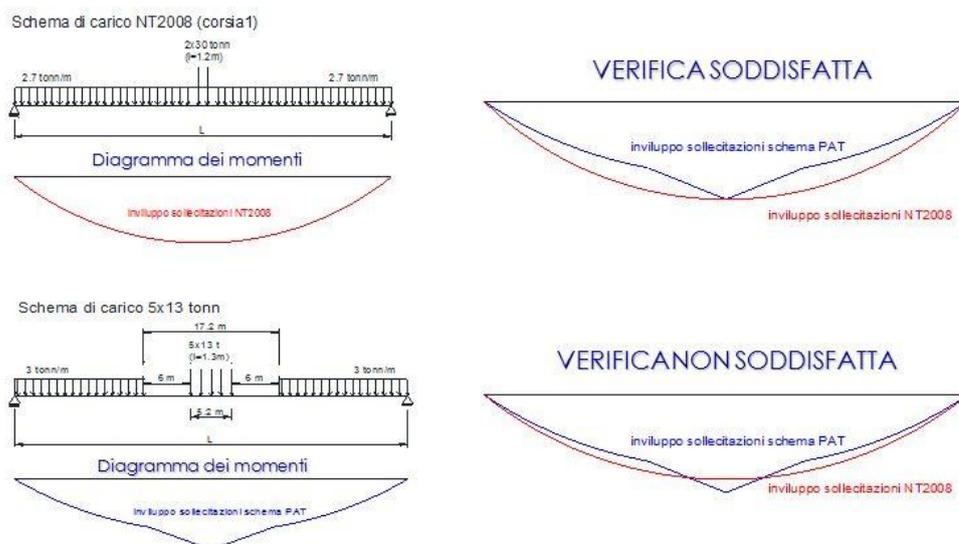
Per garantire il transito del mezzo eccezionale e allo stesso tempo soddisfare sia i requisiti formali che sostanziali della normativa di progetto, è sufficiente dimostrare che le sollecitazioni provocate dal nuovo carico in condizioni di traffico libero, siano inferiori a quelle dovute ai carichi della normativa di progetto. Con questa metodologia si garantisce infatti che il carico possa transitare con una sicurezza almeno pari a quella prevista in fase di progetto, in quanto le nuove sollecitazioni prodotte dal carico PAT sono sempre inferiori rispetto a quelle con cui è stato progettato il ponte. In questo modo si autorizza il transito di carichi che producono effetti inferiori rispetto alle assunzioni di progetto. Per valutare se il carico PAT produce effetti inferiori rispetto alla normativa di progetto è necessario valutare le sollecitazioni nell'impalcato. In particolare si comparano in ogni sezione dell'impalcato, il momento e il taglio provocati dal carico PAT e si verifica che questi siano uguali o inferiori a quelli provocati dal carico della normativa di progetto. Se entrambe le verifiche sono positive, il ponte può resistere al carico PAT. Le condizioni di transito del carico eccezionale analizzate sono:

- transito libero (senza nessuna limitazione)
- transito in centro carreggiata (il carico eccezionale transita in centro carreggiata e il traffico viene fermato nella direzione opposta alla marcia del mezzo)

6.1.1

Transito libero

Per garantire il transito del mezzo eccezionale, è sufficiente dimostrare che le sollecitazioni provocate dal nuovo carico in condizioni di traffico libero, siano inferiori a quelle dovute ai carichi della normativa di progetto. Per eseguire questa verifica si applica un criterio sostitutivo. Si sostituiscono quindi gli schemi di carico previsti dalla normativa di progetto vigente nell'anno di costruzione del ponte con i carichi PAT. Si considera un comportamento lineare della struttura in modo da poter sfruttare la sovrapposizione degli effetti.



Come si può notare dalla figura, se le sollecitazioni sull'impalcato dovute al nuovo schema di carico PAT non superano quelle provocate dalla normativa di progetto, la verifica è soddisfatta e il carico eccezionale può transitare. In caso contrario la verifica non è soddisfatta. L'analisi viene condotta per tutte le sollecitazioni: flessione e taglio.

