

<p>BMS</p>	<p>Procedura Guida Generale Sistema Ispettivo</p>	<p>MA.GG.01 vers. 9.1 20 Marzo 2013</p>
<p>SOMMARIO</p>	<p>Il presente manuale rappresenta una guida generale al sistema ispettivo della PAT e contiene (1) informazioni sulla strutturazione dei dati di inventario nel sistema, (2) prescrizioni generali sull'esecuzione delle ispezioni, (3) informazioni generali sul degrado dei materiali e delle strutture.</p>	
<p>RIFERIMENTI</p>	<p>MA.GG.02: Schede elementi</p>	
<p>SGS/SOSF PAT</p>	<p>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.</p>	

SOMMARIO

1	GENERALITÀ	6
1.1	PREMESSA	6
1.2	STRUTTURA DEL SISTEMA DI GESTIONE	6
1.2.1	Informazioni del sistema	6
1.2.2	Alimentazione del DataBase ad attori coinvolti nella gestione	7
1.2.3	Procedure	8
1.2.4	Modelli di calcolo	9
1.3	OGGETTO DEL MANUALE	9
1.4	AGGIORNAMENTI DEL PRESENTE MANUALE	9
1.5	RIFERIMENTI	9
2	STRUTTURAZIONE DEI DATI NEL SISTEMA.....	10
2.1	INTRODUZIONE	10
2.2	DATI DI PRIMO LIVELLO	10
2.3	DATI DI SECONDO LIVELLO	11
2.3.1	Unità Strutturali (US)	11
2.3.2	Collegamenti (C).....	12
2.3.3	Elementi Standard (ES).....	12
3	IL SISTEMA ISPETTIVO	15
3.1	INTRODUZIONE.....	15
3.2	TIPI DI ISPEZIONE.....	15
3.2.1	Ispezioni d’inventario	16
3.2.2	Ispezioni superficiali	16
3.2.3	Ispezioni principali	16
3.2.4	Ispezioni principali approfondite	17
3.2.5	Ispezioni speciali	18
4	LINEE GUIDA PER L'ESECUZIONE DELLE ISPEZIONI	19
4.1	INTRODUZIONE.....	19
4.2	LA PRE-ISPEZIONE	19
4.2.1	Revisione della documentazione esistente	19
4.2.2	Pianificazione e organizzazione dell'ispezione	20
4.2.3	Pianificazione dell'utilizzo di mezzi speciali d'ispezione	20
4.2.4	Acquisizione delle schede d'ispezione	20
4.2.5	Pianificazione del giorno e dell'orario d'ispezione	20
4.2.6	Identificazione dei componenti	20
4.2.7	Sequenza d'ispezione	21

4.3	L'ISPEZIONE IN SITO	23
4.3.1	Ispezione superficiale generale	23
4.3.2	Ispezione elemento per elemento	23
4.4	REGISTRAZIONE DEI RISULTATI D'ISPEZIONE	23
4.4.1	Valutazioni e proposte di intervento	23
4.4.2	Registrazione.....	23
5	ATTREZZATURA.....	24
5.1	INTRODUZIONE.....	24
5.2	ATTREZZATURA BASE	24
5.3	ATTREZZATURA D'USO GENERALE.....	24
5.4	ATTREZZATURA DI PULIZIA	24
5.5	APPARECCHIATURA OTTICA	24
5.6	APPARECCHIATURA DI MISURAZIONE.....	25
5.7	APPARECCHIATURA DI REGISTRAZIONE	25
5.8	EQUIPAGGIAMENTO DI SICUREZZA	25
5.9	EQUIPAGGIAMENTO D'ACCESSO	25
6	DEGRADO DEI MATERIALI	26
6.1	INTRODUZIONE.....	26
6.2	DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: IL CALCESTRUZZO	26
6.2.1	Agenti fisici o meccanici	26
6.2.2	Agenti fisico-chimici.....	27
6.2.3	Agenti chimici	27
6.2.4	Carbonatazione	28
6.2.5	Attacco solfatico	28
6.2.6	Reazioni alcali-aggregati	28
6.3	DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: L'ACCIAIO.....	29
6.3.1	Corrosione	29
6.4	DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: LA MURATURA.....	31
6.4.1	Degrado di tipo chimico.....	31
6.4.2	Degrado di tipo meccanico.....	31
6.5	DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: IL LEGNO	32
6.5.1	Generalità	32
6.5.2	Agenti non biologici	32
6.5.3	Agenti biologici	33
7	DEGRADO DOVUTO FATTORI ESTERNI	36
7.1	PRINCIPALI CAUSE DI DEGRADO DEI PONTI.....	36
7.2	DEGRADO DOVUTO AI CARICHI APPLICATI.....	36

7.2.1	Carichi permanenti e carichi mobili	36
7.2.2	Effetti termici e igroscopici sui materiali	37
7.2.3	Effetti termici sulla struttura	38
7.2.4	Erosione (scour)	38
7.2.5	Sisma.....	38
7.2.6	Impatto.....	39
7.2.7	Fuoco.....	39
7.3	DEGRADO PER ERRORI PROGETTUALI	40
7.3.1	Ponti ad impalcato in c.a. e c.a.p.	40
7.3.2	Ponti in acciaio e composti acciaio calcestruzzo	41
7.4	DEGRADO PER DIFETTI DI COSTRUZIONE	44
7.4.1	Ponti ad impalcato in cemento armato e cemento armato precompresso.	44
7.4.2	Ponti in acciaio e composti acciaio calcestruzzo	45
7.4.3	Ponti ad arco in muratura	45
7.4.4	Ponti ad arco in cls	46
7.5	DEGRADO DEGLI ELEMENTI ACCESSORI: APPOGGI E GIUNTI DI ESPANSIONE.....	47
8	IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO NEGLI ELEMENTI	48
8.1	IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO IN ELEMENTI DI CEMENTO ARMATO.....	48
8.1.1	Esecuzione della fase diagnostica	48
8.1.2	Fessurazione	49
8.1.3	Scaling	50
8.1.4	Delaminazione	51
8.1.5	Spalling	51
8.1.6	Contaminazione cloridrica	52
8.1.7	Honeycomb (Segregazione).....	52
8.1.8	Pop-outs	52
8.1.9	Abrasione	52
8.1.10	Danneggiamento da collisione e sovraccarichi	52
8.1.11	Corrosione delle barre d'armatura.....	53
8.1.12	Corrosione da carbonatazione	53
8.1.13	Corrosione da cloruri	54
8.1.14	La corrosione da macrocoppie	54
8.2	ISPEZIONE VISIVA DEGLI ELEMENTI DI CALCESTRUZZO	55
8.2.1	Esame visuale	55
8.2.2	Test fisico - chimici	56
8.2.3	Il degrado degli elementi strutturali dei ponti a travata in c.a. e c.a.p.	57
8.3	L'IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO NEGLI ELEMENTI DI ACCIAIO	59
8.3.1	Esecuzione della fase diagnostica	59

8.3.2	Deterioramento della protezione superficiale	59
8.3.3	Corrosione	59
8.3.4	Deterioramento delle unioni	60
8.3.5	Lesioni nei collegamenti	60
8.3.6	Deformazioni locali degli elementi.....	60
8.4	IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO NEGLI ELEMENTI IN LEGNO	61
8.4.1	Esecuzione della fase diagnostica	61
8.4.2	Fasi logiche dell'indagine	61
8.4.3	Ispezione visuale di elementi in legno.....	62
8.4.4	Attrezzatura di supporto ordinario	63
8.4.5	Attrezzature e prove strumentali	63
9	PRATICA D'ISPEZIONE.....	65
9.1	INTRODUZIONE.....	65
9.2	ISPEZIONE E VALUTAZIONE DEL PIANO VIABILE	65
9.2.1	Introduzione.....	65
9.2.2	Piano viabile in c.a.....	65
9.2.3	Piano viabile in acciaio	66
9.2.4	Piano viabile in legno	67
9.2.5	Giunti	68
9.2.6	Sistemi di drenaggio.....	69
9.2.7	Barriere di sicurezza.....	70
9.3	ISPEZIONE E VALUTAZIONE DELLE SOVRASTUTTURE	71
9.3.1	Introduzione.....	71
9.3.2	Sovrastruttura in calcestruzzo	71
9.3.3	Sovrastruttura in muratura (arco)	74
9.3.4	Sovrastruttura in acciaio	75
9.3.5	Sovrastruttura in legno	81
9.4	ISPEZIONE E VALUTAZIONE DEGLI APPOGGI.....	82
9.4.1	Introduzione.....	82
9.4.2	Appoggi elastomerici - Procedura e localizzazione delle ispezioni.....	82
9.4.3	Appoggi meccanici - Procedura e localizzazione delle ispezioni	83
9.5	ISPEZIONE E VALUTAZIONE DELLE SOTTOSTRUTTURE	84
9.5.1	Introduzione.....	84
9.5.2	Deterioramento del materiale	84
9.5.3	Dissesti nelle fondazioni.....	84
9.5.4	Dissesti nelle pile e nelle spalle dei ponti ad arco.....	85
10	GLOSSARIO	86
11	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	90

1 GENERALITÀ

1.1 PREMESSA

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

Il sistema è stato sviluppato dal Gruppo di Lavoro BMS del Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento nell'ambito di un rapporto di ricerca con la PAT, regolato da apposite convenzioni.

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 riparazione, le matrici di transizione che definiscono i modelli di degrado.

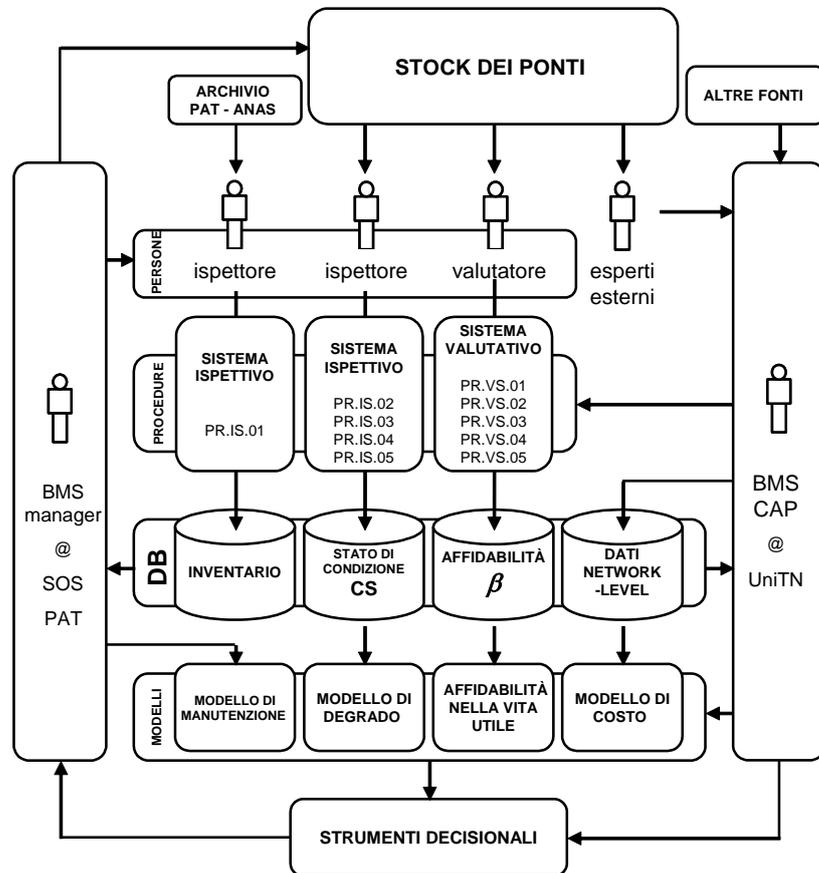


Figura 1.1. Struttura del sistema di gestione dei manufatti stradali della PAT.

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, riparazione e ricostruzione;
- modello di **affidabilità**: predice l'evoluzione dello stato di sicurezza dei ponti sulla base del degrado e dal piano di manutenzione.

1.3

OGGETTO DEL MANUALE

Il presente manuale rappresenta una guida generale al sistema ispettivo della PAT e contiene

1. informazioni sulla strutturazione dei dati di inventario nel sistema (paragrafo 2);
2. prescrizioni generali sull'esecuzione delle ispezioni (paragrafi 3, 4 e 5);
3. informazioni generali su degrado dei materiali e delle strutture (paragrafi 6,7,8 e 9).

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.02: Schede elementi

2 STRUTTURAZIONE DEI DATI NEL SISTEMA

2.1 INTRODUZIONE

Nel sistema di gestione delle opere stradali della PAT, un ponte è identificato da una serie di dati, che possono essere distinti in due livelli:

- I livello: struttura dei dati predefinita e comune a tutte le opere;
- II livello: struttura dei dati predefinita e variabile da opera ad opera (Unità Strutturali, Collegamenti e Elementi Standard).

Questa strutturazione dei dati è stata adottata per rendere compatibile la descrizione dell'opera con il database informatico mantenendo contemporaneamente le possibilità di rappresentare ogni tipologia di ponte.

2.2 DATI DI PRIMO LIVELLO

I dati di primo livello caratterizzano in modo generale la struttura e permettono di individuare in modo univoco il ponte tra tutti quelli presenti nello *stock*.

I dati di I livello riguardano ad esempio:

- la localizzazione precisa dell'opera sul territorio;
- la denominazione ufficiale;
- la tipologia prevalente e il materiale;
- la storia;
- documenti di progetto e costruzione;
- gli enti responsabili;
- eventuali limitazioni di transito;
- dati di traffico;
- ...

L'elenco completo dei dati di primo livello è contenuto nel documento MA.GG.02.

2.3**DATI DI SECONDO LIVELLO**

I dati di secondo livello rappresentano una modellazione elementare della struttura del ponte: il ponte è concettualmente decomposto in oggetti chiamati Unità Strutturali (US) e Collegamenti (C), che a loro volta possono contenere Elementi Standard (ES).

2.3.1**Unità Strutturali (US)**

Le Unità Strutturali (US) rappresentano una porzione di ponte continua con caratteristiche strutturali omogenee e identiche funzioni statiche. Alcuni esempi di US sono i seguenti:

Tabella 2.1. Elenco US.

Abbreviazione	Materiale	Famiglia	Sottofamiglia
Travata in c.a.	c.a.*	Impalcato	Travata
Travata in c.a.p.	c.a.p.**	Impalcato	Travata
Travata in c.a.p.p.	c.a.p.p.***	Impalcato	Travata
Solettone in c.a.	c.a.	Impalcato	Solettone
Solettone in c.a.p.p.	c.a.p.p.	Impalcato	Solettone
Solettone nervato in c.a.	c.a.	Impalcato	Solettone
Solettone nervato in c.a.p.p.	c.a.p.p.	Impalcato	Solettone
Cassone in c.a.p.p.	c.a.p.p.	Impalcato	Cassone
Travata in acciaio	acciaio	Impalcato	Travata
Cassone in acc.-cls	acciaio-cls	Impalcato	Cassone
Arco in acciaio a via superiore	acciaio	Impalcato	Arco
Arco in acciaio a via inferiore	acciaio	Impalcato	Arco
Reticolare in acciaio	acciaio	Impalcato	Reticolare
Arco in muratura	muratura	Arco	Arco
Arco in cls	cls****	Arco	Arco
Arco in c.a.	c.a.	Arco	Arco
Arco in c.a. a via inferiore	c.a.	Impalcato	Arco
Arco in c.a. a via inferiore	c.a.	Impalcato	Arco
Spalla in c.a.	c.a.	Elemento Verticale	Spalla
Pila in c.a.	c.a.	Elemento Verticale	Pila
Spalla in muratura	muratura	Elemento Verticale	Spalla
Pila in muratura	muratura	Elemento Verticale	Pila

- * cemento armato
- ** cemento armato precompresso
- *** cemento armato precompresso post teso
- **** calcestruzzo

Si rimanda al documento MA.GG.02 per l'elenco completo e aggiornato.

Ogni US è caratterizzata da attributi che permettono al sistema di riconoscerne le caratteristiche geometriche, la tecnologia costruttiva e la posizione all'interno della struttura. Ciascuna US è composta da uno o più Elementi Standard (per esempio: soletta, trave, marciapiede...), la cui posizione all'interno della struttura risulta pertanto definita sulla base dell'appartenenza all'US.

2.3.2

Collegamenti (C)

Il Collegamento è un oggetto che unisce più Unità Strutturali. Il Collegamento ha attributi simili ad una US e come questa può servire da contenitore per alcuni tipi di Elementi Standard (per esempio: apparecchi d'appoggio, giunti...). In aggiunta, i Collegamenti hanno la funzione logica di collegare più US. Per esempio, per permettere al sistema di riconoscere che un'US impalcato è appoggiata ad un'US Spalla, deve essere utilizzato il collegamento *appoggio di estremità di impalcato su spalla*. In fase di inventario, ad ogni collegamento sono associate le US collegate: sulla base della definizione di tutti i collegamenti, il sistema è in grado di ricostruire la distribuzione spaziale della struttura. Esempi di Collegamento sono:

- Appoggio di estremità di impalcato;
- Appoggio intermedio di impalcato continuo;
- Appoggio intermedio di impalcato non continuo;
- Sella Gerber;
- Collegamento continuo tra pila ed impalcato;
- Collegamento continuo;
- Collegamento cerniera.

Si rimanda al documento MA.GG.02 per l'elenco completo e aggiornato.

2.3.3

Elementi Standard (ES)

La composizione di un'US o di un C è rappresentata più in dettaglio attraverso Elementi Standard (ES). Le tipologie di ES sono predefinite: si rimanda al documento MA.GG.02 per un elenco completo. Ogni tipologia di ES è caratterizzata da alcuni attributi quali:

- Tipo e materiale;
- Codice identificativo;
- Unità di misura.

Inoltre, in fase di inventario, ciascun ES è specificato all'interno dell'US o del C in termini di Quantità. Gli Elementi Standard costituiscono la base del metodo adottato per rappresentare il degrado della struttura. A questo scopo, nel corso delle ispezioni per la valutazione dello stato di condizione, possono essere assegnati a ciascun ES i seguenti attributi:

- Stato di Condizione (CS);
- Anomalie Principali;

- Anomalie Secondarie;
- Note.

Questi attributi sono variabili nel tempo e possono essere aggiornati nel corso di una nuova ispezione.

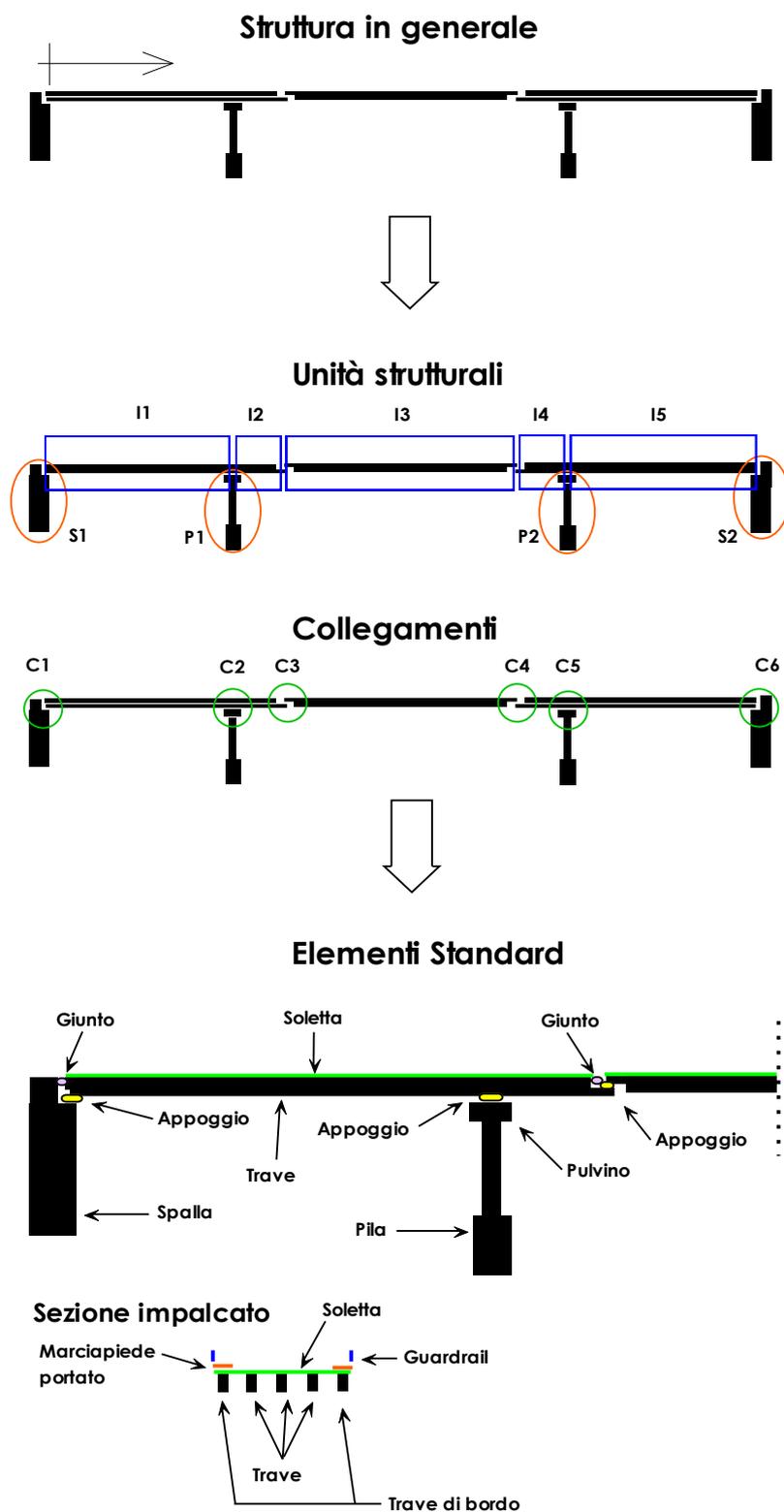


Figura 2.1. Scomposizione della struttura in Unità Strutturali, Collegamenti ed Elementi Standard.

3 IL SISTEMA ISPETTIVO

3.1 INTRODUZIONE

La gestione dello *stock* dei ponti prevede l'esecuzione di differenti tipi di ispezioni. Questo permette inizialmente di inserire il singolo ponte nel database (*accatastamento* della struttura) e, in seguito, di monitorarne lo stato di degrado attraverso ispezioni periodiche e di valutare eventuali anomalie attraverso ispezioni speciali.

3.2 TIPI DI ISPEZIONE

Il BMS della PAT prevede 5 tipi d'ispezione:

1. Ispezione d'inventario (PR.IS.01);
2. Ispezioni superficiali (PR.IS.02);
3. Ispezioni principali (PR.IS.03);
4. Ispezioni principali approfondite (PR.IS.04);
5. Ispezioni speciali (PR.IS.05).

Il primo tipo d'ispezione viene normalmente effettuato una sola volta nella vita della struttura e cioè quando questa viene inserita nel sistema; può comunque essere necessario eseguire un'ulteriore ispezione di inventario quando interventi di ristrutturazione o di ampliamento comportano una variazione della schematizzazione della struttura o delle quantità di ES.

Le ispezioni di cui ai punti 2, 3 e 4 rappresentano invece delle ispezioni di tipo periodico e finalizzate alla valutazione dello stato di degrado della struttura. La periodicità di questi tipi d'ispezione e il loro alternarsi sono rappresentati in Figura 3.1.

