POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

MILANO, 20 novembre 2015

ISPEZIONE DEI PONTI.

INDAGINI MIRATE A PARTICOLARI CRITICI AI FINI DELLA SICUREZZA

CRITICITA' SPECIFICHE DEI PONTI IN ACCIAIO

ing. Luca ROMANO – STUDIO ROMANO – ALBENGA - www.studioromano.org - luca@studioromano.org

SOMMARIO

- **PROGETTO DELLE PRESTAZIONI CON LE NORME ATTUALI**

- **Esempio: PROBLEMI COSTRUTTIVI DI UN PONTE STRALLATO – PIASTRE ORTOTROPE**

- **ANALISI DIFETTI RICORRENTI NEI PONTI ACCIAIO**

- **Esempio: ANALISI DELLE PRESTAZIONI PROGETTATE – CONTROLLO PRESTAZIONI EFFETTIVE IN UN PONTE AD ARCO**

❖ PROGETTO e CONTROLLI - MANUTENZIONE e ISPEZIONI

→ DURABILITA' DELL'OPERA

PRESTAZIONI DI PROGETTO CON LE NORME ATTUALI:

MATERIALI: prescrizioni su tavole e capitolato speciale d'appalto

CLASSE DI ESECUZIONE: prescrizioni su tavole e capitolato (EN-1090-2 marcatura CE)

SALDATURE: prescrizioni a capitolato - controlli

BULLONATURE: prescrizioni a capitolato - controlli

PROTEZIONE: prescrizioni su tavole e capitolato

MANUTENZIONE: Piano di Manutenzione "ad hoc" per la struttura progettata, con ispezioni ed interventi programmati

• MATERIALE ACCIAIO

Secondo le **NTC 2008**, cap.11, si può usare solo materiale qualificato e con controlli obbligatori in stabilimento e cantiere.

Esempio di specifica nel progetto e nel “Capitolato speciale d’appalto”:

- Elementi saldati in acciaio con spessori t ≤ 20 mm	S355J0	(ex 510C)
- Elementi saldati in acciaio con spessori 20 < t ≤ 40 mm	S355J2	(ex 510D)
- Elementi saldati in acciaio con spessori t > 40 mm	S355K2	(ex 510DD)
- Elementi non saldati angolari e piastre sciolte	S355J0	
- Imbottiture con spessore t < 3 mm	S355J0	

La tensione di snervamento nelle prove meccaniche nonché il CEV (carbonio equivalente) nell'analisi chimica dovrà essere nei limiti dell’UNI EN 10025 - 3.

Le tolleranze dimensionali per lamiere e profilati dovranno rispettare i limiti prescritti dall’UNI EN 10029, con classe di tolleranza minima A o B.

Tutti i materiali dovranno essere corredati di certificati e documenti di tracciabilità.

- ## CLASSI DI ESECUZIONE – EXECUTION CLASSES

La UNI EN 1090-2 (acciaio) è cogente dal 1 luglio 2014.

Introduce il concetto di "**Execution Class**" in termini di requisiti specificati e classificati per l'esecuzione di un' opera nel suo complesso, di un singolo componente o di un dettaglio di un componente.

La classe di esecuzione seleziona e specifica il livello di qualità appropriato in relazione alla sicurezza che quel componente avrà nell'opera di costruzione.

La Norma EN 1090 prevede 4 classi di esecuzione denominate EXC1, EXC2, EXC3, EXC4 (con criticità e performance crescenti dalla 1 alla 4).

I requisiti da rispettare, da parte del fabbricante, in funzione della EXC di progetto, sono dati nell'Appendice A della norma di supporto.

N.B. La classe di esecuzione viene definita in fase di progettazione della struttura e pertanto il fabbricate è tenuto a rispettare quella prevista nella documentazione tecnica. Nel caso non sia indicata il fabbricante potrà applicare la EXC2 come previsto dal § 4.1.2 della UNI EN 1090-2, avendo cura di richiedere l'approvazione al progettista.

SCELTA DELLA CLASSE DI ESECUZIONE:

EN 1090-2 Annex B - ACCIAIO

*I componenti devono essere classificati secondo 4 Classi di Esecuzione (**EXC**): **1 – 4***

EXC 1 - 4

Consequence Class	**CC**
Service Categories	**SC**
Production Categories	**PC**

DEFINIZIONE DELLA CLASSE DI CONSEGUENZA (CC):

DEFINITA IN BASE ALL'IMPATTO SULLA POPOLAZIONE, SULL'AMBIENTE, SULLA VITA UMANA, SUL SOCIALE

Definizione delle classi di conseguenze: (**CC** Conseguenze **C**lass).

Classe di conseguenze	Descrizione	Esempi di edifici e di opere di ingegneria civile
CC3	Elevate conseguenze per perdita di vite umane, o conseguenze molto gravi in termini economici, sociali o ambientali	• Gradinate di impianti sportivi • Edifici pubblici nei quali le conseguenze del collasso sono alte(es. sale da concerti) • Ponti Ferroviari • etc...
CC2	Conseguenze medie per perdità di vite umane, conseguenze considerevoli in termini economici, sociali o ambientali	▪ ***Edifici residenziali e per uffici*** ▪ ***Edifici pubblici nei quali le conseguenze del collasso sono medie (es. edificio di uffici)*** ▪ ***Edifici industriali***
CC1	Conseguenze basse per perdite di vite umane, e conseguenze modeste o trascurabili in termini economici, sociali o ambientali	• Costruzioni agricole, *nei quali generalmente nessuno entra* (es. serre) • Magazzini per sostanze non pericolose e nei quali l'accesso del personale sia assolutamente limitato
CC1=BASSA	CC2=STANDARD	CC3=ALTA

DEFINIZIONE DELLA CATEGORIA DI SERVIZIO (SC):

DEFINITA IN BASE ALLE SOLLECITAZIONI PREVISTE (DINAMICHE / STATICHE)

Definizione delle classi di servizio: (**SC** **S**ervice **C**ategories).

Categoria	Parametri
SC1	• Strutture e componenti progettati soltanto per azioni quasi statiche • Strutture e componenti le cui connessioni sono progettate per l'azione sismica in regioni con bassa sismicità e classe di duttilità DCL • Strutture e componenti progettati per azioni a fatica da carroponti/gru meccanici (classe S_0)
SC2	• Strutture e componenti progettati per la resistenza a fatica in accordo alla EN 1993 (es. ponti stradali e ferroviari, gru, carriponte classi da S_1 a S_9) • Strutture suscettibili a vibrazione da vento, folla o macchinari in rotazione • *Strutture e componenti progettati per l'azione sismica in regioni con media o alta sismicità ed in classe di duttilità DCM o DCH*
DCL,DCM, DCH: classi di duttilità in accordo alla EN 1998-1 (eurocodice-8) **SC1= carico statico SC2=sollecitazione a fatica**	

DEFINIZIONE DELLA CATEGORIA DI PRODUZIONE (PC):

DEFINITA IN BASE ALLE TECNOLOGIE PRODUTTIVE

Definizione della categoria di produzione: (**PC** **P**roduction **C**ategories).

Categoria	Parametri
PC1	• Componenti non saldati fabbricati con qualsiasi classe di acciaio • componenti saldati fabbricati con classe di acciaio infeiore all S355 (=S275max)
PC2	• Componenti saldati fabbricati con classe di acciaio uguale o superiore alla S355 • Componenti essenziali per l'integrità strutturale che vengono assemblati in situ mediante saldatura • componenti prodotti a caldo o che ricevono trattamenti termici durante la produzione
PC1<S355(=S275)	PC2≥S355

APPLICANDO IL CRITERIO AI PONTI, SI VEDE COME LA CLASSE DI ESECUZIONE MINIMA SIA LA EXC3:

Execution Classes EXC

Consequence classes		CC1		CC2		CC3	
Service categories		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Production categories	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 [a]	EXC3 [a]
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 [a]	EXC4

[a] EXC4 should be applied to special structures or structures with extreme consequences of a structural failure as required by national provisions.

Esempio classificazione ponte stradale a struttura metallica in zona sismica, in acciaio S355, con medie conseguenze su perdite di vite umane:

specificare sulle tavole esecutive: **classe di esecuzione: EXC3 –EN 1090-2**

Ciò significa:

-serie di procedure, controllo sui materiali, sugli assemblaggi e lavorazioni che il carpentiere metallico deve eseguire e documentare insieme al prodotto

-maggiore è la classe di esecuzione, maggiori sono i controlli da eseguire ed i costi di produzione

-non tutti i carpentiere sono qualificati per tutte le classi di esecuzione

ESEMPIO DI MARCATURA **"CE"**

CE 01234	*CE conformity marking, consisting of the "CE"-symbol given in Directive 93/68/EEC.* *Identification number of the notified body*
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 **08** 01234-CPD-00234	*Name or identifying mark and registered address of the producer* *Last two digits of the year in which the marking was affixed* *Certificate number*
EN 1090-1 Welded steel beam – M 346 **Tolerances on geometrical data: EN 1090-2.** **Weldability: Steel S235J0 according to EN 10025-2.** **Fracture toughness: 27 J at 0°C.** **Reaction to fire: Material classified: Class A1.** **Release of cadmium: NPD.** **Emission of radioactivity: NPD.** **Durability: Surface preparation according to EN 1090-2, preparation grade P3. Surface painted according to EN ISO 12944-5, S.1.09.** **Structural characteristics:** **Design: NPD.** **Manufacturing: According to component specification CS-034/2006, and EN 1090-2, execution class EXC2.**	*No. of European standard* *Description of product* *and* *information on regulated characteristics*

- ## CONTROLLI SULLE SALDATURE

Verificare / imporre: -la saldabilità dell'acciaio e l'idoneità del metodo di saldatura

-le certificazioni dei saldatori

Controllare: -che le saldature eseguite non presentino difetti fisici

-Imporre a capitolato i controlli sulle saldature che si sono previste in progetto, in funzione del tipo di saldatura e dell'importanza del giunto

-Il progettista impone il tipo e la percentuale dei controlli per ogni giunto ed inserisce la specifica nel capitolato speciale d'appalto

I controlli eseguibili sono:

- visivo
- coi liquidi penetranti
- magnetico (magnaflux), generalmente prescritto per i cordoni d'angolo
- radiografico
- con gli ultrasuoni

Generalmente si impone un controllo visivo su tutti i cordoni d'angolo, più una percentuale con magnaflux che può andare dal 30% al 100%, per quelli che si ritengono più importanti per la sicurezza strutturale.

Per i giunti a completa penetrazione si impone il controllo ultrasonoro (US) per la totalità del giunto.

<u>ESEMPIO</u> CONTROLLO SALDATURE PONTE STRALLATO "LA SPEZIA" (NEL CAPITOLATO):

Dove è indicato "saldatura a piena penetrazione" <u>è necessario eseguire controlli ad ultrasuoni sul 100% delle saldature</u>.

Andrà comunque effettuato un controllo minimo su:

1. –Antenna:
    a. Lamiere principali: controlli con ultrasuoni sulle saldature di tutti i giunti;
    b. Controllo con ultrasuoni sulle saldature della lamiera del tubo, nel punto di attacco dei pendini, per verificare che non presentino sfogliature
    c. magnaflux sul 30% delle saldature a cordone d'angolo
2. Attacco tirante: controlli con magnaflux sul 100% delle saldature degli attacchi sia superiori che inferiori
3. Tubo-anima: magnaflux sul 50% delle saldature;
4. Briglia inferiore: magnaflux sul 30% delle saldature;
5. Impalcato: controllo con ultrasuoni sul 100% delle saldature a piena penetrazione sulla piastra ortotropa;
6. Saldature di composizione della piastra ortotropa in cordoni d'angolo: magnaflux sul 30% delle saldature
7. Saldature di composizione del traverso di testa: magnaflux sul 50% delle saldature.

