

**CIAS**

**Centro Internazionale di Aggiornamento  
Sperimentale Scientifico**

**Seminario di Aggiornamento  
Bolzano - 11/12/2008  
Le Costruzioni:  
Dalle Norme alla Pratica di Cantiere**

**Ponti Strallati  
Aspetti Progettuali  
e Problematiche di Durabilità**

**Mario de Miranda  
Studio DE MIRANDA Associati  
Ingegneria Strutturale - Milano  
[www.demiranda.it](http://www.demiranda.it)**

**IUAV – Istituto Universitario di Architettura di Venezia  
DCA – Dipartimento di Costruzione nell'Architettura**

## Indice

1.	Introduzione .....	3
2.	Il tema della durabilità delle strutture .....	3
2.1	Gli obiettivi.....	3
2.2	Le differenti strategie .....	5
3.	Ponti strallati e durabilità .....	5
3.1	Materiali .....	5
3.2	Protezione degli elementi strutturali.....	7
3.2.1	Elementi in CA e CAP per impalcati e antenne .....	7
3.2.2	Elementi in acciaio per impalcati e antenne .....	7
3.2.3	Stralli.....	8
3.3	Scelte progettuali.....	11
4.	Case studies .....	14
4.1	Il recupero del ponte sul fiume Kwanza .....	14
4.2	Il ponte sul fiume Livenza .....	16
4.3	Il ponte sul rio Potengi a Natal .....	17
4.4	Il ponte sul rio Higuamo.....	18
5.	Conclusioni .....	19

## 1. Introduzione

I *ponti strallati* rappresentano oggi una tipologia strutturale di crescente successo perché in grado di risolvere con efficacia differenti tematiche progettuali; al tempo stesso essi comportano tecnologie relativamente recenti e si configurano come sistemi strutturali di una certa complessità, che si articolano attraverso una ampia gamma di tipologie e schemi statici.

Il tema della *durabilità strutturale* è anch'esso oggi di particolare attualità, infatti:

- il degrado di molte strutture risulta drammaticamente evidente; tecniche e consuetudini costruttive giudicate adeguate in passato risultano oggi inadeguate alla luce delle evidenze del degrado del costruito e dei risultati della ricerca;
- i costi per la collettività necessari per contrastare il degrado strutturale sono ingenti.

Per questi motivi può risultare utile indagare su come le problematiche della durabilità si declinino nella particolare tipologia del ponte strallato e in che modo la corretta considerazione di tali problematiche possa influenzare le scelte strutturali. Così come è utile cercare di individuare le scelte progettuali e costruttive che consentano di migliorare la durata nel tempo di queste strutture.

## 2. Il tema della durabilità delle strutture

### 2.1 Gli obiettivi

L'obiettivo che ci si prefigge quando si progetta e si gestisce un ponte in termini di durabilità consiste nel raggiungere la vita utile della struttura con il minimo deterioramento, in modo di garantirne la sicurezza e la funzionalità, e con il minimo costo di gestione, ovvero il minimo costo complessivo per la collettività, essendo i ponti, in generale, opere pubbliche.

La *vita utile* di progetto di un ponte, come è noto, dipende dall'importanza e dalla funzione del ponte.

In generale i ponti strallati si adottano per attraversamenti di una certa importanza e la loro vita utile di progetto, nella maggior parte dei casi, è fissata pari a 100 anni.

Il *deterioramento* delle strutture, è causato dagli agenti atmosferici e dagli enti di carico; pur essendo in qualche misura inevitabile per qualsiasi oggetto realizzato dall'uomo, risulta variabile in funzione dei materiali utilizzati e può essere quindi controllato e previsto quantitativamente in sede di progetto.

Il *costo di gestione* rappresenta la spesa necessaria per tenere sotto controllo nel tempo il degrado strutturale, e deriva dalle relative attività di ispezione, monitoraggio, manutenzione e dai necessari interventi di ripristino.

Essi risulteranno quindi tanto minori quanto più la struttura sarà semplice da ispezionare, quanto meno avrà bisogno di "monitoraggio", quanto minori saranno le attività di ordinaria manutenzione e, soprattutto, quelle di straordinario ripristino e adeguamento.

Il rapporto con cui interagiscono le categorie sopra richiamate: vita utile - deterioramento - costi di gestione, è ben evidente nel diagramma di fig. 1, in cui si mostrano:

- la riduzione di affidabilità e funzionalità della struttura a causa del degrado;
- il recupero di affidabilità e funzionalità operato dagli interventi manutentivi, fino al raggiungimento della vita utile;
- il crescente costo nel tempo richiesto dalle attività di ispezione e manutenzione, variabile peraltro in funzione delle strategie poste in essere nella gestione del ponte.