Ispezioni Periodiche

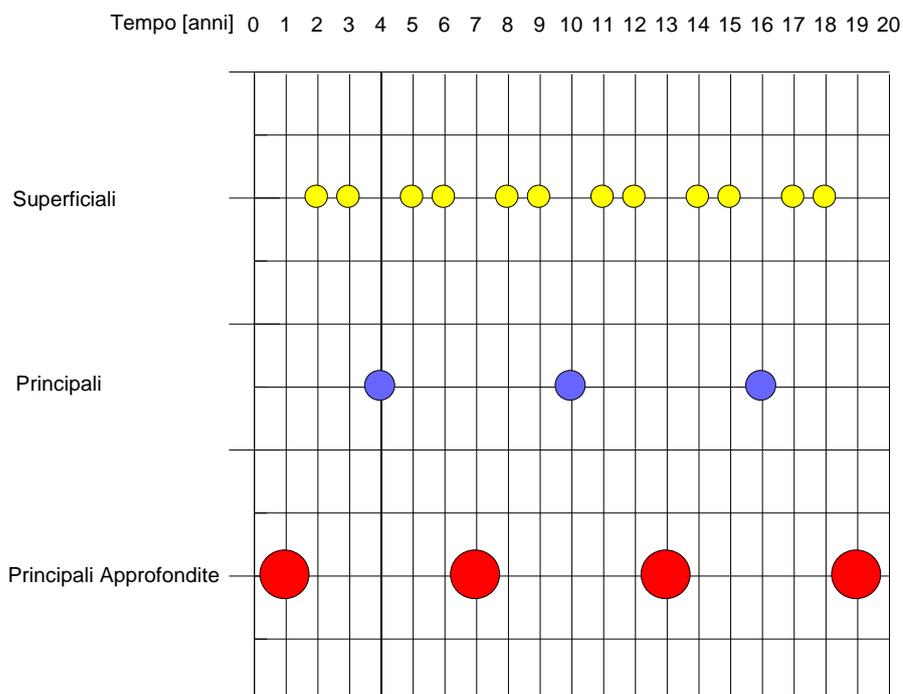


Figura 3.1. Periodicità delle ispezioni.

A differenza degli altri tipi d'ispezione, le ispezioni speciali rappresentano un evento eccezionale durante la vita del ponte. Esse vengono infatti attivate quando nel corso di una delle altre ispezioni viene riscontrata una situazione di potenziale pericolo e tale da richiedere un'analisi sperimentale o comunque una valutazione del fenomeno più approfondita.

Per quanto riguarda gli esecutori delle ispezioni, mentre le ispezioni superficiali sono effettuate da personale della PAT (generalmente dai Responsabili di Settore o da loro incaricati), gli altri quattro tipi d'ispezione vengono eseguiti da professionisti esterni incaricati dalla PAT.

Si riporta nel seguito una descrizione più dettagliata dei differenti tipi d'ispezione.

3.2.1 Ispezioni d'inventario

Le ispezioni d'inventario servono all'inserimento di un'opera, nuova o esistente, all'interno del sistema informatico. Queste ispezioni vengono inoltre ripetute successivamente all'esecuzione di un intervento sull'opera che ne modifichi l'assetto strutturale. L'ispettore è tenuto a raccogliere ed inserire nel sistema le informazioni di I livello. Procedo inoltre alla scomposizione dell'opera in Unità Strutturali ed Elementi Standard, secondo la strutturazione dei dati di II livello. Per maggiori dettagli vedere la procedura PR.IS.01: *Esecuzione ispezioni d'inventario*.

3.2.2 Ispezioni superficiali

Le ispezioni superficiali vengono eseguite annualmente. Esse consistono in un breve esame visivo atto a scoprire difetti di una certa gravità che possono portare ad incidenti od a elevati costi d'intervento se non affrontati in tempo. Questo tipo di controllo è spesso associato alla visita per la manutenzione di base durante la quale si svolgono attività come il controllo degli scoli e la pulizia dalla vegetazione. Non vengono usati particolari sistemi di accesso alla struttura. I risultati dell'ispezione superficiale devono essere registrati, in una scheda che attesta inoltre l'avvenuta ispezione. Non viene data nessuna valutazione dello stato dei singoli elementi ma della struttura nel complesso; possono inoltre essere segnalati gli interventi ritenuti necessari per risolvere gli eventuali problemi. Quando possibile il personale che esegue l'ispezione può ripristinare tutte quelle situazioni ritenute rischiose per la durabilità dell'opera (es. sistemi di drenaggio malfunzionanti) o per la sicurezza degli utenti (es. parapetti rotti). Il responsabile dell'ispezione superficiale è il Responsabile di Settore a cui il personale che esegue l'ispezione deve inoltrare la scheda compilata.

Per maggiori dettagli vedere la procedura PR.IS.02: *Esecuzione ispezioni superficiali*.

3.2.3 Ispezioni principali

Le ispezioni principali sono eseguite ogni sei anni (sfalsate di tre anni rispetto alle ispezioni principali approfondite) da professionisti esterni scelti dalla PAT in base alla preparazione e alla capacità di valutare lo stato di condizione della struttura secondo le modalità previste nell'apposita procedura a cui si rimanda per maggiori dettagli (PR.IS.03: *Esecuzione ispezioni principali*).

Questo tipo d'ispezione consiste nell'osservazione visiva di tutte le parti della struttura, elemento per elemento; solo in casi particolari può essere richiesto di eseguire prove strumentali durante l'ispezione. Le ispezioni sono condotte senza disposizioni speciali d'accesso (carrelli elevatori, ponteggi, ...); tutte le volte che è possibile gli elementi devono comunque essere raggiunti utilizzando una scala a pioli.

Al termine dell'ispezione deve essere redatto un rapporto che includa una descrizione dettagliata di tutti i difetti riscontrati; questi devono essere in seguito memorizzati nel sistema informatico. I rapporti d'ispezione devono essere integrati da foto e schizzi; essi verranno allegati al rapporto durante l'inserimento dello stesso nel sistema informatizzato.

Se lo ritiene necessario, l'ispettore può segnalare la necessità di eseguire un'analisi strumentale e/o una verifica di resistenza di elementi che presentino una situazione di pericolo evidente o potenziale; questo vuol dire che la richiesta può essere effettuata non solo quando si è certi dell'esistenza di un pericolo, ma anche quando si riscontra una situazione che potrebbe comportare un pericolo ma che necessita di un'analisi *ad hoc* per determinarne l'effettiva entità. Questo tipo di segnalazione comporta l'attivazione da parte del Manager del sistema di un'ispezione di tipo speciale (vedi punto 3.2.5); è naturalmente responsabilità dell'ispettore evidenziare le situazioni che devono essere indagate più approfonditamente evitando nello stesso tempo segnalazioni inutili dovute a valutazioni troppo superficiali.

Con questo tipo d'ispezione vengono fornite valutazioni della condizione di tutti gli elementi che possono essere osservati; gli elementi nascosti alla vista non potranno essere controllati e dunque nemmeno valutati.

Nella relazione gli ispettori possono proporre gli interventi ritenuti necessari od opportuni per ripristinare la struttura o per rallentarne il degrado.

3.2.4

Ispezioni principali approfondite

Le ispezioni principali approfondite sono eseguite ogni sei anni (sfalsate di tre anni rispetto alle ispezioni principali). La differenza tra questo tipo d'ispezione e l'ispezione principale (vedi punto 3.2.3) è la modalità di accesso alla struttura e la distanza da cui vengono valutati gli elementi.

L'ispezione principale approfondita richiede infatti di osservare e valutare ogni ES da una distanza ravvicinata (abbastanza vicino da poterlo toccare con la mano); questo implica normalmente l'uso di mezzi di accesso quali:

- scale;
- piattaforme mobili su autoveicoli;
- ponteggi;
- barche;
- corde e imbrachi;
- ...

Per maggiori dettagli vedere la procedura PR.IS.04: *Esecuzione ispezioni principali approfondite*.

3.2.5

Ispezioni speciali

Le ispezioni speciali vengono effettuate quando:

- è stata segnalata una situazione di potenziale pericolo nel corso di una ispezione di routine (superficiale, principale o principale approfondita);
- non è stato possibile nel corso di un'ispezione di routine valutare alcuni elementi (perchè non accessibili con mezzi ordinari oppure perchè la loro valutazione richiede specifica strumentazione).

L'attivazione dell'ispezione speciale viene determinata dal Manager in base all'importanza della conoscenza dello Stato di Condizione degli elementi oggetto di indagine.

Le ispezioni speciali coinvolgono una vasta gamma di prove in sito e in laboratorio; al termine dell'ispezione deve essere redatto un rapporto completo in cui siano allegati tutti i risultati dei test e delle prove di laboratorio.

Per maggiori dettagli vedere la procedura PR.IS.05: *Esecuzione ispezioni speciali*.

4 LINEE GUIDA PER L'ESECUZIONE DELLE ISPEZIONI

4.1 INTRODUZIONE

Per svolgere in modo adeguato i diversi tipi ispezione è necessario seguire le relative procedure; questo garantisce una buona qualità dell'ispezione e riduce notevolmente le possibilità di commettere errori o di dimenticare dati.

Nei paragrafi seguenti sono proposte delle linee guida generali per l'esecuzione delle ispezioni sui ponti; il loro scopo è solo quello di rendere comprensibile in cosa consiste un'ispezione e in nessun caso possono essere ritenute sostitutive delle procedure predisposte per i singoli tipi d'ispezione. Le procedure dettagliate sono contenute in appositi fascicoli scaricabili direttamente dal sistema informatico di gestione (solo dagli utenti autorizzati dal Servizio Gestione Strade o dal Servizio Opere Stradali e Ferroviarie della Provincia Autonoma di Trento).

La singola ispezione si sviluppa normalmente nelle seguenti tre fasi che vengono descritte separatamente nei paragrafi seguenti:

1. Pre-ispezione;
2. Ispezione in sito;
3. Registrazione dei risultati.

4.2 LA PRE-ISPEZIONE

Prima di eseguire un'ispezione su un ponte essa deve essere pianificata in modo accurato. Si riportano nel seguito le operazioni base necessarie.

4.2.1 Revisione della documentazione esistente

Se la documentazione e i rapporti non sono presenti nel sistema informatico (database) essi devono essere reperiti nell'archivio in cui risiedono fisicamente (tale informazione è contenuta nel sistema).

In particolare si dovrà osservare:

- Tipo di costruzione, schema statico e materiale;
- Tipi e localizzazione dei difetti riscontrati nelle ispezioni precedenti (presenti nel sistema informatico);
- Riparazioni e/o sostituzioni consigliate nell'ultima ispezione;
- Risultati di test e monitoraggi precedenti;
- La cronologia delle problematiche e dei danneggiamenti che si sono riscontrati durante la vita del ponte (presenti nel sistema informatico);
- Cronologia degli interventi di riparazione e manutenzione eseguiti sul ponte (presenti nel sistema informatico);
- Dati relativi al sito in cui è inserito il ponte (geotecnici, idrogeologici, vari).

4.2.2 Pianificazione e organizzazione dell'ispezione

- Visionare schemi, elaborati grafici e strutturazione dei dati nel sistema per l'individuazione di ciascun componente (Unità Strutturale e/o Elemento Standard) del ponte;
- Stabilire una scaletta d'ispezione che assicuri efficacia, efficienza e affidabilità dell'ispezione di ogni componente della struttura (vedi sezioni successive);
- Organizzare un team d'ispezione, assegnando ad ogni membro un'appropriata responsabilità.

4.2.3 Pianificazione dell'utilizzo di mezzi speciali d'ispezione

- Attrezzatura per il controllo del traffico sul ponte durante l'ispezione;
- Pianificazione dell'uso di piattaforme mobili, barche o scale;
- Attrezzature e procedure per ispezionare spazi confinati.

4.2.4 Acquisizione delle schede d'ispezione

Se il ponte è già inventariato è necessario acquisire dal sistema le schede d'ispezione (generate in automatico dal sistema per il determinato ponte) e di ogni schizzo che può essere utile e far risparmiare tempo in sede d'ispezione. Le schede d'ispezione costituiscono il supporto di registrazione principale durante l'ispezione, in esse sono riportati tutti gli ES ordinati per US. Per ciascun ES sono previsti dei campi di registrazione liberi: campo *note*, campo *Condition State*, campo *Anomalie principali* e *Anomalie secondarie*.

4.2.5 Pianificazione del giorno e dell'orario d'ispezione

Il momento più adatto per eseguire l'ispezione deve essere scelto prendendo in considerazione:

- luce disponibile;
- periodo di magra in caso di corso d'acqua;
- volume di traffico alle diverse ore del giorno o stagione;
- restrizioni legate al tempo meteorologico;
- stato degli elementi: la presenza di neve o di elementi molto bagnati può infatti falsare i risultati dell'ispezione.

4.2.6 Identificazione dei componenti

Tutti gli Elementi Standard devono poter essere localizzati all'interno della struttura. A questo scopo il sistema prevede che essi siano contenuti in US che hanno una determinata localizzazione riferita all'*inizio ponte*. Per una localizzazione più precisa di un'anomalia (principale o secondaria), nelle note si può far riferimento ad un sistema di riferimento destrorso centrato nell'*inizio ponte* con direzione e verso nel senso delle progressive crescenti e posizionato come nella seguente figura (*Figura 4.1*).

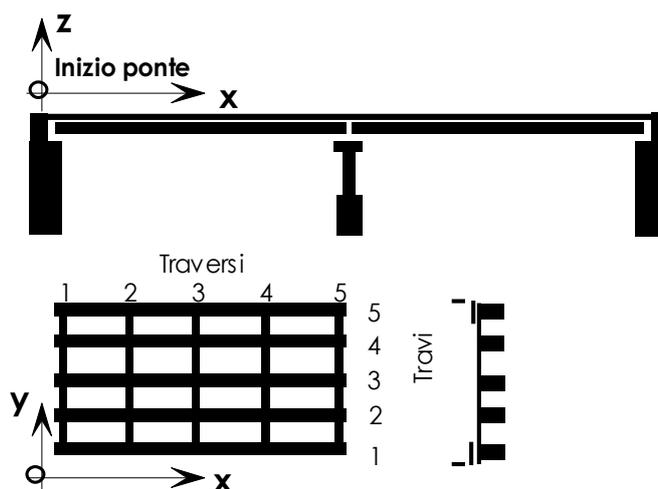


Figura 4.1. Orientazione del sistema di riferimento.

4.2.7

Sequenza d'ispezione

La sequenza d'ispezione deve essere pianificata in funzione di diversi fattori come, ad esempio:

- Tipologia di ponte;
- Complessità della struttura;
- Condizioni di traffico.

La sequenza d'ispezione deve essere decisa in fase di pre-ispezione.

In condizioni ordinarie e con poco traffico veicolare sul ponte l'ispezione deve essere eseguita in modo congruente alla strutturazione nel sistema informatico dei dati. La strutturazione dei dati è fatta per Unità Strutturali US e collegamenti C ordinati nel senso delle progressive crescenti (vedi punto 6). Per ogni ES di ciascuna US devono essere registrati i dati d'ispezione. La sequenza corretta è la registrazione di questi dati partendo dagli Elementi Standard contenuti nella prima US e proseguendo nel senso delle progressive crescenti alle altre US e/o collegamenti.

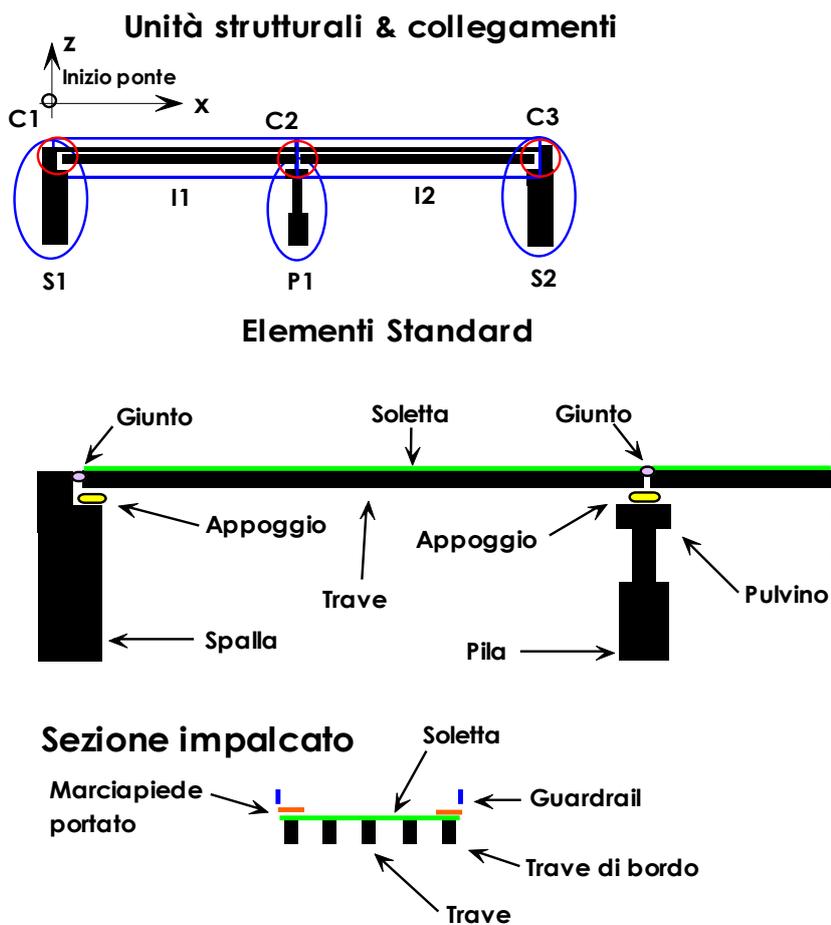


Figura 4.2. Sequenza d'ispezione: tutte le volte che è possibile bisogna partire dall'origine del sistema di riferimento e procedere nella direzione delle progressive crescenti ispezionando uno per uno tutti gli ES di ciascuna US.

4.3 L'ISPEZIONE IN SITO

La seconda fase del processo d'ispezione è l'ispezione in sito.

Essa può essere suddivisa a sua volta in due parti:

1. un'ispezione superficiale dell'intera struttura;
2. l'ispezione elemento per elemento.

4.3.1 Ispezione superficiale generale

In questa prima fase si compie un giro d'ispezione dell'intero ponte per verificare la schematizzazione adottata, per rilevare eventuali problemi che potrebbero nascere durante l'utilizzo dei mezzi di accesso ed eventualmente per modificare le modalità d'ispezione.

4.3.2 Ispezione elemento per elemento

Questa è l'ispezione vera e propria. Per ogni Elemento Standard l'ispettore deve registrare:

- lo *Stato di Condizione* dell'elemento, mediante le indicazioni contenute nelle *schede degli elementi*;
- Anomalie principali dell'elemento;
- Anomalie secondarie dell'elemento;
- Immagini scattate con fotocamera digitale (per poter allegare i file al rapporto nel sistema informatizzato);
- Note relative all'elemento.

4.4 REGISTRAZIONE DEI RISULTATI D'ISPEZIONE

Terminate le operazioni in sito i dati raccolti devono essere registrati nel sistema informatico.

4.4.1 Valutazioni e proposte di intervento

L'ispettore dovrà valutare tutti i problemi e le situazioni riscontrate (anomalie principali, anomalie secondarie, note, problematiche globali, ...) e, se sono necessario, proporre interventi di manutenzione o ripristino. Tali interventi vengono riportati nel campo note presente nella pagina dei dati generali d'ispezione.

4.4.2 Registrazione

La registrazione dei dati e degli allegati nel sistema informatico va fatta secondo le modalità indicate nelle procedure d'ispezione.

5 ATTREZZATURA

5.1 INTRODUZIONE

Le ispezioni visive si eseguono con l'intento di determinare le condizioni e la funzionalità della struttura e dei suoi elementi componenti. In particolare esse forniscono al sistema i dati necessari per poter assegnare a ciascun ponte uno stato di condizione ed il suo andamento nel tempo. Nella fase di preparazione l'ispettore dovrà dotarsi di tutta l'attrezzatura che potrà essere necessaria nel corso dell'ispezione. A titolo indicativo nel seguito è riportato un elenco dell'attrezzatura di cui, caso per caso, l'ispettore potrà avere bisogno. Naturalmente può risultare indispensabile attrezzatura diversa da quella consigliata.

5.2 ATTREZZATURA BASE

- Martello con punta (come ad esempio il martello da geologo) per la rimozione delle parti ammalorate (spalling, strati di ruggine, pulizia giunti, ...) e per sondare gli elementi (calcestruzzo delaminato, ...);
- Macchina fotografica digitale (con capienza ed autonomia elevate).

5.3 ATTREZZATURA D'USO GENERALE

- Coltello multiuso;
- Punteruolo;
- Filo a piombo per misurare allineamenti verticali tra gli elementi;
- Marsupio per il trasporto degli accessori più piccoli;
- Cassetta degli attrezzi (cacciaviti, pinze, chiavi inglesi, attrezzi vari);
- Calcolatrice;
- Orologio.

5.4 ATTREZZATURA DI PULIZIA

- Scopa e spazzola per la pulizia delle superfici;
- Spazzola metallica per la pulizia di incrostazioni e ruggine;
- Carta vetrata grossa;
- Cacciavite grosso piatto;
- Cazzuola;
- Piccone e badile.

5.5 APPARECCHIATURA OTTICA

- Binocolo o cannocchiale per esaminare gli elementi a distanza (indispensabile nel caso in cui non si possa accedere direttamente all'elemento);
- Pila portatile;
- Fari con generatore elettrico nel caso di ispezioni eseguite di notte;
- Misuratore ottico di fratture (lente di ingrandimento graduata);
- Specchietto montato su braccio telescopico e snodabile;

5.6 APPARECCHIATURA DI MISURAZIONE

- Metro a nastro da 5 metri;
- Corda metrica (50m);
- Metro pieghevole (2m);
- Calibro;
- Misuratore ottico di fratture;
- Termometro;
- Livello a bolla.

5.7 APPARECCHIATURA DI REGISTRAZIONE

- Cartella rigida;
- Schede d'ispezione confezionate;
- Blocco note;
- Penne e pennarelli;
- Righello;
- Gesso;
- Pennarello indelebile o bomboletta di colore in spray;
- Nastro adesivo (per marcare le aree danneggiate).

5.8 EQUIPAGGIAMENTO DI SICUREZZA

Prima di effettuare le ispezioni è necessario munirsi dei dispositivi di protezione individuale (DPI) di qualunque altro equipaggiamento che permetta di svolgere in sicurezza tutte le operazioni in sito, come ad esempio:

- Segnaletica stradale (luminosi, birilli, segnali di lavori in corso, segnali luminosi, ...);
- Vestiario ad alta luminosità;
- Imbracatura di sicurezza, corde, moschettoni;
- Cassetta di pronto soccorso.

5.9 EQUIPAGGIAMENTO D'ACCESSO

Nelle ispezioni principali approfondite e speciali è necessario arrivare a toccare gli elementi strutturali; per fare questo è normalmente indispensabile munirsi di dispositivi di accesso agli elementi quali ad esempio:

- Scale;
- Ponteggi;
- Passerelle;
- Piattaforme mobili e By-bridge;
- Barche.

6 DEGRADO DEI MATERIALI

6.1 INTRODUZIONE

Nell'ottica di ispezionare adeguatamente i ponti stradali è indispensabile conoscere in dettaglio i meccanismi e i modi in cui degradano i materiali costituenti. Il presente capitolo tratta questi argomenti. Il deterioramento dei materiali può essere provocato da vari fattori, con diversi gradi di gravità per la capacità portante della struttura e con o senza segnali visibili della sua presenza. Esso può manifestarsi con rotture di parti della struttura che ne modificano la geometria, vistose deformazioni e fessurazioni nelle sezioni maggiormente sollecitate. Non è detto però che fenomeni di corrosione delle armature o reazioni alcali-silice del calcestruzzo (Alkali-silica reaction = ASR), non possano essere in atto anche senza manifestarsi apertamente, diventando visibili solo quando raggiungono un stato avanzato che potrebbe aver già compromesso l'affidabilità della struttura (difetti latenti) (Abdunur C., 2000).

6.2 DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: IL CALCESTRUZZO

Comunemente si ritiene che il calcestruzzo e dunque il cemento armato siano materiali molto durevoli, in realtà a causa della loro struttura capillare, essi sono soggetti nel tempo all'infiltrazione di gas e di acqua presenti nell'ambiente che li circonda. La penetrazione di sostanze aggressive è consentita dalla permeabilità del calcestruzzo dovuta a cavità porose della pasta di cemento interconnesse tra loro.