N.B. tutte le saldature eseguite in piena penetrazione per dare continuità a lamiere strutturali, per eseguire qualsivoglia elemento, andranno controllate con ultrasuoni al 100%

- ## CONTROLLI SULLE BULLONATURE

Le nuove Norme NTC 2008 e gli Eurocodici distinguono in:

- connessioni non precaricate (a Taglio)
- connessioni precaricate (ad Attrito, con bulloni solo di classe 8.8 o 10.9)

Le norme di riferimento sulla bulloneria sono le EN 14399 ((bulloni a serraggio controllato) e le EN 15048 ((bulloni non a serraggio controllato).

Le connessioni precaricate si usano:

- in presenza di sforzi che cambiano segno
- in presenza di fenomeni di fatica
- se ci sono vibrazioni
- per strutture sismo-resistenti
- se si voglio evitare scorrimenti del giunto

Praticamente sempre nei giunti principali dei ponti.

Il dimensionamento di tali giunti generalmente avviene:

- calcolo ad attrito per SLE
- calcolo a Taglio e Rifollamento per SLU

EN 14399: Bulloneria strutturale a serraggio controllato

*diametro minimo utilizzabile per bulloneria strutturale: **M12***
*sporgenza vite da faccia esterna dado: **almeno un filetto***
*filetti liberi oltre la faccia interna dado: **almeno quattro filetti completi***
*secondo **EN 1090-2:2008***
*filetto a norma **ISO 261**; **ISO 965-2**; **ISO 965-5***
*stato superficie: "**grezzo**" (trattato termicamente+brunito+legg.oleato) o "**zincato a caldo**"*

Sistema HV

EN 14399-4

EN 14399-5 e 6

- diametri da **M12** a **M36**
- /
- vite cl. **10.9**, dado cl.**10**
- testa larga
- collare sottotesta
- filetto parziale corto (lg. tratto filettato unica in base al solo diametro)
- altezza dado ~ **0,8 d**
- 2 rondelle bonificate (300÷370 HV), smussata almeno quella sotto testa
- precarico al **70%** del carico di rottura della vite

Sistema HR

EN 14399-3

EN 14399-5 e 6

- diametri da **M12** a **M36**
- vite cl.**8.8** con dado cl.**8**
- vite cl. **10.9**, dado cl.**10**
- testa larga
- collare sottotesta
- filetto parziale ISO 888 (3 lg. tratto in base a lg. vite ≤ 125, ≤ 200, >200)
- altezza dado ~ **0,9 d**
- 1 o 2 rondelle bonificate (300÷370 HV), l'eventuale seconda sotto testa vite, smussata
- precarico al **70%** del carico di rottura della vite

Sistema HRC

EN 14399-10

EN 14399-5 e 6

- diametri da **M12** a **M36**
- vite cl.**8.8** con dado cl.**8**
- vite cl. **10.9**, dado cl.**10**
- testa larga
- collare sottotesta
- filetto parziale lungo (3 lg. tratto in base a lg. vite)
- codolo a rottura calibrata
- altezza dado ~ **0,9 d**
- rondella bonificata piana o smussata
- precarico al **70%** del carico di rottura della vite

SISTEMA BULLONERIA STRUTTURALE A SERRAGGIO NON CONTROLLATO (vite, rondella e dado):

EN 15048: Bulloneria strutturale non a serraggio controllato

diametro minimo utilizzabile per bulloneria strutturale: ***M12***
sporgenza vite da faccia esterna dado: ***almeno un filetto***
filetti liberi oltre la faccia interna dado: ***almeno un filetto completo***
secondo ***EN 1090-2:2008***

Sistema SB *(structural bolting)* ***EN 15048-1-2:2007***

per applicazioni meno importanti e rischiose
bulloni ugualmente certificati da unico produttore, marcatura CE
diametri per applicazioni standard: da ***M12*** *a* ***M36***
(la norma non esclude però altri diametri)

gambo a filetto totale o parziale

norma dimensionale viti ***ISO 4014*** .... ***4018*** *(*)*

norma dimensionale dadi ***ISO 4032 - 4033*** *(*)*

classe vite: ***4.6***, ***4.8***, ***5.6***, ***5.8***, ***6.8***, ***8.8***, ***10.9***
norma materiale (acciai al ***C*** *e legati)* ***EN ISO 898-1***
resilienza min. ***27*** *J a* ***-20*** *°C per bulloni* ***AR***

classe dado: ***4***, ***5***, ***6***, ***8***, ***10***, ***12***

rondella (in genere non richiesta, ma consigliata) classe durezza:
100 *HV o* ***200*** *HV; norma* ***ISO 7091***

marcatura vite e dado:
classe resistenza + ***SB*** + ***produttore*** *dell'* ***assieme***

SISTEMA BULLONERIA STRUTTURALE A SERRAGGIO CONTROLLATO

Sistema HV: derivazione tedesca, dado più basso e meno resistente, minor duttilità e rottura per cedimento del dado. Sola classe 10.9

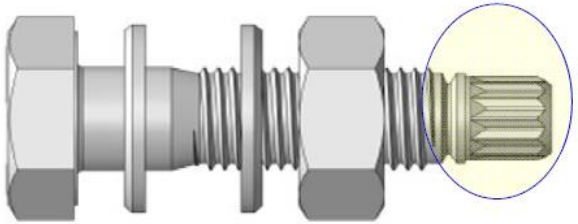
Sistema HR: derivazione anglo francese, dado più alto e resistente, maggior duttilità e rottura nella vite. Classi 8.8 e 10.9

Sistema HRC:

I bulloni sono uguali agli HR, ma con un codolo con rottura a torsione tarata.

Si usa avvitatore speciale a due bussole

È sempre più usato e permette l'esatta taratura della coppia applicata ed il controllo visivo dell'avvenuto serraggio



SERRAGGIO VITI PRECARICATE (SISTEMI HV, HR, HRC)

La norma prescrive il precarico al 70% del carico ultimo del bullone:

Table 19 — Values of $F_{p,C}$ in [kN]

Property class	Bolt diameter in mm							
	12	16	20	22	24	27	30	36
8.8	47	88	137	170	198	257	314	458
10.9	59	110	172	212	247	321	393	572

Si applica un momento di serraggio il 110% di: $M_{r,2} = k_m \, d \, F_{p,C}$

("d" diametro vite; k_m sull'imballaggio viti)

Il fattore di rendimento della coppia "k" è definito dal produttore del sistema e stampigliato sulle scatole dei bulloni

<u>Nota</u>: la coppia finale applicata: $1.1 \, M_{r,2} = 1.1 \, k_m \, d \, (0.7 \, f_{ub} \, A_s)$

Sollecita la vite molto a ridosso del limite di snervamento convenzionale:

ad es. per una vite classe 8.8. si calcola: $1.1 \; 0.7 \, (f_{yb} / 0.8) = 0.96 \, f_{yb}$

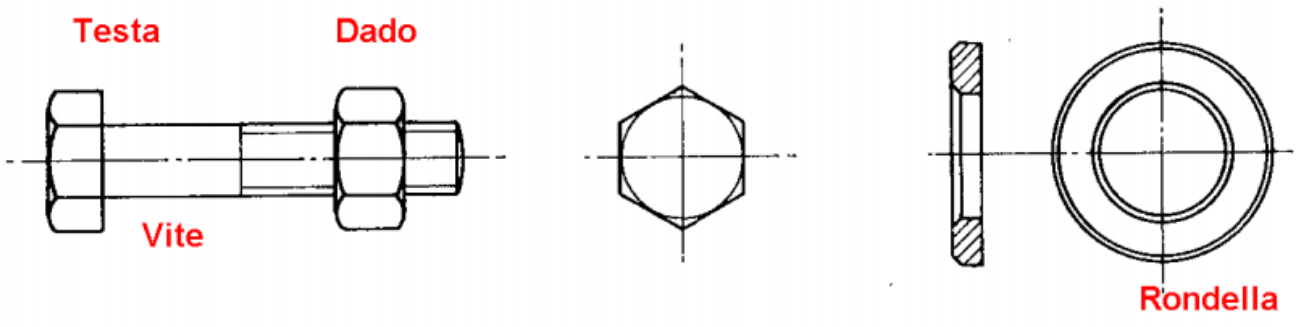
<u>Applicazione del serraggio</u>: di norma con chiave dinamometrica, con procedura in due step (es. metodo della coppia):

1- pre-serraggio col 75% della coppia $M_{r,2}$
2- serraggio finale con il 110% di $M_{r,2}$

N.B.

- Il serraggio si applica sul dado e non sulla testa della vite
- Se si applica il serraggio sulla testa della vite occorre comunicarlo al fabbricante che eseguirà test integrativi sul valore “k”

- ***SERRAGGIO VITI NON PRECARICATE (SISTEMA SB – Shear Bolt)***
- Le viti non precaricate sono da chiudere manualmente, con una chiave normale (cioè senza prolunghe), o una chiave a percussione, fermandosi all’inizio del tipico battito di “martellamento”.



- Consigliato valore di serraggio pari a circa il 50:70% della coppia prevista per i corrispondenti giunti ad attrito

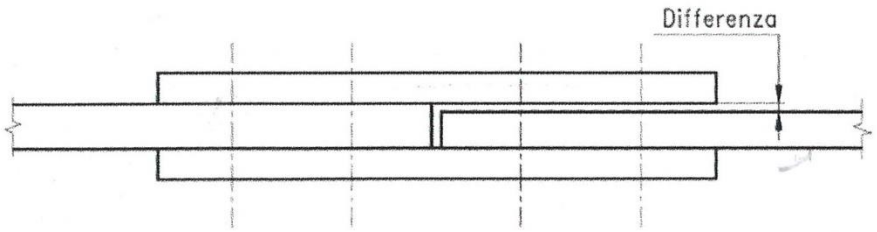
CONTROLLARE:

Giunti non precaricati:

- rondelle presenti sotto l'elemento ruotato (dado !), possono essere piane
- controllo visivo, piastre accostate, aperte non più di 4mm agli angoli e con esteso contatto nella zona centrale

Controllo distacco flange con spessimetro

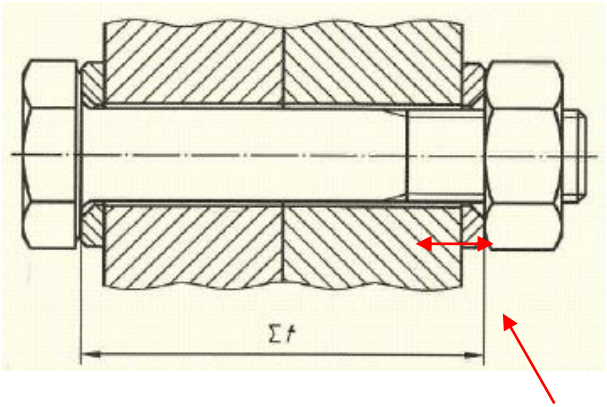
- Elementi accostati con differenza di spessore entro i 2 mm, se no aggiustare con spessori



Componenti giunto bullonato con differenze di spessore

Giunti precaricati:

- Controllo dello stato e condizioni di attrito delle superfici da accoppiare (no verniciatura, solo primer), vedi allegato G tab. 18 EN 1090-2
- Rondelle presenti sotto l'elemento ruotato (dado).
- Rondelle smussate anche sotto la testa della vite (sempre consigliate, obbligatorie in classe 10.9), smusso lato vite per non incidere il raccordo:



- Massimo 4 spire complete tra superficie di contatto dado e parte non filettata del gambo (1 spira per unioni non precaricate)
- Sporgenza vite da faccia esterna dado: almeno un filetto (anche per sistema SB)
- Piastre accostate, aperte non più di 2mm agli angoli e con esteso contatto nella zona centrale
- Elementi accostati con differenza di spessore entro i 1 mm

CONTROLLO SERRAGGIO – GIUNTI PRECARICATI SISTEMI HV E HR:

- 1° step: controllo visivo del contatto tra le piastre
- 2° step: controllo coppia serraggio nelle percentuali di tabella seguente, in funzione della classe di esecuzione strutturale:

estensione minima dei controlli sui giunti con bulloni precaricati					
classe di esecuzione strutturale	tipo di curva sequenziale	metodo della coppia		metodo combinato	
		1^ step	2^ step	1^ step	2^ step
EXC 2	**A**	non previsto controllo	5%	/	5%
EXC 3	**A**		10%	5%	10%
EXC 4	**B**		10%	5%	10%

procedure controlli dei giunti bullonati precaricati			
controllo	*metodo della coppia*	*metodo combinato*	*misurecorrettive*
iniziale	verifica contatto piastre accoppiate		aggiustamento
dopo 1^ step	controllo non previsto	$M_{contr} = 0,75\ M_{r,2}$	
		α > 15° → sotto-serraggio	ripetere tutti i serraggi
		controllo visivo di contrassegni e riferimenti	ripristino
dopo 2^ step	$M_{contr} = 1,05\ M_{r,2}$ dopo 12÷72 ore	controllo visivo di contrassegni e riferimenti	ripristino
		α > 15° in meno → sotto-serraggio	ripetere tutti i serraggi
		α > 30° in più → sovra-serraggio	ripetere tutti i serraggi
	α > 15° in meno → sotto-serraggio		ripetere tutti i serraggi

Tabella EN 1090-2: controllo giunti precaricati

CONTROLLO SERRAGGIO – GIUNTI PRECARICATI SISTEMI HRC:

- Per questi assiemi è possibile solo il controllo visivo, verificando il corretto distacco del codolo su ogni bullone del giunto:

- ## PROTEZIONE DALLA CORROSIONE

Acciaio: normale e auto passivante (corten) esempio: S355 J0 W

Il materiale base presenta ruggine e scaglie di laminazione (calamina): → preparazione

PREPARAZIONE:

-meccanica (spazzolatura, raschiatura, molatura)

-Sfiammatura

-Decapaggio (acido cloridrico)

-Sabbiatura (grado Sa2-commerciale; grado Sa2½ -metallo quasi bianco)

PROTEZIONE*:*

-zincatura (per immersione-a caldo; a spruzzo-metallizzazione a freddo). È una barriera meccanica + chimica poiché lo zinco è + elettronegativo.