L'approccio prevede di sostituire al carico di progetto più sfavorevole per la sicurezza, il nuovo carico eccezionale. In questa maniera i carichi sulle rimanenti corsie rimangono inalterati in entrambi i casi e quindi anche i loro effetti in termini di sollecitazioni flettenti e taglianti. L'analisi si riduce quindi a verificare che le sollecitazioni provocate dallo schema PAT siano inferiori o al più uguali di quelle provocate dallo schema di carico della normativa di progetto. Con questo approccio lo schema strutturale del ponte non è rilevante perché si valutano differenze di sollecitazioni e non sollecitazioni in senso assoluto. Quindi un ponte multi-campata iperstatico può essere trattato come un ponte a singola campata semplicemente appoggiato. Per la stessa ragione si possono trascurare i coefficienti di sicurezza e quindi considerare i carichi nominali perché la comparazione delle sollecitazioni porterebbe ad una loro eliminazione. Anche altri coefficienti (per esempio il coefficiente dinamico) che sono applicati in entrambe le situazioni sono trascurabili.

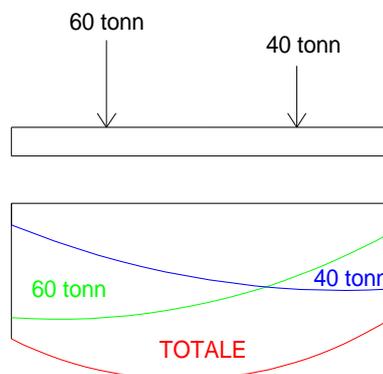
6.1.2

Transito al centro della carreggiata

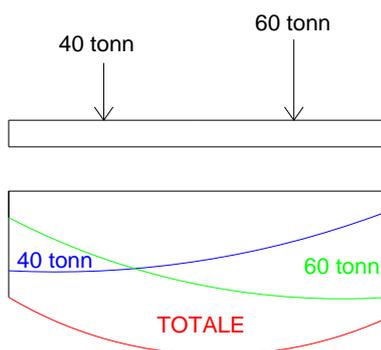
In questa condizione di transito è necessario conoscere i coefficienti di ripartizione trasversale del carico di Massonnet-Guyon-Bares. Tale condizione è necessaria e sufficiente per ricavare il nuovo carico transitabile sul ponte.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa questo tipo di ragionamento è l'accettazione che ogni configurazione di carico abbia la stessa ripartizione in direzione trasversale.

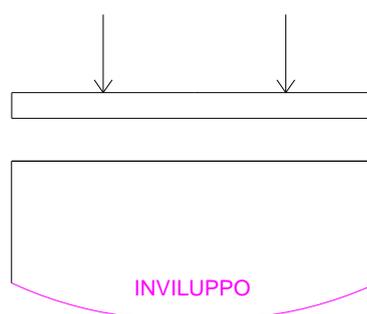
Si riporta nelle figure successive la sezione trasversale del ponte e l'andamento dei coefficienti di Massonnet-Guyon-Bares moltiplicati per il relativo carico. In altre parole le figura mostrano la quota parte del carico a cui è sottoposta una generica sezione trasversale del ponte.



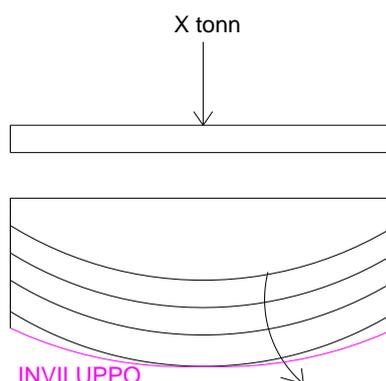
La figura mostra l'andamento dei coefficienti di Massonnet-Guyon-Bares moltiplicati per il relativo carico. Considerando la configurazione simmetrica si ottiene:



Si ottiene il seguente inviluppo:



Per determinare il carico massimo transitabile in mezzeria è sufficiente aumentare il carico fino a che l'andamento dei coefficienti di Massonnet-Guyon-Bares non rimane al di sotto dell'inviluppo determinato nella figura successiva.