Tale struttura rende il calcestruzzo molto suscettibile al degrado che può avvenire sia per meccanismi fisici (gelo/disgelo), che fisico-chimici (ASR), che per processi chimici (carbonatazione). Quando gli agenti esterni reagiscono con gli idrati possono formare composti solubili o espansivi; il calcestruzzo può anche essere soggetto a rigonfiamenti interni distruttivi e dovuti a composti chimici incompatibili in esso contenuti.

6.2.1 Agenti fisici o meccanici

Le zone di struttura in cui il conglomerato non risulta sufficientemente protetto possono essere soggette a cicli di gelo e disgelo che causano una variazione del volume dell'acqua libera contenuta nei pori, con conseguente sfaldamento.

Condizioni necessarie affinché si verifichi il fenomeno sono:

- la presenza di acqua all'interno dei pori;
- la permeabilità del calcestruzzo;
- l'oscillazione della temperatura attorno agli 0 °C.

L'aumento di volume dell'acqua dovuto a congelamento è stimato attorno al 10%; tale incremento aumenta ulteriormente la pressione della fase liquida rimanente, a sua volta contrastata dallo strato impermeabile di ghiaccio che procede dall'esterno verso l'interno. Si producono in tal modo sfaldamenti e rigonfiamenti che interessano gli strati superficiali e disgregano la pellicola di malta di cemento che si forma all'atto del getto contro le casseforme, questo rende la superficie ruvida e maggiormente esposta ad un nuovo processo e provoca una diminuzione dello spessore del copriferro.

I sali anti-gelo che si usano per sciogliere la neve sulle strade aggravano la situazione. Il calore di fusione, fornito quasi esclusivamente dal conglomerato cementizio provoca un abbassamento di temperatura e conseguentemente forti contrazioni. I sali, generalmente distribuiti in maniera non uniforme sul manufatto, provocano congelamenti differenziali che complicano il fenomeno. La presenza di ioni di cloruro, inoltre, accelera la corrosione delle armature.

Nelle zone alpine, per alcuni periodi dell'anno, tale fenomeno è dovuto agli sbalzi termici tra il giorno e la notte e quindi i cicli possono risultare molto numerosi. Quando le superfici dell'impalcato e delle spalle sono esposte all'acqua battente, abrasione ed erosione contribuiscono al degrado.

Le soluzioni a questo problema sono orientate nel ridurre la permeabilità del calcestruzzo mediante additivi areanti da aggiungere all'impasto o trattamenti con prodotti impermeabilizzanti (trattamenti siliconici) che si possono utilizzare in qualsiasi momento della vita del manufatto.

6.2.2

Agenti fisico-chimici

Se non sono prese adeguate precauzioni, i fenomeni di ritiro del calcestruzzo possono indurre varie forme di rottura (fessurazione) nei diversi stadi formativi del materiale. Le prime fessure possono manifestarsi nel giro di poche ore dal getto e sono dovute all'assestamento del calcestruzzo nelle casseforme. La fessurazione aumenta all'aumentare del rapporto acqua/cemento, della sedimentazione e della quantità di cemento nell'impasto; per contro diminuiscono all'aumentare del contenuto di umidità del conglomerato e da questa osservazione nasce la pratica comune di bagnare le superfici del getto dopo la presa per alcuni giorni.

Dopo la rimozione delle casseforme possono seguire, a causa della naturale contrazione per essiccazione del conglomerato, fessurazioni capillari superficiali che diventano tanto più ampie e profonde anche grazie all'elevato calore di idratazione. Nel lungo termine le fessurazioni dovute a deformazione da essiccazione sono originate dalla successiva perdita di acqua libera.

Queste problematiche facilitano l'accesso degli agenti aggressivi aumentando la velocità di degrado.

6.2.3

Agenti chimici

L'ambiente in cui è inserito il ponte gioca un ruolo fondamentale per la determinazione dei tipi di attacco chimico al calcestruzzo, atmosfere industriali e marine risultano particolarmente aggressive così come acque fluenti e terreni a bassa resistività. Per di più la presenza di basse temperature induce i gestori della rete stradale l'uso dei già citati sali anti-gelo che risultano molto aggressivi nei confronti del conglomerato cementizio.

6.2.4

Carbonatazione

Il biossido di carbonio atmosferico si dissolve nell'acqua sotto forma di acido carbonico il quale reagisce con la maggior parte degli idrati di cemento. Questa reazione, chiamata carbonatazione, procede molto lentamente nella porosità aperta del calcestruzzo implicando il passaggio del pH da fortemente alcalino ($\text{pH}=12\div 13$) a debolmente alcalino ($\text{pH}=8$) e quindi l'abbassamento della passivazione dell'acciaio d'armatura, dando origine al processo di corrosione. La velocità di carbonatazione dipende dalle dimensioni dei pori capillari e dal contenuto d'acqua. Velocità maggiori si registrano nel caso in cui i pori, sufficientemente ampi, permettano la presenza di acqua sulle pareti (che funge da solvente) e l'assorbimento di anidride carbonica al loro interno. Velocità minori si hanno quando il calcestruzzo è tenuto asciutto o è completamente immerso in acqua; in questo caso ci vogliono molti anni o perfino decenni perché la carbonatazione superi il normale copriferro.

6.2.5

Attacco solfatico

L'attacco solfatico è originato da una reazione chimica tra lo ione solfato (SO_4^{--}) e l'idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente nella pasta di cemento. I solfati nel calcestruzzo possono essere introdotti dalla presenza di acqua selenitosa o marina, dal contatto con terreni contenenti solfati o con l'esposizione ad atmosfere industriali ricche di vapor d'acqua e anidridi solforose o solforiche. Possono avere comunque anche origine interna se l'impasto contiene aggregati piritici o gessosi.

La reazione menzionata avviene in due fasi:

1. Reazione del solfato con l'idrossido di calcio;
2. Formazione di gesso che reagisce con alluminati per formare il solfo alluminato di calcio (ettringite).

L'ettringite è una sostanza cristallina, la cui formazione avviene con un aumento di volume che induce forti pressioni interne conducendo alla disgregazione del calcestruzzo.

6.2.6

Reazioni alcali-aggregati

All'atto della preparazione dell'impasto, la presenza d'inerti incompatibili può dare inizio a complesse reazioni chimiche, con conseguenze meccaniche distruttive. Fra le reazioni conosciute la più frequente è la reazione alcalo-aggregati (ASR). All'interno della pasta di cemento si crea un ambiente fortemente alcalino dovuto alla presenza dell'idrossido di calcio, dell'idrossido di sodio e del manganese. Tale ambiente reagisce con le particelle di silicio degli aggregati formando un gel espansivo che provoca tensioni nel conglomerato.

L'espansione del calcestruzzo può produrre tensioni rilevanti nei ferri d'armatura con conseguenti fessurazioni della superficie del conglomerato.

6.3

DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: L'ACCIAIO

6.3.1

Corrosione

A contatto con l'atmosfera o con agenti chimici l'acciaio può reagire ed ossidarsi. Nelle strutture di ingegneria civile questo meccanismo di corrosione avviene principalmente a causa di un processo elettrochimico in soluzione. L'intensità dell'ossidazione dipende dal tipo di acciaio, dalle sue proprietà meccaniche e dai parametri che intervengono nella reazione quali: composizione, trattamento, forma, tensioni agenti, concentrazione dei reagenti, pH, contenuto di ossigeno, temperatura (Abdunur C., 2000).

L'acciaio esposto all'umidità atmosferica (>50÷70%), alla polvere ed altri depositi, specialmente contenenti solfati, si ossida spontaneamente. Questa corrosione atmosferica accelera in ambienti inquinati.

Nel c.a. e c.a.p. la corrosione delle barre d'armatura inizia quando la protezione alcalina è distrutta dalla carbonatazione o dagli ioni-cloruro. Il processo evolve facilmente dove il copriferro manca di spessore e densità; e si intensifica in presenza di ossigeno e di umidità, specialmente quando quest'ultima si alterna a stati secchi.

L'ossido risultante dal processo riduce le sezioni effettive dell'acciaio, la loro duttilità e la resistenza a fatica. L'aumento di volume, che può essere fino a sei volte il volume dell'acciaio reagito, può far letteralmente esplodere il calcestruzzo circostante: si assiste in tal caso al cosiddetto fenomeno dello spalling. Gli strati d'acciaio più interni, quelli non interessati dal fenomeno, possono risultare integri ma la loro inaccessibilità implica difficoltà d'ispezione e quindi di valutazione incerta.

I cavi di precompressione sono particolarmente sensibili allo spessore del copriferro o alla qualità della malta di iniezione delle guaine se del tipo post teso; inoltre possono essere soggetti ad altre forme di corrosione, tipo infragilimento da idrogeno o meccanismi di fatica.

In molti casi, come già detto, la corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo avviene senza segni esterni o difetti. Spesso dove l'impermeabilità del conglomerato è venuta meno le infiltrazioni d'acqua possono manifestarsi sottoforma di tracce di ruggine e/o efflorescenze superficiali.

I cavi d'acciaio corrodono principalmente in due modi :

- *Pitting*, succede principalmente nei punti di ristagno come le zone basse delle sospensioni dei cavi, le selle di deviazione, le zone di ancoraggio e connessioni in genere.
- *Stress cracking corrosion*, implica una reazione tra gli ossidi della superficie in tensione e l'acciaio che produce idrogeno nascente e implica quindi l'infragilimento del metallo.



Figura 6.1. a) corrosione da pitting; b) corrosione da stress cracking (Abdunur C., 2000)

Nel caso di grossi cavi di precompressione o di sospensione gli spostamenti relativi tra i fili curvi dei cavi e dei trefoli possono generare forze locali di frizione. Questo meccanismo chiamato *fretting* consuma o addirittura rompe la superficie di contatto. A lungo andare il danneggiamento peggiora con la presenza delle particelle di metallo distaccatesi per il processo. La variazione di tensione dovuta al *fretting* può essere anche causa di rottura per fatica e condurre a collassi inaspettati della struttura.

I cavi d'acciaio ad alto contenuto di carbonio con impurità sottoposti ad una tensione eccessiva e concentrata possono essere oggetto di collassi fragili per contro l'acciaio dolce ha un comportamento più duttile e dunque più sicuro.

6.4 DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: LA MURATURA

6.4.1 Degrado di tipo chimico

Degrado della malta

La malta utilizzata nelle murature è soggetta ad un invecchiamento naturale che comporta una riduzione della sua capacità legante. Il fenomeno risulta accelerato dalla presenza di forti vibrazioni ambientali. Le malte caratterizzate da ridotte proprietà meccaniche iniziali evidenziano una maggiore velocità di diminuzione delle stesse (Binda, 2000).

Degrado degli elementi lapidei (naturali o artificiali)

Il degrado degli elementi murari è legato principalmente alla presenza di solfati e cloruri (smog, piogge acide). I prodotti delle reazioni, che possono avvenire solo in presenza di umidità, comportano un rigonfiamento del materiale e quindi lo sfaldamento dello stesso.

6.4.2 Degrado di tipo meccanico

Le principali cause di degrado delle murature di tipo meccanico sono la presenza di vegetazione, l'azione dei cicli di gelo e disgelo, le vibrazioni meccaniche.

Le radici delle piante tendono a penetrare nelle murature provocando fessurazioni che facilitano l'infiltrazione di acqua. La rimozione delle radici, ad opera dell'uomo o in seguito alla morte naturale della pianta, può causare pericolosi dissesti nella muratura.

Il passaggio dallo stato liquido a quello solido dell'acqua comporta un aumento di quasi un decimo del suo volume. Nel caso dell'acqua presente nelle murature, il fenomeno ha inizio in corrispondenza della superficie dell'elemento e prosegue poi verso l'interno. All'interno dell'elemento si vengono a creare pressioni interstiziali la cui entità risulta inversamente proporzionale alla diametro dei pori del materiale (un diametro inferiore comporta una maggior risalita capillare, una minor "disponibilità" di spazio per la dilatazione dell'acqua e quindi maggiori pressioni).

Le vibrazioni ambientali favoriscono il deterioramento della muratura per due motivi: l'elevato numero di cicli che caratterizza questo tipo di sollecitazione (normalmente di ampiezza molto bassa) comporta da un lato il deterioramento ed il distacco della malta della muratura, dall'altro il formarsi di microfessure negli elementi che facilitano la penetrazione dell'acqua ed in generale il degrado dell'elemento. Le vibrazioni ambientali sono causate principalmente dal traffico transigente sulla struttura o in prossimità di essa.

6.5 DEGRADO DEI MATERIALI COSTITUENTI: IL LEGNO

6.5.1 Generalità

Il legno, materiale completamente biodegradabile (e ciò può essere un vantaggio dal punto di vista dell'ecologia), comporta degli svantaggi dal punto di vista della durabilità quando è usato come materiale da costruzione, e in particolare per le strutture portanti.

Il legno degradato presenta caratteristiche di resistenza drasticamente ridotte rispetto al materiale sano.

Il degrado del materiale avviene sulla base di ben determinate azioni, anche molto diverse tra loro, in presenza di altrettanto ben determinate condizioni ambientali. Eliminando le condizioni che favoriscono gli attacchi al materiale si elimina di fatto anche la possibilità di degrado, come dimostrano le molteplici costruzioni in legno dell'antichità che si sono conservate fino ai giorni nostri (ponti, coperture, solai, ...).

Nei paragrafi seguenti si descrivono i principali agenti di degrado del legno e le condizioni che ne favoriscono lo sviluppo, per gli argomenti si è fatto riferimento a *Il manuale del Legno Strutturale* Vol. I, Mancosu editore, a cui si rimanda per un ulteriore approfondimento.

6.5.2 Agenti non biologici

Fra i principali agenti di degrado non biologici si ricordano quelli di seguito riportati.

Luce visibile e raggi UV

La radiazione solare, e in particolare la componente ultravioletta, causa un'ossidazione fotochimica degli stati più superficiali del legno esposto determinando un ingiallimento o un imbrunimento dei legni chiari oppure uno sbiancamento dei legni scuri. Successivamente il colore del legno assume tonalità grigiastre e biancastre.

Tale reazione coinvolge solamente gli strati superficiali e perciò non altera assolutamente le caratteristiche di resistenza degli elementi coinvolti.

Radiazioni elettromagnetiche di elevata frequenza e radiazioni ionizzanti (radio onde, microonde raggi x, raggi gamma, ecc.) possono modificare la struttura molecolare del legno e conseguentemente le sue caratteristiche di resistenza; tali situazioni comunque non sono normalmente riscontrabili in opera.

Temperatura

Temperature elevate (80-100°C) mantenute per periodi sufficientemente lunghi possono indurre alterazioni nel legno tali da potersi configurare come degrado termico. Nel caso in cui il legno venga a trovarsi per tempi molto lunghi in condizioni di elevata temperatura e pressione e assenza di ossigeno si ha il fenomeno della carbonizzazione, che porta il legno a trasformarsi in lignite e successivamente carbon fossile.

Agenti chimici

A differenza di molti altri materiali da costruzione (acciaio e calcestruzzo) il legno risente in maniera poco marcata dell'azione degli inquinanti contenuti nell'aria e nelle acque meteoriche. La stabilità chimica delle molecole che compongono la parete cellulare lo rendono adatto a resistere all'azione di molti sali, solventi organici e soluzioni acquose acide o alcaline.

Per quel che riguarda il legno degli elementi strutturali ciò si traduce in una pressoché totale insensibilità all'azione chimica delle soluzioni saline dovute allo spargimento di sale sulle strutture stradali e delle deiezioni organiche come il guano dei piccioni nelle strutture di copertura accessibili.

6.5.3

Agenti biologici

Ben più importanti, per quanto riguarda il degrado del legno negli elementi strutturali, risultano gli agenti biologici. Alcuni organismi viventi trovano nel legno fonte di nutrimento o semplicemente rifugio.

Le due principali categorie di organismi degradanti il legno sono i funghi e gli insetti.

Funghi

I funghi che attaccano il legno sono organismi vegetali parassiti o saprofiti che hanno origine da spore microscopiche liberate a loro volta dai corpi fruttiferi di funghi già sviluppatasi.

Le spore, presenti in abbondanti quantità in quasi tutti gli ambienti, sono molto resistenti alle condizioni ambientali e possono rimanere inattive per periodi molto lunghi in attesa di trovare le condizioni ottimali di sviluppo (umidità del legno sufficiente). Una volta entrate in contatto con il legno esse germinano producendo delle ife filiformi che penetrano nel legno, ne alterano la colorazione (biancastro, verdastro, nerastro, azzurrato, ecc.) e lo degradano nutrendosi delle pareti cellulari (solo alcuni funghi). La fase finale del ciclo vitale è lo sviluppo del corpo fruttifero (sotto forma di cappello, di mensola o di crosta irregolare) che sprigiona a sua volta spore riproduttrici.

Non tutti i funghi determinano una riduzione delle capacità di resistenza meccanica del legno (funghi cariogeni), alcuni di essi si limitano a cambiare la colorazione del materiale (funghi cromogeni).

Condizioni favorevoli di attacco

I fattori che controllano lo sviluppo dei funghi nel legno sono:

- Temperatura: i funghi si sviluppano a temperature comprese tra 3°C e 50 °C a seconda del tipo, le spore resistono invece a temperature comprese tra -150°C e +100°C;
- Umidità: è il parametro più importante per lo sviluppo dei funghi, l'umidità minima oscilla sui 18-20%. In presenza di umidità molto elevata il fungo interrompe la crescita per mancanza di ossigeno, ciò spiega la lunga durata di elementi lignei immersi permanentemente in un fluido o nel terreno umido. I pali di legno infissi nel terreno solitamente presentano un degrado nella zona del bagnasciuga piuttosto che nella parte esterna ben ventilata o della parte interrata costantemente imbibita d'acqua;
- Luce: i funghi non hanno bisogno di fonti luminose per svilupparsi, essi non svolgono alcuna fotosintesi;
- Ossigeno: i funghi hanno bisogno di una certa quantità di ossigeno per svilupparsi, come già accennato un eccesso d'acqua può portare ad un blocco della crescita;

- Azoto: esso è un elemento nutritivo la cui abbondanza nel legno condiziona il tasso di sviluppo di alcuni funghi. Si noti che eventuali sostanze azotate (guano di piccione) non impregnano il legno e dunque non costituiscono una sorta di fertilizzante per i funghi;
- pH: i funghi trovano una condizione ottimale di sviluppo in ambiente leggermente acido, ma non tollerano le reazioni alcaline;

Principali conseguenze dell'attacco fungino

Le prime conseguenze dell'attacco fungino nel legno sono l'alterazione cromatica del materiale (a seconda del tipo di fungo e/o di legno) e la perdita di peso e consistenza con conseguente perdita di resistenza meccanica.

Lo stato di avanzamento della carie è esprimibile qualitativamente in tre fasi che corrispondono a tre differenti stati verificabili sul materiale con semplici strumenti:

- **Legno ancora sano:** presenta una lieve alterazione di colore ma offre una buona resistenza all'infissione di un chiodo che risulta saldo. Se percosso con un martello il legno risponde con un suono chiaro e netto. Tentando di staccare una scheggia con la lama di un taglierino o di un cacciavite, facendo leva con la punta, la scheggia si rompe alcuni centimetri distante dal punto di leva in corrispondenza del quale il legno rimane intatto;
- **Carie incipiente:** il legno ha cambiato colore, il chiodo si infigge piuttosto facilmente ma ha una discreta tenuta al rifollamento. Se colpito con il martello il legno trasmette un suono sordo, poco smorzato. Alla prova della scheggia il legno si rompe molto vicino al punto di leva;
- **Carie avanzata:** alla prova di infissione il chiodo si pianta con troppa facilità e non presenta resistenza al rifollamento. La percussione con martello restituisce un suono sordo, il martello schiaccia la superficie lasciando i segni della percussione. La prova della leva non è eseguibile, il legno cede nel punto di leva.

La possibilità che il legno in opera sia in stato di avanzamento 2 o 3 è subordinata al fatto che si riesca a cambiare le condizioni ambientali di modo che il legno mantenga costantemente un'umidità inferiore al 18% oltre che siano adottate opportune forme di trattamenti preservanti.

Insetti

Il degrado del legno dovuto agli insetti ha solitamente conseguenze meno gravi di quello dovuto all'attacco fungino. Gli insetti, ciò nonostante, possono attaccare legno stagionato in opera da molti anni che non ha mai manifestato problemi di attacco fungino.

Il danno provocato dagli insetti è dovuto principalmente alla riduzione della sezione resistente ultima dovuta all'asportazione di materiale, sotto forma di gallerie, da parte degli insetti. Le gallerie vengono scavate per procurarsi la sostanza nutritiva di cui hanno bisogno o in alcuni casi solo come rifugio. La demolizione del legno, operata con le robuste mandibole, è accompagnata dai residui di materiale organico (rosame: polvere di legno ed escrementi) che possono essere osservati sotto forma di mucchietti di polvere in prossimità gli elementi attaccati.

L'aspetto, il diametro e l'andamento delle gallerie (che partono dalla superficie esterna) e del rosime dipende dalla specie di insetto responsabile dell'attacco, che risulta dunque individuabile dall'esperto. I fori presenti sulla superficie del legno sono dei fori di sfarfallamento, dipendono dalla tipologia di attacco e spesso sono di diametro molto diverso da quelli presenti nella parte interna dell'elemento.

Il ciclo di vita degli insetti xilofagi avviene, nella maggior parte dei casi, secondo le seguenti fasi:

1. Deposizione delle uova: la femmina adulta, fecondata, depone le minuscole uova sulla superficie;
2. Sviluppo della larva: la larva che nasce è in grado di rodere il legno con le mandibole e di scavare vere e proprie gallerie nella parte interna, dopo un periodo di nutrimento che va da 1 a 3 anni la larva si porta in prossimità della superficie;
3. Fase di pupa e metamorfosi: la larva crea una celletta in cui si impupa per completare la metamorfosi passando alla fase farfalla;
4. Sfarfallamento: l'insetto adulto rompe il legno superficiale e sfarfalla. Sul legno rimane un foro d'uscita che permette di identificare l'attacco xilofago. A questo punto l'insetto può accoppiarsi dando origine ad un altro ciclo vitale.

In molti casi gli insetti si cibano dell'alburno che risulta più ricco di sostanze nutritive e di legno primaticcio, più tenero.

Alcuni tipi di insetti quali le termiti e le formiche non praticano alcun foro visibile sulle superfici; altri non sono in grado di attaccare il legno stagionato e possono cibarsi solo del legno fresco.

7 DEGRADO DOVUTO FATTORI ESTERNI

7.1 PRINCIPALI CAUSE DI DEGRADO DEI PONTI

Si riportano di seguito le principali cause di degrado dei ponti; l'influenza di questi singoli fattori dipende dalla tipologia e dal materiale con cui è realizzata la singola struttura (Abdunur C., 2000).

- Aumento del traffico in termini di: intensità, frequenza e velocità rispetto alla situazione di progetto;
- Variazioni delle caratteristiche degli alvei o errate scelte progettuali delle fondazioni in alveo che facilitano lo scalzamento delle stesse;
- Deterioramento dei materiali (legato alle condizioni ambientali più o meno aggressive);
- Difetti di costruzione;
- Urto di veicoli o di solidi trasportati dalla corrente.

7.2 DEGRADO DOVUTO AI CARICHI APPLICATI

Da un punto di vista meccanico la struttura viene danneggiata quando non è più rispettato l'equilibrio, quando l'entità o la ripetitività di forze e deformazioni applicate eccedono i limiti ammessi dal materiale si può arrivare allo stato limite ultimo. In questo sottoparagrafo si riportano le principali forme di degrado dovute a fattori meccanici esterni.

7.2.1 Carichi permanenti e carichi mobili.

Talvolta, in fase di progetto, vengono commessi errori nella stima dei carichi permanenti, ciò può condurre al prematuro degrado della struttura. Alcuni fattori che possono ridurre il fattore di sicurezza della struttura sono la sottostima della quantità o della densità del materiale costituente e una mancata valutazione del peso degli elementi non strutturali.

