

PONTI IN ACCIAIO: PROGETTARE PER LA DURABILITÀ

Prof. Ing. Mario de Miranda
de Miranda Associati, Milano

1. INTRODUZIONE

La corrosione è l'elemento di debolezza di gran lunga più importante delle strutture metalliche e quindi dei ponti in acciaio, come testimonia la prevalenza dei costi di manutenzione e riparazione legati all'ossidazione dell'acciaio, rispetto a quelli legati ad altri fenomeni quali la resistenza, la rottura, l'instabilità o la resistenza a fatica.

Per questa ragione le strutture metalliche dei ponti vengono protette con sistemi di varia tipologia e natura.

Tuttavia, a fronte della necessità di un sistema di protezione si deve riconoscere che l'acciaio presenta rispetto ad altri materiali il formidabile vantaggio della totale ispezionabilità. Ispezionabilità e accessibilità che consentono il sistematico controllo dello stato del sistema di protezione, del grado di ossidazione dell'acciaio, della presenza o assenza di situazioni patologiche quali rotture, pieghe o cricche; e che consentono anche una riparabilità - ed una adeguabilità a mutate condizioni di traffico/carico o normative - relativamente semplice. In queste note ci si riferisce, soltanto al principale tra i vari aspetti di durabilità, ossia al controllo della corrosione, rimandando agli altri aspetti successivi interventi, e ci si prefigge in particolare un duplice obiettivo:

- Innanzitutto presentare lo Stato dell'Arte della protezione dalla corrosione dei Ponti Metallici in Italia, nell'ambito di un esame critico-costruttivo con particolare riferimento ai ponti realizzati in acciaio autoprotetto;



- Infine individuare e proporre, anche sulla base di una serie di reali ispezioni sul campo di opere significative, una serie di Raccomandazioni di Buona Pratica che possano essere un'utile guida per i progettisti, gli universitari e soprattutto per i gestori delle opere.

Questo al fine di tendere ad avere in futuro ponti in acciaio di limitata ed economica manutenzione e durata reale di

ben oltre i 100 anni di attuale riferimento, cosa che è oggi realmente possibile.

2. ASPETTI GENERALI DI DURABILITÀ E PRINCIPALI SITUAZIONI DI VULNERABILITÀ DEI PONTI IN ACCIAIO

Soggetti responsabili

La durabilità del ponte in acciaio dipende innanzitutto dall'azione e responsabilità di due principali soggetti: il Progettista e l'Ente Proprietario, o Gestore.

- Infatti il ponte in acciaio consente, come accennato, la completa visibilità di ogni parte e dettaglio strutturale, e questo è di grande utilità nella valutazione dello stato della struttura, nella sua possibilità di ispezione e nella agevole disponibilità ad interventi di adeguamento ed eventuale rinforzo. Ma questo vantaggio può essere colto solo se in fase di Progetto si tiene in debito conto l'accessibilità e quindi l'ispezionabilità della struttura.

Questa opportunità, e relativa responsabilità, sono di competenza del Progettista.

- Inoltre il ponte in acciaio, come tutte le opere dell'uomo, deve essere sistematicamente ispezionato e mantenuto. L'ispezione sistematica, i controlli e la manutenzione vengono effettuati e sono di responsabilità dall'Ente Gestore del Ponte con la cadenza necessaria ed impiegando le necessarie risorse.

Elementi di vulnerabilità

Nel ponte metallico non è solo la struttura portante a richiedere cura e protezione; bensì esistono differenti elementi di vulnerabilità, che comportano deterioramento in misura spesso maggiore di quanto avvenga per la struttura principale, e che si elencano qui di seguito.

• Giunti di dilatazione

Sono decisamente uno degli elementi più fragili nell'organismo strutturale.

Sono tipicamente deteriorati per:

- fenomeni d'urto nelle ruote degli automezzi;
- corse eccessive;
- lame degli spalaneve, non sollevate in corrispondenza dei giunti al passaggio del mezzo;
- deterioramento o assenza dei canali flessibili di drenaggio dell'acqua di carreggiata.

Il loro deterioramento causa percolazioni lungo la struttura che costituiscono per essa la più frequente causa di degrado.