Quando l'andamento dei coefficienti di Massonnet-Guyon-Bares moltiplicati per il carico X posizionato in mezzeria raggiunge in un punto l'inviluppo ottenuto dalla normativa di progetto, si è determinato il carico massimo transitabile sul ponte. Conoscendo quindi i coefficienti di ripartizione trasversale del carico è possibile determinare per qualsiasi ponte e per qualsiasi dimensione trasversale (anche più di 2 corsie) il massimo carico transitabile in mezzeria.

Analogamente al metodo di Massonnet-Guyon-Bares è possibile determinare i coefficienti di ripartizione trasversale anche con il metodo proposto da Courbon, il quale ipotizza un impalcato infinitamente rigido e rigidità torsionale nulla. Questo metodo semplificato risulta essere un caso particolare del metodo di Massonnet-Guyon-Bares e non sempre a favore di sicurezza. Questo metodo è quello utilizzato nelle analisi di valutazione al transito dei carichi eccezionali di livello 0. Il metodo di Massonnet-Guyon-Bares viene utilizzato nel caso in cui siano presenti i dati necessari all'applicazione del metodo e in particolare i coefficienti α e θ .

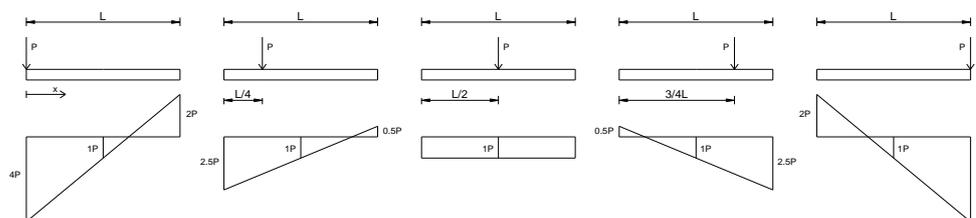
Nel caso in cui si consideri un impalcato formato solamente da una soletta, il carico viene ripartito in direzione trasversale nel seguente modo:

$$r(x) = 1 + \frac{6e}{L} - \frac{12ex}{L^2}$$

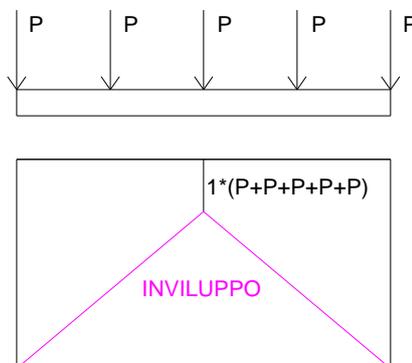
dove:

- $r(x)$ è il coefficiente di ripartizione trasversale in funzione della coordinata trasversale x ($x=L/2$ in mezzeria);
- e è l'eccentricità del carico rispetto alla mezzeria;
- L è la larghezza dell'impalcato.

Dalla formula si può notare che $r(x)$ assume sempre un valore unitario in corrispondenza della mezzeria. Si riporta nella figura seguente l'andamento dei coefficienti di ripartizione trasversale al variare dell'eccentricità del carico.

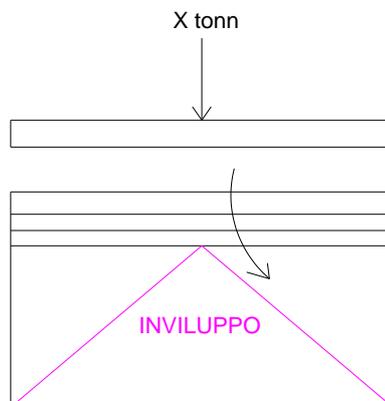


Se si esegue un involuppo dei coefficienti di ripartizione trasversale si ottiene:



Il valore di minimo si ottiene in mezzeria dell'impalcato, e tale valore è pari alla somma dei carichi presenti sull'impalcato.