-pitturazione:

primer (fondo): aderente e anticorrosivo

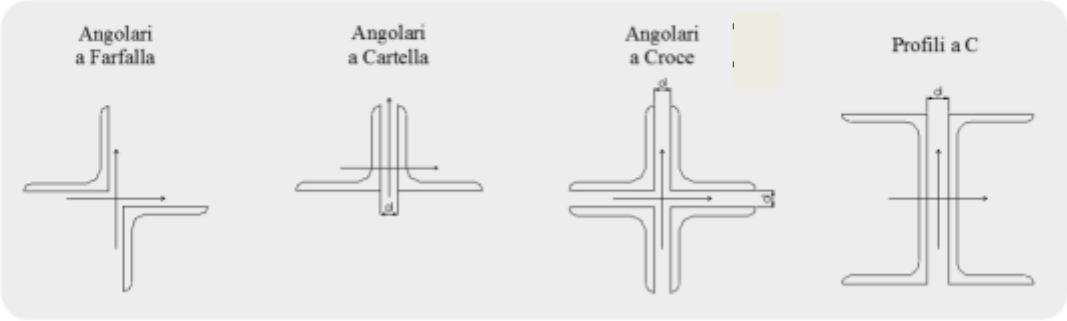
intermedio: pigmentato, dà spessore, barriera

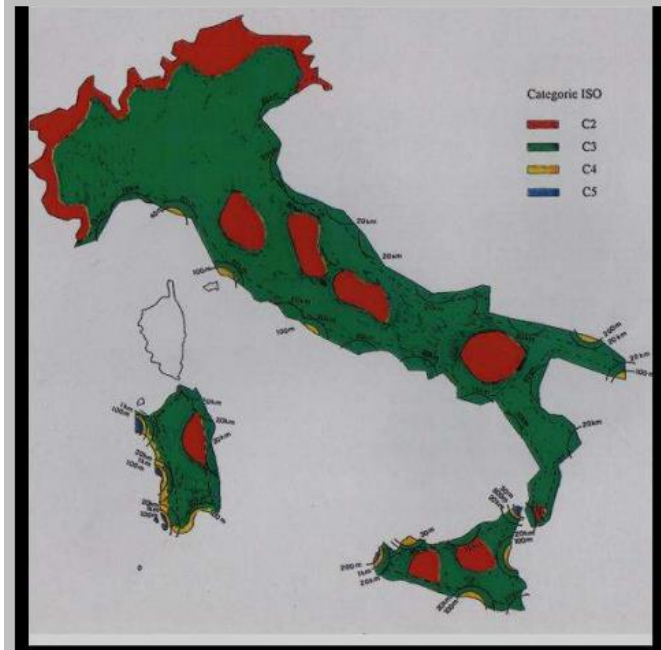
finitura: isolamento ed estetica

NOTA: Superfici interne: problemi di condensa → perfettamente stagne oppure verniciarle ed aerarle oppure deumidificarle.

Il progettista dovrà:

- identificare eventuali condizioni di corrosione particolari e valutare la possibilità di impiego di acciaio autopatinabile .
- individuare e classificare, nel caso di protezione mediante verniciatura, la corrosività dell'ambiente in cui la struttura sarà ubicata: C3 o C4 (o superiore).
- indicare, nel caso di protezione mediante verniciatura ,una classe di durabilità alta (H > 15 anni).
- indicare, nel caso di protezione mediante verniciatura, l'effetto cromatico (RAL, brillantezza.).
- progettare la struttura assicurando che siano evitate le trappole di corrosione e che sia prevista una adeguata accessibilità per gli interventi di protezione dalla corrosione, tenendo conto del ciclo protettivo eventualmente scelto e dei successivi interventi di manutenzione.





Esempio analisi della corrosività atmosferica in Italia per un acciaio al carbonio in funzione dei fattori climatici e di inquinamento

Mappe

Classi di aggressività e velocità di corrosione prevista nel primo anno

Categorie		Velocitá di corrosione			
		Acciaio (μm/anno)	Zinco (μm/anno)	Rame (μm/anno)	Alluminio g/(m²anno)
C1	Molto bassa	<1,3	<0,1	<0,1	Trascurabile
C2	Bassa	1,3-25	0,1-0,7	0,1-0,6	<0,6
C3	Media	25-50	0,7-2,1	0,6-1,3	0,6-2
C4	Alta	50-80	2,1-4,2	1,3-2,8	2-5
C5	Molto alta	80-200	4,2-8,4	2,8-5,6	5-10

Classificazione degli ambienti

Classe di corrosività	Tipici ambienti esterni	Tipici ambienti interni
C1 Molto bassa	-	Edifici riscaldati con atmosfera pulita per esempio uffici, scuole, negozi, alberghi.
C2 Bassa	Ambienti con basso livello di inquinamento, principalmente aree rurali.	Edifici non riscaldati dove può crearsi condensa per esempio depositi, locali sportivi.
C3 Media	Ambienti urbani e industriali, modesto inquinamento da anidride solforosa. Zone costiere con bassa salinità.	Locali di produzione con alta umidità ed un relativo livello di inquinamento; per esempio industrie alimentari, lavanderie, birrerie, caseifici.
C4 Alta	Aree industriali e zone costiere con moderata salinità.	Impianti chimici, piscine, cantieri costieri per imbarcazioni.
C5-I Molto alta (industriale)	Aree industriali con alta umidità e atmosfera aggressiva.	Edifici o aree con condensa quasi permanente e con alto inquinamento.
C5-M Molto alta (marina)	Zone costiere e offshore con alta salinità.	Edifici o aree con condensa quasi permanente e con alto inquinamento.

Esempio ponte Molassana - Genova:

ciclo di verniciatura:

ciclo C4 > 15 anni

steel preparation min livello 1

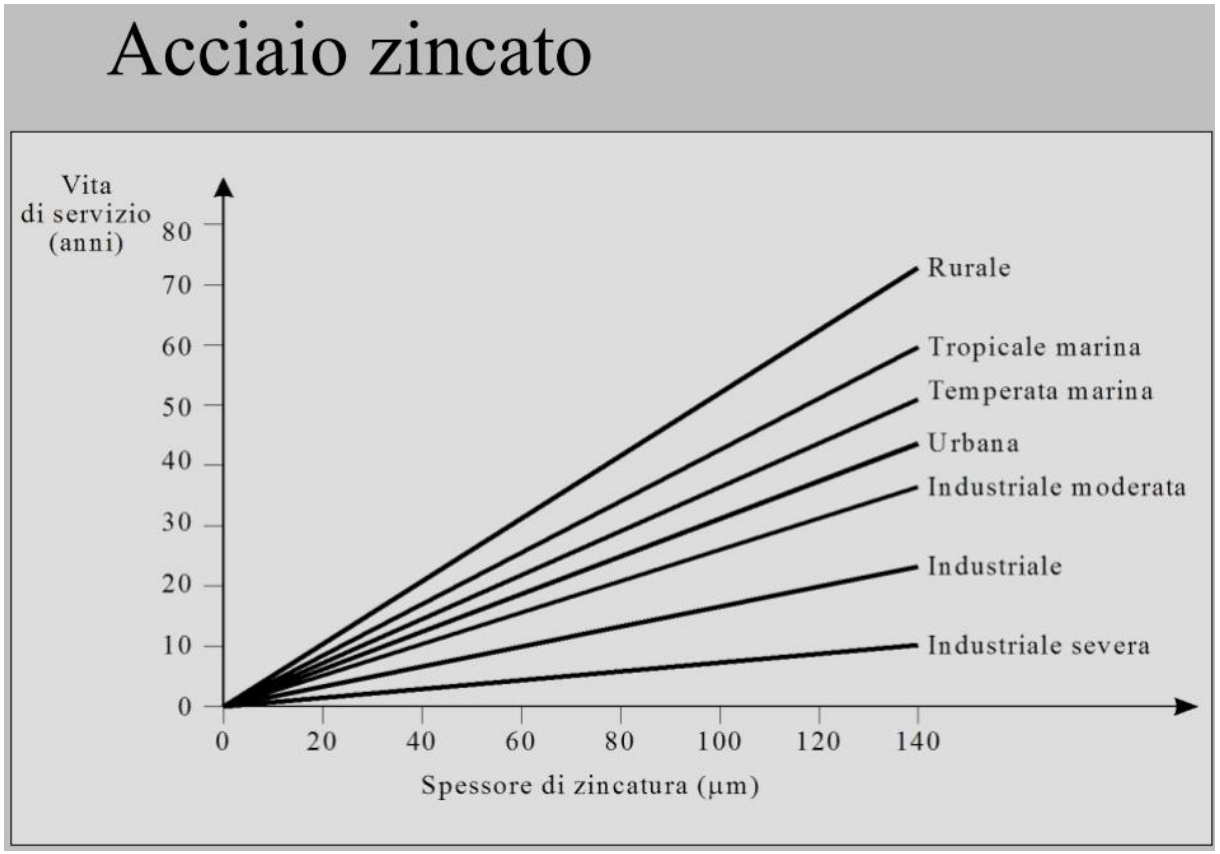
sabbiatura Sa 2 ½, rugosità 50-75 μm

primer epossidico ai fosfati di zinco 160 μm

finitura acrilico poliuretanica 80 μm

PROTEZIONE DALLA CORROSIONE – ACCIAIO ZINCATO A CALDO

Anche nel caso di zincatura a caldo si deve imporre uno spessore di zincatura funzione della vita prevista e della corrosività dell'ambiente:



Preparazione superficiale

Scopo: Pulizia della superficie e ottenimento della rugosità necessaria per assicurare l'adesione del rivestimento

Metodo di preparazione	Standard di riferimento ISO12944 (ISO 8503)	Specifiche SSPC	Standard fotografico ISO 8501
Sgrassaggio	--	SP1	--
Pulizia con attrezzi manuali	St 2	SP2	B St 2, C St 2, D St 2
Pulizia con attrezzi meccanici	St 3	SP3	B St 3, C St 3, D St 3
Decapaggio (acido)	Be	SP8	--
Sabbiatura di spazzolatura	Sa 1	SP7	B Sa 1, C Sa 1, D Sa 1
Sabbiatura commerciale	Sa 2	SP6	B Sa 2, C Sa 2, D Sa 2
Sabbiatura a metallo quasi bianco	Sa 2½	SP10	A Sa 2½, B Sa 2½, C Sa 2½, D Sa 2½
Sabbiatura a metallo bianco	Sa 3	SP5	A Sa 3, B Sa 3, C Sa 3, D Sa 3
Pulitura alla fiamma	Fl	--	A Fl, B Fl, C Fl, D Fl