• Apparecchi d'appoggio

Le aree spesso critiche sono:

- l'ossidazione per mancanza di rispristini in occasione di ispezioni;
- l'ingresso di polvere e sporcizia nelle superfici di scorrimento, per l'assenza di guarnizioni protettive;
- l'abnorme movimento reciproco tra la parte fissa e quella mobile in occasione di movimenti imprevisti o sottostimati delle sotto-strutture: pile e spalle;
- la fessurazione degli elastomeri negli appoggi in neoprene armato, o per sovraccarico, o per errata mescola, e/o per effetto dell'ozono e quindi dell'esposizione alle intemperie.

• Solette in calcestruzzo

Le solette in c.a. dei ponti a struttura composta acciaio - calcestruzzo sono l'elemento strutturale più esposto e più vulnerabile del ponte: soggette direttamente ai carichi di traffico, soggette a possibili infiltrazioni d'acqua dalle pavimentazioni, ed ai sali anti-gelo sparsi in inverno.

Gli elementi più vulnerabili sono tipicamente:

- i cordoli d'estremità;
- i fori, aperti a volte con criteri empirici, per il drenaggio dell'acqua. E molto critici sono tali fori se insufficienti o

mancanti sono i tubi di allontanamento dell'acqua;

- le zone prossime ai giunti di dilatazione.

• Travata e strutture in acciaio

Le più tipiche situazioni di deterioramento si riscontrano nei seguenti casi:

- invecchiamento della verniciatura, soprattutto dello strato di finitura, e carenza dei relativi ripristini e rifacimenti;
- ristagno di acqua/umidità/sporcizia nelle aree sub-orizzontali, o nelle aree ove l'assenza di *slot* o fori di drenaggio consente o favorisce la permanenza e sedimentazione di materiale;
- ossidazione di parti di strutture e di bulloni, non protetti in molti casi.

Per le lastre ortotrope valgono qualitativamente i concetti espressi per le solette.

In aggiunta un fenomeno da controllare è la fatica, ossia l'insorgere di cricche per fatica nelle zone di maggiore sollecitazione e concentrazione di sforzo.

• Sistemi di sospensione: stralli e cavi

Le zone più delicate sono gli ancoraggi, ed in particolare quelli inferiori.

Infatti in essi può accumularsi acqua proveniente da varie origini:

- condensa;
- ingresso dalle guaine, a volte fessurate;
- ingresso dalle giunzioni tra le varie parti del sistema di stralli: tubi forma, anti-vandalismo, ancoraggi.

La conoscenza di questo elemento di vulnerabilità è il primo passo, essenziale, per l'indirizzamento efficace delle ispezioni e del controllo dello stato del ponte.

3. I METODI DI PROTEZIONE DELLA STRUTTURA IN ACCIAIO

I metodi di protezione delle strutture in acciaio sono basati sostanzialmente, su due meccanismi, eventualmente integrati tra loro:

- La protezione fisica, che si ottiene creando una barriera artificiale al contatto tra acciaio e ossigeno, o acqua allo stato liquido o di vapore.

Questa barriera può essere realizzata da vari sistemi artificiali, o è creata dall'ossido superficiale nel caso di acciai cosiddetti "autoprotetti" o "patinabili" o degli acciai "inossidabili".

- La protezione catodica, creando a livello diffuso o concentrato un anodo sacrificale.

Questi due meccanismi si declinano e in parte si integrano in diversi sistemi di protezione che qui di seguito brevemente si descrive, e dei quali si tracciano i principali vantaggi e svantaggi, e per i quali si rimanda, per una descrizione più

approfondita, al Quaderno del CTA “Acciaio e Durabilità”.

La verniciatura

La verniciatura costituisce il metodo di protezione tradizionale. Questo sistema è realizzato con i differenti strati di primer, intermedio e finitura. Gli ultimi due forniscono protezione attraverso la barriera fisica. Il primo anche mediante l'effetto catodico, attraverso la aliquota di zinco presente nel composto. Essenziale, per una buona riuscita del sistema protettivo, ed una adesione del primer per diversi decenni, è la corretta sabbiatura che precede l'applicazione del primer.

Il grado Sa 2.5 o Sa 3, ed una brevissima attesa prima dell'applicazione del primer, sono i due elementi fondamentali per tale riuscita.

Lo spessore totale del rivestimento, variabile tipicamente da 120 a 240 micron, è proporzionale alla protezione che la verniciatura fornisce.

Il primer e lo stato intermedio possono durare diverse decine di anni se non vengono intaccati dal deterioramento eccessivo della finitura.