Nel caso di un impalcato senza uno spartitraffico centrale che divide in due la carreggiata, il mezzo eccezionale può transitare al centro dell'impalcato fermando contemporaneamente il traffico in entrambe le direzioni. L'andamento dei coefficienti di Courbon risulta essere il seguente:



Il massimo carico transitabile risulta calcolabile nel seguente modo:

$$Carico_{Max_transitabile} = \sum Carichi_presenti_sull'impalcato$$

Nel caso di un impalcato con uno spartitraffico centrale che divide in due la carreggiata, il mezzo eccezionale non può transitare al centro dell'impalcato ma al centro della semi-carreggiata fermando il traffico solo nella direzione di transito. Il metodo risulta essere analogo al caso di Massonnet-Guyon-Bares. Il metodo è quindi identico a quello descritto in tale paragrafo con la differenza del calcolo dei coefficienti di ripartizione che viene eseguito con il metodo di Courbon (paragrafo 3.2.2).

7

GESTIONE OPERATIVA DEL SISTEMA

Il manager ha la possibilità di modificare i parametri di calcolo dei modelli implementati accedendo alla sezione Network del BMS. In tale sezione sono selezionabili le seguenti finestre:

- Costo ES
- Costo US
- Degrado
- Manutenzione
- Coeff. Rivalutazione
- Pannello

7.1

COSTO ES

In questa finestra il manager può impostare il modello di costo corrente, creare una copia di un modello di costo esistente, modificare i parametri di un modello di costo esistente per un qualsiasi elemento standard.

Per impostare un modello di costo come modello corrente è necessario procedere come segue:

- Selezionare il modello desiderato dal menù a tendina
- Cliccare su Cambia modello corrente

Per creare una copia di un modello di costo esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello che si intende copiare
- Inserire il nome nel campo Nome nuovo modello
- Cliccare su Crea una copia del modello corrente

Per modificare i parametri di costo di un elemento standard riferiti ad un modello di costo esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello di cui si desidera modificare i parametri
- Selezionare l'elemento standard e l'anno di riferimento
- Evidenziare la riga corrispondente al valore che si intende modificare
- Cliccare su Modifica Elemento
- Inserire il valore desiderato
- Cliccare su Salva per rendere effettiva la modifica

7.2

COSTO US

In questa finestra il manager può impostare il modello di costo corrente, creare una copia di un modello di costo esistente, modificare i parametri di un modello di costo esistente per una qualsiasi unità strutturale.

Per impostare un modello di costo come modello corrente è necessario procedere come segue:

- Selezionare il modello desiderato dal menù a tendina
- Cliccare su Cambia modello corrente

Per creare una copia di un modello di costo esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello che si intende copiare

- Inserire il nome nel campo Nome nuovo modello
- Cliccare su Crea una copia del modello corrente

Per modificare i parametri di costo di una unità strutturale riferiti ad un modello di costo esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello di cui si desidera modificare i parametri
- Selezionare l'unità strutturale e l'anno di riferimento
- Evidenziare la riga corrispondente al valore che si intende modificare
- Cliccare su Modifica Elemento
- Inserire il valore desiderato
- Cliccare su Salva per rendere effettiva la modifica

7.3

DEGRADO

In questa finestra il manager può impostare il modello di degrado corrente, creare una copia di un modello di degrado esistente, modificare i parametri di un modello di degrado esistente per un qualsiasi elemento standard.

Per impostare un modello di degrado come modello corrente è necessario procedere come segue:

- Selezionare il modello desiderato dal menù a tendina
- Cliccare su Cambia modello corrente

Per creare una copia di un modello di degrado esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello che si intende copiare
- Inserire il nome nel campo Nome nuovo modello
- Cliccare su Crea una copia del modello corrente

Per modificare i parametri di degrado di un elemento standard riferiti ad un modello di degrado esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello di cui si desidera modificare i parametri
- Selezionare l'elemento standard e l'anno di riferimento
- Evidenziare la riga corrispondente al valore che si intende modificare
- Cliccare su Modifica Elemento
- Inserire il valore desiderato
- Cliccare su Salva per rendere effettiva la modifica

7.4

MANUTENZIONE

In questa finestra il manager può impostare il modello di manutenzione corrente, creare una copia di un modello di manutenzione esistente, modificare le frequenze temporali di un modello di manutenzione esistente per un qualsiasi elemento standard.