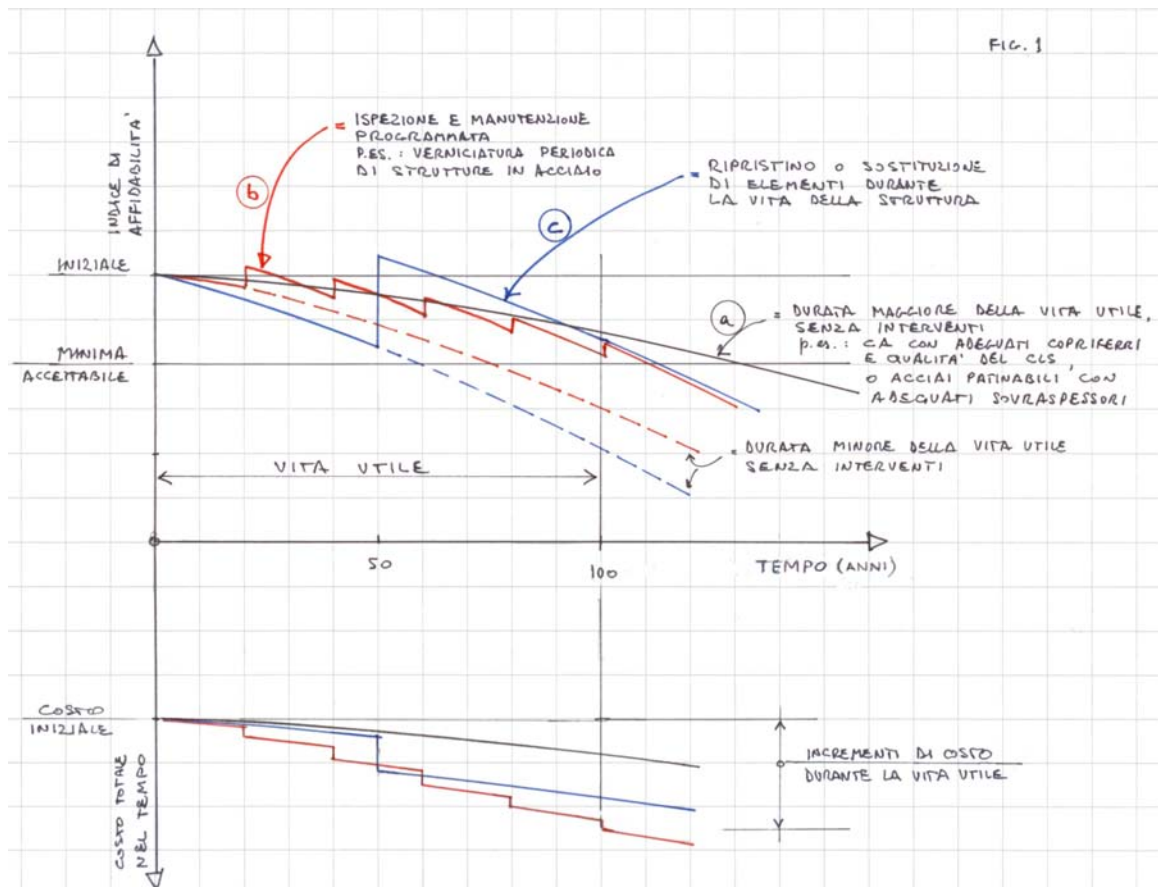


Fig. 1 – Diagrammi qualitativi della variazione nel tempo dell'affidabilità strutturale e dei costi totali, con differenti situazioni di intervento:

- senza interventi di ripristino, solo costo di ispezione;
- con ripristini programmati frequenti;
- con ripristini programmati rari, o interventi di recupero non programmati.

Risulta chiaro, quindi, come la "durabilità" sia un concetto relativo e funzionale ad un obiettivo da conseguire: una determinata vita utile in condizioni di funzionalità e sicurezza, al minimo costo.

Non si richiede, cioè, per l'intera struttura una durata assoluta e indefinita né l'assenza totale di fenomeni di degrado, bensì una durata finita ed un degrado controllato.

## 2.2 Le differenti strategie

Una adeguata durabilità può essere quindi conseguita attraverso strategie differenti:

- È possibile, in determinate situazioni, ricercare una sorta di "*durata indefinita*" fino alla vita di progetto della struttura, senza la necessità di alcun intervento di manutenzione in tale arco di tempo. È ciò che si richiede di norma alle strutture non accessibili dopo la costruzione, come le fondazioni e le opere interrato, e che sarebbe auspicabile, pur essendo difficile da ottenere in tutte le condizioni ambientali, ricercarla per tutte le rimanenti strutture.  
È anche ciò che si richiede in generale agli elementi metallici nei confronti della resistenza a fatica.
- È altresì possibile garantire il controllo del degrado strutturale attraverso il progressivo *rinnovamento* delle barriere di protezione contro il degrado: rivestimenti verniciati, malte di rivestimento o altri tipi di protezione. La durata del sistema di protezione viene quindi aggiornata attraverso l'applicazione di strategie di manutenzione programmata.
- Esiste infine la possibilità di adeguare la durata della struttura attraverso la *sostituzione* degli elementi deteriorati. È ciò che avviene tipicamente con gli elementi soggetti a maggiore usura come le pavimentazioni, gli apparecchi d'appoggio e i giunti di carreggiata. Nei ponti strallati, come vedremo, questo concetto si può applicare, a determinate condizioni, anche agli stralli.

## 3. Ponti strallati e durabilità

### 3.1 Materiali

I materiali utilizzati per la costruzione dei ponti strallati sono i tipici materiali strutturali: per le sottostrutture, le strutture in elevazione e gli impalcati si usano i calcestruzzi armati e precomposti e gli acciai da carpenteria; raramente, e limitatamente agli impalcati, le leghe d'alluminio o le resine fibrorinforzate.

Per gli stralli si usano tipicamente acciai ad alta resistenza e, in fase finora solo sperimentale, fibre di carbonio.

Negli ultimi decenni si sono affermate due differenti tipologie:

- Gli stralli in fune chiusa, utilizzati principalmente per tiranti di piccola portata, formati da fili spiralati i cui strati più superficiali sono conformati a z in modo da serrarsi (chiudere gli spazi di interfaccia) quando vengono posti in tensione.

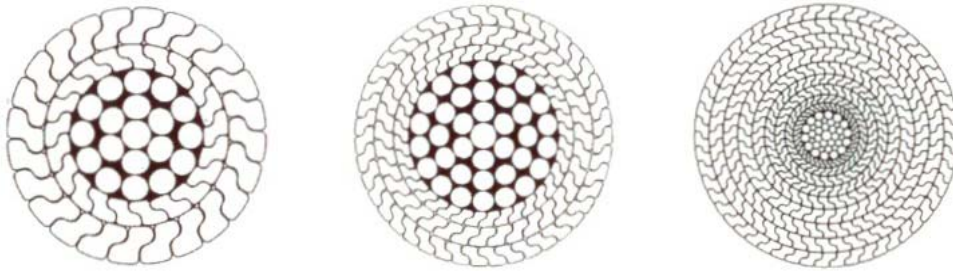


Fig. 2 – Sezioni tipiche di “funi chiuse”.

- Gli stralli a trefoli paralleli, in cui viene realizzato un sistema multiplo di protezione: zincatura dei fili, protezione del singolo trefolo con grasso o cera e guaina individuale in HDPE, e protezione dell’intero strallo con guaina di grande spessore in HDPE.