Ed infatti la finitura è lo strato che in condizioni di normale manutenzione viene ripristinato a cadenze di anni, il cui numero dipende dall'aggressività ambientale e dalla qualità chimica del polimero.

Le moderne finiture silossaniche, e soprattutto quelle basate sui fluororati, mantengono le caratteristiche originali per alcune decine di anni e consentono corrispondenti tempi di riverniciatura.

La zincatura a caldo

La zincatura a caldo integra l'effetto barriera e la protezione catodica nell'unico omogeneo rivestimento. È un metodo efficace per atmosfere non aggressive, ottimo per quelle rurali, ma richiede che la struttura del ponte sia composta da elementi di piccola dimensione tali da poter essere immersi nelle vasche di zincatura.

Comunque, nei ponti, per i quali si richiede una vita utile di 100 anni, la zincatura da sola non è, normalmente, sufficiente ad assicurare tale durata e richiede pertanto, al termine del periodo – anche di vari decenni – in cui esplica efficacemente

la sua funzione protettiva, un intervento di verniciatura.

Acciai inossidabili

Presentano un eccellente risultato in termini di protezione in quanto l'ossido che si forma in superficie è protettivo e durevole. Nei ponti l'elevato costo di tali acciai ne ha impedito finora la diffusione.

Protezione catodica

La protezione catodica diretta, ossia la predisposizione di anodi sacrificali o l'applicazione di eventuali correnti impresse, è un efficace sistema per strutture metalliche immerse nell'acqua. Non risulta particolarmente efficace o conveniente in strutture esposte all'aria.

Weathering Steel

L'uso di acciaio patinabile, o Weathering Steel (WS), nel quale la barriera è costituita dall'ossido che si forma in particolari condizioni, è una soluzione oggi molto utilizzata in Italia e all'estero, ed è l'oggetto principale delle successive considerazioni. Costituisce infatti un sistema economico ed efficiente in molte situazioni per realizzare ponti in acciaio durevoli e con bassi costi di manutenzione.

Richiede peraltro alcune attenzioni nella scelta dell'ambiente in cui utilizzarlo e nelle modalità d'impiego.

Storia e diffusione

L'acciaio patinabile non è una invenzione recente: è stato studiato ed introdotto per la prima volta sul mercato americano dalla U.S. Steel nel 1933 originariamente per applicazioni nei vagoni ferroviari per eliminare la loro verniciatura e manutenzione. Dalla fine degli anni '50 è stato studiato e migliorato in Giappone.

Dai primi anni '60 è stato utilizzato nei ponti, ed in larga scala negli USA dalla metà degli anni '60.

In Italia le prime esperienze nei ponti risalgono alla fine degli anni '70.

Dopo le prime pionieristiche applicazioni il Weathering Steel si è diffuso con continuità.

	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Fyk Mpa	Fu Mpa	Kv (J)		A %
											(-10°)	(-20°)	
Min.	0.11	0.2	0.07	-	0.30	0.25	-	0.50	355	470	41	27	20
Max.	0.12	0.5	0.15	0.03	0.50	0.55	0.65	1.25	-	630	-	-	-

Tabella 1 – Proprietà chimiche e meccaniche tipiche di wethering steel europei, secondo EN 10025-5

Oggi l'acciaio patinabile viene utilizzato in larga scala, e nella maggior parte delle applicazioni in zone rurali.

Caratteristiche

- In termini di composizione chimica il WS è principalmente caratterizzato dalla elevata presenza di rame, dallo 0,25% fino allo 0,55%, oltre a cromo e fosforo, tra gli elementi di lega (tabella 1).

Il rame è il principale elemento funzionale alla resistenza alla corrosione.

La adozione di un importante tenore di nichel fornisce un contributo positivo in condizioni di atmosfera con elevati contenuti di cloruri.

- In termini di comportamento fisico, il WS si comporta, tipicamente e in opportune condizioni, nel seguente modo:
 - in presenza di cicli umido-asciutto la superficie si ossida;
 - l'ossido, in condizioni opportune, risulta a struttura compatta e fortemente aderente alla superficie del materiale base, e forma una patina che risulta resistente alle successive aggressioni; questo avviene in un periodo di tempo variabile da 3 a 15 anni, proporzionalmente al grado di aggressività ambientale;
 - la perdita di materiale a causa dell'ossidazione si riduce esponenzialmente nel tempo ed in condizioni adatte risulta molto bassa. Tuttavia molti fattori influenzano il fenomeno: la persistenza dello stato umido della superficie, la presenza e concentrazione di cloruri (Cl-) e di inquinamento atmosferico (SO₂). (tabella 2).
- In termini di comportamento meccanico il WS ha caratteristiche di resistenza, snervamento, duttilità e resilienza analoghe a quelle degli altri acciai al carbonio.