Per impostare un modello di manutenzione come modello corrente è necessario procedere come segue:

- Selezionare il modello desiderato dal menù a tendina
- Cliccare su Cambia modello corrente

Per creare una copia di un modello di manutenzione esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello che si intende copiare
- Inserire il nome nel campo Nome nuovo modello
- Cliccare su Crea una copia del modello corrente

Per modificare le frequenze temporali di manutenzione di un elemento standard riferite ad un modello di manutenzione esistente è necessario procedere come segue:

- Impostare come corrente il modello di cui si desidera modificare le frequenze temporali
- Selezionare l'elemento standard e l'anno di riferimento
- Evidenziare la riga corrispondente al valore che si intende modificare
- Cliccare su Modifica Elemento
- Inserire il valore desiderato
- Cliccare su Salva per rendere effettiva la modifica

7.5 COEFF. RIVALUTAZIONE

In questa finestra viene visualizzata una tabella riassuntiva dei coefficienti medi di rivalutazione utilizzati dal sistema. Attualmente il manager non ha la possibilità di operare modifiche dirette.

7.6 PANNELLO

In questa finestra è possibile visualizzare una tabella riassuntiva delle elaborazioni richieste e richiedere una nuova esecuzione dei calcoli.

Per visualizzare una tabella riassuntiva delle elaborazioni richieste è necessario procedere come segue:

- Selezionare dal menù a tendina il numero di richieste da visualizzare
- Cliccare su Aggiorna Risultati Elaborazioni

La tabella riporta in colonne il numero progressivo che identifica ciascuna richiesta effettuata, la data della richiesta, la data della risposta, lo stato della richiesta, l'identificativo dell'utente che ha richiesto l'analisi, i modelli di costo, degrado e manutenzione utilizzati nell'analisi e lo stato di avanzamento dell'analisi.

Lo stato della richiesta può assumere i seguenti valori:

- -2 Analisi interrotta a causa di errori
- -1 Analisi in corso
- 0 Richiesta in corso
- 1 Analisi completata

Per richiedere una nuova esecuzione dei calcoli è sufficiente cliccare su Richiedi una nuova esecuzione dei calcoli.

Durante l'analisi il sistema effettua il calcolo delle età apparenti, degli stati di condizione, dei costi di manutenzione, della vulnerabilità strutturale (P_F), del rischio cumulato (P_X), degli indici di affidabilità e di priorità di intervento.

Il database viene aggiornato con i risultati dell'analisi.

8

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Abdunur C., *Inspection, monitoring and assessment - Manual of bridge engineering*, Tomas Telford, Cap18, 2000

Ang AHS & Tang WH. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Volume I: Decision, Risk and Reliability. New York: John Wiley & Sons. 1984.

Bortot, F. *Reliability-based decision-making in infrastructure management*. Ph.D. thesis, University of Trento, Italy. 2006.

Mori Y & Ellingwood BR. *Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures*. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(5):1600–1621.

Ross SM. *Stochastic Processes*. New York: John Wiley & Sons. 1996.

Ross SM. *Introduction to probability models*. Accademic Press, Inc., New York, N.Y.1989.

GLOSSARIO

AFFIDABILITÀ

L'affidabilità di una struttura rappresenta la sua capacità di soddisfare un determinato stato limite. L'indice di affidabilità, la probabilità di collasso e il moltiplicatore critico dei carichi sono misure di affidabilità strutturale.