I ponti in calcestruzzo precompresso iperstatici (impalcato continuo) risentono degli effetti di fluage del cls e del rilassamento dell'acciaio; questi fenomeni, legati all'entità dei carichi permanenti spesso causano seri danni strutturali. Per una corretta stima delle reazioni agli appoggi è opportuno anche confrontare le possibili differenze, in termini di forza, tra le soluzioni di uno schema strutturale assumendo il materiale come viscoelastico od elastico.

I carichi da traffico intenso hanno effetti di degrado elevati, producono effetti dinamici e di fatica e sono tra le principali cause dell'invecchiamento dei ponti. Per tener conto del costante aumento dei pesi veicolari e della densità di traffico la normativa nazionale di progetto è aggiornata periodicamente. Per una corretta interpretazione del degrado da traffico delle strutture esistenti è necessaria una valutazione aggiornata delle configurazioni dei carichi mobili che risulta indispensabile anche per dare una stima della loro capacità di carico.

Nei ponti stradali, in fase di progetto, gli effetti dinamici sono tenuti in considerazione aumentando i corrispondenti carichi statici con dei coefficienti moltiplicativi; questi dipendono da parametri strutturali, di superficie, veicolari e di velocità. In realtà gli effetti dinamici sono maggiori vicino alle discontinuità superficiali e ciò spiega le rotture che si osservano di frequente nei giunti di espansione dei ponti che costituiscono punti sensibili della struttura anche in virtù della tenuta stagna a cui sono chiamati. Effetti di frenatura longitudinali e vibrazioni possono spostare e deteriorare i sistemi di supporto inadeguatamente progettati.

7.2.2

Effetti termici e igroscopici sui materiali

La fluttuazione della temperatura può influire molto sulla durabilità del materiale sollecitando con effetti locali e globali la struttura.

Il calcestruzzo, gettato a temperature molto fredde, può deteriorarsi a causa dell'espansione dell'acqua gelata contenuta nell'impasto. Il calcestruzzo gettato a temperature maggiori di 35 gradi, invece, indurisce troppo velocemente e vede una riduzione della porosità. L'idratazione accelerata del cemento crea inoltre gradienti di temperatura nucleo-superficie, inducendo stress superficiali, da cui può seguire un'estesa fessurazione che va a peggiorare le doti di impermeabilità del conglomerato.

Altro effetto simile è causato da un meccanismo completamente differente: alte temperature e bassa umidità atmosferica favoriscono la perdita di acqua libera creando un considerevole gradiente igroscopico vicino alla superficie del calcestruzzo. La sollecitazione risultante, meglio conosciuta come *contrazione da essiccamento* induce tensioni superficiali molto elevate che eccedono la resistenza a trazione del calcestruzzo e spesso anche le sollecitazioni dovute ai carichi mobili.

Dove l'armatura secondaria specifica è insufficiente, gli effetti sovrapposti dei meccanismi di idratazione e microscopici causano fratture superficiali estese, conducendo al deterioramento del calcestruzzo e conseguentemente all'esposizione dell'acciaio alla corrosione.

Nell'acciaio la bassa temperatura incrementa la resistenza, ma diminuisce la duttilità; in certi tipi di acciaio si possono manifestarsi rotture fragili con deformazioni praticamente non plastiche.

Nella muratura, come già evidenziato nei paragrafi precedenti, le variazioni termiche, associate alla presenza di umidità, rappresentano la principale causa di degrado. La presenza di umidità risulta un parametro determinante per lo sviluppo delle reazioni chimiche di deterioramento del materiale costituente; essa svolge inoltre la funzione di trasportare un componente chimico verso l'altro, consentendo così quel contatto in assenza del quale queste reazioni non potrebbero avere luogo.

Anche nel legno la presenza di umidità è la principale causa di degrado, essa favorisce lo sviluppo dei funghi. L'umidità minima che consente lo sviluppo di funghi nel legno è dell'ordine del 18-20%. Il legno soggetto ad attacchi fungini può subire una forte riduzione della resistenza meccanica.

7.2.3

Effetti termici sulla struttura

Nei ponti in c.a., l'irraggiamento solare si diffonde attraverso la soletta creando un potenziale campo di sollecitazione non lineare, ε , parzialmente limitato dalla conservazione delle sezioni piane a una distribuzione lineare, ε_m . Sull'altezza della sezione, h , si risentono due effetti meccanici longitudinali:

- un profilo di tensioni auto-bilanciate non lineari;
- una distribuzione di sollecitazioni lineare.

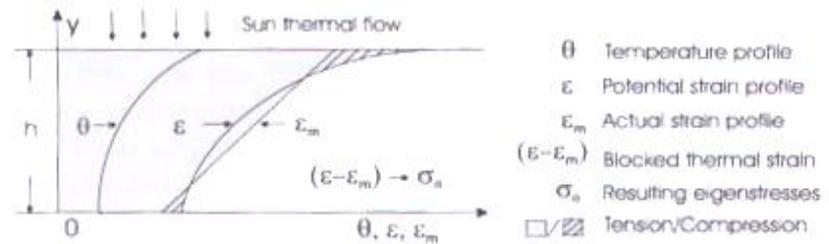


Figura 7.1. Distribuzione delle tensioni per effetto della temperatura (Abdunur, 2000).

Il primo amplifica la tensione superficiale locale dovuta al calore di idratazione e alla contrazione da essiccamento.

Il secondo, in caso di campate iperstatiche comporta tensioni di flessione che, se non considerate, possono causare rotture al lembo inferiore degli appoggi intermedi.

In strutture composte, si osservavano spesso deterioramenti dei connettori dovuti al differente coefficiente di espansione termica tra acciaio e calcestruzzo.

7.2.4

Erosione (scour)

L'indebolimento dei punti d'appoggio delle pile sul terreno (fondazioni) da parte dell'acqua è sempre stato una delle principali cause del collasso dei ponti; con il continuo progresso nelle tecnologie delle fondazioni profonde questo rischio è stato praticamente eliminato nelle strutture più recenti. Tale problematica prende il nome inglese di *scour*, che in italiano è tradotto con *erosione*. L'erosione, da parte dell'acqua, del terreno sotto le fondazioni indebolisce i punti d'appoggio e può causare il collasso dell'intera opera. Questo effetto è modellato nel sistema con l'elemento *Smart Flag: Erosione – pericolo di scalzamento*.

Nel caso di ponti ad arco in muratura o calcestruzzo i fenomeni di scalzamento ed in generale i cedimenti delle fondazioni comportano danni irreversibili di notevole entità e rappresentano la principale causa di collasso.

7.2.5

Sisma

Elevate accelerazioni del terreno, dovute a sisma, possono danneggiare seriamente i ponti in c.a. costituiti da pesanti elementi rigidi, eccessive barre d'acciaio longitudinali e/o insufficienti rinforzi trasversali.

Un comportamento più soddisfacente al sisma si è riscontrato nei ponti continui in cemento armato, a piastra in cemento armato precompresso e nei ponti e travata in c.a.p. dotati di appoggi in neoprene.

7.2.6

Impatto

L'impatto di natanti e veicoli può produrre seri danni alle sovrastrutture e alle sottostrutture, in particolar modo negli elementi snelli e quindi negli elementi in acciaio.

Nei ponti ad arco e reticolari a via inferiore (acciaio, c.a. e legno) si presentano spesso danneggiamenti dell'arco, dei correnti superiori, degli elementi di parete e dei controventi dovuti ad impatto di veicoli.

7.2.7

Fuoco

Il calore causato da una combustione avvenuta nei pressi della struttura (incendio di veicoli) può essere causa di un serio deterioramento del materiale costituente.

Il cemento armato a 200°C subisce delle trasformazioni che abbassano la resistenza a compressione del conglomerato e la resistenza a trazione delle armature; nel cemento armato precompresso la soglia di danno si abbassa a 175 °C, solo le barre d'acciaio ad alta resistenza possono raggiungere temperature di esercizio attorno ai 350-405 °C.

L'acciaio risulta più sensibile del c.a. all'esposizione al fuoco in quanto si presenta un rapido aumento della temperatura in tutta la sezione dell'elemento esposto. Si sottolinea come la mancanza di protezione (strati coibenti) negli elementi delle strutture da ponte le renda vulnerabili a tali eventi, che comunque risultano poco probabili.

Il legno, a differenza degli altri materiali da costruzione è combustibile, dunque in caso di incendio può alimentare e propagare la reazione di combustione. È importante comunque considerare che le proprietà meccaniche del materiale incombusto rimangono pressoché invariate durante e dopo l'evento; inoltre la velocità di combustione e quindi di deterioramento dell'elemento ligneo è relativamente bassa (circa 6 mm/min).

7.3

DEGRADO PER ERRORI PROGETTUALI

Le scelte progettuali sono fondamentali per ottenere la durabilità del materiale e della struttura. Il degrado delle strutture da ponte può risultare accelerato da errori compiuti in sede di progetto (Abdunur C., 2000). Alcuni sono:

- Forma e disposizione inappropriate degli elementi strutturali con riguardo ad aspetti della durabilità e dell'accessibilità d'ispezione e manutenzione;
- Modelli teorici che non colgono comportamento globale e locale della struttura, (specialmente quello a fatica);
- Insufficienti precauzioni contro la corrosione;
- Scelta e/o confezionamento dei materiali errati.

In seguito sono menzionati alcuni errori comuni di progetto.

7.3.1

Ponti ad impalcato in c.a. e c.a.p.

Drenaggio o impermeabilizzazioni mal progettati, copriferro esiguo, poco compatto e permeabile sono dettagli che possono diminuire sensibilmente la vita di servizio di una struttura.

Nelle solette dei ponti in cemento armato ordinario, gli errori di progetto strutturale hanno relativamente poche conseguenze. Generalmente il degrado può presentarsi a seguito di tensioni derivanti da:

- azioni termiche trascurate;
- spinte esterne non equilibrate da armature;
- armature secondarie inadeguate;
- vincoli trasversali dei piani principali d'armatura mancanti;
- ancoraggi e sovrapposizioni delle barre ridotti e supporti troppo vicini alle sezioni finali del calcestruzzo.

Nei ponti di cemento armato precompresso post-tesi i principali errori di progetto sono costituiti da precauzioni anti-corrosione insufficienti, quelli più frequenti sono:

- sigillatura non impermeabile degli ancoraggi dei cavi;
- tenuta non stagna delle guaine metalliche dei cavi da precompressione;
- inefficiente impermeabilizzazione della soletta e dei punti di ancoraggio dei cavi;
- drenaggio inadeguato dei giunti di espansione;
- insufficiente copriferro atto a prevenire il degrado a catena delle armature: corrosione-spalling-esposizione dei cavi.

Gli ancoraggi dei cavi sulla soletta ed i molteplici giunti di costruzione dei cavi aumentano i rischi di corrosione.

In passato, per errori di progetto e di costruzione, si sono verificate rotture a flessione nelle travi scatolari costruite per conci.

Tali rotture possono essere generate da:

- errata valutazione degli effetti del gradiente termico;

- sottovalutazione delle perdite di precompressione per attrito e/o della distribuzione degli sforzi dovuta a fenomeni di fluage e contrazione.

Le sezioni dei giunti si possono anche aprire quando i cavi sono agganciati impropriamente o mancano di dispositivi di unione efficienti e/o rinforzo.

In prossimità degli appoggi, si possono verificare rotture da taglio dovute a staffe sotto dimensionate o ad una sovrastimata capacità della compressione longitudinale di ridurre il taglio. Azioni di flessione e taglio spesso si combinano causando forme di rottura intermedia.

Localmente armature di frettaggio sotto dimensionate degli ancoraggi dei cavi di precompressione causano rotture di diffusione o di trasferimento.

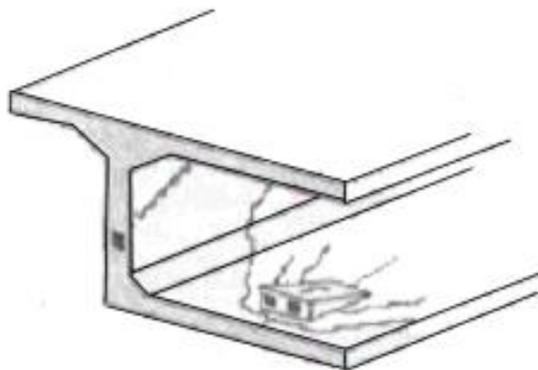


Figura 7.2. Principali tipi di fessurazione nelle zone di ancoraggio dei cavi di precompressione (Abdunur, 2000).

Negli ancoraggi nelle zone d'anima, si possono verificare fratture di diffusione che ripercorrono il tracciato dei cavi sulla superficie. Sebbene meccanicamente tollerabile, esse favoriscono l'infiltrazione d'acqua con la conseguente possibilità che si instaurino fenomeni di gelo-disgelo. Nei blocchi di ancoraggio posizionati nelle solette inferiori possono instaurarsi fessure di diffusione che interessano entrambi i lati, tali fratture sono organizzate a spina di pesce e possono estendersi anche all'anima (vedi Figura 7.2); le fessure di trasferimento si sviluppano trasversalmente dietro il blocco dei cavi.

Le discontinuità, principalmente fessure da flessione e apertura dei giunti, sviluppano spesso un alto rischio di fatica per i cavi, dipendente dal numero, intensità e variabilità dei cicli di carico. Collasso dei vincoli e spostamenti irreversibili si sommano, riducendo ulteriormente la vita di servizio.

L'esperienza ha tuttavia dimostrato che i danni da fatica non si manifestano se le armature di progetto riescono ad evitare rotture nelle sezioni di calcestruzzo.

7.3.2

Ponti in acciaio e composti acciaio calcestruzzo

Nei ponti in acciaio la maggiore causa di degrado è la corrosione.

Il processo elettro-chimico di corrosione è spesso il risultato di un'impermeabilizzazione assente o mal eseguita, di sistemi di drenaggio sottodimensionati. Errori di progettazioni frequenti si riscontrano nelle connessioni di elementi strutturali che favoriscono il ristagno d'acqua e la condensa e/o l'accumulo di materiale. Alcune situazioni a rischio sono:

- Posizionamento di profili con sezione ad U rivolti verso l'alto che comportano ristagni d'acqua e di materiale;
- Connettori (chiodi, rivetti e bulloni) troppo distanziati che favoriscono infiltrazioni di umidità e conseguentemente la corrosione tra gli elementi collegati;
- Elementi di metallo diverso (a diverso potenziale elettrico) messi a contatto, in presenza di umidità, che conducono alla formazione di macrocoppie e conseguentemente alla corrosione del materiale.

Il danneggiamento da fatica è una problematica dei ponti in acciaio spesso trascurata in fase di progetto che è dovuto a carichi mobili di media intensità e alta frequenza. Per questo motivo le connessioni saldate tra travi (rigide) e piastra di impalcato (flessibile) dei ponti in acciaio a piastra ortotropa sono particolarmente vulnerabili.

Generalmente il danneggiamento da fatica si evidenzia in connessioni chiodate o saldate non progettate ad hoc, in presenza di concentrazioni di tensione di differenti origine e cattiva lavorazione.

Alcuni errori di progetto sono:

- Aste di strutture reticolari non convergenti, in cui nascono dei momenti secondari che possono portare a rottura gli elementi o la piastra di connessione;
- Bruschi cambiamenti di sezione nell'elemento che inducono a concentrazioni di tensioni che possono comportare la formazione di fessure;
- Rottura nei collegamenti realizzati come incastri ma progettati come appoggi.

Nonostante il progetto e l'esecuzione di rinforzi nelle strutture metalliche sia più semplice che in quelle in c.a. alcune riparazioni realizzate in modo inappropriato possono comportare serie conseguenze. Si riportano alcuni esempi:

- Rinforzo attraverso saldatura senza avere verificato la saldabilità del materiale di base;
- Errori nelle esecuzioni delle saldature di riparazione delle fessure;
- Sostituzione di elementi di travature reticolari senza considerare la redistribuzione dei carichi permanenti sugli elementi adiacenti;
- Irrigidimenti di elementi di strutture iperstatiche senza valutarne l'effetto sulla redistribuzione delle sollecitazioni;
- Rinforzo di connessioni mediante sistemi di connessione non compatibili con la connessione originale (saldature di rinforzo in collegamenti chiodati, bulloni resistenti a taglio di rinforzo a piastre saldate).

Nei ponti composti acciaio calcestruzzo, i problemi di durabilità e strutturali nascono spesso da una progettazione inadeguata dei connettori trave-soletta in relazione alle deformazioni dovute a fenomeni viscosi e alle forze locali. Inizialmente, a seguito al ritiro del calcestruzzo, si possono formare fratture capillari nello stesso attorno ai connettori trave in acciaio-soletta calcestruzzo. Il graduale propagarsi di queste fratture e la plasticizzazione locale in corrispondenza dei connettori possono portare ad uno scorrimento relativo tra trave e soletta che altera il comportamento monolitico previsto in fase di progetto.

Le fessure di cui si è parlato assieme a quelle che si possono formare nelle zone a momento negativo facilitano l'infiltrazione di acqua e quindi il degrado del materiale riducendo la vita utile della struttura.

7.4 **DEGRADO PER DIFETTI DI COSTRUZIONE**

I progetti non adeguatamente dettagliati, la non osservanza delle regole dell'arte del costruire, la mancanza dei controlli di qualità e l'insufficiente organizzazione sono fra le maggiori cause dei difetti costruttivi. Di seguito sono presentate le possibili cause di alcuni dei frequenti difetti riscontrati nelle strutture da ponte.

7.4.1 **Ponti ad impalcato in cemento armato e cemento armato precompresso.**

Comunemente la qualità e l'uso dei materiali in sito è un fattore molto importante.

Nel cemento armato, i difetti di costruzione includono:

- impasto e trasporto dall'impianto di betonaggio irregolari;
- segregazione dovuta all'eccessiva o scarsa vibrazione o getto da un punto troppo alto;
- facce interne di casseforme non preparate (lisce);
- insufficiente accuratezza nell'esecuzione dei giunti;
- repentina variazione termiche.

Qualche volta, una presa rapida del conglomerato causa profonde fratture da ritiro che estendendosi oltre il copriferro, riducendo anche la durabilità delle armature.

Elementi in calcestruzzo prefabbricato con variazioni dimensionali possono causare forze di trasmissione e tensioni di distribuzione parassite.

Quanto alle armature con barre di acciaio, una mancanza di un controllo di qualità può condurre a cattive scelte del tipo di acciaio e dei diametri di piegatura. L'errato posizionamento delle barre, rispetto a quanto stabilito dal progetto, dovuto allo spostamento della stessa prima e durante il getto, spesso riduce il copriferro, causano una prematura corrosione dell'acciaio e conseguente lo spalling del calcestruzzo; inoltre si può anche ridurre la capacità strutturale inizialmente richiesta.

Nelle solette di cemento armato precompresso si incontrano dei difetti specifici di costruzione tra i quali:

- la mancanza di impermeabilizzazione;
- l'incompleto riempimento con malta delle guaine dei cavi di precompressione in ambiente umido e aggressivo;
- l'insufficiente sigillatura dei blocchi di ancoraggio.

In zone congestionate da guaine, che si presentano specialmente nei bordi superiori ed il calcestruzzo gettato con poca cura può aumentare il rischio di segregazione del materiale, fratture da essiccamento e spalling.

A livello strutturale, le guaine dei cavi collocate fuori posto sono i difetti più gravi e più frequenti che si possano incontrare perché inducono un aumento delle forze parassite laterali e delle spinte verso l'esterno che conducono a scheggiatura del calcestruzzo e delaminatura della piastra. Si può anche riscontrare un significativo incremento delle perdite di attrito per frizione che riduce la forza di precompressione e di conseguenza la capacità strutturale.

Nei ponti costruiti per conci, specialmente se di spessore variabile, la mancanza di collante adatto e *chiavi di taglio* all'interfaccia tra due conci, lascia liberi i movimenti relativi con un conseguente forte rischio di infiltrazioni e corrosione. L'insufficiente adattabilità superficiale tra due conci genera anche fessure longitudinali che partono dai punti di contatto.

7.4.2

Ponti in acciaio e composti acciaio calcestruzzo

Le diverse parti costituenti dei ponti in acciaio sono usualmente costruite in officina meccanica ove l'esecuzione dei controlli di qualità sono relativamente facili da mettere in atto. I fattori che riguardano i possibili difetti di costruzione sono perciò principalmente l'assemblaggio e la protezione degli elementi in sito.

I ponti di metallo possono essere assemblati in differenti modi: attraverso travi di varo, usando gru, travature a sbalzo, e così via.

Se queste procedure non vengono analizzate e programmate accuratamente, esse possono mettere a repentaglio l'affidabilità della struttura oltre che l'incolumità degli operatori.

Se le saldature in sito non vengono eseguite a regola d'arte possono trasformarsi in un grave difetto di assemblaggio. La qualità della saldatura è usualmente testabile con metodi non distruttivi quali i raggi x e gli ultrasuoni; se, in fase di progetto, è stata prevista la possibilità di accedere alle zone interessate.

I sistemi di protezione dalla corrosione mal eseguiti e difficoltà di accesso agli elementi per la manutenzione conducono a danneggiamenti estensi. I difetti di costruzione maggiormente pericolosi sono relativi a giunzioni, posizionamento delle barre d'armatura nel calcestruzzo e altri dettagli che favoriscono la condensa, il ristagno l'acqua e l'accumulazione di depositi umidi.

I ponti composti acciaio-calcestruzzo possono aumentare la loro vulnerabilità a seguito di fessurazione non controllata del calcestruzzo risultante da difetti di esecuzione, quali:

- Non osservanza delle specifiche del mix design e delle prescrizioni atte a minimizzare gli effetti del ritiro del calcestruzzo;
- Eccessivo gradiente termico acciaio-calcestruzzo durante la messa in opera del calcestruzzo;
- Rimozione prematura della cassaforma.

7.4.3

Ponti ad arco in muratura

I ponti ad arco in muratura sono strutture caratterizzate da un'elevata rigidità e quindi molto sensibili ai cedimenti delle fondazioni e ai dissesti di pile e spalle. I principali difetti di costruzione sono quindi quelli legati ad un dimensionamento errato delle fondazioni, in particolar modo per quanto concerne i cedimenti differenziali, o degli elementi di sostegno (es: rotazioni delle spalle dovute alla mancanza di equilibrio tra le spinte dell'arco e del terrapieno).

Come per le altre tipologie di ponti, la mancanza o il malfunzionamento del sistema di impermeabilizzazione può portare ad un rapido degrado della struttura. Oltre a favorire il deterioramento dei materiali costituenti, le infiltrazioni d'acqua possono comportare il dilavamento del materiale di riempimento e quindi la formazione di vuoti nello stesso. L'azione del gelo sul riempimento saturo d'acqua comporta inoltre la nascita di forti spinte sui muri di testa e quindi la possibilità di avere uno spanciamento o scorrimento degli stessi oppure una rottura trasversale dell'arco (distacco delle armille dalla volta).

7.4.4

Ponti ad arco in cls

Analogamente ai ponti ad arco in muratura, i ponti ad arco realizzati in cemento armato o non armato presentano un'elevata sensibilità ai cedimenti delle fondazioni e quindi ai difetti nella progettazione o realizzazione delle stesse.

Il materiale con cui sono realizzati questi ponti risente invece dei possibili difetti esecutivi evidenziati nel paragrafo 7.4.1.

7.5

DEGRADO DEGLI ELEMENTI ACCESSORI: APPOGGI E GIUNTI DI ESPANSIONE

Gli elementi accessori dei ponti, *equipment*, sono spesso soggetti a rapido deterioramento, gli appoggi invecchiano e i giunti di espansione si consumano o si deteriorano. In certi casi essi possono rivelare o indurre comportamenti strutturali anomali restringendo o estendendo il movimento previsto della struttura.