SSPC: Steel Structures Painting Council

Requisiti minimi di preparazione superficiale

Pitture alchidiche, oleofenoliche, bitumi	SSPC-SP6	Sabbiatura commerciale
Pitture epossidiche, uretaniche, allo zinco organico	SSPC-SP10 o 6	Sabbiatura a metallo quasi bianco o commerciale
Pitture allo zinco inorganico	SSPC-SP5 o 10	Sabbiatura a metallo bianco o quasi bianco
Pitture all'olio di lino	SSPC-SP2 o 3	Preparazione meccanica o manuale

Esempi di cicli di pitturazione ad alta durabilità per atmosfere umide in aree industriali e marine

(UNI EN ISO 12944: 2000; preparazione grado SA2½)

Fondo				Intermedio e finitura		
legante	**tipo**	**strati**	**spessore**	**legante**	**strati**	**spessore**
epossidico, poliuretano	Zn	1	40	epossidico, poliuretano[1]	3-4	280
	Misc	1	80		3	200
silicato di etile	Zn	1	80		3	200
		1	80		2-4	240
epossidico, poliuretano	Misc	1-2	80		3-4	240
		1	250		1	250
	Zn	1	40	vinil-catrame	3	360
		1	40	catrame epossidico	3	360

[1]*Finitura poliuretano alifatico se occorre ritenzione del colore e brillantezza (esterni)*

Cicli di manutenzione da seguire per garantire la durata della struttura:

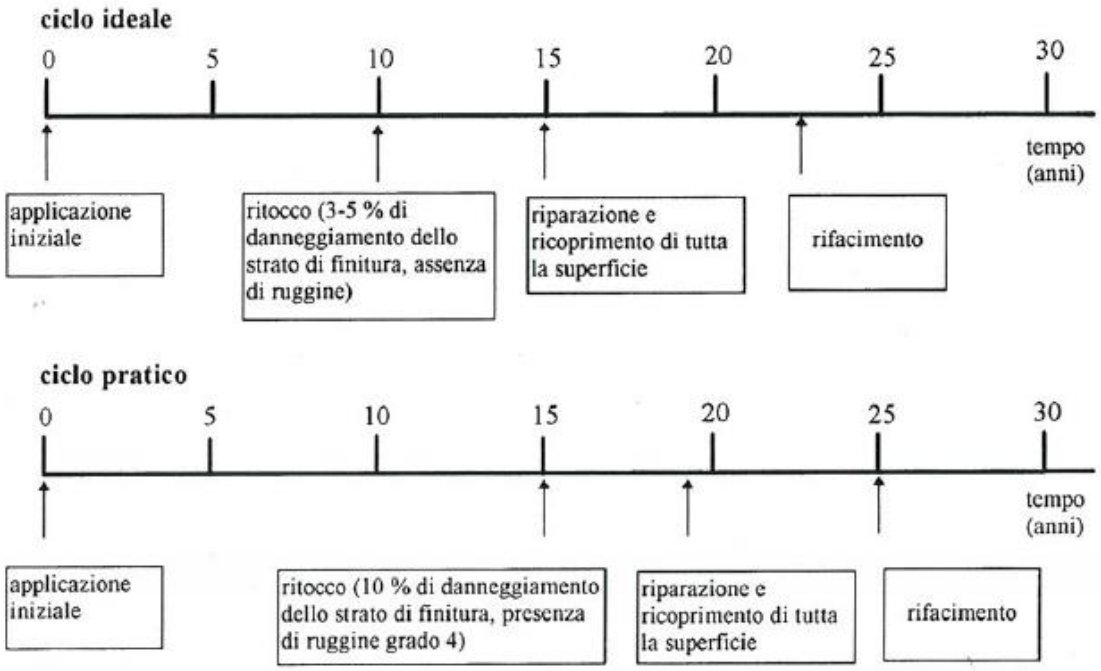


Figura 16. Cicli di manutenzione per strutture rivestite (da Brevoort e Roebuck).

- **Esempio: MATERIALI E INDICAZIONI PROGETTUALI –PONTE MOLASSANA (GE)**

Note sui Materiali:
ACCIAIO CARPENTERIA CONFORME UNI EN 10025,
DM 14/01/2008
Materiali muniti di Certificazione CE
Qualità Acciaio Tubolari: **S355J2**
Qualità Acciaio Piatti e Piastrame: spess≤40mm **S355J2W**
spess>40mm **S355K2W**

Note sulle Bullonature:
CONFORMI D.M. 14/01/2008
CONFORMI A UNI EN 14399-1
per giunzioni a serraggio controllato - cl.10.9 (travi princ. e traversi)
CONFORMI A UNI EN 15048-1
per giunzioni non a serraggio controllato - cl 10.9 (controventi)

Note sulle Saldature:
CONFORMI D.M. 14/01/2008

Classificazione:
EXC3 - EN 1090-2

Note sulle Tolleranze di Montaggio:
SECONDO EN 1090-2

Note sui Trattamenti Superficiali:
Antenna, cavalletto e cassone verniciati (colore bianco)
Stralli guaina RAL9016
Mensola marciapiede zincata a caldo

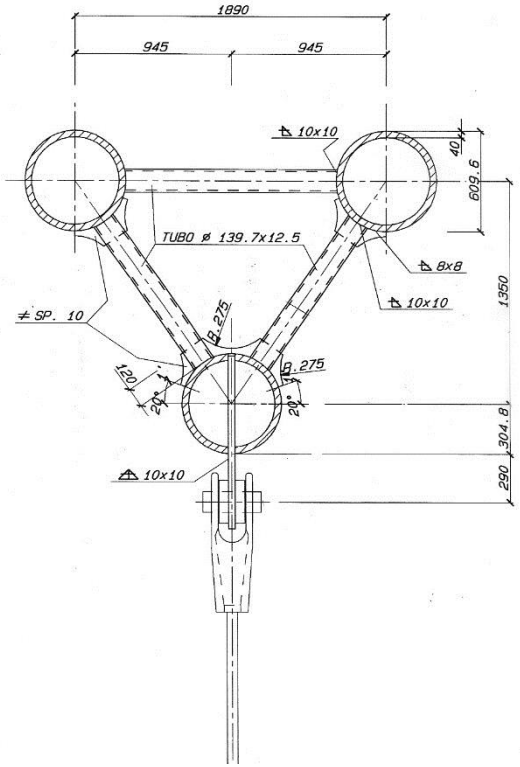
Ciclo di verniciatura:
ciclo c4 > 15 anni
steel preparation min lvello 1
sabbiatura sa 2 1/2, rugosita' 50-75 um
primer epossidico ai fosfati di zinco 160 um
finitura acrilico poliuretanica 80 um

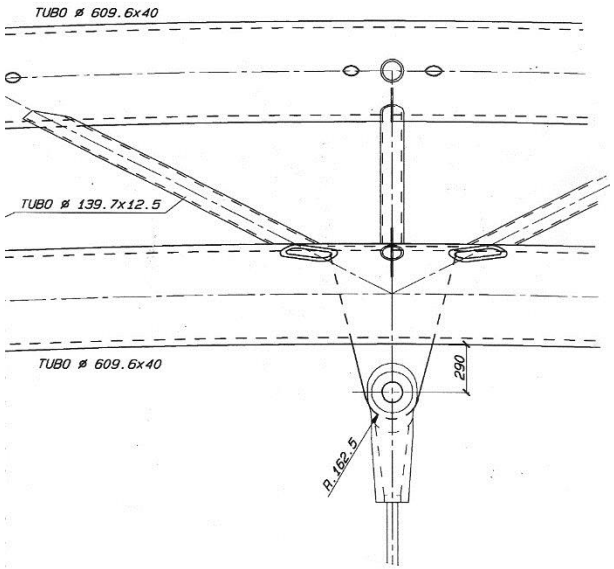
❖ ISPEZIONE PONTI

Sono molto delicate e per essere efficaci devono:

- Effettuate da ingegneri strutturisti esperti di ponti
- Conoscenza della struttura e dei dettagli del ponte da controllare.

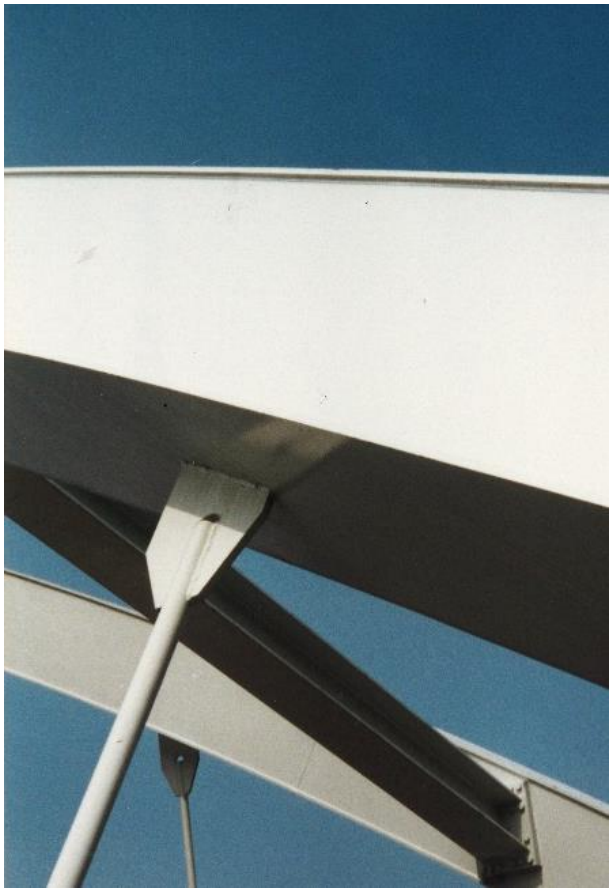
Notevole differenza tra questo attacco: (forma a cuneo passante e semplici cordoni d'angolo)



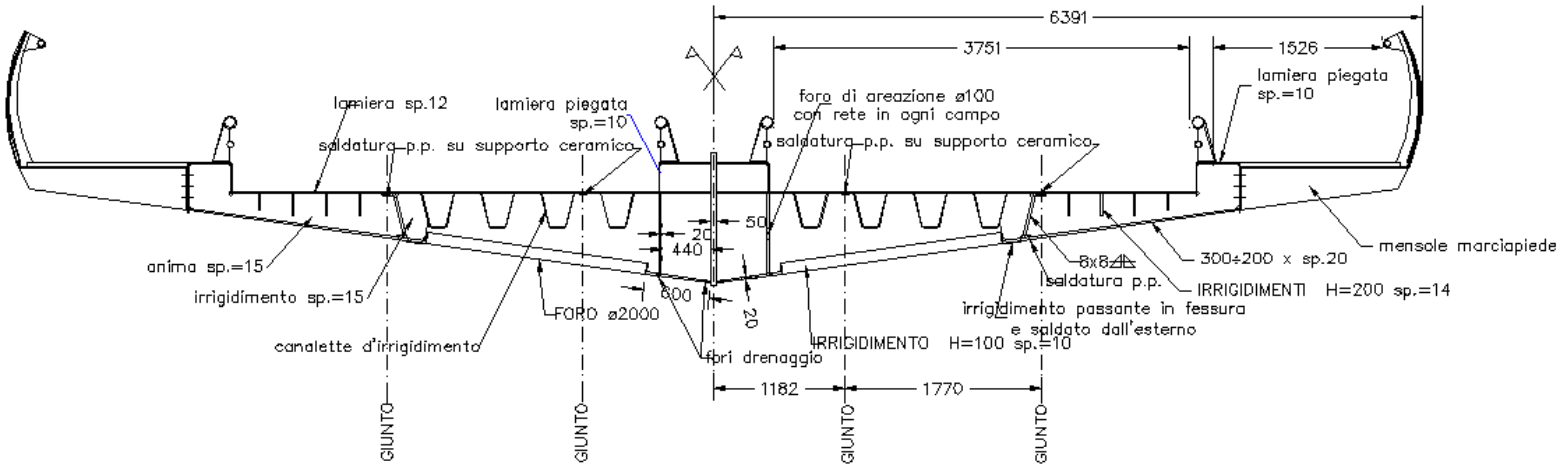


Questo secondo attacco richiede molte più attenzioni e la conoscenza perfetta del giunto saldato e degli eventuali irrigidimenti interni:

- Problemi di fatica nella saldatura (cordoni? piena penetrazione?)
- Rischio strappi lamellari nelle lamiere dell'arco



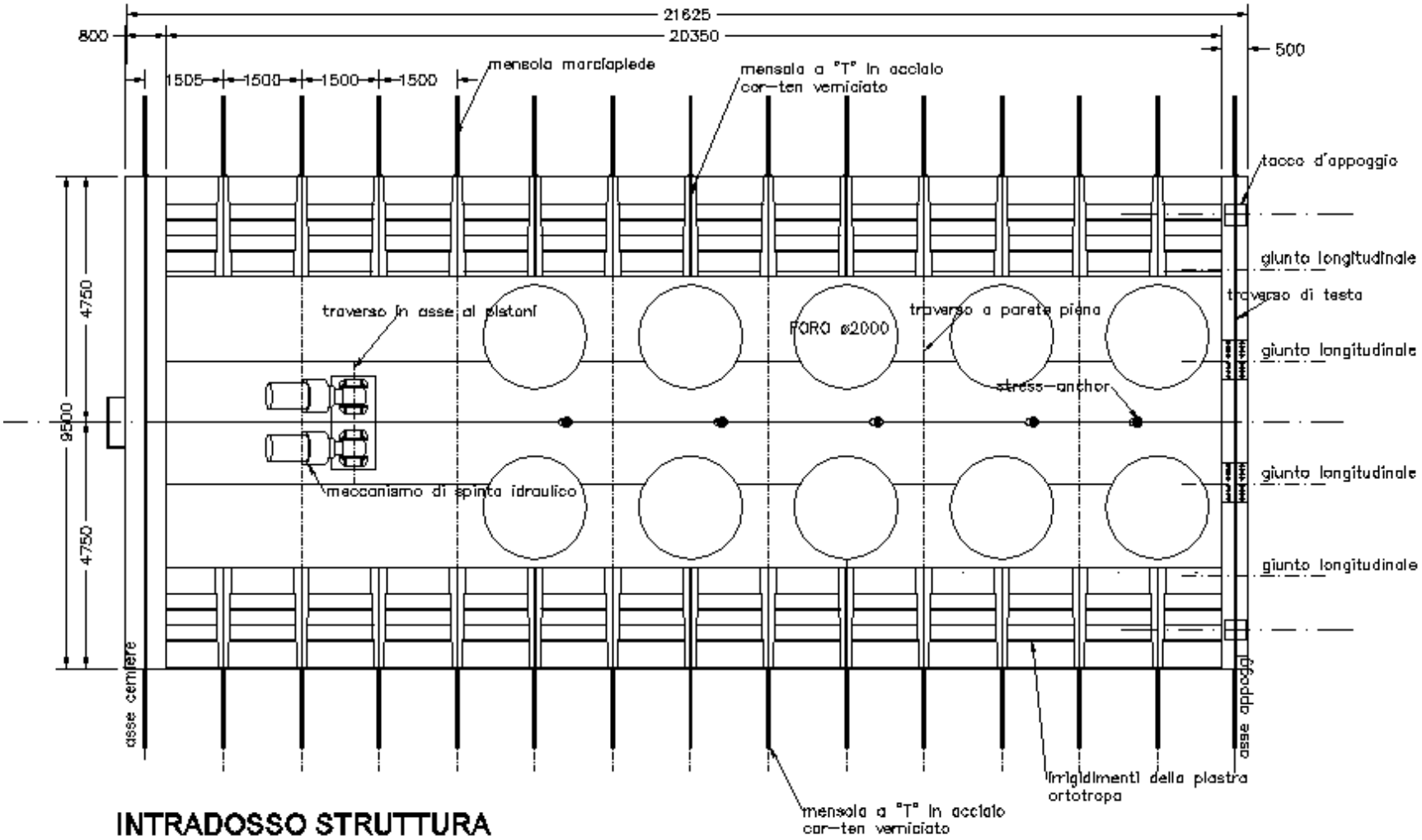
❖ Esempio: CONTROLLI COSTRUTTIVI IN UN PONTE STRALLATO LEVATOIO A LA SPEZIA - 2006



Sezione trasversale dell'impalcato

Vista intradosso

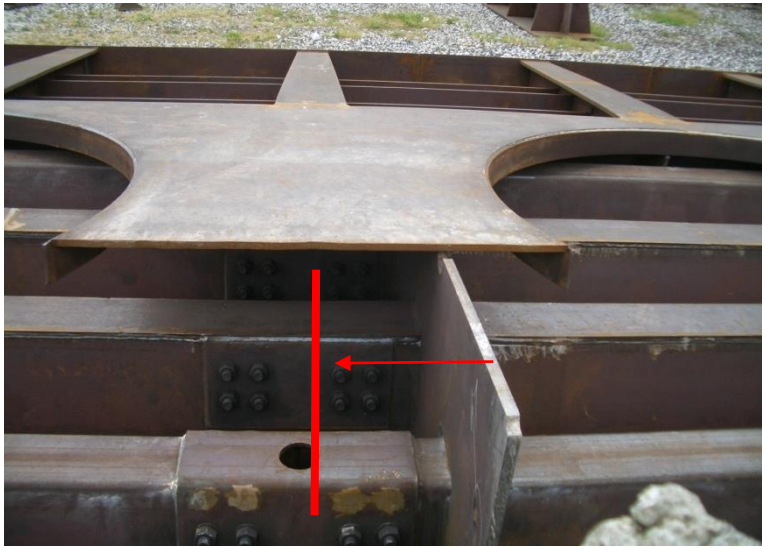
Vista intradosso ad impalcato sollevato



INTRADOSSO STRUTTURA

CONTROLLI - PROBLEMI COSTRUTTIVI:

- Errata posizione giunti costruttivi e conseguente disallineamento irrigidimenti-traversi:



- Errori di tracciatura e disallineamenti:

CONTROLLI - PROBLEMI COSTRUTTIVI:

- Errata formatura canalette, con cricche e riparazione non adeguata:

- Mancanza di irrigidimenti in corrispondenza mensole:

- ## PIASTRE ORTOTROPE

Sono strutture di sostegno del piano viabile che si adottano quando si hanno esigenze di limitato peso proprio.

Sono composte da una lamiera superiore irrigidita da canalette all'intradosso.

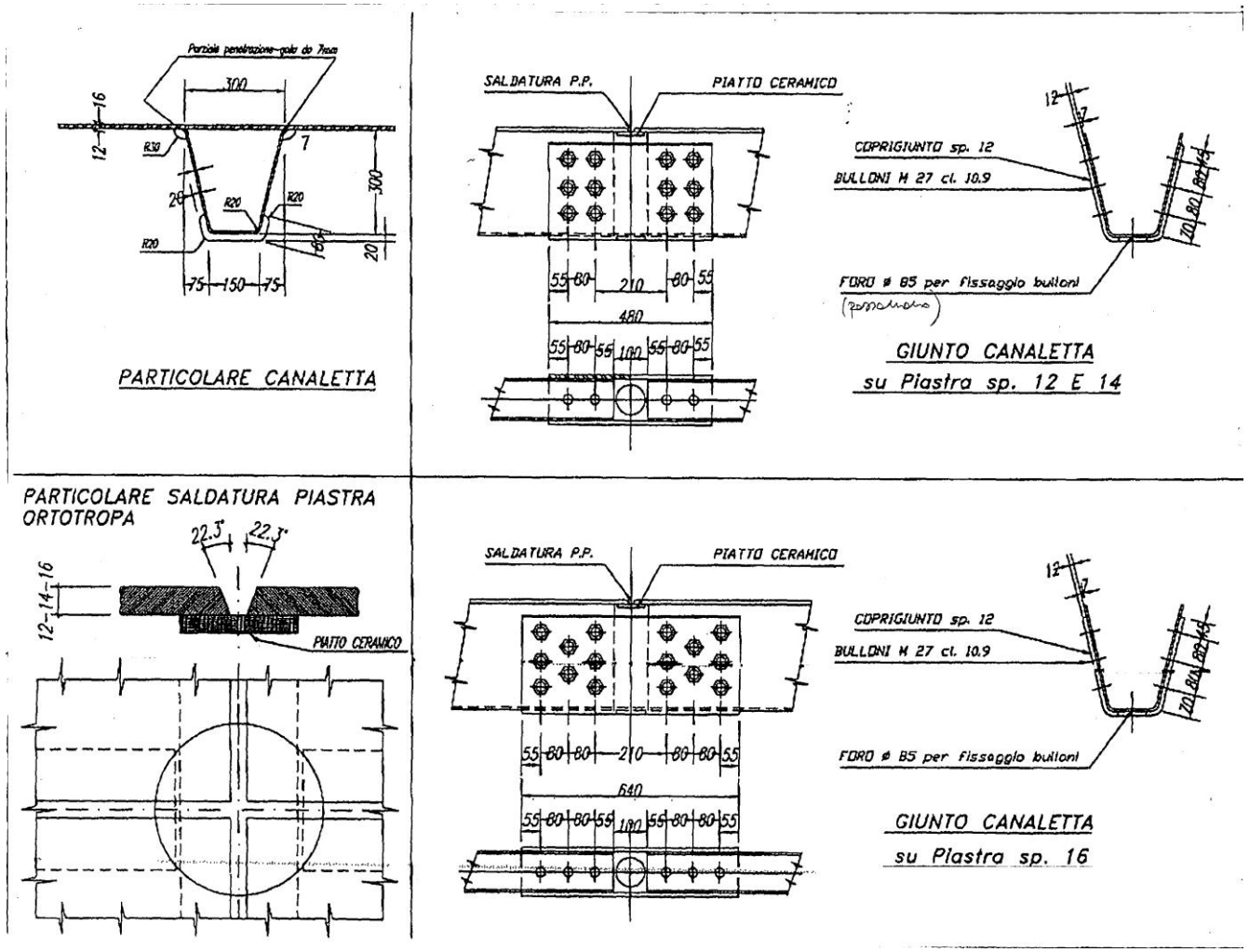
Le saldature della lamiera superiore sono continue, a piena penetrazione, eseguite su piatto di sostegno.

Tale piatto può essere metallico (dà problemi in fase di controllo con ultrasuoni della saldatura, perché riflette le onde e non si comprende la bontà del cordone) o meglio ceramico (il più usato e tecnologico).

In questo modo si esegue la saldatura interamente dall'alto, i due lembi sono preparati a "V" e tenuti a distanza di 6:8 mm.

E' un componente sensibile a fatica, per questo sono fondamentali i dettagli realizzativi ed i controlli.