ANOMALIE PRINCIPALI

Per anomalie principali si intendono tutte quelle condizioni il cui verificarsi:

- richiede una indagine più approfondita sull'elemento;
- richiede un intervento di sostituzione o ripristino sull'elemento;
- implica la presenza di una situazione di pericolo per gli utenti della struttura.

Il primo caso mette in evidenza una mancanza di informazioni e/o di competenza per la valutazione del problema, in questo caso il sistema dovrà attivare la procedura per l'esecuzione di un intervento d'ispezione mirato: una ispezione speciale.

Il secondo caso si verifica quando il problema è conosciuto ma particolarmente insidioso per la sicurezza strutturale del ponte, in questo caso l'ispettore dovrà prescrivere un intervento di ristrutturazione o ripristino dell'anomalia.

Nel terzo caso si presentano situazioni che in qualche modo compromettono la sicurezza degli utenti. (ad es. rottura del parapetto da impatto di veicolo).

In tutti i casi vanno riportate informazioni più dettagliate nel campo note della scheda d'ispezione e scattate delle foto all'anomalia.

Esempio: ad un elemento trave che presenti un unico fenomeno di spalling con forte riduzione della sezione resistente delle barre d'armatura in una determinata posizione può essere assegnato un CS che non consideri questo "problema" attivando però il flag *Anomalia Principale* e descrivendo il problema riscontrato, la sua posizione e l'intervento ritenuto necessario (in questo caso: pulizia e protezione delle barre e ripristino del cls). Il sistema, una volta inseriti tali dati, metterà in risalto il ponte che presenti anomalie rispetto a quelli in cui non ne sono state identificate.

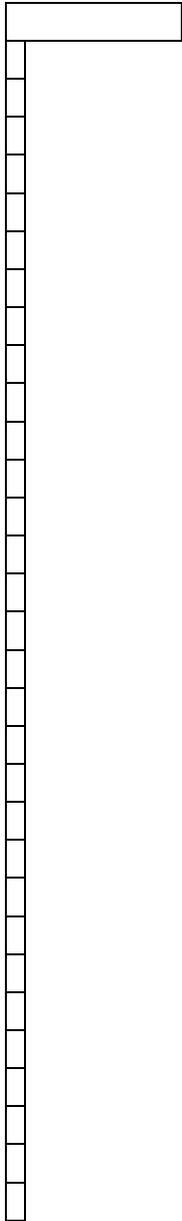
Esempi di possibili Anomalie Principali sono:

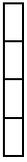
- Danni da impatto;
- Rottura delle saldature negli elementi e/o nelle connessioni d'acciaio;
- Rilevante accumulo di materiale davanti alle pile in alveo;
- Fuori piombo;
- Anomale deformazioni permanenti dell'elemento;
- Rilevanti riduzioni di sezione negli elementi d'acciaio o di legno;
- Rilevanti riduzioni di sezione nell'armatura di elementi in c.a.;
- Fessurazioni negli elementi in c.a.p.;
- Fenomeni di fatica nelle saldature o negli elementi d'acciaio;
- Presenza di materiale soggetto a possibile caduta sulla strada sottostante (elementi lapidei instabili,...).



CATENA DI MARKOV

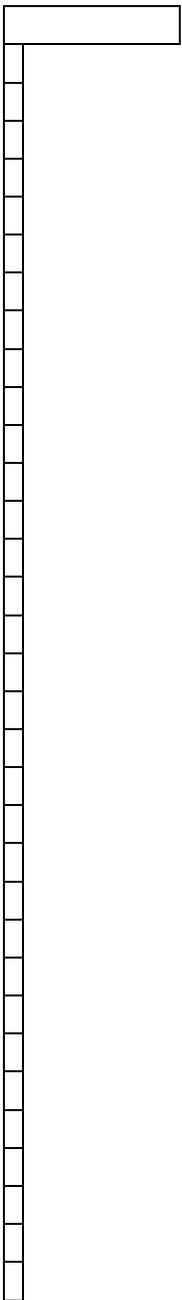
Una catena di Markov è un processo stocastico ad intervalli temporali discreti che descrive in termini probabilistici la transizione di un sistema da uno stato all'altro.