Gli apparecchi di appoggio permettono rotazioni con o senza scorrimenti, sono fatti in metallo, calcestruzzo o gomma (neoprene) armata con lamine d'acciaio. I principali difetti che si riscontrano negli appoggi sono:

- la corrosione del metallo;
- la fessurazione e lo spalling del calcestruzzo;
- corrosione del rivestimento e relativo scivolamento con rottura della gomma.

Di norma la corrosione degli apparecchi di appoggio è dovuta più all'ambiente in cui sono montati che al materiale.

Giunti di espansione e gli apparecchi d'appoggio mal progettati o montati scorrettamente, possono deteriorarsi velocemente per effetto di carichi dinamici ripetitivi. Pochi millimetri di differenza tra giunto e superficie stradale amplificano di molto il deterioramento.

Il degrado include:

- rottura degli elementi metallici e delle saldature;
- disorganizzazione e collasso degli ancoraggi in fase di frenatura dei veicoli o azione di mezzi spazzaneve.

Cicli di gelo e disgelo e sale anti-ghiaccio aggravano le condizioni degli ancoraggi nel calcestruzzo. In ponti in curva o inclinati l'uso di giunti dentati è spesso incompatibile con il loro movimento trasversale.

8 IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO NEGLI ELEMENTI

8.1 IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO IN ELEMENTI DI CEMENTO ARMATO

Il calcestruzzo viene normalmente impiegato per la costruzione di qualsiasi elemento costituente la struttura delle opere d'arte stradali; pertanto sia l'ambiente che l'esposizione ad esso, possono essere estremamente variabili fra elemento ed elemento di una stessa struttura (FHWA, 1990). In questo capitolo si descrivono i principali tipi di deterioramento più facilmente riscontrabili negli elementi delle strutture da ponte in c.a. e c.a.p. che vengono di seguito riassunte:

- Fessurazione (cracking);
- Scaling;
- Delaminazioni;
- Spalling ;
- Contaminazione da cloruri;
- Nidi d'ape;
- Pop-outs;
- Usura;
- Danneggiamento da collisione;
- Abrasioni;
- Danneggiamento da sovraccarico;
- Corrosione delle armature;
- Deterioramento del c.a.p.

8.1.1 Esecuzione della fase diagnostica

Per l'identificazione del degrado negli elementi in cemento armato si dovranno preliminarmente soddisfare le seguenti condizioni.

- Accessibilità alla struttura: l'ispezione accurata richiede la piena accessibilità all'elemento, ciò significa predisporre dei mezzi idonei per raggiungerlo (ponteggi, scale, piattaforme mobili) e garantire una libertà di indagine all'ispettore eliminando, ove possibile, gli ostacoli che occultano alla vista l'elemento (vegetazione);
- Pulizia accurata dell'elemento: l'indagine deve essere eseguita su elementi ripuliti da strati di sporcizia quali polvere, rifiuti, calcinacci, ecc. La pulizia oltre ad allontanare la sporcizia più grossolana permette di valutare lo stato di degrado del materiale individuando la presenza di fessure e altri difetti, per questo l'ispettore deve essere munito di attrezzatura specifica di pulizia;
- Illuminazione: in fase d'ispezione è sempre necessaria un'illuminazione ottimale delle superfici. Possono essere quindi indispensabili lampade orientabili che producano un'illuminazione generale e diffusa da abbinare a fonti di luce concentrate.
- Rilievo grafico: una valutazione accurata della struttura richiede la misura dell'estensione delle parti soggette ai differenti tipi di ammaloramento e della loro posizione.

8.1.2

Fessurazione

In elementi di c.a. le fessure possono avere spessore rilevante e visibile anche ad occhio nudo. Negli elementi in c.a.p. invece le fessure, solitamente molto più piccole, devono essere misurate con strumenti appositi. Dalle fessure spesso fuoriescono efflorescenze e macchie di ruggine.

Tutte le fessure negli elementi principali delle strutture da ponte devono essere annotate in fase ispettiva, in particolar modo quelle negli elementi di c.a.p..

Le fessure possono essere classificate come:

1. Capillari, sono misurabili solo con attrezzatura apposita, non sono, solitamente, pericolose per la sicurezza (per aperture minori di 0.5 mm);
2. Medie, possono essere misurate con semplici comparatori (per aperture fra 0.5 e 2 mm);
3. Ampie, possono essere misurate con semplici comparatori e devono essere registrate in fase d'ispezione e tenute sotto controllo tra un'ispezione e l'altra (per valori superiori ai 2 mm).

Negli elementi in c.a.p. ogni tipo di fessura è significativa.

Nei rapporti d'ispezione deve essere indicata la presenza di fessure ed in particolare:

- la lunghezza;
- l'ampiezza;
- la localizzazione;
- l'orientazione.

Inoltre devono essere indicate la presenza di efflorescenze e ruggine che fuoriescono dalle fessure ed eventuali movimenti differenziali tra le due facce interessate.

Per le travi, considerate in posizione orizzontale, soggette a regime flessionale e di taglio, la fessurazione è inquadrabile in varie categorie, le prime due sono di tipo strutturale:

- Le fessure verticali sono fessure da flessione. Partono nella zona tesa di massimo momento flettente (in cui sono più profonde) e si estendono fino alle zone in cui lo sforzo di tensione nel calcestruzzo è inferiore alla resistenza dello stesso a trazione. Si possono notare nelle zone di intradosso e in prossimità della mezzera delle travi inflesse ma possono prodursi anche all'estradosso nella zona di appoggio di travi continue;
- Le fessure inclinate a 45° sono le cosiddette fessure da taglio. Sono collocate nell'anima della trave (non emergono cioè all'intradosso e all'estradosso) in corrispondenza degli estremi, dove lo sforzo di taglio è massimo. Può presentarsi anche il caso in cui le fessure sono inclinate a 45° ma sono curvilinee con concavità rivolta verso la mezzera della trave. In questo caso sono dovute all'effetto combinato di taglio e flessione;

Questi tipi di fessurazione del calcestruzzo sono dovuti ad errori di progettazione o noncuranza dei particolari costruttivi.

Altri tipi di fessurazioni, che di solito non influiscono sulla capacità portante del conglomerato, sono i seguenti:

- Fessure termiche, sono dovute a variazioni termiche;
- Fessurazione per ritiro plastico, dovuta al rapido essiccamento del getto o a copriferro ridotto. Essa consiste in fessurazioni con disposizioni irregolari in getti di grande estensione;
- Fessurazione per ritiro igrometrico dovuta principalmente all'inadeguatezza dei giunti di costruzione;
- Fessure da gradiente termico, sono dovute a variazioni termiche differenziali (temperatura all'intradosso differente da quelle all'estradosso).

Tali tipi di fessura possono fornire un passaggio all'acqua e alla contaminazione che a lungo andare può portare a problemi di durabilità.

Oltre ai tipi indicati si possono avere anche fessurazioni dovute a fenomeni chimici quali la corrosione delle armature, la reazione alcali-silice, la carbonatazione del calcestruzzo già trattate nei capitoli precedenti.

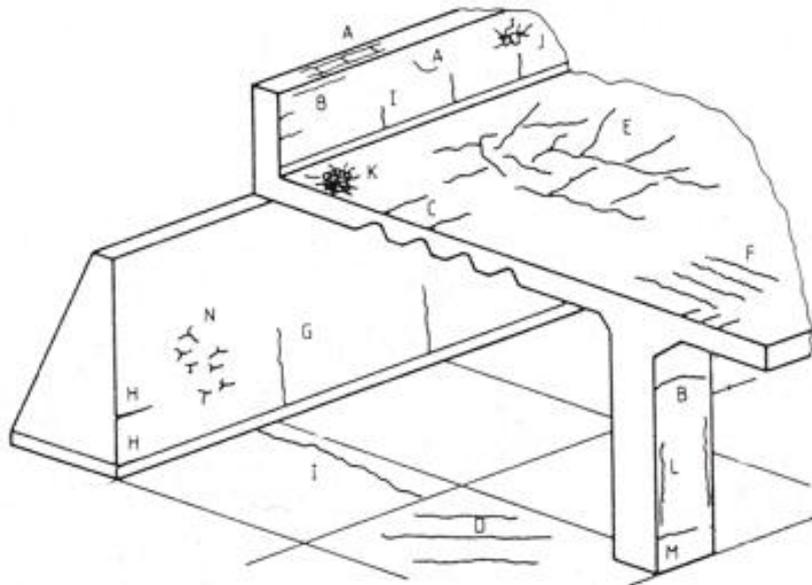


Figura 8.1. (A,B;C): Assestamento plastico del getto; Bleeding eccessivo, essiccamento troppo rapido. (D,E,F): Ritiro plastico; Essiccamento troppo rapido, armature troppo superficiali. (G,H): Contrazione termica; Calore, idratazione eccessiva, raffreddamento troppo rapido. (I): Ritiro; Inefficienza dei giunti, ritiro eccessivo, curing inadatto. (J,K): Concentrazione acqua. (L,M): Corrosione delle armature. (N): Reazione alcali-aggregato (Abdunur, 2000).

8.1.3

Scaling

Lo scaling si manifesta con la graduale decomposizione della pasta di cemento, inizialmente dalla parte superficiale con esposizione dell'aggregato, fino a raggiungere le parti più interne. Lo scaling è visto come l'effetto dei cicli di gelo e disgelo su superfici poco drenate e composte da calcestruzzi di scarse caratteristiche o di errata confezione.

Il suo effetto, in concomitanza a fenomeni fessurativi può comportare la disintegrazione del calcestruzzo.

Lo scaling può essere classificato nelle seguenti quattro categorie:

- Leggero: perdita dello strato superficiale di pasta di cemento minore di 0.5 mm che espone parte della superficie degli aggregati;
- Medio: perdita dello strato superficiale di pasta di cemento compreso tra 0.5 mm e 2 mm, mancanza di malta cementizia tra gli aggregati;
- Elevato: perdita dello strato superficiale di pasta di cemento compreso tra 2 mm e 3 mm, gli aggregati sono visibilmente esposti;
- Grave: perdita dello strato superficiale di pasta di cemento maggiore di 3 mm, in superficie si notano distacco degli aggregati, solitamente i ferri d'armatura sono esposti all'aria.

In fase d'ispezione si deve annotare la localizzazione del difetto, l'estensione dell'area colpita e la profondità di penetrazione.

8.1.4 Delaminazione

La delaminazione accade quando vi è il distacco laminare di una porzione di calcestruzzo. Il piano di delaminazione è solitamente esterno al piano di armatura. La delaminazione è solitamente dovuta all'espansione ed al rigonfiamento dei ferri d'armatura in fase di corrosione comunemente causata dall'intrusione di cloruri o sali. La corrosione produce polvere di ruggine che occupa un volume molte volte (sei) superiore al volume del metallo originario che si è corroso. La delaminazione si identifica mediante battitura della superficie del calcestruzzo con martello od altro attrezzo, in presenza di delaminazione il suono sordo prodotto dalla battitura rivela il distacco di un piano (il martello "batte da vuoto").

In fase d'ispezione si deve annotare la localizzazione e l'estensione dell'area colpita.

8.1.5 Spalling

Lo spalling è letteralmente la "frantumazione" puntuale del calcestruzzo costituente lo spessore di copriferro con conseguente messa a nudo dell'armatura. Questo fenomeno è conseguenza di numerosi fattori ma la causa principale può indicarsi nell'evoluzione delle fessure causate dall'espansione legata alla corrosione delle armature e all'uso frequente di sali disgelanti. La differenza con la delaminazione sta nella forma e nell'estensione (circolare) dell'area colpita, nello spalling il fenomeno è puntuale.

Si possono distinguere due livelli di gravità:

- Leggero: la profondità di distacco è inferiore ai 2 cm e/o l'estensione non è maggiore a 15 cm di diametro;
- Grave: Leggero: la profondità di distacco è maggiore ai 2 cm e/o l'estensione ai 15 cm di diametro.

Il fenomeno di spalling per alternanza di cicli gelo-disgelo, è dovuto all'aumento di volume dell'acqua (circa il 9%). Questo aumento di volume provoca una pressione capace di distruggere progressivamente il calcestruzzo, in particolare se il fenomeno si ripete ciclicamente porta ad una tipica rottura per fatica. (Collepari, 1991). L'abbassamento di temperatura è comunque condizione necessaria ma non sufficiente per il manifestarsi dell'azione distruttiva. Infatti i calcestruzzi essiccati prima di essere sottoposti a cicli di gelo e disgelo non presentano danni significativi data l'assenza di acqua congelabile. Affinché si manifesti il degrado è necessario che il grado di saturazione (cioè la percentuale in volume dell'acqua presente nei pori del materiale rispetto al volume stesso dei pori), superi il 91,7%. In queste condizioni (grado di saturazione critico), infatti, l'aumento di volume dell'acqua provocato dal congelamento non è più in grado di essere contenuto all'interno dei pori non ancora saturi d'acqua.

In fase d'ispezione si deve annotare la localizzazione, l'estensione e la profondità del fenomeno.

8.1.6 Contaminazione cloridrica

La contaminazione cloridrica del calcestruzzo consiste nella presenza di sali solubili ricristallizzati. Essa causa un'accelerazione della corrosione degli elementi metallici contenuti nel calcestruzzo colpito dal fenomeno. La presenza di fratture permette l'assorbimento dei sali all'interno della massa del conglomerato cementizio, tale fenomeno è evidenziato dalla presenza di efflorescenze (depositi bianchi sulla superficie del calcestruzzo). Le efflorescenze sono la combinazione di carbonato di calcio fuoriuscito dalla pasta cementizia e altri composti (carbonati ricristallizzati e cloruri).

8.1.7 Honeycomb (Segregazione)

Gli honeycomb, letteralmente nidi d'ape, sono dovuti ad una cattiva lavorazione del conglomerato cementizio al momento del getto. L'incuria nella realizzazione e nella vibrazione dello stesso provoca vuoti e spazi di malta cementizia tra gli inerti; ne risulta una segregazione molto deleteria ai fini della durabilità.

8.1.8 Pop-outs

Si tratta di fori conici nel calcestruzzo dovuti ad eventi di espansione puntuali: si formano dei piccoli fori sulla superficie. Il fenomeno è causato dalle reazioni che gli aggregati hanno con il cemento alcalino.

8.1.9 Abrasione

Il danneggiamento da abrasione si verifica quando forze esterne agiscono sulla superficie degli elementi di calcestruzzo. Il flusso dell'acqua che trasporta elementi solidi in fiumi e torrenti può produrre danneggiamenti significativi di pile e fondazioni in acqua.

8.1.10 Danneggiamento da collisione e sovraccarichi

Mezzi pesanti, trasporti eccezionali, impatti dovuti a incidenti stradali possono produrre seri danni ai componenti della struttura (le travi in c.a.p. sono molto sensibili alle collisioni). I sovraccarichi dovuti a trasporti eccezionali possono fessurare seriamente i componenti in calcestruzzo che risultano così più inclini al degrado.

8.1.11**Corrosione delle barre d'armatura**

Per effetto della passivazione indotta dalle reazioni di solidificazione del cemento le barre d'armatura contenute nel calcestruzzo sono protette dalla corrosione. La protezione è dovuta all'ambiente fortemente alcalino del calcestruzzo e alla perfetta aderenza della pasta di cemento alle barre. Questa protezione può essere eliminata dall'intrusione di cloruri i quali permettono all'acqua e all'ossigeno di ossidare le barre e iniziare il processo di corrosione che lentamente diminuisce la sezione resistente.

Gli ioni cloro sono presenti in ambienti marini, industriali e in presenza di sali antighiaccio.

La corrosione delle armature nel calcestruzzo rappresenta una diretta conseguenza del verificarsi dei fenomeni di degrado nel calcestruzzo.

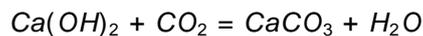
In un calcestruzzo ben confezionato, l'idrossido di sodio e potassio contenuti nei pori della pasta cementizia creano un ambiente di passività annullando la velocità di corrosione. Partendo dagli strati più interni e passando a quelli più esterni, un normale calcestruzzo tende comunque a perdere le sue caratteristiche protettive, in rapporto al tempo ed in funzione dell'aggressività ambientale cui è esposto.

Vengono espone di seguito le principali tipologie di corrosione delle barre d'armatura. (Pedefferri, 1991).

8.1.12**Corrosione da carbonatazione**

L'azione dell'anidride carbonica dell'aria nei confronti del calcestruzzo consiste fondamentalmente nella neutralizzazione della calce presente (carbonatazione), con conseguente abbassamento della basicità dell'ambiente.

In questo modo l'estratto acquoso della pasta di cemento passa da valori di $\text{pH} \geq 13$ a valori di $\text{pH} < 9$, molto al di sotto quindi della soglia ($\text{pH} = 11,5$) che garantisce, in assenza di cloruri, le condizioni di passività delle armature. La reazione che caratterizza il fenomeno è la seguente:



In termini generali la progressione del fronte di carbonatazione può essere descritta da una relazione del tipo (CEB, 1997):

$$D = K\sqrt{t}$$

in cui:

D è la profondità raggiunta dal fronte di carbonatazione;

K è il coefficiente di carbonatazione;

t è il tempo di esposizione all'anidride carbonica.

Il coefficiente di carbonatazione K dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo in esame e dalle condizioni ambientali. Per quanto riguarda il materiale si ha che il fenomeno è sostanzialmente legato alla porosità e permeabilità per effetto di un elevato rapporto a/c . Il coefficiente K è inoltre legato al contenuto in CO_2 per il quale si possono indicare i seguenti valori:

- 0.6 gr/m^3 per atmosfere non inquinate;
- >3 gr/m^3 per atmosfere molto inquinate.

La reazione di carbonatazione si produce solo in presenza di umidità. L'intervallo di umidità relativa più pericoloso per lo sviluppo del fenomeno può essere ritenuto quello compreso fra il 50 e l'80%.

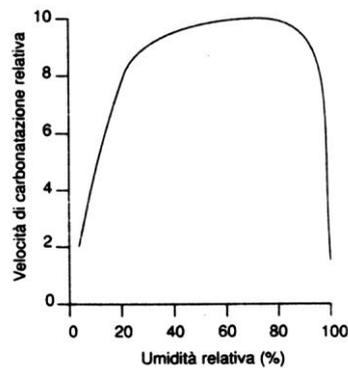


Figura 8.2. Andamento della velocità di carbonatazione al variare dell'umidità relativa (CEB, 1997).

Il fenomeno della carbonatazione non deteriora assolutamente il calcestruzzo ma crea un ambiente favorevole alla corrosione delle armature.

Gli attacchi corrosivi da carbonatazione si presentano generalmente uniformemente distribuiti sull'intera superficie dell'armatura raggiunta dal fronte di carbonatazione.

8.1.13

Corrosione da cloruri

In presenza di cloruri, le armature vengono depassivate in maniera localizzata con attacchi penetranti e perforanti (pits) come conseguenza dell'elevata velocità del fenomeno, concentrato, generalmente in aree ristrette.

Nel caso di strutture in calcestruzzo per opere stradali e autostradali la presenza dei cloruri è determinata dalla necessità, durante la stagione invernale, di spargere sul manto stradale dei sali decongelanti (quasi sempre a base di cloruro di calcio e cloruro di sodio) per accelerare la rimozione del ghiaccio. In queste condizioni, la penetrazione del cloruro dall'ambiente verso i ferri di armatura può essere accelerata dalla disintegrazione del copriferro a causa dei cicli di gelo e disgelo.

La presenza di cloruri nel calcestruzzo può comunque essere dovuta all'uso di acceleratori durante la fase di costruzione.

A contatto con ambienti contenenti cloruri, il calcestruzzo si può arricchire in questi anioni finché sulla superficie delle armature si supera il tenore critico per la stabilità del film protettivo.

Il tempo d'innescò della corrosione da cloruri su calcestruzzi umidi o saturi d'acqua dipende dalla composizione del calcestruzzo e dallo spessore di copriferro.

8.1.14

La corrosione da macrocoppie

Un caso tipico di corrosione da macrocoppie è quello che si verifica tra le armature superiori e quelle inferiori delle solette di ponti su cui nei mesi invernali vengono sparsi sali antigelo a base di cloruri (Siviero et al., 1995).

Le soluzioni di questi sali, penetrando nel calcestruzzo, raggiungono prima le armature superiori e le depassivano. Se queste, come in genere succede, si trovano in contatto elettrico con le armature inferiori (passive perché non ancora raggiunte dai cloruri) risultano fortemente attaccate poiché le armature inferiori forniscono aree catodiche per la riduzione di ossigeno.

La depassivazione delle armature immerse nel calcestruzzo si localizza in genere sulle armature più esposte all'aggressione ambientale o dove lo spessore di copriferro risulta minore o indebolito.

Qualunque sia la causa che provoca la depassivazione locale delle armature, si forma una cella galvanica (macrocella), tra la zona non più passiva che funziona da anodo e quelle circostanti che funzionano da catodo.

La velocità di penetrazione della corrosione in corrispondenza delle zone anodiche dipende:

- dalla conducibilità del calcestruzzo e quindi dai fattori ambientali relativi alla composizione del calcestruzzo stesso;
- dal rapporto delle aree anodiche e di quelle catodiche circostanti;
- dalla velocità con cui si può produrre il processo catodico sulle aree passive cioè sulla possibilità di apporto di ossigeno su queste ultime.

8.2

ISPEZIONE VISIVA DEGLI ELEMENTI DI CALCESTRUZZO

In fase d'ispezione, per determinare le condizioni di un certo elemento, devono essere visionati i precedenti rapporti d'ispezione. Questo permette all'ispettore di visionare l'andamento del degrado degli elementi già interessati da ammaloramenti e permette una valutazione più accurata dello stato di condizione (*condition state*).

L'ispezione degli elementi di calcestruzzo viene fatta attraverso un esame visivo integrato, dove necessario, da esami fisico - chimici.

8.2.1

Esame visuale

La tecnica principalmente adottata in un'ispezione è quella visuale. Essa risulta essere la più veloce ed economica, ma affinché sia affidabile deve essere basata su criteri obiettivi di valutazione. Tali criteri sono ottenibili solamente procedendo in maniera codificata nell'ispezione, rispettando le indicazioni presenti nelle schede degli elementi ed in questo manuale e avendo un'accurata conoscenza delle forme di degrado e delle strutture da ponte in genere.

Una delle forme di deterioramento che si osservano durante le ispezioni visive è la fessurazione degli elementi. Tutte le caratteristiche di tale degrado devono essere registrate e controllate nell'ispezione futura per identificare eventuali attività.

Come già ricordato le caratteristiche principali della fessurazione sono:

- il tipo;
- la lunghezza;
- l'ampiezza;
- la localizzazione;
- l'orientazione.

Le fratture sono uno dei più affidabili indicatori di problematiche future per la struttura.

Un'altra indicazione del deterioramento che può essere identificata tramite ispezioni visuali sono le macchie di ruggine. Esse indicano che all'interno del calcestruzzo l'armatura è in fase di corrosione. La corrosione produce una riduzione della sezione resistente delle barre, fessurazioni e infine spalling del copriferro. Localizzazione ed estensione delle macchie di ruggine devono essere osservate e registrate in fase d'ispezione.

Le altre forme di deterioramento visibili ad occhio nudo, già trattate in precedenza, sono:

- Scaling;
- Delaminazioni;
- Spalling;
- Efflorescenze;
- Segregazione degli aggregati;
- Pop-out;
- Danneggiamenti da collisione e sovraccarico;
- Corrosione delle armature (se il copriferro è saltato);
- Deterioramento degli elementi in c.a.p.

In aiuto all'esame visuale deve essere condotto anche un esame fisico del conglomerato; esso viene condotto utilizzando strumenti quali il martello da geologo. L'integrità del calcestruzzo è segnalata dal rumore di battitura del martello sulla superficie.