Vantaggi

I vantaggi sono a due livelli:

- Durante la esecuzione, in officina, e durante il trasporto ed il montaggio le operazioni sono più rapide e richiedono meno attenzione che nel caso di una struttura verniciata. La produzione di una struttura in WS è pertanto più economica che con altri sistemi. L'eliminazione del costo della verniciatura è in genere compensata dall'aumento del prezzo del materiale.
- Durante l'esercizio del ponte l'assenza di protezioni esterne da rinnovare rende la manutenzione più economica.

Si è peraltro notato che in un acciaio WS verniciato la verniciatura presenta una durata maggiore che in caso di acciaio normale, e si verifica quindi una efficace sinergia tra i due sistemi.

Accorgimenti progettuali

La condizione indispensabile per la formazione di una patina protettiva ben aderente e resistente è la presenza continua di cicli di asciutto-umido in atmosfere con basso contenuto di cloruri e non persistentemente umide o bagnate.

Queste condizioni possono essere compromesse in caso di:

- Persistenza di condizioni di umido o di bagnato sulle superfici in particolare in corrispondenza di giunti e recessi che non consentono il naturale drenaggio o asciugatura dell'acqua; questo avviene spesso in corrispondenza di giunti di dilatazione non impermeabili;
- Dilavamento frequente della superficie per effetto della pioggia in zone di elevata piovosità, e persistenza di condizioni di umidità e soprattutto persistenza di acqua su superfici sub-orizzontali esposte;
- Area prossima al mare;

Metallo	Condizioni ambientali									
	Mild						Severe			
	C1		C2		C3		C4		C5	
	r _{av}	r _{lin}	r _{av}	r _{lin}	r _{av}	r _{lin}	r _{av}	r _{lin}	r _{av}	r _{lin}
Acciaio al carbonio	≤ 0.5	≤ 0.1	0.5÷5	0.1÷1.5	5÷12	1.5÷6	12÷30	6÷20	30÷100	20÷90
Weathering Steel	≤ 0.1	≤ 0.1	0.1÷2.0	0.1÷1.0	2÷8	1÷5	8÷15	5÷10	15÷80	10÷80

C1 = Zone asciutte o fredde, inquinamento molto basso e minimo tempo di umidità (deserti, artico, antartico).
 C2 = Zone temperate, basso inquinamento ($SO_2 < 5 \mu g/m^3$) (aree rurali, piccole città): aree asciutte o fredde con inquinamento e tempo di umidità bassi.
 C3 = Zone temperate, medio inquinamento ($5 \mu g/m^3 < SO_2 < 30 \mu g/m^3$): aree urbane o costiere con bassi depositi di cloruri, aree subtropicali e tropicali con basso inquinamento.
 C4 = Zone temperate ad alto inquinamento ($30 \mu g/m^3 < SO_2 < 90 \mu g/m^3$) o effetto dei cloruri: aree urbane inquinate, aree industriali, costiere senza spruzzi di acqua di mare, esposizione a sali scongelanti.
 C5 = Zone temperate e subtropicali con inquinamento molto alto ($90 \mu g/m^3 < SO_2 < 250 \mu g/m^3$), e/o effetti significativi dei cloruri: aree industriali e costiere.
 r_{av} = tasso medio di corrosione durante i primi 10 anni ($\mu g/m/anno$).
 r_{lin} = tasso di corrosione stazionario dopo i primi 10 anni ($\mu g/m/anno$).

Tabella 2 – Tasso di corrosione in atmosfera per diverse categorie di corrosività (ISO 1224:1992)