CONDITION STATE DEL PONTE (CSponte)

Il Condition State del ponte è un numero reale che rappresenta lo stato di condizione dell'intera struttura ed è funzione del condition state degli elementi standard del ponte.



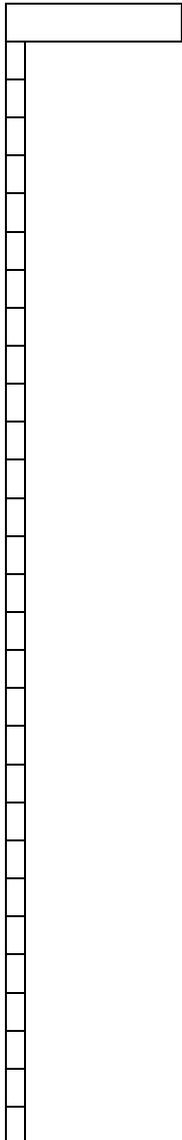


ELEMENTO STANDARD

L'elemento standard ES (CoRe Element - AASHTO) è un oggetto che il sistema usa per descrivere e identificare un componente (strutturale o non) del ponte. Esempi di ES sono: trave in c.a., soletta in c.a., apparecchio di appoggio, ecc. L'ES inoltre permette di registrare, in fase di ispezione, la condizione di stato di un componente. Tutti gli ES sono descritti in dettaglio in apposite schede (contenute nel manuale MA.GG.02).

ETÀ APPARENTE

Età che viene assegnata ad un ponte in funzione dello stato di condizione dei suoi elementi standard. L'età apparente fornisce una misura dello stato globale di degrado di un ponte.





INDICE DI PRIORITÀ (α)

L'indice di priorità è un rapporto costi-benefici utilizzato dal sistema per assegnare un ordine di priorità agli interventi di manutenzione sui ponti.

ISPETTORE

L'ispettore è l'attore incaricato dell'inserimento dei dati di inventario nel DataBase e/o della valutazione dello stato di condizione degli elementi standard di un ponte.

ISPEZIONI PRINCIPALI

Le ispezioni principali sono ispezioni prettamente visive in cui viene data una valutazione del *condition state* di ciascun elemento, secondo le metodologie indicate nel manuale MA.GG.01 e nel documento Procedura Ispezione Principale. Le ispezione principali devono essere eseguite ogni tre anni salvo il caso in cui nello stesso anno venga eseguita una *Ispezione Principale Approfondita*.

ISPEZIONI PRINCIPALI APPROFONDITE

Le ispezioni principali approfondite sono ispezioni visive, che possono essere integrate da test, in cui viene data una valutazione del *condition state* di ciascun elemento, secondo le metodologie indicate nel manuale MA.GG.01 e nel documento Procedura Ispezione Principale Approfondita. Le ispezioni principali approfondite devono essere eseguite ogni sei anni.

ISPEZIONI SPECIALI

Le ispezioni speciali sono ispezioni visive integrate da test volte ad identificare in profondità *anomalie principali* riscontrate nelle ispezioni principale e principale Approfondita e devono essere eseguite secondo le metodologie indicate nel manuale MA.GG.01 e nel documento Procedura Ispezione Speciale.