Le ispezioni visuali devono essere condotte a distanza ravvicinata dall'elemento ispezionato, ma a volte questo non è possibile. L'ispettore, qualora non disponga di mezzi di accesso alla struttura adeguati, quali By-Bridge o ponteggi, deve comunque cercare di avvicinarsi il più possibile all'elemento, quando questo si fisicamente attuabile, ad esempio con scale a pioli. Se l'avvicinamento non è possibile l'ispettore deve munirsi di strumentazione ottica che supplisca a tale carenza (binocoli, cannocchiali, foto ingrandibili e valutabili a fine ispezione).

8.2.2

Test fisico - chimici

Quando le ispezioni visuali non riescono a fornire informazioni certe sulla natura e sulla gravità dei difetti riscontrati deve essere fatto ricorso a tecniche ispettive avanzate. Queste tecniche solitamente sono adottate nelle ispezioni speciali e alcune volte nelle ispezioni principali approfondite.

I test non distruttivi comprendono:

- Misurazioni agli ultrasuoni;
- Misurazioni di potenziale elettrico;
- Misurazioni radar;
- Misurazione dell'eco d'impatto;
- Termografia ad infrarossi;
- Laser test;
- Misurazione del disturbo di campo magnetico indotto;
- Misurazione di campo magnetico (Pacometro);

- Misurazioni sclerometriche.

I test distruttivi comprendono:

- Test di carbonatazione;
- Permeabilità del conglomerato;
- Resistenza del conglomerato (carotaggi);
- Misure endoscopiche;
- Resistenza dei ferri d'armatura.

8.2.3

Il degrado degli elementi strutturali dei ponti a travata in c.a. e c.a.p.

Il tipo di degrado subito dal materiale di un ponte è spesso funzione dell'elemento strutturale al quale appartiene. Si manifestano delle situazioni di degrado che sono specifiche di alcuni elementi del ponte: in questo paragrafo viene trattato il degrado negli elementi dei ponti a travata in c.a. e c.a.p.

La soletta d'impalcato è tra tutti gli elementi di un ponte quello maggiormente sollecitato. I fattori che contribuiscono al suo degrado sono le costanti azioni del traffico, la totale esposizione all'aggressività dell'ambiente in cui è inserita e l'uso dei sali antigelo. I difetti più evidenti sono costituiti dai fenomeni di spalling cui si aggiungono fessurazioni ed efflorescenze.

Per gli elementi principali in c.a. o c.a.p. si deve sottolineare il fatto che la superficie esterna delle membrature è parte integrante della struttura e quindi ogni perdita di aderenza fra armatura e calcestruzzo, causata da fenomeni di spalling, corrosione delle armature o semplice deterioramento del copriferro, può ridurre la capacità di carico della struttura.

Negli elementi in c.a.p. si riscontrano spesso lesioni per concentrazione di carico in prossimità delle zone di ancoraggio dei cavi.

Le membrature principali appartenenti a strutture sottopassate o facenti parte di strutture a traliccio a via inferiore, possono essere interessate da fenomeni d'urto le cui conseguenze sono la perdita di sezione degli elementi.

Tra gli elementi secondari in c.a. si considerano le travi di collegamento o di controvento, i setti intermedi nei ponti a cassone, i traversi, ecc.. il cui degrado può ricondursi a quello degli elementi principali.

Il degrado delle spalle, in modo analogo a qualsiasi altro elemento del ponte esposto all'atmosfera, è dovuto al degrado del materiale. Degradi particolari possono verificarsi nel caso di giunti difettosi in prossimità delle spalle e nel caso di fenomeni di spalling dovuti al movimento della pavimentazione.

Il degrado strutturale è dovuto prevalentemente alla fessurazione (con disposizione verticale), in seguito ai possibili movimenti causati dal cedimento della fondazione. L'instabilità delle spalle può essere la conseguenza di fenomeni di erosione idraulica del materiale di fondazione, o dell'errata stima, in fase progettuale, della resistenza del terreno.

Possono inoltre verificarsi fessure da ritiro causate da drenaggio insufficiente del muro di contenimento o sgretolamenti in corrispondenza dei drenaggi se il muro è a contatto con terreni ricchi di zolfo (attacco dei solfati).

Nel caso di attraversamenti fluviali e spalle in alveo, il materiale in corrispondenza del pelo libero è soggetto al degrado tipico dovuto all'alternanza asciutto-bagnato.

Il degrado delle pile, del pulvino e delle travi di collegamento in fondazione, è molto simile a quello che interessa le spalle (fessurazioni, deterioramento superficiale del calcestruzzo, problemi di stabilità, ecc.), con importanza ed entità maggiori dovute alla loro posizione intermedia.

Tralasciando i possibili errori di costruzione o i danni provocati da sismi o altri eventi disastrosi, il degrado delle fondazioni, di tipo superficiale o profondo, delle pile e delle spalle, può ricondursi, nel caso esse siano esposte all'ambiente naturale, a quello tipico del calcestruzzo armato. A questi si aggiungono, nel caso di fondazioni a contatto con acqua in movimento, i fenomeni di erosione e cavitazione direttamente correlati all'aggressività dell'ambiente immerso quantificabile con la velocità della corrente e quindi con la dimensione del trasporto solido.

Per strutture di fondazione in acque povere di sali (acque pure, quali quelle montane), sono possibili fenomeni di dilavamento del calcestruzzo e conseguente perdita di materiale. Nel caso esse siano protette dal materiale in cui si fondano, il loro degrado risulta funzione del tipo di ambiente.

Se si prescinde dalle cause di degrado, ovviamente diverse in funzione dell'elemento considerato, i danni strutturali di maggiore rilievo derivano generalmente dal deterioramento del materiale conseguente a caratteristiche scadenti dello stesso, in rapporto all'aggressività ambientale.

I casi di danni provocati da carichi superiori a quelli di progetto, almeno per quanto concerne le strutture principali, non risultano essere molto frequenti. Ciò può rilevarsi eventualmente sugli elementi che risentono di effetti locali concentrati non analizzati in modo adeguato le cui conseguenze, comunque, possono essere ricondotte al degrado del materiale costituente.

Un'attenzione particolare, in seguito alla maggiore frequenza di collassi legati a questo fenomeno, deve essere posta allo studio del cedimento delle fondazioni.

Il degrado strutturale deve venir considerato in base al degrado del calcestruzzo, delle armature e dell'acciaio costituenti ciascun elemento dell'opera d'arte.

8.3 L'IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO NEGLI ELEMENTI DI ACCIAIO

8.3.1 Esecuzione della fase diagnostica

Per l'identificazione del degrado negli elementi in metallo si dovranno preliminarmente soddisfare le seguenti condizioni:

- **Accessibilità alla struttura:** l'ispezione accurata richiede la piena accessibilità all'elemento, ciò significa predisporre dei mezzi idonei per raggiungerlo (ponteggi, scale, piattaforme mobili) e garantire una libertà di indagine all'ispettore eliminando, ove possibile, gli ostacoli che occultano alla vista l'elemento;
- **Pulizia accurata dell'elemento:** l'indagine deve essere eseguita su elementi ripuliti da strati di sporcizia quali polvere, rifiuti, calcinacci e guano di piccioni, ecc. La pulizia oltre ad allontanare la sporcizia più grossolana permette di mettere in luce lo stato di degrado del materiale in termini di ossidazione, presenza di fratture, presenza di cricche da fatica, ecc. Quando si procede alla pulizia dell'elemento si deve prestare attenzione a non danneggiare gli strati di protezione dello stesso (vernice o strato di ossido compatto);
- **Illuminazione:** in fase d'ispezione è sempre necessaria un'illuminazione ottimale delle superfici. Possono essere quindi indispensabili lampade orientabili che producano un'illuminazione generale e diffusa da abbinare a fonti di luce concentrate;
- **Rilievo grafico:** una valutazione accurata della struttura richiede la misura dello spessore dello strato ossidato, della riduzione di spessore, della percentuale di connettori o saldature danneggiati.

Si riportano nel seguito i principali tipi di degrado riscontrabili negli elementi di acciaio.

8.3.2 Deterioramento della protezione superficiale

La presenza di agenti atmosferici aggressivi, la cattiva esecuzione (in particolare negli angoli, attorno ai connettori e nelle zone di contatto tra elementi), il dilavamento delle superfici, il ristagno di acqua o di umidità e il naturale deterioramento delle vernici sono le principali cause del deterioramento delle protezioni superficiali. Questo deterioramento si può presentare come distacco di scaglie o di strati di vernice oppure come separazione della protezione dalla superficie con corrosione al di sotto di protezione stessa.

8.3.3 Corrosione

La mancanza di una adeguata protezione o il deterioramento della stessa senza un tempestivo intervento di manutenzione sono le cause principali dell'ossidazione delle strutture in acciaio.

Altri fattori importanti sono: il ristagno d'acqua o la presenza di un ambiente umido, la presenza di correnti vaganti e il contatto con cloruri (sali antigelo, ambiente marino).

La corrosione può presentarsi come uniforme o puntuale (crateri). Durante le ispezioni è importante valutare la riduzione della sezione resistente e la resistenza residua dei connettori soggetti a corrosione. Si raccomanda di verificare la presenza di zone soggette a ristagno d'acqua lungo gli elementi, all'interno di quelli scatolari e nei nodi della struttura.

8.3.4

Deterioramento delle unioni

I principali difetti che si possono riscontrare nelle chiodature sono:

- la mancanza di chiodi o delle loro teste (dovuta alla corrosione tra gambo e testa o alla rottura per taglio del connettore);
- imperfetta realizzazione della chiodatura (testa irregolare o non in asse con il gambo);
- presenza di spazio tra le teste dei chiodi e le piastre collegate (causata dalla corrosione, da sollecitazioni eccessive o agenti in direzione assiale oppure formatasi in fase di realizzazione).

Per rilevare i difetti delle chiodature può essere necessario procedere, oltre all'esame visivo, anche alla percussione con martello.

I bulloni possono presentarsi:

- allentati (o addirittura mancanti) a causa dell'applicazione di una coppia di serraggio insufficiente o in presenza di vibrazioni e in mancanza di un controdado o di una apposita rondella;
- tranciati a causa di sollecitazioni eccessive o impreviste, urti, fenomeni di fatica, o in seguito alla sollecitazione a taglio dei bulloni in giunzioni progettate per lavorare ad attrito (in questi casi si può riscontrare anche il rifollamento dei fori).

I principali difetti che si possono riscontrare nelle saldature sono:

- inclusioni interne o crateri superficiali;
- irregolarità nello spessore e nella direzione dei differenti passaggi nel cordone di saldatura;
- presenza di cricche (microfessure) nelle saldature o in loro prossimità;
- presenza di fessure, spesso passanti, nelle saldature o in loro prossimità;
- distacco dei cordoni di saldatura.

Le cause principali di questi difetti sono:

- errori nell'esecuzione delle saldature (modalità, personale, materiali impiegati);
- fenomeni di fatica;
- sollecitazioni impreviste o eccessive.

8.3.5

Lesioni nei collegamenti

L'incremento dei carichi transitanti, urti, terremoti, fenomeni di fatica e corrosione possono causare danneggiamenti nei nodi della struttura.

Durante le ispezioni si deve pertanto prestare attenzione allo stato dei connettori, delle saldature, degli elementi collegati e delle piastre dei nodi.

8.3.6

Deformazioni locali degli elementi

Urti, instabilità locali (spesso legate alla diminuzione di spessore dovuta alla corrosione), carichi concentrati e forzature durante la fase di montaggio sono le principali cause di deformazione locale negli elementi di acciaio. In ogni caso è importante valutare l'entità del difetto e quindi la diminuzione della funzionalità e della capacità portante che il difetto comporta.

8.4 IDENTIFICAZIONE DEL DEGRADO NEGLI ELEMENTI IN LEGNO

Nel passato il legno veniva normalmente impiegato per la costruzione delle opere d'arte stradali e ancora oggi alcuni elementi di qualche ponte vengono realizzati in legno. Principalmente si tratta di sovrastrutture di legno lamellare (travi principali) e in alcuni casi anche di solette (Uzinelli, 2002).

Nei capitoli precedenti si sono già trattate le più comuni forme di deterioramento del legno, nei prossimi paragrafi si espongono le metodologie per l'identificazione del degrado degli elementi in opera.

8.4.1 Esecuzione della fase diagnostica

Per l'identificazione del degrado negli elementi lignei si devono preliminarmente soddisfare le seguenti condizioni:

- **Accessibilità alla struttura:** l'ispezione accurata richiede la piena accessibilità all'elemento, ciò significa predisporre dei mezzi idonei per raggiungerlo (ponteggi, scale, piattaforme mobili) e garantire una libertà di indagine all'ispettore eliminando, ove possibile, gli ostacoli che occultano alla vista l'elemento.
- **Pulizia accurata dell'elemento:** l'indagine deve essere eseguita su elementi ripuliti da strati di sporcizia quali polvere, rifiuti, calcinacci e guano di piccioni, ecc. La pulizia oltre ad allontanare la sporcizia più grossolana permette di mettere in luce le caratteristiche macroscopiche dell'elemento ligneo, quali la venatura, il colore, i nodi, le fessure, ecc. Il tecnico incaricato della valutazione deve ispezionare gli elementi della struttura prima di ogni tipo di intervento, e in particolare anche prima degli interventi di pulizia che potrebbero cancellare in modo definitivo informazioni importanti quali ad esempio infiltrazioni ed umidità (macchie ed aloni) oppure attacchi di insetti (rosame).
- **Illuminazione:** in fase d'ispezione è sempre necessaria un'illuminazione ottimale delle superfici. Possono essere quindi indispensabili lampade orientabili che producano un'illuminazione generale e diffusa da abbinare a fonti di luce concentrate.
- **Rilievo grafico:** una valutazione accurata della struttura richiede un altrettanto scrupoloso rilievo geometrico e architettonico da eseguire nelle fasi preliminari, esso potrà costituire la base di tutti le considerazioni da fare in fase di interpretazione dei risultati.

8.4.2 Fasi logiche dell'indagine

Lo schema generale da seguire nella diagnosi di una struttura si articola in quattro punti principali:

1. **Accertamento della geometria e della realtà fisica dell'elemento:** che comprende l'identificazione univoca mediante assegnazione di codice, posizione nella struttura, dimensioni, forma, vincoli, riparazioni precedenti, ecc.;
2. **Valutazione della qualità originaria del legno:** specie legnosa, presenza ed estensione di alborno e durame, tipo di lavorazione superficiale, anomalie e difetti iniziali (nodi, inclinazione della fibra, fessurazioni, smussi, tasche di resina, ecc.);
3. **Valutazione dell'eventuale alterazione biologica:** tipo di attacco (fungino e/o da insetti), posizione ed estensione della zona degradata, stato di avanzamento dell'attacco;

4. Valutazione delle attuali caratteristiche fisico-meccaniche: stima in base ai punti sopraindicati.

La metodologia di indagine principale è quella visiva, che deve essere sempre eseguita; essa può tuttavia essere integrata da metodologie diagnostiche strumentali variabili in base agli scopi dell'indagine.

8.4.3

Ispezione visuale di elementi in legno

L'ispezione visuale consiste in un'indagine ravvicinata (a vista) dell'intero elemento ligneo integrata dai risultati ottenuti con l'aiuto di semplici strumenti (martello, lente di ingrandimento, cacciavite, trivella, ...) che permettono di investigare zone altrimenti non accessibili all'operatore.

In dettaglio le indagini principali devono comprendere:

1. Identificazione della specie legnosa:
 - Esame macroscopico (in sito);
 - Esame microscopico (in laboratorio).
2. Influenza dei difetti caratteristici e naturali del legno sulla resistenza dell'elemento:
 - Nodi (influenti in funzione della posizione e dell'estensione);
 - Cretti e fenditure da ritiro (poco influenti);
 - Cipollature (influenti);
 - Difetti di forma (rastremazioni, deformazioni, smussi, ...);
 - Inclinazione della fibratura (influyente sulla resistenza);
 - Presenza ed estensione dell'alburno (sensibile ad attacchi fungini e xilofagi).
3. Valutazione delle zone degradate ed a rischio di attacco biologico;
 - Attacchi fungini (riducono di molto la resistenza meccanica);
 - Attacchi xilofagi.
4. Valutazione dei danni derivanti da sovraccarichi;
 - Cedimenti per flessione e trazione assiale (linee di frattura frastagliate in direzione trasversale);
 - Cedimenti per compressione perpendicolare alla fibratura;
 - Cedimenti per compressione assiale (corrugamenti sul bordo superiore di travi inflesse);
 - Cedimenti per taglio e/o scorrimento assiale (scivolamento assiale dei talloni delle catene delle capriate);
 - Cedimenti per spacco e trazione trasversale (dovute alla bassissima resistenza del legno alle trazioni perpendicolari alla fibra).
5. Valutazione delle caratteristiche meccaniche del materiale;
 - Modulo elastico (prove di carico o dinamiche);
 - Massa volumica (misurazioni dirette tramite pesatura o indirette tramite prove di penetrazione);
 - Resistenza ammissibile (secondo classificazione a vista del materiale).

I seguenti fattori, non menzionati precedentemente, hanno dimostrato di non influire significativamente sulla resistenza meccanica dell'elemento:

- Età del legno;
- Esposizione alla luce solare o artificiale;
- Esposizione a raggi x o raggi gamma;
- Contatto prolungato con deiezioni animali;
- Contatto prolungato con acidi e basi deboli;
- Contatto con atmosfera industriale inquinata;
- Contatto con ambienti salmastri.

8.4.4 Attrezzatura di supporto ordinario

Le attrezzature ausiliarie all'ispezione visuale aiutano l'ispettore a identificare la struttura interna dell'elemento ligneo nonché le parti non accessibili.

L'equipaggiamento minimo prevede la seguente attrezzatura di supporto:

- Martello di gomma;
- Asciotto;
- Seghetto da legno;
- Trapano elettrico con punte da legno;
- Lamette di acciaio;
- Asta di acciaio millimetrata;
- Cacciaviti e scalpelli;
- Spazzola di acciaio;
- Spazzola di fibra rigida;
- Spazzola di setola (morbida);
- Buste raccoglitrici;
- Igrometro da legno (per la verifica dell'umidità).

8.4.5 Attrezzature e prove strumentali

Le tecniche d'ispezione strumentali hanno lo scopo di mettere in luce difetti e caratteristiche del legno che non sono direttamente rilevabili in un'ispezione visuale. I risultati di tali prove devono comunque essere utilizzati prudenzialmente, specialmente quando non sono direttamente correlabili alle indagini visive.

In questo paragrafo si citano alcune di esse, per informazioni più dettagliate si rimanda alla bibliografia.

Misure di umidità sul legno

Le misure di umidità nel legno vengono eseguite attraverso igrometri con elettrodi a chiodo da infiggere nell'elemento. Da esse si ricavano dei valori di umidità locale nel legno che permettono di stabilire se esso è o meno a rischio di un attacco fungino potendo determinare se l'umidità si trova sotto la soglia di sicurezza di 18-20%.

Carotaggi e forature nel legno

L'ispezione superficiale eseguita ad occhio nudo o con l'ausilio di uno scalpello o di un cacciavite può essere estesa all'interno dell'elemento attraverso dei carotaggi o delle forature eseguite con punte da trapano. Lo scopo è duplice: avere la possibilità di sondare il legno in profondità, dunque saggiarne la durezza o osservarne in profondità gli strati (con endoscopio); estrarre del materiale da poter analizzare successivamente in laboratorio.

Le carote sono utilizzabili per:

- Valutazione visuale dello stato di conservazione in profondità;
- Valutazione della presenza di gallerie di insetti;
- Prelievo di campioni per esame microscopici;
- Prelievo di campioni per esami dendrocronologici;
- Determinazione della massa volumica.

Penetrazione statica e/o dinamica nel legno

Tali prove si basano sulla misurazione di parametri numerici da confrontare con parametri noti i quali consentono di determinare le caratteristiche meccaniche del legno nell'elemento. Alcune prove che sfruttano questi principi sono:

- Penetrazione statica nel legno (prove di impronta);
- Penetrazione dinamica (Pilodyn);
- Resistenza all'avanzamento della foratura (Resistograph).

Prove di carico

Le prove di carico permettono di misurare le deformazioni elastiche delle strutture in opera (deformazioni per flessione). Conoscendo la geometria, i vincoli e le sezioni resistenti della struttura si possono determinare dei parametri meccanici quali il modulo elastico. Non sempre questo tipo di prova risulta di agevole interpretazione.

Prove dinamiche

Tale prova consiste nel misurare i parametri dinamici della struttura (modi propri di vibrare), conoscendo i vincoli esterni è possibile, anche se non semplicemente, determinare un modulo di elasticità approssimato.

Propagazione di onde elastiche

Anche tale prova permette di determinare un modulo elastico approssimato rilevando le velocità di propagazione delle onde elastiche prodotte da una percussione attraverso il legno.

9 PRATICA D'ISPEZIONE

9.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono trattati i metodi di esecuzione delle ispezioni alle parti costituenti i ponti con riferimento alla loro posizione nella struttura ed al materiale di costruzione.

Convenzionalmente la struttura viene suddivisa in tre blocchi:

- Piano viabile: costituito dal pacchetto della soletta;
- Sovrastruttura: costituita dagli elementi portanti;
- Sottostruttura: costituita dagli elementi che scaricano a terra i carichi provenienti dalla sovrastruttura.

La suddivisione operata prescinde dalla tipologia strutturale ed è indipendentemente dalla suddivisione in Unità Strutturali ed Elementi Standard; è stata scelta per sinteticità di esposizione della metodologia ispettiva in quanto essa raggruppa tipologie per cui il modo di procedere è simile.

La suddivisione in Unità Strutturali ed Elementi Standard serve a modellare la struttura all'interno del sistema informatico. Ogni Elemento Standard comunque è stato riferito, in sede di creazione, ad uno dei blocchi sopra elencati. Questa ulteriore suddivisione costituisce una "vista" da un'altra prospettiva del ponte.

9.2 ISPEZIONE E VALUTAZIONE DEL PIANO VIABILE

9.2.1 Introduzione

Lo scopo principale del piano viabile è quello di distribuire sulla sovrastruttura (travi principali e secondarie) i carichi permanenti del piano viabile e quelli provenienti dal traffico veicolare.

Il piano viabile è soggetto a una gran varietà di problematiche dipendenti da molti fattori i più importanti dei quali sono:

- Fattori dovuti al traffico: impatto (mezzi sgombraneve) e logorio (attrito);
- Fattori ambientali (umidità, schizzi d'acqua, gelo-disgelo, neve, ...);
- Fattori chimici (inquinamento, sali antighiaccio);
- Deficienze costruttive e progettuali.

9.2.2 Piano viabile in c.a.

La soletta in c.a. è il più comune tipo di piano viabile; le proprietà del calcestruzzo permettono la realizzazione della soletta in molte forme e modi. Oltre a ripartire i carichi sugli elementi della sovrastruttura, generalmente la soletta collabora con questi stessi elementi (in c.a., c.a.p., acciaio o legno) nel riportare i carichi sugli elementi della sottostruttura. La soletta può essere realizzata interamente in opera o essere composta da elementi prefabbricati (c.a. o c.a.p.) e da un getto complementare in c.a.; elementi prefabbricati in c.a. o c.a.p. possono essere inoltre utilizzati come casseforme a perdere il cui contributo alla resistenza della soletta può comunque essere rilevante.

Nell'ispezione delle solette in c.a., come per tutti gli elementi in c.a., di fondamentale importanza risulta essere la valutazione dello stato di deterioramento delle armature. Questo richiede innanzitutto l'individuazione delle direzioni delle eventuali armature principali e secondarie (ad esempio, nel caso di sovrastruttura realizzata mediante una sola orditura di travi parallele, le armature principali saranno disposte perpendicolarmente alle travi, quelle secondarie in direzione parallela). L'individuazione della probabile orditura delle armature permette una corretta interpretazione dello stato fessurativo dell'elemento e quindi di distinguere: fessure da ritiro, fessure dovute allo stato tensionale, fessure dovute alla corrosione delle armature, ecc.