Fig. 3 – Sezione tipica di trefolo “viplato” utilizzato per la composizione di stralli da ponte a trefoli paralleli.

Gli stralli in calcestruzzo precompresso, dopo le esperienze coraggiose di Riccardo Morandi non hanno più avuto un reale seguito applicativo. Ed è tuttavia interessante segnalare, nel contesto degli argomenti trattati in queste note, come quelle esperienze fossero tese proprio a risolvere le problematiche di durabilità degli stralli, e cioè un problema centrale per i ponti strallati.

Nei classici materiali da costruzione il problema della durabilità si articola essenzialmente nei confronti di due obiettivi: la resistenza alla fatica e la protezione dalla corrosione. E in quest’ultimo caso nella grande maggioranza dei casi si configura con la esigenza di evitare o controllare la ossidazione degli elementi in acciaio.

Il calcestruzzo, se si evitano situazioni di reattività degli inerti, si controlla l’eventuale attacco di solfati e dei cicli di gelo-disgelo, e se se ne salvaguarda l’integrità superficiale da fenomeni di abrasione dovuti all’acqua e al vento o da attacchi chimici, è un materiale che può durare nel tempo ben oltre la vita utile di una struttura.

La sua integrità può comunque essere minata dall’ossidazione delle parti metalliche poste al suo interno, che induce un aumento di volume dei prodotti dell’ossidazione; ma in questo caso l’origine del degrado è l’armatura, non il calcestruzzo.

Il problema della durabilità si concentra quindi nell'esigenza di proteggere le parti metalliche di una struttura.

## 3.2 Protezione degli elementi strutturali

### 3.2.1 Elementi in CA e CAP per impalcati e antenne

Negli elementi in calcestruzzo armato la protezione delle parti metalliche si ottiene con la protezione nei confronti della penetrazione dell'acqua che viene fornita dal copriferro, e con la passivazione delle superfici delle armature che viene fornita dall'ambiente alcalino del calcestruzzo.

Oggi sappiamo che la penetrazione dell'anidride carbonica all'interno del copriferro può riuscire in un numero di anni relativamente breve ad annullare la passivazione delle armature così come anche la penetrazione di cloruri può raggiungere le parti metalliche, ed attivare il processo corrosivo, in un numero di anni relativamente limitato.

Ne risulta la necessità di mettere in atto alcune precise scelte progettuali:

- prescrizione di elevate qualità dei calcestruzzi: bassa porosità, bassi rapporti a/c, aggiunta di parti ultra fini, fumi di silice, uso di additivi;
- adozione di elevati copriferri;
- riduzione o eliminazione degli elementi soggetti a dilavamento, o al contatto diretto con sali e cloruri;
- adozione, ove i provvedimenti precedenti non siano sufficienti o possibili, di armature non metalliche o ad alta resistenza alla corrosione (zincate o "inox"); in genere limitatamente alle zone più critiche e vulnerabili: ad esempio estradossi di solette e zone di bagnasciuga in strutture marine.

### 3.2.2 Elementi in acciaio per impalcati e antenne

Negli elementi in carpenteria metallica il problema della durabilità è stato posto da sempre: l'evidenza del fenomeno della corrosione in strutture in acciaio nudo ha imposto da subito - da oltre duemila anni - la tecnica della protezione mediante vari rivestimenti.

La verniciatura, tuttavia, non è eterna, né in genere consente una protezione di durata pari alla vita utile della struttura. È soggetta ad abrasione e invecchiamento ed è caratterizzata da una certa porosità che consente nel tempo la diffusione del vapore acqueo.

È quindi necessario rinnovarla, ripristinarla, o ri-eseguirla; la scelta più efficace dipende dalla tipologia strutturale, dal tipo di verniciatura, dalle strategie manutentive adottate.

La protezione mediante verniciatura rappresenta un costo di gestione e questo è uno svantaggio; tuttavia la necessità di interventi manutentivi programmati comporta una conseguente sistematicità negli interventi di ispezione, che consentono un controllo dello stato di degrado della struttura, realizzabile facilmente in strutture aperte e in genere agevolmente ispezionabili come le strutture metalliche; e questo è un forte vantaggio, soprattutto in un confronto con le strutture in calcestruzzo, per le quali il controllo dello stato di degrado strutturale è in generale non sistematizzato, e per tale motivo spesso risulta tardivo, poco agevole o impossibile da effettuare in misura esaustiva, e di costo elevato.

L'utilizzo di strutture in acciaio tipo Cor-Ten, a "migliorata resistenza alla corrosione", è spesso considerato una efficace alternativa alla verniciatura: ad un costo iniziale equivalente o leggermente più elevato corrisponde un minore costo di gestione nel tempo, rimanendo inalterati i vantaggi in termini di ispezionabilità e futuri adeguamenti.

La protezione superficiale fornita dall'ossido aderente e compatto, che si forma nei primi anni di esposizione, e la eventuale previsione di adeguati sovrassessori in condizioni ambientali sfavorevoli, può consentire di prolungare la vita utile della struttura fino al valore di progetto.

È tuttavia sempre possibile intervenire con interventi di verniciatura, e quindi aggiornare le condizioni di protezione alla corrosione, laddove i previsti tassi di corrosione risultino superiori a quelli stimati, o altre circostanze lo richiedessero.

### **3.2.3 Stralli**

- Vulnerabilità e affidabilità

Negli stralli il problema della durabilità rappresenta un aspetto fondamentale del loro progetto e realizzazione.

Esistono infatti diversi fattori di vulnerabilità:

- Gli acciai con cui sono realizzati gli stralli sono, per motivi progettuali e costruttivi, sempre acciai ad elevata resistenza e quindi molto sensibili alla corrosione; risulta quindi essenziale prevedere un sistema di protezione dall'ingresso di acqua e umidità estremamente efficace.
- Gli stralli sono soggetti a sensibili variazioni di tensione, movimenti e vibrazioni indotti dal traffico e dal vento; questo comporta una forte sollecitazione statica e ambientale delle zone di ancoraggio, nonché forti sollecitazioni di fatica.
- La opportunità di poter ritensionare o sostituire lo strallo nel tempo fa sì che il sistema di protezione preveda materiali flessibili, iniettabili, soggetti a variazioni di pressione e, in generale, con rischi di infiltrazione di acqua o vapore acqueo.