Nel seguito si riportano i particolari salienti di una piastra ortotropa, fondamentali per la resistenza a fatica:



Dettagli progettuali piastre ortotrope

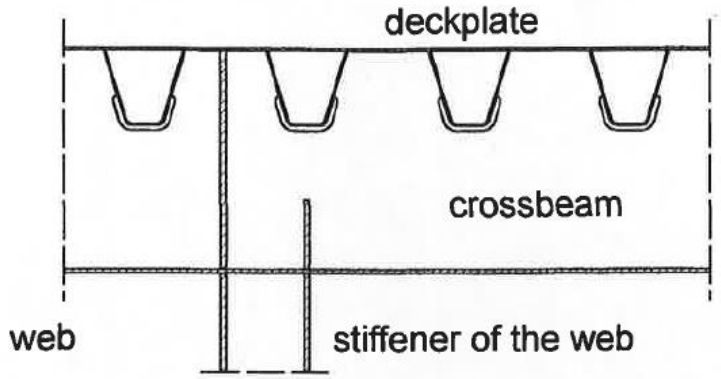


Figure G.11: Connection of cross beam to vertical stiffener of the web

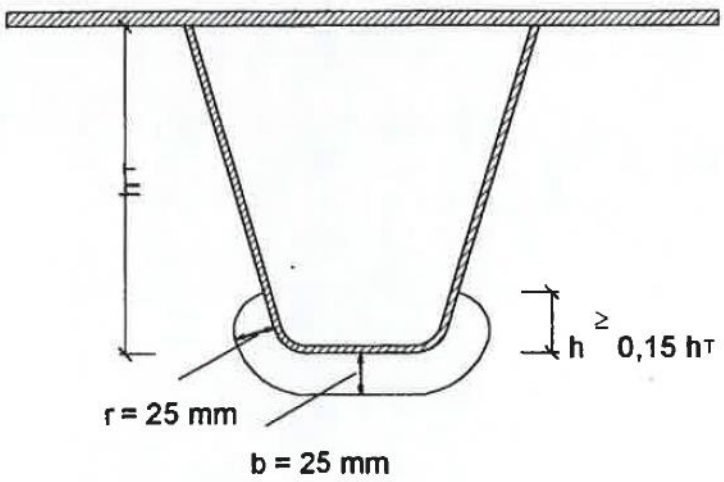


Figure G.7: Cope holes at stiffener - cross beam connection

Spessore lamiera superiore: t ≥ 12 mm per asfalti ≥ 70 mm (impiego corrente)

t ≥ 14 mm per asfalti < 70 mm e ≥ 40 mm

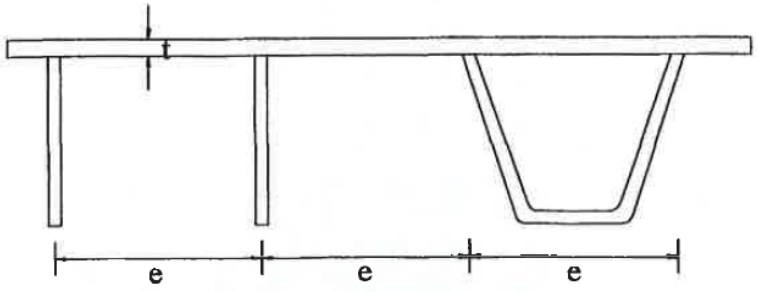


Figure G.1: Spacing of stiffeners of deckplates

Interasse irrigidimenti: e ≤ 300 mm con e/t ≤ 25

Vista giunto bullonato su piastra ortotropa

❖ DIFETTI RICORRENTI NEI PONTI IN ACCIAIO

Cause di crollo nei ponti:

- Scalzamento al piede di spalle e pile, dovuto agli effetti delle piene ed al loro trasporto solido
- Spinte orizzontali dovute all'accumulo di detriti sulle pile dei ponti in fase di piena

Responsabili del 50% dei crolli strutturali.

Altri motivi di crollo o danno nei ponti:

- Insufficiente prestazione dei materiali utilizzati, intendendo insufficiente resistenza o duttilità o fragilità …
- Mancanza di controllo durante l'esercizio del ponte
- Mancanza di manutenzione durante l'esercizio del ponte

Progetto ponte:

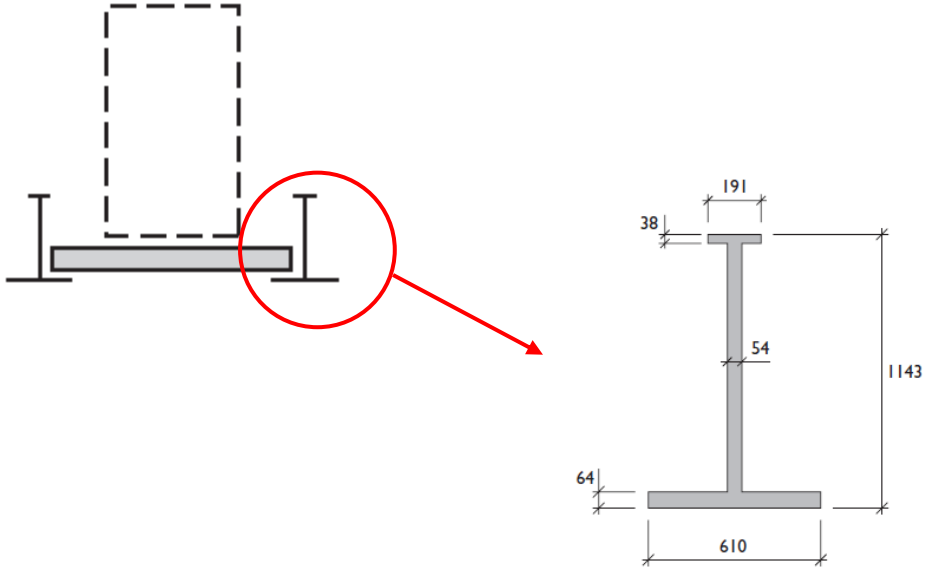
- Adeguata capacità portante della struttura
- Carichi assegnati dalle Norme
- Resistenza dei materiali e coefficienti di sicurezza definiti dalle Norme
- Schematizzazioni di calcolo corrette

Nonostante il rischio di errori di calcolo, raramente tale problema è la causa del collasso di un ponte, poiché piccoli errori sono “coperti” dai coefficienti di sicurezza imposti dalle norme, sia nei confronti dei carichi viaggianti, sia nei confronti della resistenza dei materiali.

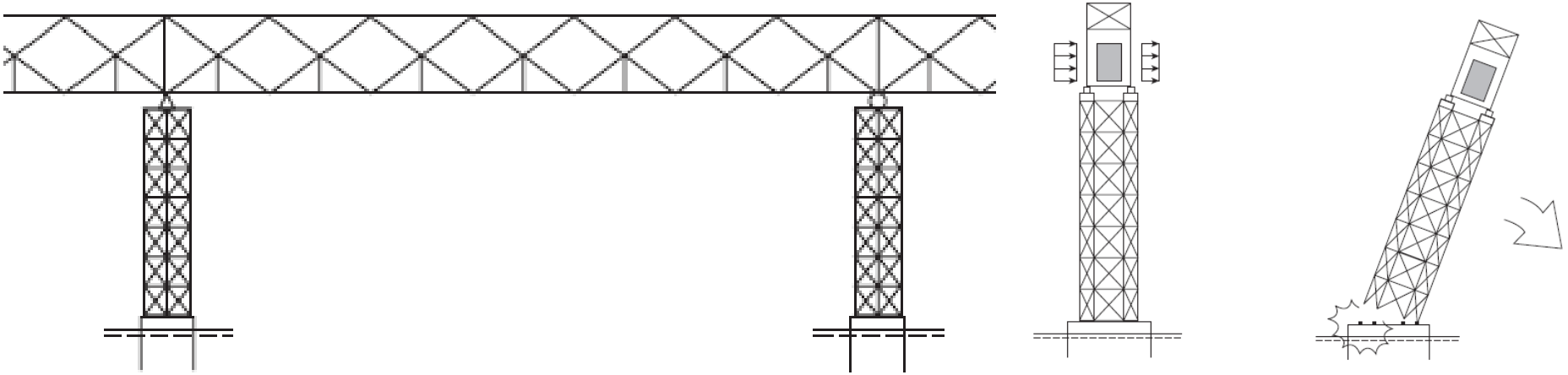
Inoltre le schematizzazioni strutturali sono sempre a favore di sicurezza, poiché non si tiene conto di tutte le iperstaticità presenti in un sistema, che conserva riserve di resistenza ben superiori alle usuali schematizzazioni di calcolo.

Grandi crolli storici nei ponti dovuti all'eccesso di sicurezza dei progettisti che sviluppano uno schema strutturale eccessivamente oltre le conoscenze dei fenomeni ed eccessivamente oltre i limiti del tempo.

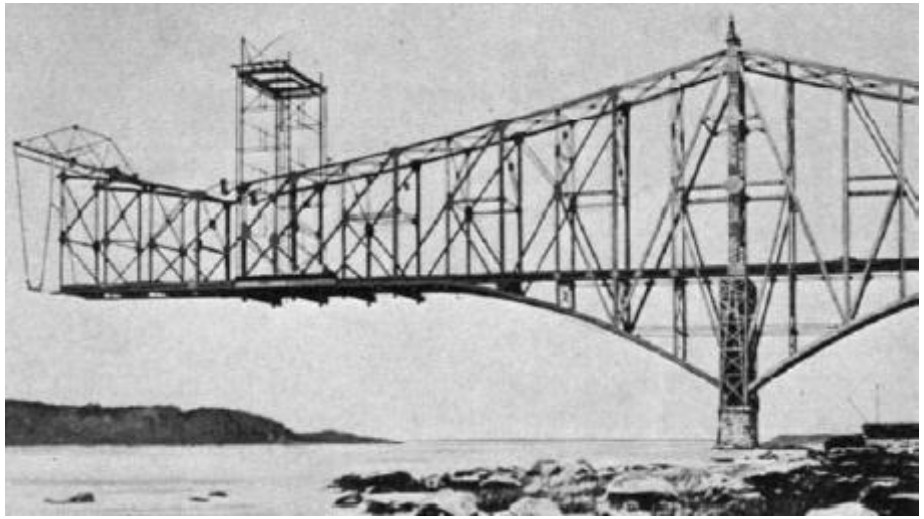
- Crollo del Dee Bridge (1847) – ponte a traliccio: si compresero i fenomeno dell'instabilità torsionale:



- <u>Crollo del Tay Bridge (1879) – ponte a travata:</u> si comprese l'importanza dei fenomeni legati all'instabilità al vento

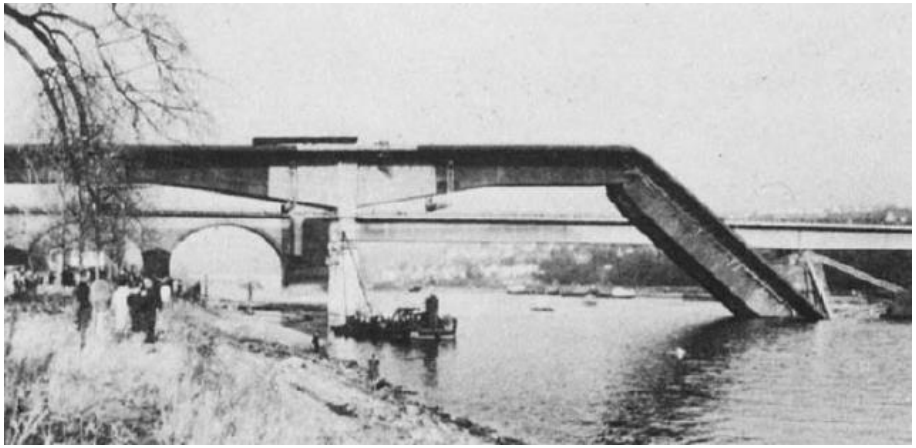


- Crollo del Quebec Bridge (1907) – ponte a sbalzo: si comprese la necessità di una stima accurata dei pesi propri e dei carichi agenti ed una valutazione approfondita della capacità portante degli elementi compressi (instabilità a compressione):



- Crollo del Tacoma Narrows bridge (1940) – ponte sospeso: nasce l'ingegneria del vento. Il crollo fu dovuto all'eccesso di snellezza dell'impalcato ed alla mancanza di rigidezza torsionale. Instabilità aerodinamica: il fenomeno di distacco alternato dei vortici si è accoppiato alle oscillazioni torsionali, mandando in risonanza il ponte fino al crollo:

- Crollo dei ponti a cassone tra il 1969 ed il 1971: si compresero i fenomeni di instabilità delle lamiere irrigidite:

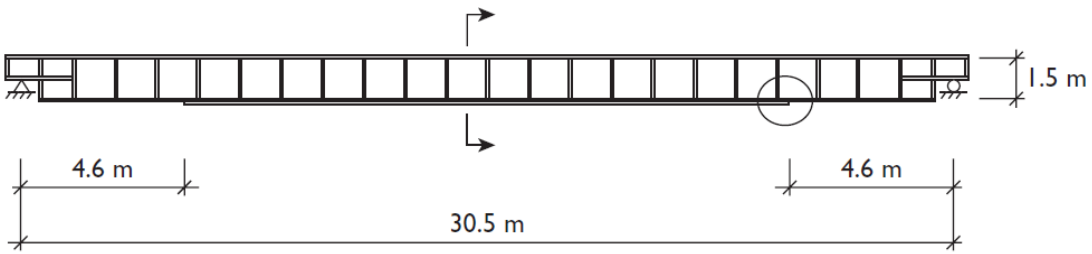


E' importante conoscere gli errori del passato per apprenderne gli insegnamenti.