Procedura e localizzazione delle ispezioni

Durante le ispezioni devono essere osservate sia la superficie di intradosso sia, quando possibile (cioè in assenza di un rivestimento della soletta), la superficie di estradosso della soletta. Su queste superfici devono essere individuate le fessure, i fenomeni di degrado del cls, di spalling, di delaminazione, di contaminazione da cloruri, di corrosione delle armature, di riduzione della sezione di cls e/o delle armature.

Le principali zone che devono essere esaminate sono le seguenti:

- aree esposte al traffico (solette senza pavimentazione): verificare la presenza di zone usurate, di delaminazioni più o meno localizzate e spalling;
- parti del sistema di drenaggio: verificare la presenza di deterioramento del cls e delle armature;
- zone di appoggio: verificare la presenza di fessurazioni o rotture dovute alle azioni di flessione e taglio;
- collegamenti tra elementi prefabbricati: cercare rotture o altri indizi di comportamento indipendente degli elementi;
- superficie superiore sopra gli appoggi e superficie inferiore nelle zone centrali: verificare la presenza di fessure dovute a flessione;
- superficie superiore ed inferiore nelle zone in cui la sovrastruttura è soggetta a momento negativo: verificare la presenza di fessure trasversali;
- casseforme a perdere: esaminare il deterioramento e la corrosione di questi elementi, normalmente indicatori di contaminazione del cls della soletta; questi elementi possono inoltre trattenere umidità e cloruri che possono così penetrare la soletta per tutto il suo spessore;
- elementi con armatura di presollecitazione: verificare la presenza di fessurazioni nelle zone di ancoraggio o di rientro dei cavi; se sono disponibili dati registrati durante precedenti ispezioni confrontarli con la situazione attuale.

9.2.3

Piano viabile in acciaio

La soletta in acciaio viene normalmente impiegata per i ponti con sovrastruttura in acciaio e, in alcuni casi, per i ponti in legno. Nei ponti con struttura in c.a. o c.a.p. si deve prestare attenzione a non confondere la presenza di casseri "a perdere" in acciaio con la presenza (rara in queste tipologie) di una soletta in acciaio o di una soletta composta acciaio-cls.

Le solette in acciaio possono essere costituite da lamiere grecate, lamiere con elementi ravvicinati di rinforzo all'intradosso (lastre ortotrope) o griglie. Sopra questi elementi si trova generalmente uno strato di cls (anche armato), uno strato di conglomerato bituminoso o entrambi con l'eventuale interposizione di una membrana impermeabilizzante; la funzione di questi ricoprimenti è molteplice: protezione dall'acqua piovana, protezione dall'usura dovuta traffico, garanzia di adeguata aderenza per i veicoli.

Come per gli altri tipi di soletta, la presenza di strati di materiale di protezione e/o di usura rende difficile, se non impossibile, l'ispezione dell'estradosso delle solette.

Procedura e localizzazione delle ispezioni

Durante le ispezioni devono essere osservate sia la superficie di intradosso sia, quando possibile, la superficie di estradosso della soletta. Su queste superfici devono essere individuate le rotture nelle saldature e nei connettori, le fessure e le perdite di sezione negli elementi.

Le principali zone che devono essere esaminate sono le seguenti:

- zone soggette a flessione: verificare la presenza di rotture nelle saldature e, in generale, nei collegamenti con la sovrastruttura; prestare attenzione ai fenomeni di fatica;
- elementi di rinforzo: verificare la presenza di rotture nei singoli elementi e nelle loro connessioni;
- zone in cui si può verificare un ristagno di acqua o un frequente dilavamento delle superfici: controllare la presenza di corrosione;
- solette in acciaio senza rivestimenti: verificare l'usura della soletta e l'aderenza fornita ai veicoli;
- solette con rivestimenti: in corrispondenza degli appoggi della soletta verificare la fessurazione dei rivestimenti e quindi la possibilità di infiltrazione di acqua e corrosione degli elementi in acciaio;
- connessioni: verificare la presenza di rotture visibili (fessure e cricche) e di rumori anomali dovuti al passaggio dei veicoli.

9.2.4

Piano viabile in legno

Gli strati d'usura dei piani viabili in legno possono essere costituiti in legno, materiali bituminosi o calcestruzzo.

Le superfici d'usura in legno sono solitamente delle assi poste trasversalmente alla direzione del ponte, esse svolgono una funzione portante (trasmissione dei carichi alle travi sottostanti) e una funzione di strato d'usura (sovradimensionamento della sezione).

Se al di sopra della soletta portante in legno vi è uno strato in conglomerato bituminoso (cementizio) si parla di strato di usura in bitume (in calcestruzzo). Solitamente tali strati d'usura non sono molto usati per via della flessibilità della soletta in legno che tende a fessurare gli strati di bitume (calcestruzzo).

Procedura e localizzazione delle ispezioni

Per il piano viabile in legno le principali aree da ispezionare sono:

- aree esposte direttamente al traffico: esaminare lo strato d'usura, le parti degradate e quelle danneggiate da impatto;

- aree di appoggio con la superstruttura: esaminare gli schiacciamenti, la carie e deficienze varie;
- aree in tensione (campata): esaminare i danni da flessione quali fratture, fessure, deformazioni, ecc;
- aree superficiali: ricercare le zone degradate da attacchi fungini (zone umide o bagnate frequentemente);
- bordi esterni alla soletta: zone degradate da attacchi fungini.

Per l'ispezione del degrado del legno, dovuto principalmente ad attacchi fungini e rotture meccaniche, ci si affida principalmente ad ispezioni visuali che devono essere eseguite a distanza il più possibile ravvicinata e su ogni parte dell'elemento. Una tecnica molto semplice e redditizia in sede d'ispezione è quella dell'uso del martello per sondare l'eventuale presenza nel legno di degrado dovuto ad attacco fungino.

9.2.5

Giunti

I giunti dell'impalcato sono una parte molto importante dei ponti. La loro funzione principale è quella di assecondare le deformazioni di espansione o contrazione dell'impalcato (causati normalmente dai carichi variabili e dalle variazioni termiche). I giunti permettono inoltre di eliminare il divario tra impalcato e appoggi e quindi di garantire un agevole passaggio dei veicoli dalle rampe di accesso alla soletta del ponte. I giunti devono quindi essere in grado di assecondare tutte le deformazioni della struttura in qualsiasi condizione meteorologica senza compromettere la qualità dell'accesso dei veicoli alla struttura. L'ispettore deve essere in grado di individuare i giunti che non funzionano correttamente.

I giunti si possono dividere in due categorie:

- giunti aperti: consentono il passaggio di acqua e detriti che, in caso di una progettazione non accurata dei particolari del giunto, possono comportare degrado dei materiali del giunto o degli elementi collegati oppure accumuli che impediscono le deformazioni della struttura;
- giunti chiusi: sono progettati per impedire il passaggio di acqua e detriti; durante le ispezioni particolare attenzione va posta nell'osservare l'efficacia dell'impermeabilizzazione del collegamento (guarnizioni, guaine, riempimenti con materiale bituminoso, ...).

Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni dei giunti delle solette è importante osservare:

- gli accumuli di detriti;
- l'allineamento degli elementi collegati;
- i danneggiamenti delle guarnizioni;
- il ricoprimento dei giunti durante il rifacimento della pavimentazione;
- gli ancoraggi ed i supporti degli elementi costituenti il giunto.

Il rischio principale nel caso di danneggiamento dei giunti è dovuto all'accumulo di materiale in prossimità degli appoggi ed al passaggio di acqua che aumentano il rischio di degrado delle zone di appoggio e delle testate delle travi; la situazione è aggravata nella stagione invernale in cui avviene lo spargimento di sale. Durante l'ispezione tali situazioni vanno identificate e segnalate (a mezzo del flag di anomalia secondaria o principale e del campo note).

9.2.6

Sistemi di drenaggio

Lo scopo dei sistemi di drenaggio è la raccolta e l'allontanamento dell'acqua meteorica dalla pavimentazione stradale. Uno scorretto funzionamento di questi sistemi può comportare:

- disagi e pericolo per gli utenti del ponte in seguito all'allagamento della sede stradale;
- il deterioramento di quegli elementi strutturali che vengono a trovarsi a contatto con l'acqua (contatto che risulta spesso prolungato ben oltre la durata della precipitazione).

Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni dei sistemi di drenaggio delle solette è importante osservare:

- le grate: controllare la presenza di detriti e/o di vegetazione;
- i canali di raccolta e convogliamento sulla soletta: controllare la presenza di detriti e/o di vegetazione che può rallentare o impedire il deflusso dell'acqua;
- le canalizzazioni interne alla struttura; verificare che non siano intasate (anche parzialmente);
- le tubazioni di scarico dalla struttura: la rottura, lo spostamento o la mancanza di questi elementi può comportare il dilavamento di elementi della sovrastruttura o della sottostruttura.

Il verificarsi di tali situazioni mette a rischio deterioramento gli elementi a contatto con il sistema di drenaggio; la velocità di degrado a cui vanno incontro tali elementi aumenta notevolmente nella stagione invernale in cui avviene lo spargimento di sale sulla carreggiata. Durante l'ispezione tali situazioni vanno identificate e segnalate (a mezzo del flag di anomalia secondaria o principale e del campo note).

9.2.7

Barriere di sicurezza

Le barriere di sicurezza possono dividersi in due gruppi:

- i guardrail: sono protezioni previste per impedire che i veicoli transitanti possano, in seguito ad incidenti o altri eventi anomali, uscire dalla carreggiata cadendo dal ponte o invadendo il marciapiede (se questi dispositivi sono posizionati tra il piano viabile ed il marciapiede);
- i parapetti: sono protezioni destinate ad impedire che le persone possano cadere dal ponte.

Molti ponti (generalmente caratterizzati da un traffico limitato) pur essendo dotati di marciapiedi laterali, non hanno protezioni collocate tra questi ed il piano viabile; in questi casi si ha una sola protezione laterale con la funzione di contenere sia i veicoli che i pedoni.

Le barriere di sicurezza possono essere realizzate con molti materiali differenti in funzione, generalmente, della tipologia strutturale del ponte: acciaio, c.a., muratura, pietra, legno.

A seconda del materiale con cui gli elementi sono realizzati si deve procedere all'ispezione degli stessi valutandone la capacità di assolvere al proprio compito; si dovranno quindi osservare:

- il degrado del materiale;
- la presenza di rotture o deformazioni rilevanti (normalmente causate dall'urto di veicoli);
- lo stato dell'eventuale sistema di protezione del materiale.

9.3 ISPEZIONE E VALUTAZIONE DELLE SOVRASTUTTURE

9.3.1 Introduzione

La sovrastruttura di un ponte ha il compito di trasmettere i carichi del traffico provenienti dal piano viabile ed il peso proprio del pacchetto della soletta alla sottostruttura (costituita dalle pile e dalle spalle). La sovrastruttura comprende elementi del ponte quali le travi principali e secondarie dei ponti a travata, la volta ed i muri di timpano dei ponti ad arco, le travi reticolari dei ponti in acciaio, ecc.

La metodologia d'ispezione della sovrastruttura (posizioni e fenomeni esaminati) varia in funzione del materiale costituente e dello schema statico. Nel seguito verranno riportate le principali indicazioni necessarie per l'ispezione delle sovrastrutture considerando le tipologie più significative per ogni materiale.

9.3.2 Sovrastruttura in calcestruzzo

I principali fenomeni di degrado che si possono riscontrare nelle sovrastrutture in c.a. e in c.a.p. sono i seguenti:

- spalling;
- delaminazioni estese o localizzate;
- efflorescenze;
- corrosione delle armature;
- vespai;
- danni da impatto;
- abrasioni;
- danni dovuti a sovraccarico;
- negli elementi in c.a.p.: il rientro dei cavi di precompressione, dei loro apparecchi di ancoraggio, oppure la fessurazione del cls in prossimità degli ancoraggi.

Tutti questi fenomeni sono già stati descritti nei capitoli precedenti del manuale.

Le posizioni a cui prestare particolare attenzione durante le ispezioni dipendono dalla tipologia strutturale della sovrastruttura.

Solettoni - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni dei solettoni è importante:

- Esaminare le zone soggette a flessione per localizzare eventuali fessurazioni anomale o rotture per compressione;
- Verificare se in prossimità degli appoggi sono presenti fessurazioni diagonali indice di una sollecitazione a taglio prossima alla corrispondente resistenza massima;
- In tutte le zone fessurate verificare se sono presenti colorazioni indice di corrosione delle armature;
- Esaminare le zone di appoggio dove le deformazioni termiche o dovute ai carichi possono comportare danneggiamenti degli elementi in mancanza di adeguati sistemi di appoggio;
- Controllare lo stato del materiale in tutte le zone prossime ai sistemi di drenaggio;

- Verificare la presenza di danneggiamenti dovuti ad impatti;
- Verificare la presenza di fessure diagonali sulla superficie di intradosso, indice di rotazione relativa tra gli appoggi;
- Controllare gli spostamenti laterali della sovrastruttura;
- Negli elementi in c.a.p.: verificare le zone di ancoraggio;
- Negli elementi in c.a.p.: controllare se sono presenti fessure che possono facilitare la corrosione dei cavi di precompressione.

Travate - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni delle travate è importante:

- Esaminare le zone soggette a flessione per localizzare eventuali fessurazioni anomale o rotture per compressione;
- Verificare se in prossimità degli appoggi sono presenti fessurazioni diagonali indice di una sollecitazione a taglio prossima alla corrispondente resistenza massima;
- In tutte le zone fessurate verificare se sono presenti colorazioni indice di corrosione delle armature;
- Esaminare le zone di appoggio dove le deformazioni termiche o dovute ai carichi possono comportare danneggiamenti degli elementi in mancanza di adeguati sistemi di appoggio;
- Controllare lo stato del materiale in tutte le zone prossime ai sistemi di drenaggio;
- Verificare la presenza di danneggiamenti dovuti ad impatti; misurare le eventuali perdite di sezione;
- Verificare lo stato e l'efficacia degli eventuali interventi di ripristino presenti;
- Verificare la presenza di fessure diagonali sulla superficie di intradosso, indice di rotazione relativa tra gli appoggi;
- Controllare gli spostamenti laterali della sovrastruttura;
- Negli elementi in c.a.p.: verificare le zone di ancoraggio;
- Negli elementi in c.a.p.: controllare se sono presenti fessure che possono facilitare la corrosione dei cavi di precompressione.

Archi in cls - Procedura e localizzazione delle ispezioni

I ponti ad arco in calcestruzzo non armato o debolmente armato presentano un comportamento strutturale molto simile a quello dei ponti ad arco in muratura. In entrambi i casi infatti il materiale costituente è caratterizzato da una resistenza a trazione trascurabile rispetto a quella a compressione.

I ponti ad arco in cls presentano normalmente spessori degli archi inferiori a quelli dei ponti in muratura; questo comporta una maggior sensibilità della struttura agli spostamenti della curva delle pressioni dovuti ai carichi variabili.

Nelle ispezioni di queste sovrastrutture è importante:

- Esaminare la superficie dell'arco per verificare la presenza di fessurazioni dovute a sovraccarico o a spostamenti e rotazioni delle imposte;
- Identificare inoltre delaminazioni, corrosione di armature o altri segni di degrado del materiale;
- Verificare le zone di giunzione dei muri di contenimento con l'arco;
- Verificare l'efficienza dei sistemi di allontanamento dell'acqua piovana e l'efficacia del sistema di impermeabilizzazione del materiale di riempimento;
- Verificare la presenza e quindi lo stato di precedenti interventi di ripristino.

Archi in c.a. a Via Inferiore o Superiore - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni di queste sovrastrutture è importante:

- Esaminare gli elementi degli archi per verificare la presenza di fessurazioni dovute a sovraccarico o alla presenza di rilevanti momenti flettenti; cercare inoltre delaminazioni, corrosione di armature o altri segni di degrado del materiale;
- Nei collegamenti tra i diversi elementi strutturali verificare la presenza di fessurazioni o spalling dovuti ad azioni flettenti secondarie;
- Esaminare gli elementi verticali per individuare: fessure longitudinali o rotture da compressione nei puntoni, fessure trasversali nei tiranti (in particolare per quelli in c.a.p.);
- Controllare gli elementi dell'impalcato (sopra o sotto l'arco) secondo quanto indicato nel paragrafo relativo alle travate;
- Verificare l'efficienza dei sistemi di allontanamento dell'acqua piovana e l'efficacia del sistema di impermeabilizzazione del materiale di riempimento;
- Verificare la presenza e quindi lo stato di precedenti interventi di ripristino.

9.3.3

Sovrastruttura in muratura (arco)

I principali fenomeni di degrado che si possono riscontrare nelle sovrastrutture in muratura sono i seguenti:

- Degrado del materiale (elementi lapidei e malta) dovuto all'umidità e alla presenza di sostanze aggressive;
- Fessure, rotture e schiacciamenti localizzati dovuti a sovraccarichi o, più frequentemente, a spostamenti delle spalle o delle pile;
- Danneggiamento da impatti.

Tutti questi fenomeni sono già stati descritti nei capitoli precedenti del manuale.

La presenza di fessure trasversali negli archi è dovuta alla scarsa resistenza a trazione delle murature ed evidenzia il fatto che la curva delle pressioni risulta esterna al nocciolo centrale d'inerzia dell'elemento.

Proporzionale all'entità delle fessure risulta essere il rischio che si verifichi lo schiacciamento della muratura sul lato opposto dell'arco o la formazione di un meccanismo nel caso in cui un carico variabile anomalo comporti un ulteriore spostamento della curva delle pressioni.

Le fessure longitudinali evidenziano uno sforzo di compressione maggiore di quello ammissibile che provoca la rottura per trazione perpendicolare alla direzione delle tensioni di compressione nei maschi murari.

Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni degli archi in muratura è importante:

- Esaminare la superficie dell'arco per verificare la presenza di fessurazioni o schiacciamenti dovute a sovraccarico o a spostamenti e rotazioni delle imposte; cercare inoltre segni di degrado del materiale;
- Verificare le zone di giunzione dei muri di contenimento con l'arco;
- Verificare l'efficienza dei sistemi di allontanamento dell'acqua piovana e l'efficacia del sistema di impermeabilizzazione del materiale di riempimento;
- Verificare la presenza e quindi lo stato di precedenti interventi di ripristino.

9.3.4

Sovrastruttura in acciaio

Le sovrastrutture di molti ponti vengono realizzate in acciaio, si ricordano in particolare alcune tipologie di ponti con:

- Travi laminate;
- Travi a sezione chiusa (saldate, chiodate o imbullonate);
- Travi reticolari;
- Archi in acciaio a via inferiore;
- Archi in acciaio a via superiore.

Le più comuni forme di degrado riscontrate negli elementi della sovrastruttura di un ponte in acciaio comprendono la corrosione, il danneggiamento da fatica e quello da collisione o da sovraccarico. In un'ispezione si dovranno ricercare ed individuare tali forme di degrado.

Le posizioni critiche da considerare durante le ispezioni dipendono dalla tipologia strutturale della sovrastruttura ma nella maggior parte dei casi bisogna prestare particolare attenzione a:

- Zone in cui si manifestano le massime tensioni di taglio e flessione;
- Connessioni tra elementi primari e secondari. I particolari costruttivi delle connessioni, soprattutto quelli soggetti a distorsioni fuori piano, possono essere soggetti a rotture da fatica quando sottoposti a carichi ciclici.

Una grande quantità di ponti, specialmente in USA dove queste tipologie sono molto in uso, hanno manifestato gravi deficienze, talvolta culminate in crolli, in seguito a rotture da fatica di particolari costruttivi mal progettati.

Travi laminate - Procedura e localizzazione delle ispezioni

In un ispezione di sovrastrutture composte da travi principali laminate è importante:

- Zone di taglio: esaminare le anime nelle zone vicino all'appoggio dove il taglio assume valori massimi;
- Zone inflesse: esaminare le perdite di sezione, il danneggiamento nelle zone di massimo cimento della flangia quali gli effetti di instabilità locali nella flangia compressa e le fratture in quella tesa. Nelle travi continue in prossimità dei punti di appoggio intermedi il momento negativo tende le fibre inferiori;
- Elementi secondari: esaminare a fondo le connessioni ricercando quelle allentate o le saldature che manifestano fratture (questo problema è molto comune nei ponti sghembi). Esaminare le connessioni controllando l'eventuale presenza di detriti che costituiscono una trappola per l'umidità con conseguente pericolo di corrosione localizzata;
- Zone di esposizione al traffico: esaminare le travature suscettibili di danneggiamento da impatto. Riduzione di sezione, fratture e deformazioni localizzate devono essere identificate e riportate sul rapporto d'ispezione;

- Particolari sensibili alla fatica: esaminare a fondo le aree soggette a accumuli di materiale (detriti, terriccio, ...) che, trattenendo l'umidità, possono causare corrosione localizzata con conseguente pericolo di formazione di "zone deboli" soggette a rottura a fatica;
- Particolari sensibili alla fatica: negli elementi verniciati è importante esaminare le zone in cui sono presenti rigonfiamenti e rotture del ricoprimento, tali segnali potrebbero indicare l'esistenza di fratture da fatica. Le aree sospette andranno ripulite e verificate attentamente;
- Particolari sensibili alla fatica: esaminare le saldature nelle zone soggette a tensione, specialmente nella flangia della trave;
- Particolari sensibili alla fatica: esaminare le fratture da fatica dovute a distorsione dell'anima della trave;
- Particolari sensibili alla fatica: esaminare le fratture da fatica che si creano in prossimità delle connessioni di travi secondarie con dell'anima della trave principale.

Travi composte a sezione chiusa - Procedura e localizzazione delle ispezioni

In un'ispezione di sovrastruttura composta da travi principali a sezione chiusa (saldate, chiodate o imbullonate) è necessario ispezionare oltre che la parte esterna anche la parte interna della trave (se lo spazio lo permette). Nel caso d'ispezione in spazi confinati si deve fare particolare attenzione alla possibile mancanza di ossigeno od alla presenza di sacche di gas tossico e/o infiammabile. Inoltre è importante osservare le seguenti indicazioni:

- Zone di taglio: esaminare le anime nelle zone vicino all'appoggio esiste la possibilità di instabilità locale delle pareti;
- Zone inflesse: esaminare le zone tese o compresse in cui si è identificata una riduzione di sezione dovuta alla corrosione;
- Zone inflesse: esaminare la presenza di instabilità locali nelle pareti della trave ed eventuali distorsioni dei diaframmi dovuti a azioni di torsione;
- Travi principali: esaminare le zone in prossimità dei diaframmi nella parte inferiore della trave che possono costituire trappole per acqua ed umidità con conseguente pericolo di corrosione localizzata. Esaminare le zone in prossimità dei diaframmi nella parte inferiore della trave che possono costituire trappole per acqua ed umidità con conseguente pericolo di corrosione localizzata;
- Elementi secondari: esaminare le zone di connessione, in particolare la presenza di aperture e di fratture nelle saldature. Esaminare le zone in prossimità dei diaframmi nella parte inferiore della trave che possono costituire trappole per acqua ed umidità con conseguente pericolo di corrosione localizzata;
- Particolari sensibili alla fatica: esaminare a fondo le aree soggette a accumuli di materiale (detriti, terriccio,...) che, trattenendo l'umidità, possono causare corrosione localizzata con conseguente pericolo di formazione di "zone deboli" soggette a rottura a fatica;

- Particolari sensibili alla fatica: esaminare tutte le saldature interne alla trave comprendendo quelle tra anima e flangia, di flangie irrigidenti, di diaframmi, ecc. Particolare attenzione va posta nelle saldature di testa tra irrigidimenti longitudinali;
- Particolari sensibili alla fatica: esaminare le fratture da fatica dovute a distorsione dell'anima della trave.

Ponti a Travata reticolare - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Le travi reticolari contengono elementi soggetti generalmente ad azione assiale.

Gli elementi soggetti a trazione, suscettibili di problematiche legate alla fatica e alla rottura fragile, devono essere ispezionati in maniera maggiormente accurata di quelli soggetti a compressione.