A fronte di tali elementi di vulnerabilità gli stralli presentano alcuni importanti elementi di affidabilità:

- lo strallo è un elemento ridondante, composto da numerosi fili, eventualmente intrecciati in trefoli: il cedimento dei primi fili più vulnerabili comporta una limitata riduzione di capacità portante, ma nel contempo una modifica dei parametri di rigidità e di frequenza di vibrazione sufficiente a consentire una identificazione del danno in occasione di un controllo;
- realizzando ponti con stralli sufficientemente ravvicinati l'eventuale degrado o cedimento di un elemento non comporta né il collasso delle strutture né il danneggiamento di altri elementi strutturali. E questa ridondanza oltre a rappresentare un importante elemento di sicurezza, consente di attuare strategie di controllo del degrado basate sul rinnovamento degli elementi strutturali;
- infatti lo strallo, in certe configurazioni, può essere sostituito, anche con traffico in esercizio.

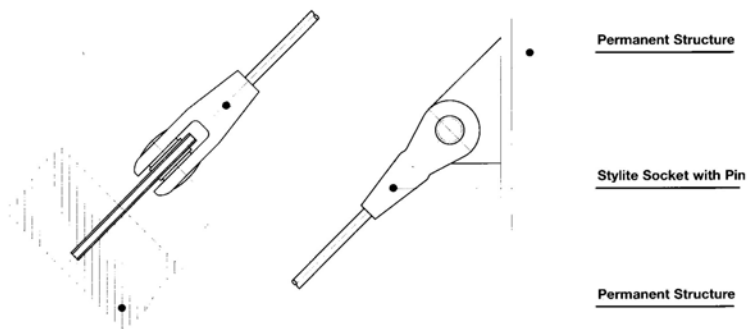
In tal modo è possibile ripristinare integralmente una condizione di degrado attraverso interventi che, se resi possibili e semplici in fase progettuale, comportano costi poco rilevanti.



È altresì possibile ipotizzare di programmare sin dall'inizio la completa o parziale sostituzione del sistema di stralli, dopo un certo numero di anni di servizio della struttura; per esempio il numero di anni per il quale è garantita con certezza, in base ad esperienze e a prove di invecchiamento, la piena integrità dello strallo.

- Sistemi di protezione  
Gli stralli di ultima generazione comprendono un sistema di protezione dalla corrosione formato da differenti barriere.
- Negli stralli a *funi chiuse* è prevista una verniciatura dell'intero cavo, il serraggio dei fili esterni, conformati a z, durante il tensionamento del cavo, e la zincatura dei singoli fili.

**Stylite Socket Fixed Anchorage**



**Stylite Socket Adjustable Anchorage**

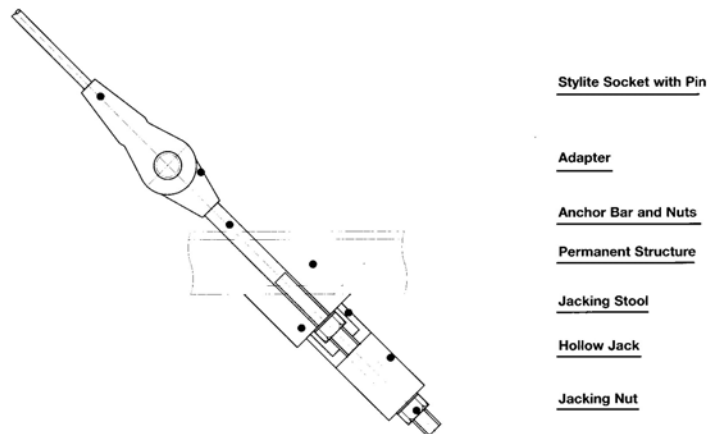


Fig. 4 – Schema concettuale di alcuni tipi di ancoraggi di stralli a funi chiuse.

I punti delicati del sistema consistono nella sigillatura delle zone in cui la fune si innesta nell'ancoraggio, e negli ancoraggi a cerniera, qualora utilizzati, nei quali la articolazione formata dal sistema perno-foro risultano potenziali zone di accesso di acqua, di difficile protezione a lungo termine. Inoltre la protezione esterna, formata in genere da una verniciatura o protezione affine, deve essere rinnovata periodicamente e ciò risulta disagiata per la difficile accessibilità dei cavi.

- o Negli *stralli a trefoli paralleli* è prevista una protezione formata da quattro livelli differenti:
  - la zincatura del trefolo;
  - la cera o il grasso tra trefolo e guaina individuale;
  - la guaina individuale in HDPE;
  - la guaina globale in HDPE di grande spessore.

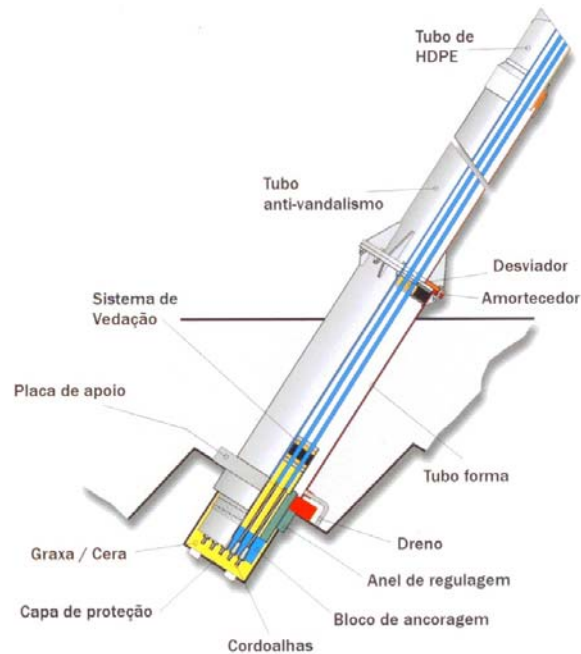


Fig. 5 – Sezione illustrativa dei componenti del complesso di ancoraggio di uno strallo a trefoli paralleli.