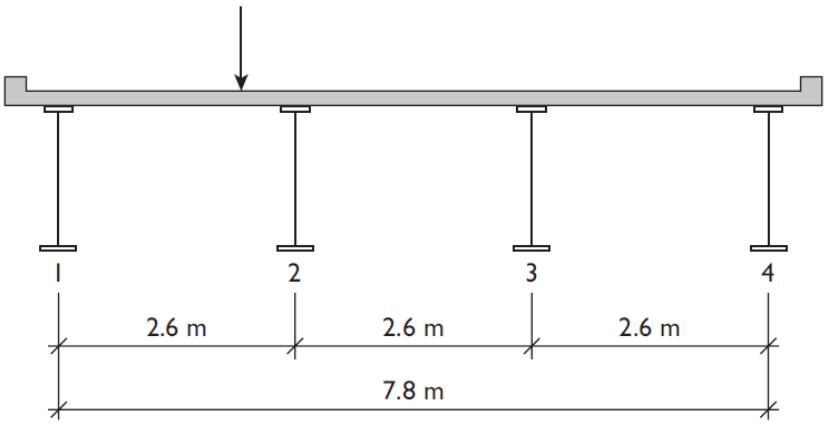
Nel seguito una rapida carrellata di "case histories" di criticità specifiche dei ponti in acciaio.

• CROLLO DEL KINGS BRIDGE – MELBOURNE AUSTRALIA - 1962

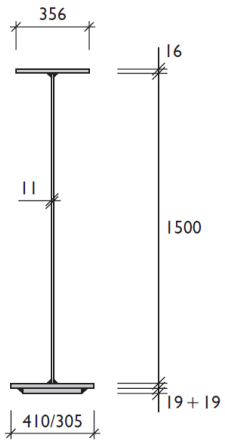
Si tratta di un ponte multi campate isostatiche in struttura mista, di luce pari a 30.5 m, costruito nel 1957 e crollato nel 1962:



sezione longitudinale campata tipo



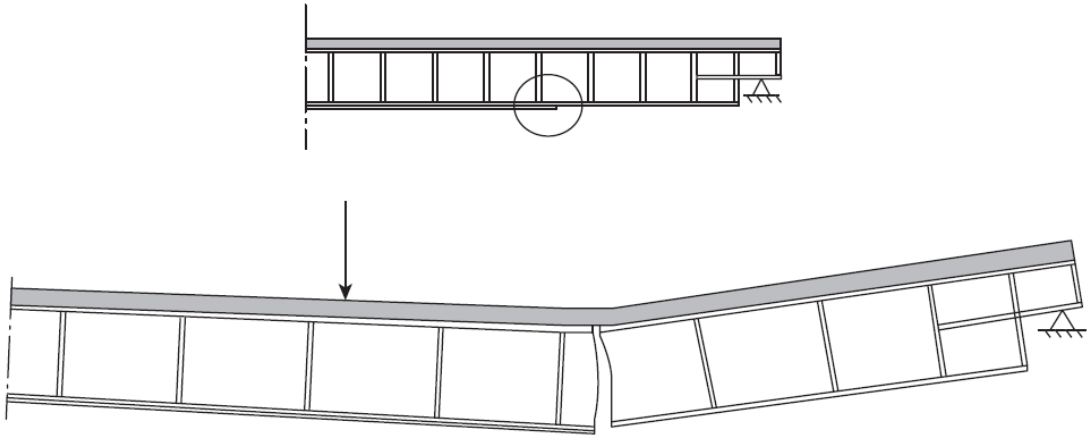
sezione trasversale



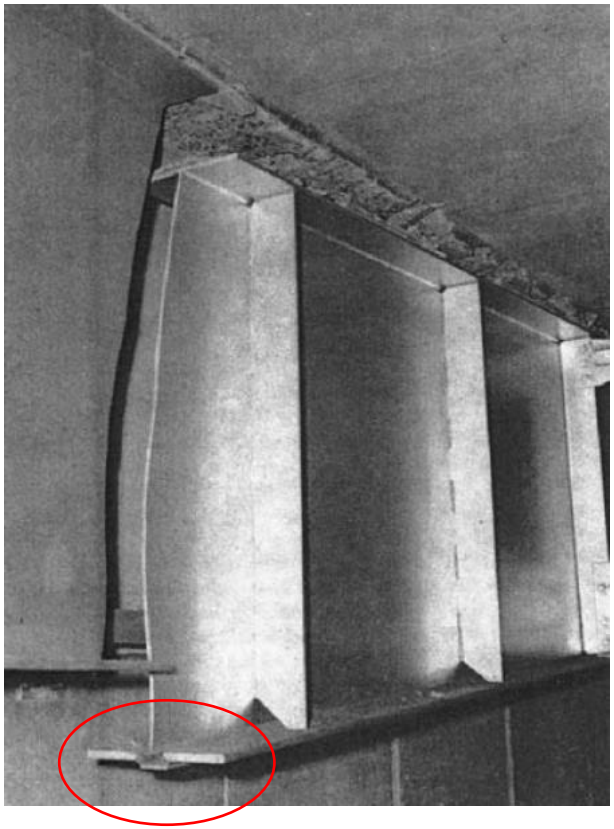
dettaglio trave con raddoppio della piattabanda inferiore

A causa di condizioni geologiche difficili, si decise di usare acciaio ad alta resistenza per ridurre i pesi propri strutturali.

Il ponte crollò una fredda mattina, al transito di un mezzo pesante di 45 tonnellate, con una rottura fragile in prossimità dell'estremo dei piatti di rinforzo della piattabanda inferiore:



localizzazione della rottura della trave, in corrispondenza della rastremazione del raddoppio piattabanda

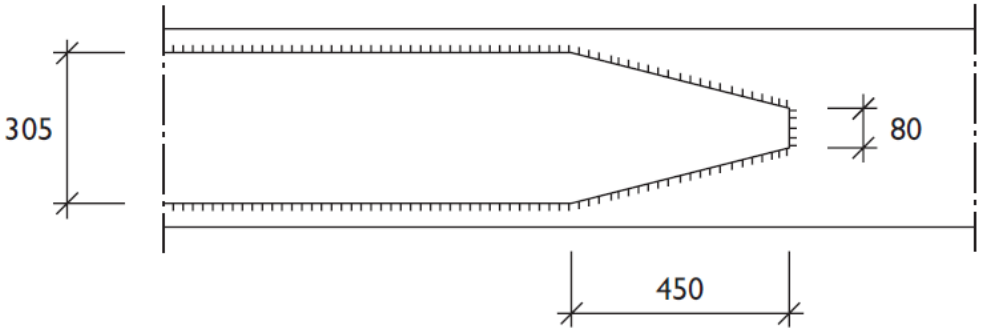


Vista della trave completamente fratturata in corrispondenza del rinforzo inferiore

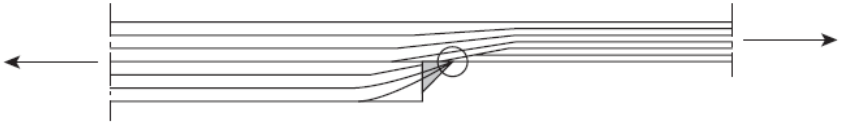
Il raddoppio di piattabanda era, nelle intenzioni dei progettisti:

- incrementare il momento resistente ultimo in campata
- tenere basso il peso strutturale e diminuire le tensioni nella piattabanda inferiore, migliorando il comportamento a fatica
- ridurre la temperatura di pre-riscaldo per la saldatura piattabanda-anima, necessaria se si sceglieva un piatto inferiore spesso 38 mm

Il piatto era rastremato per non avere un cambio di rigidezza improvviso e minimizzare la concentrazione di sforzi:



vista intradosso piattabanda inferiore: dettaglio rastremazione e saldatura piatto di raddoppio



concentrazione delle tensioni

Problemi riscontrati:

- acciaio ad alta resistenza, con alto contenuto di carbonio e manganese
- acciaio con Carbonio Equivalente alto, valore pari a 0.61: attualmente acciaio con $C_{equival} > 0.6$ sono considerati non saldabili
- acciaio con bassa resilienza: valore riscontrato di 3 J a 0°C, ben al di sotto del valore attualmente prescritto di 27 J (quindi fragilità alle basse temperature)
- cricche nella saldatura di estremità del piatto di raddoppio, dovute ad insufficiente pre-riscaldamento dei pezzi
- saldatura d'estremità fatta con elettrodo a mano, irregolare, che ha causato incremento delle tensioni
- cricche a freddo nel cordone di saldatura, già presenti nelle travi prodotte in officina, dovute ad elettrodi umidi (tale presenza è stata riscontrata a posteriori in tutte le travi – erano sotto la vernice !)

Lezione: L'effettuazione di validi controlli sulle saldature ed opportune ispezioni in esercizio, avrebbero permesso di scoprire il difetto ed evitare il crollo.

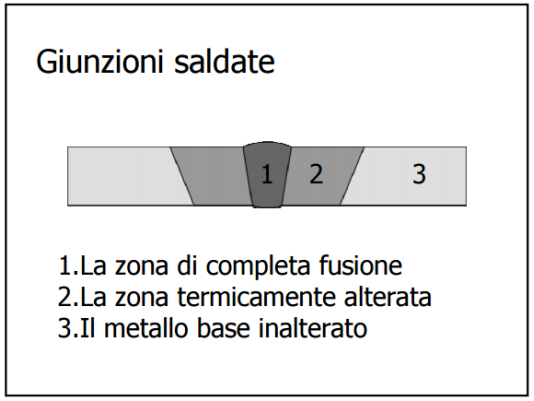
Questo crollo poteva essere assolutamente evitato se fosse stata metabolizzata la lezione dei crolli dei ponti in acciaio saldato, avvenute alla fine degli anni '30 in Germania e Belgio.

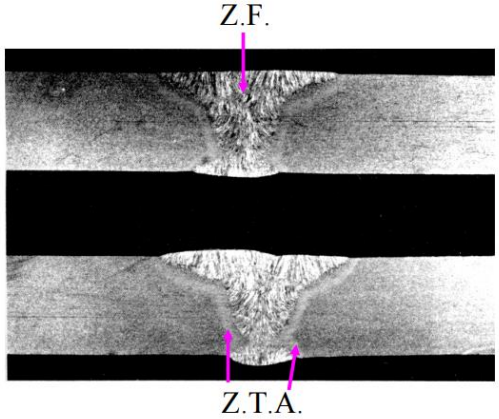
- ## SALDABILITA' ACCIAIO

La saldatura consiste nella giunzione di due elementi metallici realizzata mediante apporto di materiale fuso.

Saldabilità di un materiale quando è possibile effettuare un'operazione di saldatura senza effettuare successivi trattamenti termici.

Il gradiente termico sviluppato durante l'operazione determina la presenza di tre zone metallurgicamente diverse (Zone Termicamente Alterate ZTA):





Nelle ZTA si possono avere problemi derivanti dal surriscaldamento:

- Microstruttura ingrossata e formazione di strutture dure
- Diminuzione della resistenza a trazione
- Infragilimento e formazione di precipitati

Se si passa da struttura austenitica a martensitica, durante il raffreddamento si possono avere cricche a freddo.

Se è presente anche idrogeno (dovuto a umidità o ruggine), la formazione di cricche è molto probabile.

PROBLEMI DELLE ZTA

I problemi legati alla ZTA sono descritti dal parametro *CE* (carbonio equivalente).