Come specificato nel seguito ogni elemento va ispezionato in base al tipo di azione a cui è soggetto. Nei documenti di progetto, se presenti, è indicato se l'elemento è in trazione od in compressione; se non è chiaro a che tipo di azione è soggetto un elemento esso deve essere ispezionato in entrambi i modi.

Gli elementi principali di tale tipologia sono le travi reticolari e quelle d'impalcato.

In un'ispezione di sovrastrutture composte da travi reticolare è importante osservare le seguenti indicazioni:

- Elementi tesi della reticolare: esaminare attentamente le possibili corrosioni in atto e in generale ogni forma di fessura. Esaminare l'allineamento degli elementi e assicurarsi che non siano piegati (esso potrebbero essere un segno di inversione del segno della forza). Ispezionare le giunzioni e le saldature usate per eventuali riparazioni. Esaminare a fondo elementi con saldature trasversali alla direzione delle tensioni;
- Elementi compressi della reticolare: esaminare eventuali instabilità locali della sezione che potrebbero indicare sovraccarichi. Onde e piegature nelle flange, nelle anime o nelle piastre sono segni di evidenti instabilità locale. Gli elementi compressi sono molto suscettibili a eventuali urti dovuti ai veicoli in transito sotto o sopra la struttura in tal caso potrebbero ridurre notevolmente la capacità portante della struttura;
- Elementi della corda inferiore: ricercare zone con corrosione in atto e in generale fenomeni di deterioramento nei nodi, nelle piastre di collegamento e nelle imbottiture. Esaminare le superficie orizzontali per identificare possibili zone umide;
- Elementi secondari: valgono le considerazioni fatte nelle tipologie precedenti. Esaminare le connessioni con gli elementi principali, identificare eventuali zone umide e danni da impatto con il traffico veicolare;
- Particolari sensibili alla fatica: valgono le considerazioni fatte nelle tipologie precedenti. Controlli accurati devono essere eseguiti in generale sulle saldature di elementi soggetti a sforzi di trazione, sulle piastre di connessioni saldate, sulle connessioni tra elementi secondari ed elementi principali.

Archi a via superiore - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Gli elementi principali di tale tipologia sono le travi curve, i puntoni, le travi d'impalcato.

Le travi principali curve sono elementi progettati per resistere a sforzi di compressione e momento. I puntoni, soggetti a sola compressione, trasmettono ad esse le forze provenienti dalle travi d'impalcato.

Per le travi d'impalcato, principali e secondarie, vale quanto detto per le tipologie sopra riportate, con l'eccezione che le principali possono essere considerate spesso come travi continue su più appoggi. Le travi principali curve possono essere costituite da sezioni chiuse oppure aperte, in entrambi i casi esse sono composte mediante saldatura, bullonatura oppure chiodatura per cui, in ispezione, valgono le considerazioni sopra riportate per le travi.

Durante l'ispezione delle sovrastrutture dei ponti ad arco a via superiore è importante osservare le seguenti indicazioni:

- Travi curve: esaminare l'elemento per verificare la presenza di instabilità locali e danneggiamenti nelle costolature, specialmente in prossimità dei puntoni. Se presenti verificare l'integrità dei perni d'estremità, in particolare nei riguardi della corrosione e del consumo per attrito. Controllare l'allineamento degli archi e delle piastre di connessione dei vari elementi, se presenti;
- Puntoni: esaminare i punti di connessione con gli archi e con le travi d'impalcato;
- Travi d'impalcato: devono essere adottate le stesse procedure già menzionate per le tipologie a travata;
- Elementi secondari: esaminare le zone di connessione, in particolare la presenza di aperture e di fratture nelle saldature. Esaminare le connessioni controllando l'eventuale presenza di detriti che costituiscono una trappola per l'umidità con conseguente pericolo di corrosione localizzata;
- Particolari sensibili alla fatica: valgono le considerazioni fatte nelle tipologie precedenti. Controlli accurati devono essere eseguiti in generale sulle saldature di elementi soggetti a sforzi di trazione, sulle piastre di connessione saldate, sulle connessioni tra elementi secondari ed elementi principali. In particolare devono essere ispezionati accuratamente eventuali perni di connessione.

Archi a via inferiore - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Gli elementi principali di tale tipologia sono le travi curve, i tiranti, le travi d'impalcato.

Le travi principali curve sono elementi progettati per resistere a sforzi di compressione e momento. I tiranti, soggetti a trazione, trasmettono agli archi le forze provenienti dalle travi d'impalcato.

Per le travi d'impalcato, principali e secondarie, vale quanto detto per le tipologie sopra riportate, con l'eccezione che per le principali che possono essere considerate spesso come travi continue su più appoggi. Le travi principali curve possono essere costituite da sezioni chiuse oppure aperte, in entrambi i casi esse sono composte mediante saldatura, bullonatura oppure chiodatura per cui, in ispezione, valgono le considerazioni sopra riportate per travi.

Se la componente orizzontale delle forze trasmesse dall'arco è assorbita dalle travi principali d'impalcato esse saranno soggette a tenso-flessione.

Durante l'ispezione delle sovrastrutture dei ponti ad arco a via inferiore è importante osservare le seguenti indicazioni:

- Travi curve: esaminare l'elemento per verificare la presenza di instabilità locali e danneggiamenti nelle costolature, specialmente in prossimità dei puntoni. Se presenti, verificare l'integrità dei perni d'estremità, in particolare nei riguardi della corrosione e del consumo per attrito. Controllare l'allineamento degli archi e delle piastre di connessione dei vari elementi, se presenti;
- Tiranti: esaminare attentamente le possibili corrosioni in atto e in generale ogni forma di fessura con particolare riguardo alle giunzioni d'estremità. Esaminare a fondo elementi con saldature trasversali alla direzione delle tensioni. Individuare eventuali danneggiamento da urto.
- Travi d'impalcato: devono essere adottate le stesse procedure già menzionate per le tipologie a travata;
- Elementi secondari: esaminare le zone di connessione, in particolare la presenza di aperture e di fratture nelle saldature. Esaminare le connessioni controllando l'eventuale presenza di detriti che costituiscono una trappola per l'umidità con conseguente pericolo di corrosione localizzata;
- Particolari sensibili alla fatica: valgono le considerazioni fatte nelle tipologie precedenti. Controlli accurati devono essere eseguiti in generale sulle saldature di elementi soggetti a sforzi di trazione, sulle piastre di connessine saldate, sulle connessioni tra elementi secondari ed elementi principali. In particolare devono essere ispezionati accuratamente eventuali perni di connessione.

9.3.5

Sovrastruttura in legno

Le sovrastrutture che comunemente si realizzano nei ponti in legno comprendono le tipologie:

- Travi a sezione rettangolare (lamellare o massiccio);
- Travi composte (reticolari);
- Travi ad arco.

Le più comuni forme di degrado che si riscontrano negli elementi in legno comprendono: l'attacco fungino e da parassiti, il danneggiamento da sovraccarico e quello da impatto (vedi degrado del legno). Durante l'ispezione si dovranno ricercare ed individuare tali forme di degrado.

Procedura e localizzazione delle ispezioni

E' importante osservare le seguenti indicazioni :

- Zone d'appoggio: esaminare le zone d'appoggio nei confronti di attacchi da agenti biologici, assicurarsi dell'assenza di accumulo di materiale che potrebbe trattenere umidità;
- Travi: esaminare il danneggiamento nelle zone di massimo cimento (da taglio e momento) per identificare eventuali danneggiamenti meccanici. Individuare eventuali principi di attacco fungino e conseguenti riduzioni di sezione, fenditure orizzontali dovute al taglio, zone umide, trappole per l'umidità;
- Elementi secondari: esaminare a fondo le connessioni ricercando quelle allentate e degradate. Esaminare zone umide e trappole per l'umidità alla ricerca di zone con attacco fungino in atto.

9.4 ISPEZIONE E VALUTAZIONE DEGLI APPOGGI

9.4.1 Introduzione

Gli appoggi sono elementi della sovrastruttura che fungono da interfaccia tra questa e la sottostruttura ed hanno le seguenti funzioni:

- Trasmettere le sollecitazioni;
- Permettere determinati spostamenti e rotazioni relative tra gli elementi collegati.

Sistemi di appoggio possono essere inoltre presenti tra elementi differenti della sovrastruttura (ad esempio nelle "Selle Gerber").

I sistemi di appoggio possono essere costituiti da: fogli di piombo, strati di materiali elastomerici (eventualmente confinati), teflon, meccanismi metallici più o meno complicati (rulli, bielle, perni, ...) e combinazioni di questi.

Nei ponti più vecchi e di minore importanza, gli elementi possono essere inoltre collegati con appoggio diretto senza interposizione di nessun sistema di connessione. In questi casi, durante le ispezioni, si dovrà prestare particolare attenzione allo stato degli elementi nella zona di appoggio che risulta spesso danneggiata.

Nel seguito si riportano alcune indicazioni da seguire durante l'ispezione degli appoggi considerando separatamente gli appoggi elastomerici da quelli meccanici; particolari sistemi di appoggio possono comunque essere costituiti sia da parti meccaniche che da elementi elastomerici.

9.4.2 Appoggi elastomerici - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni di questi elementi è importante:

- Valutare se la deformazione per taglio e per rotazione dell'appoggio è accettabile o se risulta eccessiva per le condizioni di carico ed ambientali presenti;
- Verificare lo stato di degrado delle eventuali parti di metallo (piastre, piastre guida, dischi, elementi di confinamento, ...);
- Verificare lo stato degli eventuali ancoraggi del sistema di appoggio agli elementi strutturali;
- In presenza di superfici lubrificate, verificare la presenza e l'efficacia del materiale lubrificante;
- Nel caso di elastomero confinato, verificare che non ci sia estrusione dello stesso;
- Verificare che non ci sia un accumulo di detriti tale da diminuire la funzionalità dell'appoggio o da accelerare il degrado degli elementi.

9.4.3

Appoggi meccanici - Procedura e localizzazione delle ispezioni

Nelle ispezioni di questi elementi è importante:

- Valutare se la deformazione dell'appoggio è accettabile, se risulta eccessiva per le condizioni di carico ed ambientali presenti o se rappresenta una situazione instabile (in particolare per bielle e rulli);
- Verificare lo stato di degrado delle parti di metallo e dei sistemi di protezione (piastre, piastre guida, bielle, perni, rulli ...);
- Verificare lo stato degli eventuali ancoraggi del sistema di appoggio agli elementi strutturali;
- In presenza di superfici o perni lubrificati, verificare la presenza e l'efficacia del materiale lubrificante;
- Verificare che non ci sia un accumulo di detriti tale da diminuire la funzionalità dell'appoggio o da accelerare il degrado degli elementi.

9.5 ISPEZIONE E VALUTAZIONE DELLE SOTTOSTRUTTURE

9.5.1 Introduzione

I problemi delle sottostrutture possono essere legati:

- al deterioramento del materiale;
- a danneggiamenti dovuti ad eventi quali urti o incendi;
- a cedimenti delle fondazioni (uniformi o localizzati);
- agli spostamenti causati dalle forze orizzontali (spinta del terreno, spinta degli archi, ...);
- errori progettuali.

I dissesti di pile e spalle possono avere ripercussioni più o meno gravi sulla resistenza e sulla funzionalità di un ponte in funzione della sua tipologia strutturale. I ponti ad arco risultano normalmente più sensibili agli spostamenti e alle rotazioni degli appoggi e per questo motivo il fenomeno viene trattato in un apposito paragrafo (9.5.4); questo non significa che le altre tipologie strutturali non possano subire danni rilevanti in seguito a spostamenti relativi degli appoggi che andranno quindi sempre indagati in fase d'ispezione.

9.5.2 Deterioramento del materiale

Il tipo di deterioramento che si può riscontrare dipende dal materiale costituente: per questo aspetto si rimanda ai paragrafi in cui si sono trattati i differenti materiali.

Durante le ispezioni delle sottostrutture si deve prestare particolare attenzione alle zone di collegamento della sovrastruttura; queste parti degli elementi strutturali sono infatti caratterizzate dalla presenza di:

- sollecitazioni concentrate di notevole entità e spesso caratterizzate da componenti trascurate in fase di progetto;
- ambienti che favoriscono il deterioramento dei materiali (accumulo di detriti, ristagni di acqua, umidità).

Durante l'analisi dello stato fessurativo e/o deformativo degli elementi, si deve considerare l'influenza:

- di possibili cedimenti più o meno localizzati delle fondazioni;
- della spinta del terreno nelle spalle e nei muri d'ala.

9.5.3 Dissesti nelle fondazioni

Le fondazioni possono presentare cedimenti o fenomeni di scalzamento.

I cedimenti possono essere causati:

- da errori nella realizzazione delle fondazioni che comportano una disuniforme o eccessiva pressione sul terreno;
- da variazioni del livello della falda;
- dalla realizzazione di scavi o dalla battitura di pali in prossimità della fondazione;
- dalle vibrazioni indotte dal traffico.

Nel caso di ponti antichi le fondazioni sono generalmente su pali in legno; l'oscillazione dell'altezza della falda può comportare in questo caso un rapido degrado dei pali che si ripercuote sulla struttura come cedimenti più o meno estesi.

Lo scalzamento delle fondazioni (superficiali) realizzate in alveo è dovuto all'abbassamento localizzato dello stesso. Durante le piene si verifica un abbassamento generale dell'alveo dovuto alla maggior velocità dell'acqua a cui si sovrappone un ulteriore abbassamento in prossimità delle pile e delle spalle dei ponti legato sia all'incremento della velocità della corrente dovuto al restringimento della sezione, sia alle turbolenze che si creano in prossimità degli elementi.

Il fenomeno dello scalzamento è tra i più frequenti motivi di collasso dei ponti con fondazioni superficiali. L'individuazione del fenomeno risulta difficoltosa sia perché interessa una porzione della struttura sommersa e quindi difficilmente ispezionabile, sia perché l'erosione del terreno sotto la fondazione avviene durante la piena del corso d'acqua mentre il vuoto formatosi viene poi colmato da nuovo materiale. È importante sottolineare il fatto che questo nuovo materiale presenta una granulometria molto fine, non garantisce un appoggio sicuro per la struttura e viene rimosso velocemente dalla piena successiva. L'entità dello scalzamento è legata alla geometria degli elementi, alla loro disposizione e naturalmente alle caratteristiche dell'alveo e della piena.

L'individuazione di dissesti nelle fondazioni, e quindi di spostamenti e/o rotazioni negli elementi, richiede l'osservazione sia degli elementi della sottostruttura che degli elementi della sovrastruttura; in particolare si dovranno osservare:

- le inclinazioni degli elementi (utilizzando strumenti quali il filo a piombo, la bolla, il livello ottico, ...);
- lo stato fessurativo degli elementi (posizione, direzione, entità).

9.5.4

Dissesti nelle pile e nelle spalle dei ponti ad arco

Le pile e le spalle dei ponti ad arco possono presentare dissesti (spostamenti o rotazioni) causati dalla mancanza di equilibrio tra le forze a cui sono sottoposte.

Nelle spalle, quando la spinta dell'arco è superiore a quella del terrapieno, si verifica un allontanamento delle imposte dell'arco, un abbassamento della chiave di volta e l'apertura di fessure all'intradosso della parte centrale della volta. Quando la spinta del terrapieno risulta maggiore di quella dell'arco (in seguito a saturazione del terreno, diminuzione dei carichi permanenti sull'arco, ...) si verifica un avvicinamento delle imposte e l'apertura di fessure in prossimità delle stesse.

Quando le spinte su di una pila non risultano equilibrate essa può presentare notevoli rotazioni che possono comportare sollecitazioni flessioni nella pila, la "apertura" dell'arco spingente e la "chiusura" dell'altro arco.

Rotazioni di pile o spalle rispetto all'asse longitudinale del ponte comportano l'apertura di fessure diagonali nell'arco (dall'esterno delle imposte al centro della chiave della volta).

GLOSSARIO

Anomalie Principali

Per anomalie principali si intendono tutte quelle situazioni in cui:

- Si ritiene opportuna una indagine più approfondita sull'elemento per verificare la presenza di eventuali situazioni di pericolo;
- Si richiede un intervento di sostituzione o ripristino sull'elemento;
- Vi sia una situazione di pericolo per gli utenti della struttura.

La prima situazione mette in evidenza una mancanza di informazioni e/o di competenza per la valutazione del problema. In questo caso il Manager può decidere di attivare la procedura di 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 riparazione 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: nel caso di un elemento trave che presenti un fenomeno di spalling con forte riduzione della sezione resistente delle barre d'armatura in una posizione in cui le sollecitazioni si prospettano essere elevate: esiste una riduzione della capacità portante e conseguentemente si manifesta una situazione di pericolo per l'utente, in tal caso, nel sistema, tale situazione verrà identificata con il flag *Anomalia Principale*. Nella casella di testo corrispondente si dovrà descrivere il problema riscontrato e l'esatta posizione. 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,...).

Anomalie Secondarie

Per anomalie secondarie si intendono tutte quelle situazioni in cui l'elemento si trova in una situazione da accelerare il degrado dello stesso.

Esempi di possibili Anomalie Secondarie sono:

- Sistemi di drenaggio (canalette, pluviali, gocciolatoi, ...) rotti, sottodimensionati o assenti;
- Sistemi di drenaggio (canalette, pluviali, gocciolatoi, ...) intasati o malfunzionanti;
- Vegetazione sugli elementi (piante rampicanti);
- Ristagni d'acqua negli elementi d'acciaio;
- Trappole d'acqua negli elementi di legno (fessure "a bicchiere", connessioni, particolari costruttivi,...);
- Accumulo di detriti negli elementi d'acciaio o legno (connessioni, nodi, appoggi,..);
- Macchie, aloni, alterazioni cromatiche del legno;
- Riempimento dei giunti di dilatazione.

Attachment

Si definisce attachment qualsiasi file elettronico da allegare nel sistema informatico durante l'inserimento dei dati.

Carreggiata destra (sinistra)

La carreggiata sulla destra (sinistra) guardando in direzione delle progressive crescenti.

Collegamento (C)

Elemento che unisce più unità strutturali. Alcuni C sono i seguenti:

- Appoggio di estremità di impalcato su spalla;
- Appoggio intermedio di impalcato continuo su pila;
- Appoggio intermedio di due impalcati su pila;
- Sella Gerber;
- Collegamento continuo tra pila ed impalcato.

Si veda il documento MA.GG.02 per l'elenco completo.

Condition State

In fase d'ispezione, per ogni elemento standard ispezionato, deve essere assegnato un condition state CS. Il CS può assumere un numero discreto di valori, solitamente da 1 a 4. Il CS rappresenta lo stato di condizione dell'elemento. Per ciascun elemento gli stati di condizione possibili sono definiti in MA.GG.02.

Elemento Standard (ES)

L'elemento standard ES 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 d'ispezione, la condizione di stato di un componente. Si veda il documento MA.GG.02 per l'elenco completo.

Famiglia di un unità strutturale

Attributo che serve per definire in maniera sintetica la funzione strutturale dell'unità indipendentemente dalla tecnologia costruttiva. È definito automaticamente per ogni tipologia di unità strutturale (non viene scelta dall'ispettore). Tutte le unità strutturali della stessa famiglia hanno gli stessi attributi.

Fine ponte

Estremità del ponte con la progressiva maggiore. La fine del ponte si trova sulla linea del giunto d'espansione o, quando non presente, quella di appoggio dell'ultimo impalcato sulla spalla. In caso di arco si faccia riferimento al filo interno della spalla.

Id Codificato

Serve a identificare il ponte in modo rapido, è costituito da un insieme di attributi di primo livello utili ad individuare in modo univoco il ponte. L'Id codificato è una stringa alfanumerica costituita da:

- Tipo strada (SS o SP);
- Numero strada;
- Progressiva chilometrica;
- Indicatore di unicità del ponte su quel tratto stradale, che può assumere i valori null (unico), -D (tratto destro) ed -S (tratto sinistro).

Inizio ponte

Estremità del ponte con la progressiva minore. L'inizio del ponte si trova sulla linea del giunto d'espansione o, quando non presente, quella di appoggio dell'ultimo impalcato sulla spalla. In caso di arco si faccia riferimento al filo interno della spalla.

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 in questo manuale e nel documento Procedura Ispezione Principale. Le ispezioni principali devono essere eseguite ogni tre anni e possono essere derogate nell'anno in cui viene eseguita una *Ispezione Principale Approfondita*.

Ispezioni Principali e Principali Approfondite

Le ispezioni principali e principali approfondite sono ispezioni visive in cui viene data una valutazione del *condition state* di ciascun elemento, secondo le metodologie indicate in questo manuale e nelle Procedure d'ispezione.

Ispezioni Speciali

Le ispezioni speciali sono ispezioni visive integrate da test volti ad identificare in profondità *anomalie principali* riscontrate nelle ispezioni principali e principali approfondite e devono essere eseguite secondo le metodologie indicate in questo manuale e nelle Procedure d'ispezione.

Ispezioni Superficiali

Le ispezioni superficiali sono ispezioni visive atte a identificare *anomalie* di vario genere nella struttura. Le ispezioni superficiali sono svolte dal responsabile di zona o da un suo delegato e devono essere condotte secondo le metodologie indicate in questo manuale e nel documento Procedura Ispezione Superficiale. Le ispezione superficiali sono eseguite annualmente.

Manager

Il Manager è un attore coinvolto nel processo di gestione dei manufatti stradali , esso rappresenta il gestore del sistema ovvero la figura di riferimento a cui gli ispettori devono riferirsi.

Materiale dell'unità strutturale:

È un attributo che serve a definire in maniera sintetica la tecnologia costruttiva dell'unità strutturale, indipendentemente dalla funzione strutturale. È definito automaticamente per ogni tipologia di unità strutturale (non viene scelta dall'ispettore). Alcuni materiali sono i seguenti:

- C.a.: Cemento armato ordinario;
- C.a.p.: Cemento armato precompresso pre-teso in stabilimento;
- C.a.p.p.: Cemento armato precompresso post-teso;
- Cls: Calcestruzzo debolmente armato;
- Acciaio: Acciaio;
- Acciaio-cls: Struttura mista in acciaio - calcestruzzo;
- Muratura: Struttura in muratura di pietra e/o laterizio;
- Legno: Legno.

Ponte

Manufatto stradale compreso tra due spalle.

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 dell'ES;
- Unità di misura;
- Descrizione elemento;
- Descrizione dei livelli di degrado (CS).

Unicità di accesso

Può assumere i valori Sì o No. Indica se la struttura serve una strada che costituisce l'unica via di accesso ad un centro abitato. Per "centro abitato" si fa riferimento all'art.3 del Nuovo Codice della Strada: "insieme di edifici, delimitato lungo le vie di accesso dagli appositi segnali di inizio e fine. Per insieme di edifici si intende un raggruppamento continuo, ancorché intervallato da strade, piazze, giardini o simili, costituito da non meno di 25 fabbricati e da aree di uso pubblico con accessi veicolari o pedonali sulla strada".

Unità strutturale (US)

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

11

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

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

Binda L. (A cura di), *Caratterizzazione delle murature in pietra e mattoni ai fini dell'individuazione di opportune tecniche di riparazione*, CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, 2000.

Collepari M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, III Edizione, Hoepli, Milano, 1991.

CEB, Comité Euro-International du Béton, *New Approach to Durability Design. An example for carbonation induced corrosion*, CEB Bulletin n. 238, Lausanne, 1997.

CEB, Comité Euro-International du Béton, *Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures. Guidance Report*, CEB Bulletin n. 243, Lausanne, 1998.

Pedeferrì P., *La corrosione delle armature nel calcestruzzo*, L'industria Italiana del Cemento, vol. 655, pp. 333-340, 1991.

Siviero E., Cantoni R., Forin M., *Durabilità delle opere in calcestruzzo*, F. Angeli, Milano, 1995.

U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Bridge inspector's training manual 95*, Washington D.C., 1990.

Uzinelli L., *Ispezione e diagnosi in opera - Il manuale del legno strutturale*, Mancosu, 2002.