Tali protezioni garantiscono certamente una durata molto elevata allo strallo del suo tratto libero.

La sola guaina esterna in HDPE se realizzata in spessori superiori a 6 mm presenta valori di permeabilità tali da garantire una efficace barriera alla diffusione del vapor d'acqua per un periodo superiore a 100 anni. La resistenza ai raggi UV e all'invecchiamento è in teoria altrettanto garantita, da prove di laboratorio di invecchiamento artificiale per il medesimo periodo. Un grande vantaggio di questo sistema consiste nella possibile sostituzione di singoli trefoli danneggiati, o anche nella possibile sostituzione di tutti i trefoli, cioè dell'intero strallo, agendo in maniera graduale su un numero limitato di trefoli, in fasi successive.

I punti delicati del sistema risiedono nelle zone di ancoraggio, ove l'efficace sistema a quattro livelli viene interrotto: la guaina esterna viene giuntata ad un tubo di transizione e le guaine individuali vengono interrotte per consentire l'ancoraggio dei trefoli. In questa zona la protezione è garantita da una iniezione di cera, la cui perfetta esecuzione e la cui elevata qualità costituiscono le necessarie condizioni all'impedimento dell'ingresso di acqua e vapor d'acqua nell'ancoraggio.

Le testate dell'ancoraggio sono protette da grasso contenuto in una calotta esterna.

Questa zona dell'ancoraggio può essere ispezionata e ciò va fatto periodicamente, anche per rimuovere il grasso di protezione.

Il sistema è quindi efficace nel proteggere nel tempo le parti metalliche, a condizione che venga messo in opera con grande accuratezza in tutti i suoi componenti, e che venga mantenuto nel tempo nelle sue componenti deteriorabili: innesto della guaina nel tubo-forma; protezione degli ancoraggi dei trefoli; verniciatura delle parti metalliche esterne del sistema d'ancoraggio.

Tuttavia, l'esperienza attuale sulla durata nel tempo di elementi strutturali realizzati con funi e cavi d'acciaio è limitata ad un periodo pari alla metà di quella che vorremmo risultasse la vita utile dei nostri ponti: i primi ponti strallati moderni sono degli anni 50, e diversi grandi ponti sospesi e strallati realizzati in quel periodo e negli anni successivi hanno mostrato nei cavi, in molti casi, segni di degrado inaspettati.

Inoltre l'installazione iniziale degli stralli può risultare a volte inadeguata, per difficoltà operative o per necessità di abbreviare eccessivamente i tempi esecutivi.

Così come la manutenzione può risultare insufficiente o assente, come è avvenuto in diversi casi.

Pertanto, la concezione di un sistema strutturale che consenta nel tempo la agevole e programmata rigenerazione degli elementi più vulnerabili, può rappresentare una ragionevole strategia per la garanzia della necessaria durabilità strutturale.

### **3.3 Scelte progettuali**

I ponti strallati sono strutture nelle quali risultano possibili numerose variazioni e alternative progettuali.

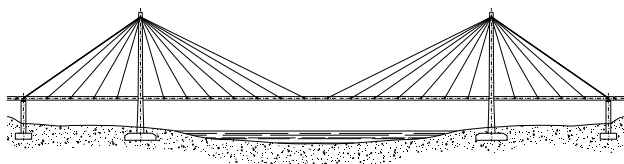
Per ponte strallato si intende una struttura il cui impalcato è sostenuto da cavi di sospensione ad andamento rettilineo, gli stralli, che fanno capo ad una o più antenne.

Dalla sommità di tali antenne gli stralli si ancorano verso terra, e tale ancoraggio può essere realizzato o direttamente a terra o sull'impalcato retrostante le antenne.

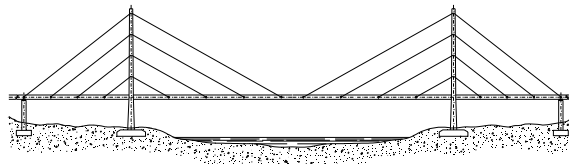
Si configurano pertanto differenti tipologie di ponti strallati:

- ancorato a terra;
- autoancorato;
- su una, due, tre o più luci;
- ad unica o doppia antenna;
- ad antenne verticali o inclinate;
- con stralli ravvicinati o radi;
- con schema di sospensione ad arpa o a ventaglio;
- con uno o due piani di stralli;
- con impalcato aperto o a cassone;
- con differenti materiali;
- in numerose configurazioni ottenute dalla combinazione delle caratteristiche sopra citate.

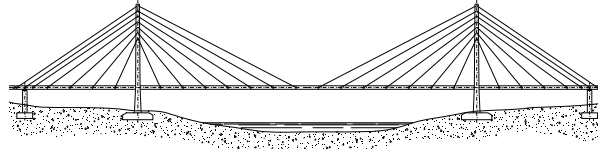
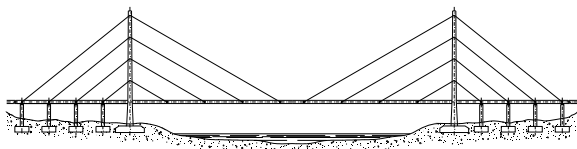
*Schema autoancorato e ancorato a terra*



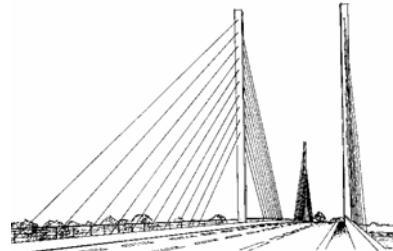
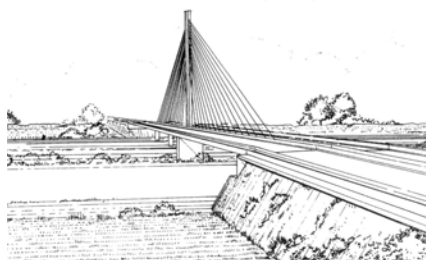
*Ponte strallato con configurazione degli stralli a ventaglio*