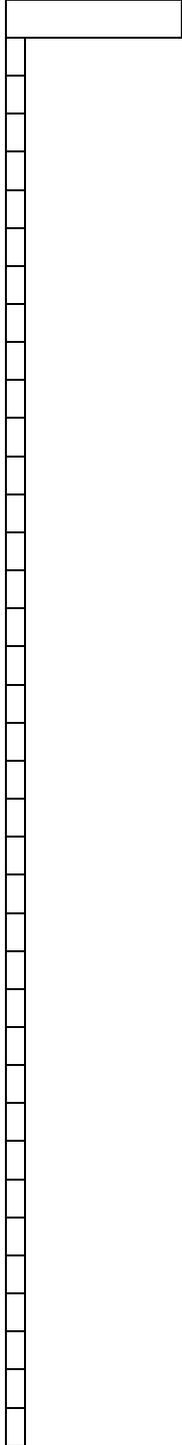
ISPEZIONI SUPERFICIALI

Le ispezioni superficiali sono ispezioni visive superficiali atte a identificare *anomalie* di vario genere sulla struttura. Le ispezioni superficiali sono svolte dal responsabile di zona o da un suo delegato e devono essere condotte secondo le metodologie indicate nel manuale MA.GG.01 e nel documento Procedura Ispezione Superficiale. Le ispezioni superficiali devono essere eseguite annualmente salvo il caso in cui nello stesso anno venga eseguita una *Ispezione Principale od una Ispezione Principale Approfondita*.



PROBABILITÀ DI COLLASSO (P_F)

Definito uno di stato limite la probabilità di collasso P_F è definita come la probabilità che tale stato venga superato.



PROGRAMMA DI MANUTENZIONE

Il sistema definisce tre diversi programmi di manutenzione:

- Nessuna Azione: non viene eseguita nessuna azione all'istante attuale;
- Ristrutturazione: viene eseguita un'azione di ristrutturazione all'istante attuale;
- Ricostruzione: viene eseguita la ricostruzione all'istante attuale.

In tutti e tre i casi, la manutenzione ordinaria viene eseguita periodicamente, con frequenza assegnata dal manager.

Per ogni programma di manutenzione il sistema calcola:

- lo stato di condizione del ponte (CSponte)
- il costo di manutenzione ordinaria cumulato sulla vita utile del ponte;
- l'indice di affidabilità β ;
- la probabilità di collasso P_F (o vulnerabilità strutturale) cumulata sulla vita utile del ponte;
- e il rischio cumulato P_x .

Questi dati sono visualizzati nella finestra "Stato di condizione/Priorità" per tutti i ponti per i quali sia disponibile il risultato di un'ispezione principale.

PONTE

Manufatto stradale compreso tra due spalle. Un ponte si divide in unità strutturali ed in elementi standard associati all'unità strutturale.

RISCHIO

Misura della probabilità e severità di un evento pericoloso per le vite, la salute, le proprietà, l'ambiente. Esso è valutato come prodotto della probabilità di accadimento e delle conseguenze associate, tenendo conto di tutti gli scenari possibili.

SCHEDE DEGLI ELEMENTI

Nelle schede degli elementi sono raccolte le principali informazioni sulla valutazione di stato degli elementi standard. Ciascun elemento possiede una scheda, in essa sono contenuti:

- Identificativo
- Nome completo
- Unità di misura
- Descrizione elemento
- Descrizione

TEMPO DI SERVIZIO (t_s)

Il tempo di servizio di un elemento standard è definito come il periodo di tempo trascorso dalla messa in opera dell'elemento all'anno in cui la probabilità che l'elemento sia ancora in servizio è 0.50, nell'ipotesi che non venga effettuata sull'elemento nessuna azione di manutenzione.

UNITÀ STRUTTURALE (US)

Porzione di ponte continua con caratteristiche strutturali omogenee e identiche funzioni statiche.

VALUTATORE

Il valutatore è l'attore incaricato della valutazione formale dello stato di sicurezza e della capacità portante dei ponti. La valutazione formale è non periodica e viene attivata dal Manager del sistema solo quando questo risulta necessario o opportuno (per esempio quando lo stato di condizione del ponte evidenziato nel corso di un'ispezione periodica fa sorgere dubbi sulla sicurezza dell'opera).

VARIABILE ALEATORIA

Una quantità, il cui valore assoluto non è esattamente determinato, ma che può assumere qualunque valore descritto dalla sua distribuzione di probabilità.

VETTORE DELLE PROBABILITÀ DI STATO (Cs)

Il vettore delle probabilità di stato C_s è definito, per ogni elemento standard, come quel vettore colonna i cui elementi sono le probabilità di trovarsi in un determinato stato di condizione. Il vettore delle probabilità di stato è funzione del tempo.