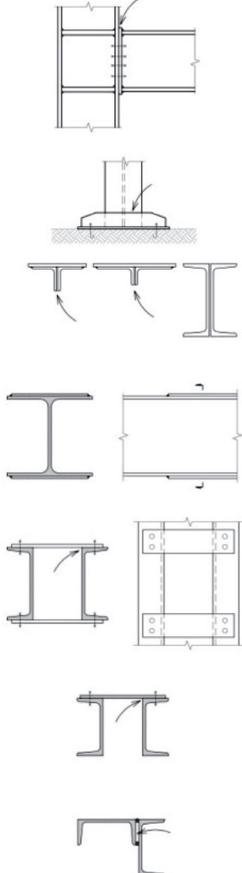
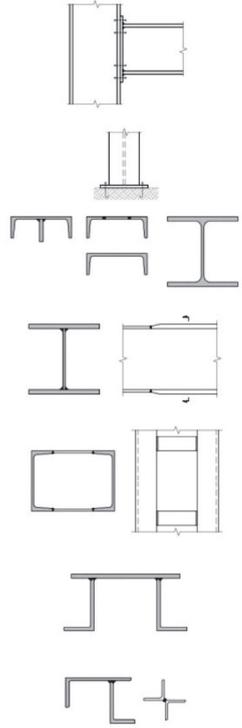
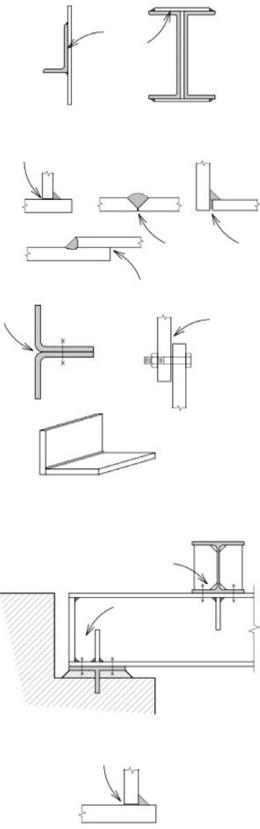
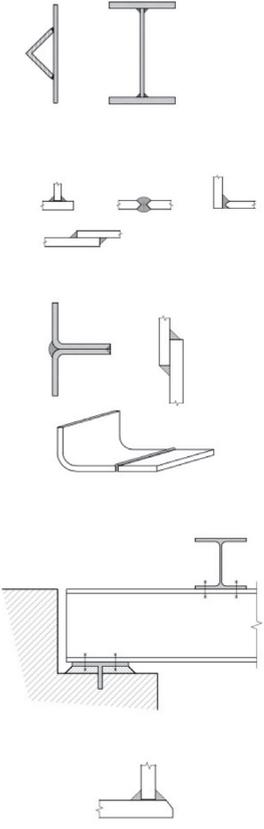
#	Tema	Dettaglio Critico	Dettaglio Ottimale
1	Evitare superfici solo giustapposte e infiltrabili		
2	Evitare interstizi		

Fig. 1a - Dettagli costruttivi e loro miglioramento in funzione della massima durabilità

- Presenza locale di micro-atmosfera salina in presenza di spargimento di sali disgelanti sul manto stradale.

Le condizioni ambientali poco adatte all'uso del WS, ossia nelle quali la patina protettiva non è stabile, corrispondono alla presenza di concentrazioni di sale maggiori di 0,1 mdd (mg/dm²/day, di NaCl). Si considerano anche poco adatte le condizioni che inducono ad una perdita teorica media di materiale $r \geq 6\mu\text{g}/\text{m}/\text{anno}$.

Di conseguenza gli accorgimenti principali per una buona *performance* di un ponte in acciaio autoprotetto sono i seguenti:

- Limitazione dell'esposizione diretta in atmosfere ad alto contenuto di Cl, marine o in presenza di sali disgelanti o di forte inquinamento;
- Protezione della struttura in acciaio dal ristagno d'acqua e dal frequente dilavamento: realizzare preferibilmente ponti a via superiore, nei quali l'acciaio è protetto dalla soletta superiore e nei casi di ponti a via inferiore è necessario, e non sempre facile, evitare zone di possibile ristagno dell'acqua;
- Ventilazione delle strutture scatolari ispezionabili, o sigillature accurate di quelle di piccole dimensioni e non ispezionabili;
- Controllo delle perdite d'acqua dalle solette (tubi di drenaggio, fessure, aperture) e soprattutto dai giunti di dilatazione;
- Progettazione di dettaglio tale da evitare ristagno d'acqua, di polvere/sporco, e conseguente umidità localizzata;
- Progettazione di dettaglio che privilegi particolari semplici, con ridotte possibilità di accumulo di polvere / sporcizia / umidità, e sempre ispezionabili.