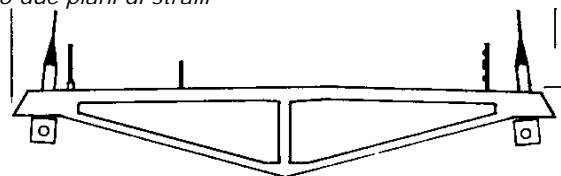
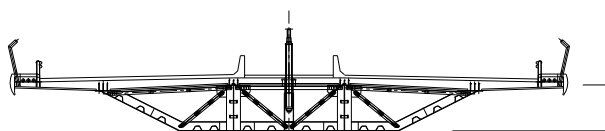
*Ponte strallato con configurazione degli stralli ad arpa*



*Configurazione ad arpa con ancoraggio a terra, e ad arpa-ventaglio*



*Ponti strallati con uno o due piani di stralli*



*Sezioni tipiche d'impalcato: in acciaio con stralli centrali; in calcestruzzo con stralli laterali*

Fig. 6 – Alcuni Schemi tipologici dei ponti strallati

A fronte di tale ricchezza nelle opzioni progettuali, risulta necessario operare una sintesi, orientata al tema specifico, che ottemperi le varie esigenze di stabilità, economia, estetica e durabilità.

In funzione di quest'ultima categoria si possono quindi formulare alcune considerazioni sulla valenza ed efficacia di alcune opzioni e scelte di progetto.

- *Schemi statici: ancorato a terra o auto ancorato?*

Nello schema autoancorato l'impalcato risulta soggetto ad azioni di compressione; nel ponte ancorato a terra l'impalcato è in trazione; il primo schema è pertanto, in linea generale, da preferire, per impalcati realizzati interamente o parzialmente in cemento armato.

Vale la pena osservare che in un ponte strallato autoancorato è possibile ottenere, con una attenta distribuzione dei tiri negli stralli, una condizione di azione assiale centrata di compressione sia nelle antenne e pile, che nell'impalcato.

Si ottengono pertanto, soprattutto se si adotta per tali elementi il calcestruzzo come materiale, condizioni ideali di durabilità: sezioni integralmente e uniformemente compresse per carichi permanenti in impalcato e antenna. E solo gli stralli, elementi specializzati per questo tipo di azione, in trazione.

- *Stralli ravvicinati o radi?*

Nei primi ponti strallati gli stralli erano visti come vincoli elastici in sostituzione di pile intermedie; erano quindi posti a grandi interassi: dai 25 ai 40 m.

Gli stralli disposti a grandi interassi richiedono grandi rigidità e altezze delle travi d'impalcato, elevate forze da trasmettere, nonché stralli, ancoraggi e traversi di grande portata; ciò aumenta le difficoltà e gli oneri in caso di sostituzione di uno strallo, oltre alle difficoltà esecutive in fase di realizzazione del ponte.

Stralli ravvicinati riducono tali difficoltà, aumentano la ridondanza del sistema, e consentono una sostituzione più agevole.

- *Uno o più piani di stralli?*

Il singolo piano di stralli impone un impalcato rigido a torsione, tipicamente una struttura scatolare.

Inoltre, la sezione dell'impalcato risulta soggetta a momenti flettenti negativi nel piano trasversale; ciò comporta tensioni di trazione all'estradosso della soletta, che si combinano con le tensioni principali di trazione indotte dalle azioni torsionali nel cassone.

Questa condizione è più onerosa, in termini di durabilità della soletta rispetto alla condizione di compressione trasversale che si verifica con il doppio piano di stralli.

In situazioni di singolo piano di stralli è quindi opportuno prevedere una precompressione trasversale della soletta per evitare la fessurazione per carichi permanenti.

- *Impalcati: sottili o di grande altezza?*

Le tensioni longitudinali indotte negli impalcati dalle variazioni termiche differenziali tra stralli e impalcato e tra estradosso/intradosso dell'impalcato, risultano direttamente proporzionali allo spessore dell'impalcato, a parità di ogni altro parametro geometrico.

Tali azioni possono indurre tensioni di trazione negli estradossi degli impalcati e sono quindi, preferibilmente, da ridurre al minimo.

Gli impalcati snelli sono quindi meno sensibili a questo fenomeno e pertanto, da questo punto di vista, da preferire.

- *Antenne: rigide o flessibili?*

Le antenne rigide nel piano longitudinale tendono ad assorbire forti momenti flettenti per condizioni di carico non equilibrato: per esempio applicato sulla sola campata centrale.

Ne risultano tensioni alternate, con affaticamento dei materiali, siano essi acciaio o calcestruzzo.

La predisposizione di cerniere alla base delle antenne, seppure annulli i momenti sopra richiamati, comporta la presenza di articolazioni, sensibili al degrado, e di quasi impossibile sostituzione a causa degli elevati carichi trasmessi.

- *Elementi strutturali: aperti o chiusi?*

Gli elementi aperti risultano ispezionabili e questo è un vantaggio.

Negli impalcati la previsione in sede progettuale di un sottoponte per l'ispezione risulta molto utile.

I cassoni, sono anch'essi ispezionabili se di adeguate dimensioni; i cassoni non accessibili presentano l'incognita di un quasi impossibile controllo dello stato di degrado.

In elementi di calcestruzzo le sezioni piene, ove possibile, sono preferibili: consentono più agevolmente di adottare grandi copriferri e sono poco soggette alle coazioni termiche in virtù della grande massa.

- *Antenne: verticali o inclinate?*

Le antenne inclinate presentano le superfici esterne soggette al dilavamento in caso di pioggia.

Le antenne verticali, se prismatiche e se in sommità si prevede un leggero oggetto di protezione, non sono soggette a dilavamento, se non in caso di vento.

Inoltre le antenne inclinate presentano sempre difficoltà esecutive per cui, se le condizioni statiche lo consentono, e quindi in assenza di forti azioni orizzontali, sono preferibili le antenne con fusti verticali.

Le antenne, se cave, dovrebbero avere al loro interno lo spazio e le condizioni per una agevole salita verso le testate d'ancoraggio per consentirne l'ispezione ed i necessari interventi di manutenzione.