Esempi di dettagli favorevoli ad una elevata durabilità, validi non solo per gli acciai autoprotetti, sono illustrati nelle figure 1a e 1b. Un criterio progettuale adottato in UK per tener conto in maniera cautelativa della perdita di sezione degli acciai patinabili consiste nella riduzione degli spessori di calcolo rispetto a quelli nominali con i seguenti valori, relativi a ciascuna superficie esposta:

- 0,5 mm nelle sezioni interne dei cassoni;
- 1,0 mm per ambienti C1, C2 e C3, condizioni "mild";
- 1,5 mm per ambienti C4 e C5, condizioni "severe".

4. ISPEZIONE DEI SISTEMI PROTETTIVI

Tutti i sistemi di protezione, seppur in misura differente, richiedono un periodico controllo:

- Sullo stato della protezione fisica artificiale, (verniciatura o zincatura) il cui strato superficiale subisce l'attacco degli agenti atmosferici e si degrada;
- Sullo strato e la effettiva formazione dell'ossido negli acciai patinabili;
- Sul consumo dell'anodo, o delle superfici zincanti.

Per i sistemi di verniciatura è essenziale l'esame visuale sistematico, soprattutto nel primo periodo di vita della struttura, in modo da individuare precocemente i punti deboli della protezione e ripristinarli con ritocchi di verniciatura, applicati con specifiche procedure.

È poi essenziale individuare il tempo di riverniciatura, ripristinando la finitura prima che vengano attaccati e indeboliti lo strato intermedio ed il primer.

Per le strutture in acciaio patinabile l'ispezione può avvenire in due fasi:

- Con esame visivo, verificando lo stato delle superfici e l'adesione della patina superficiale.
- Con misure di spessore degli elementi strutturali e confronto con lo spessore di progetto e con lo spessore di elementi distanti della stessa lamiera.
- Verificando l'assenza di ristagni d'acqua o di umidità, ed eliminando le cause.

Si può quindi affermare che la necessità di ispezione sussiste in assoluto per tutti i sistemi di protezione, ma si può altrettanto riconoscere che le modalità e le frequenze di tali ispezioni sono variabili e dipendono dal tipo di sistema. E si può ugualmente affermare che esistono dei tempi e delle frequenze di ispezione e di intervento ottimali in termini di costo, al di sotto dei quali vengono impiegate inutilmente risorse di ispezione e manutenzione e al di sopra dei quali i maggiori costi dei successivi interventi di ripristino superano i minori costi connessi a interventi ispettivi/manutentivi reali.

Naturalmente l'ispezione dei sistemi protettivi, così come le ispezioni alle strutture, possono e devono essere agevolate in fase di progetto: più sono agevoli e tanto più frequentemente verranno realmente effettuate.

- All'interno dei cassoni dovrebbe essere agevole entrare, e dovrebbero essere predisposti sistemi di illuminazione;
- All'interno di travate aperte dovrebbero essere predisposte passerelle interne ed accessi dalle pile;
- L'accesso all'esterno delle strutture è possibile, in generale, utilizzando dei *bay-bridge*. Tuttavia è possibile predisporre, già in fase di progetto, la presenza di piattaforme sotto-ponte molto utili per ispezioni e manutenzioni di ogni tipo. In alcuni recenti ponti stralati, all'estero ed in Italia, sono state previste, ed utilizzate già in fase di costruzione, oltre che in fase di ispezione e mantenimento.

5. CONCLUSIONI

La durabilità del ponte in acciaio può essere molto elevata, certamente ben oltre 100 anni, adottando l'uso di vari sistemi di protezione; tra questi, il principale è la verniciatura i cui prodotti più moderni presentano prestazioni eccellenti e superiori al passato; l'acciaio "patinabile", molto diffuso in Italia, è anche particolarmente adatto in molti contesti.

Sono tuttavia necessarie, contestualmente, sia corrette pratiche progettuali che sistematiche azioni ispettive manutentive, supportate dalla conoscenza, tra i responsabili e gli operatori, dei possibili fenomeni di vulnerabilità e degrado, le cui caratteristiche principali sono state brevemente anticipate e sintetizzate in questo report.

#	Tema	Dettaglio Critico	Dettaglio Ottimale
3	Evitare ristagni d'acqua, umidità, sporcizia		
4	Evitare cassoni non ispezionabili, o non sigillati		
5	Evitare spigoli vivi		
6	Evitare contrasto tra materiali eterogenei		
7	Consentire la ispezionabilità e la mantenibilità		

Fig. 1b – Ulteriori dettagli costruttivi e loro miglioramento in funzione della massima durabilità