Nelle antenne cave dovrebbe essere prevista una sufficiente ventilazione sia per consentire di lavorare in condizioni accettabili, sia per evitare eccessivi tassi di umidità nelle zone di ancoraggio degli stralli.

## **4. Case studies**

Allo scopo di mostrare come ai concetti sopra richiamati possa darsi pratica attuazione, si riporta nel seguito l'illustrazione di alcuni progetti di ponti strallati realizzati negli ultimi anni e di un intervento di recupero.

### **4.1 Il recupero del ponte sul fiume Kwanza**

In Angola, a una sessantina di chilometri a sud di Luanda, il fiume Kwanza è attraversato da un ponte strallato a tre luci con campata centrale di 260 m costruito nel 1970.

Il ponte ha un impalcato formato da travi in acciaio e soletta in calcestruzzo; le antenne sono in calcestruzzo; gli stralli erano del tipo a fili paralleli.

Dopo circa 33 anni di servizio, complice la totale assenza di manutenzione causata anche dalla guerra civile, il ponte presentava un forte danneggiamento degli stralli nelle zone d'ancoraggio, con diverse rotture di fili, ed uno degli stralli d'ormeggio del tutto inattivo.

L'impalcato presentava una forte deformazione verticale verso il basso ed una torsione altrettanto accentuata, dell'ordine entrambe di diverse decine di centimetri.

Il ponte era essenziale per l'economia del Paese, ed era strategico dal punto di vista militare; per tali motivi esso era in esercizio, seppure in condizioni precarie, al momento della decisione del suo recupero e tale doveva rimanere durante i lavori di adeguamento statico.

L'adeguamento è consistito nella totale sostituzione dei vecchi tiranti con nuovi stralli a trefoli paralleli, e nel completo ripristino dell'assetto geometrico e statico dell'impalcato e delle antenne.



Fig. 7 – Il ponte sul fiume Kwanza, dopo gli interventi di recupero strutturale.

A tale scopo si è studiata una strategia di intervento sviluppata attraverso le seguenti fasi:

- realizzazione di ancoraggi provvisori saldati alle travi d'impalcato;
- installazione, in sommità delle antenne, di nuove selle provvisorie adiacenti alle selle originali;
- installazione di nuovi stralli provvisori, ancorati alle selle provvisorie ed agli ancoraggi provvisori sull'impalcato, e contestuale detensionamento e rimozione degli stralli originari;
- realizzazione, in sommità delle antenne, di nuove testate d'ancoraggio poste al di sopra delle selle originarie;
- installazione degli stralli definitivi, ancorati alle nuove testate sull'antenna ed alle testate originarie sull'impalcato, e contestuale detensionamento degli stralli provvisori;
- regolazione dei tiri e ripristino della configurazione geometrica originaria dell'impalcato e delle antenne.

L'intera operazione è avvenuta, come accennato, con il ponte in esercizio, peraltro presidiato militarmente per proteggerlo da attacchi armati.

Nell'intervento furono incontrate varie difficoltà: la prima consisteva nella ignoranza, al momento dell'intervento, delle forze nei tiranti esistenti. La tipologia degli ancoraggi non consentiva di installare martinetti per il controllo o la regolazione delle forze negli stralli esistenti. Esse furono quindi stimate teoricamente in base ad un rilievo geometrico delle catenarie. Risultò anche particolarmente delicato il controllo della flessione delle antenne e dell'impalcato, nonché delle forze negli stralli durante le varie fasi. Fasi nelle quali la freccia dell'impalcato in mezzeria ha sperimentato una escursione di oltre un metro.

Il risultato è stato alla fine molto soddisfacente essendo riusciti, innanzitutto, a realizzare una operazione di recupero strutturale oggettivamente rischiosa e complessa, ma anche ad ottenere una geometria finale del ponte che si discostava da quella di progetto di soli 2 cm.

Alla luce dell'esperienza di questo intervento è possibile fare alcune considerazioni:

- Le rotture dei tiranti originari si erano verificate nelle zone d'ancoraggio, ed in particolare all'entrata del cavo nella sella, zona in cui convergono gli effetti negativi del frettaggio trasversale, della fatica e dell'infiltrazione di acqua tra cavo e sella.  
Le selle con cavi passanti risultano ancora oggi un tema di difficile soluzione per le medesime ragioni, preferendosi nella maggior parte dei casi ancoraggi diretti.
- La sostituzione degli stralli ed il completo recupero del ponte sono stati resi possibili dalla presenza di una struttura in acciaio per l'impalcato, che ha reso possibile installare nuovi ancoraggi in modo relativamente semplice; inoltre il ridotto peso delle strutture d'impalcato comportava forze negli stralli gestibili senza eccessiva difficoltà.
- La necessità di adottare tiranti provvisori derivava dalla grande distanza tra gli stralli: 35 m, che era un valore tipico per i ponti di quegli anni, ma che non consentiva di rimuovere uno strallo senza contestualmente riprenderne la forza con uno provvisorio. Operazione che oggi, con stralli ravvicinati, risulta possibile.

## 4.2 Il ponte sul fiume Livenza

Si tratta di un ponte su tre luci di 39 + 66 + 29 m, di cui le ultime due parzialmente in curva interamente in calcestruzzo precompresso, realizzato in provincia di Treviso <sup>(1)</sup>.



Fig. 8 – Il ponte sul fiume Livenza, presso Meduna (Tv).

Una singola antenna ed un piano di stralli centrale sostengono la campata centrale e la campata di riva.



Il singolo piano di stralli è derivato da un'esigenza indotta dal contesto ambientale.

La presenza relativamente prossima di un antico ponte in ferro, di cui si voleva rispettare l'immagine richiedeva per il nuovo ponte un inserimento alquanto discreto, caratterizzato da semplicità ed essenzialità formale.

L'impalcato è continuo sulle tre luci ed è solidale alla pila ed all'antenna: gli apparecchi d'appoggio ed i giunti di dilatazione sono quindi limitati alle due spalle.

L'impalcato del ponte è stato precompresso longitudinalmente e trasversalmente in modo da garantire in tutte le sezioni tensioni di compressione per le azioni permanenti e frequenti sia in direzione longitudinale che trasversale.

### 4.3 Il ponte sul rio Potengi a Natal

Si tratta di un ponte su tre luci, con campata centrale di 212 m, che scavalca il rio Potengi nei pressi della sua foce nell'Oceano Atlantico, nella città di Natal in Brasile <sup>(2)</sup>.



Fig. 9 – Il ponte sul rio Potengi a Natal.

Due viadotti d'accesso, con campata di 43 m, portano la lunghezza totale dell'opera a 1782 m.

L'impalcato presenta una altezza sul livello del mare di 58 m, e quindi pile alte e snelle.

Questa circostanza ha indotto a progettare un ponte con impalcato solidale con gli elementi verticali: pile e antenne, e quindi di realizzare una struttura a portale, senza apparecchi d'appoggio o articolazioni. Una struttura di tipo "integrale", secondo un'accezione usata in questi ultimi anni.

La struttura del ponte risulta formata da due piani strutturali paralleli, nei quali sono disposte le travi longitudinali d'impalcato, gli stralli, le antenne e le pile.

Le sezioni dell'impalcato sono piene e con spigoli arrotondati, soluzione utilizzata in altri due ponti realizzati recentemente, e rivelatasi efficace anche dal punto di vista costruttivo <sup>(3)</sup>, <sup>(4)</sup>.

Anche i traversi sono a sezione piena, con forma rettangolare, e precompressi.

Le antenne hanno sezione cava, e sono dotate di aperture in sommità e alla base per garantirne la ventilazione.

L'impalcato, in virtù delle componenti orizzontali dei tiri degli stralli e della compressione longitudinale, risulta sempre compresso per carichi permanenti e frequenti in direzione longitudinale e trasversale. Così come pile e antenne.

#### 4.4 Il ponte sul rio Higuamo

È stato realizzato nella Repubblica Dominicana, nei pressi della città di San Pedro di Macorix <sup>(5)</sup>.



Fig. 10 – Il ponte sul rio Higuamo.

Presenta una campata centrale di 390 m di luce e due campate laterali di 108 m ciascuna, appoggiate su pile disposte a passo ravvicinato.

Le campate laterali sono in calcestruzzo, con sezione piena. Esse infatti forniscono il necessario contrappeso per il bilanciamento del carico della grande campata centrale.

Quest'ultima ha una struttura metallica con soletta in calcestruzzo.

La struttura in acciaio, formata da travi a sezione aperta, di facile ispezionabilità, è quindi stata utilizzata soltanto per la campata centrale, di grande luce, con conseguente riduzione della massa da sostenere a sbalzo dagli appoggi e pertanto con una buona efficienza strutturale.

È inoltre stata installata sotto l'impalcato una piattaforma mobile che, dopo aver funzionato a supporto delle operazioni di montaggio dell'impalcato durante la costruzione, è stata successivamente destinata alle operazioni di ispezione, monitoraggio e manutenzione dell'impalcato e degli ancoraggi inferiori degli stralli.

L'antenna, con forma a  $\lambda$ , è realizzata con la parte inferiore in calcestruzzo, con sezioni a spigoli arrotondati, e la parte superiore in acciaio.

Nella testa dell'antenna sono ubicate scale e piani di lavoro per l'ispezione degli ancoraggi superiori degli stralli.

L'impalcato, irrigidito da una coppia di travi longitudinali ed una serie di travi trasversali, è sostenuto lateralmente dai due piani di stralli.

I traversoni sono quindi sollecitati con momenti flettenti positivi e la soletta superiore risulta sempre in compressione in direzione trasversale.

Così come risulta compressa in direzione longitudinale per le condizioni di carico permanente e frequenti, in virtù dell'azione indotta dalle componenti orizzontali dei tiri degli stralli.

Gli stralli, nei tre ponti sopra descritti, seppur forniti da tre differenti produttori, sono del tipo a trefoli paralleli, poco distanziati in senso longitudinale, e con sistemi di ancoraggio tali da consentirne sia l'eventuale ritensionamento nel tempo che l'eventuale sostituzione.

## 5. Conclusioni

Nei ponti strallati è spesso possibile effettuare scelte progettuali differenti, tutte realizzabili e a volte equivalenti in termini di efficienza statica. In molti casi esse sono anche guidate da esigenze estetiche.

Non tutte le scelte sono equivalenti in termini di durabilità, ed è opportuno tenere conto di questo aspetto già nelle prime fasi del progetto concettuale.

In generale si è mostrato che le esigenze di durabilità vengono meglio ottemperate in strutture che presentino schemi auto ancorati, con due piani di stralli in cui gli ancoraggi sull'impalcato siano posti ad interassi relativamente piccoli; con impalcato preferenzialmente a sezione aperta, in quanto più agevolmente ispezionabili, e antenne verticali. Strutture differenti sono certamente ben realizzabili, ma senza i vantaggi che le caratteristiche sopra richiamate già implicitamente forniscono in termini di durabilità.

Si è mostrato anche che le esigenze di durabilità possono essere realizzate, oltre che con adeguati sistemi di protezione delle parti metalliche della struttura, attraverso la previsione della agevole sostituzione degli stralli, anche in una ottica di rigenerazione programmata degli elementi strutturali più vulnerabili.

E in conclusione si è mostrato che i moderni ponti strallati, pur comportando reali aspetti di complessità e taluni elementi di vulnerabilità, possono essere progettati e realizzati in modo da garantire una durata nel tempo superiore alla vita di progetto dell'opera, e potenzialmente superiore a quella di altre tipologie strutturali.

---

Ref.: (1): Concept Design of Cable Stayed Bridge - Milano Bicocca - 1÷2 July 2003  
(2): 24° Convegno Nazionale AICAP - Salerno - 4÷6 ottobre 2007  
(3): The Guamà Bridge - Rivista SEI Structural Engineering International n. 3/2003  
(4): Il nuovo ponte sul rio Sergipe ad Aracajù – Rivista Le Strade n. 6 giugno 2008  
(5): Il Giornale dell'Ingegneria n. 5 - 15 Marzo 2008