Tale parametro è anche usato per valutare la saldabilità degli acciai:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

Il *CE* è indice per la misura della maggiore o minore attitudine ad assumere struttura di tempra al raffreddamento dopo saldatura:

se CE<0,4 → acciaio facilmente saldabile

se 0,4<CE<0,6 → acciaio saldabile con pre-riscaldo

se CE>0,6 → Problemi di saldabilità.
Sono necessari pre e post-riscaldi

Scopo del preriscaldo: ridurre la velocità di raffreddamento della ZTA in modo tale da escludere la formazione di martensite.

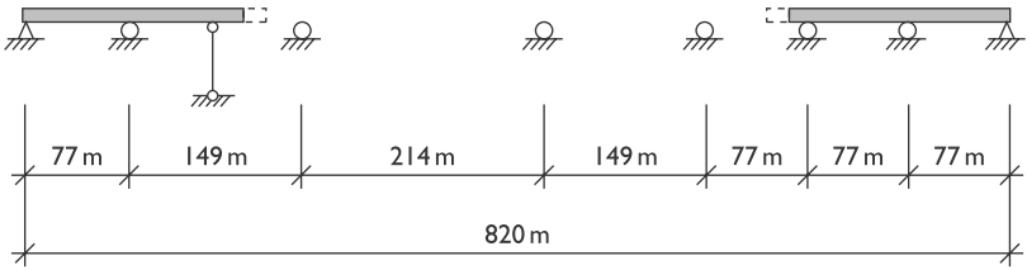
Scopo del post-riscaldo: ridurre lo stato tensionale della martensite rendendo in tal modo più duttile il giunto saldato

• CROLLO DEL CLEDDAU BRIDGE – GALLES REGNO UNITO - 1970

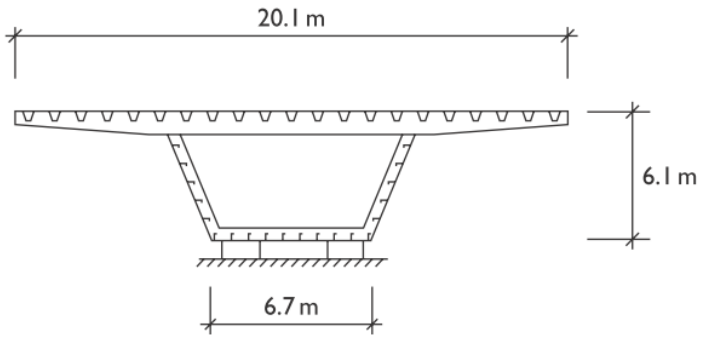
Ponte a cassone in acciaio, con piastra ortotropa e lamiere irrigidite, continuo su più appoggi, di luce massima 214 metri.

Crollato in Galles nel 1970, durante il montaggio.

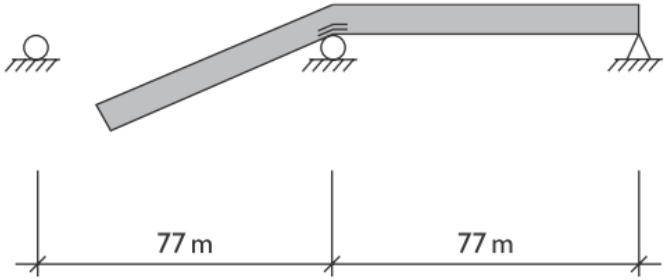
Costruite prima le due campate di riva su ponteggi provvisorio, si procedette con il montaggio a sbalzo dall'impalcato già realizzato.



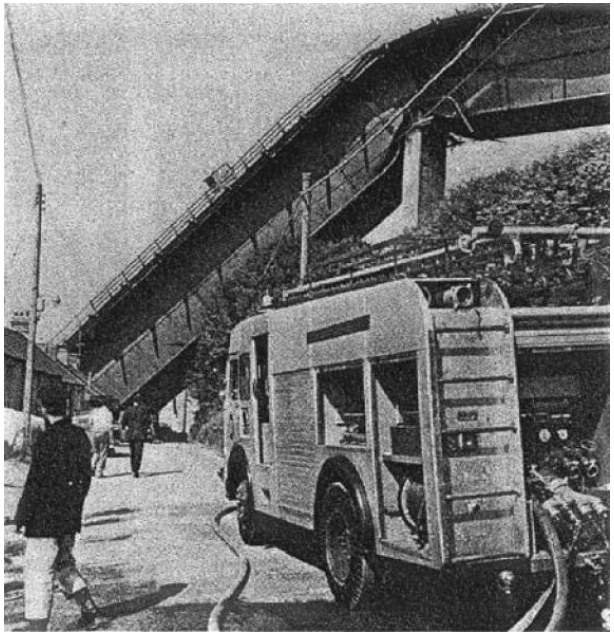
Schema longitudinale durante il montaggio – il crollo sulla sezione a destra, sullo sbalzo



Sezione trasversale del cassone



Collasso seconda campata in fase di montaggio (61 m di sbalzo): instabilizzazione del diaframma sopra la pila

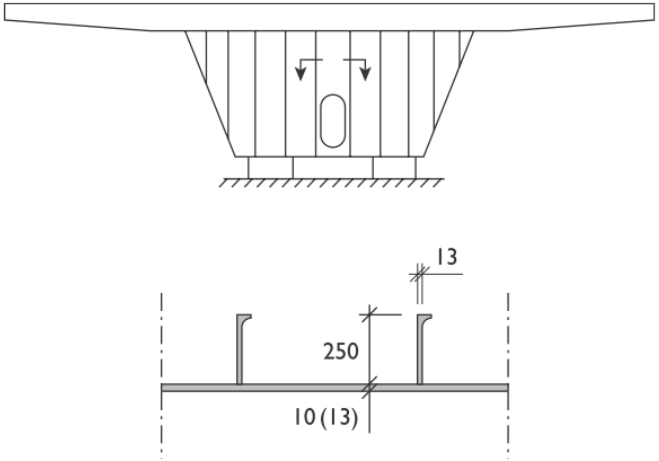


Il crollo, dall'altezza di 30 metri, causò la morte di quattro persone.

Al momento del crollo il ponte si trovava in condizioni isostatiche, senza riserve resistenziali, poiché lo schema finale iperstatico sarebbe arrivato solo al momento della “chiusura” delle campate.

Il cedimento si ebbe per instabilizzazione del diaframma sopra la pila, per inadeguatezza degli irrigidimenti e concentrazione degli sforzi.

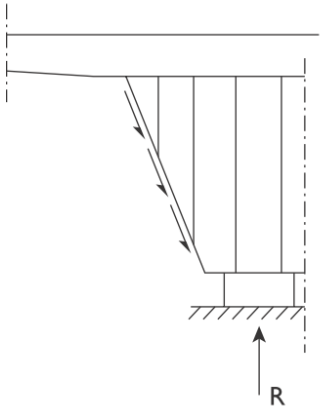
Il diaframma era in lamiera piena, spessa 13 mm, irrigidito con piatti a bulbo ed un “passo d’uomo” al centro:



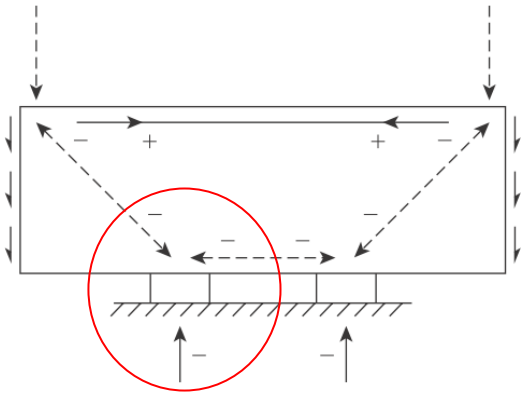
Diaframma sulla pila – dettaglio irrigidimenti

Funzioni del diaframma agli appoggi:

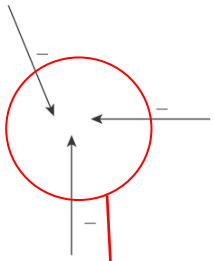
- Trasferire il taglio proveniente dalle anime inclinate fino agli appoggi
- Portare le reazioni vincolari
- Costituire irrigidimento verticale per le anime
- Funzionare come traverso portante durante la sostituzione degli appoggi
- Trasferire le forze orizzontali del vento agli appoggi



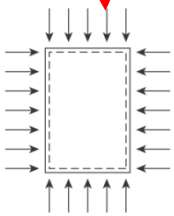
Trasferimento del taglio dall'anima all'appoggio



Modello semplificato per visualizzare la distribuzione del carico ed il comportamento del traverso



Diagonale compressa verso l'appoggio e forza orizzontale equilibrante



Compressione biassiale vicino all'appoggio, sulla lamiera del diaframma

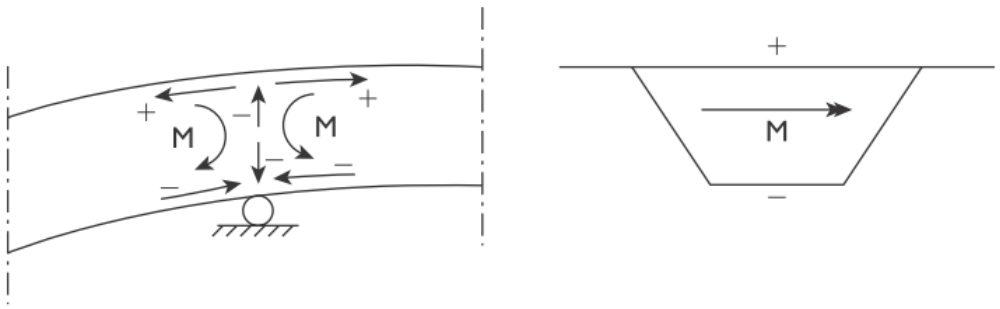
In questo stato di sforzo biassiale le tensioni critiche di buckling possono essere scritte:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_{x,cr}} + \frac{\sigma_y}{\sigma_{y,cr}} = 1.0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_x = \sigma_{x,cr} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{y,cr}}\right)$$

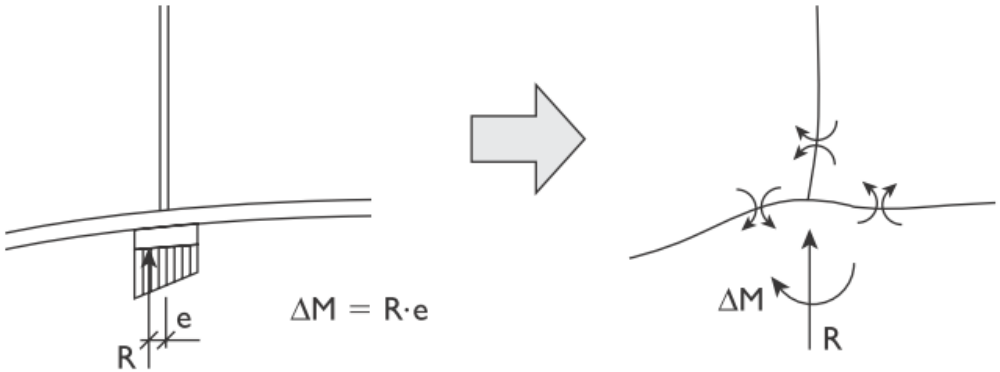
con evidente aggravio della stabilità nel caso siano presenti i due stati di sforzo di compressione.

Altri effetti collaterali al problema furono:

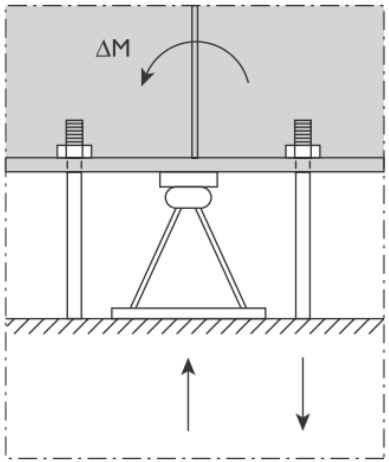
- Effetto addizionale di compressione nel diaframma dovuto alla curvatura del ponte, causata dal forte sbalzo sulla pila:



- Eccentricità nel carico della piastra di appoggio dovuta alla curvatura longitudinale sulla pila, con conseguente flessioni locali su piattabanda inferiore e diaframma:

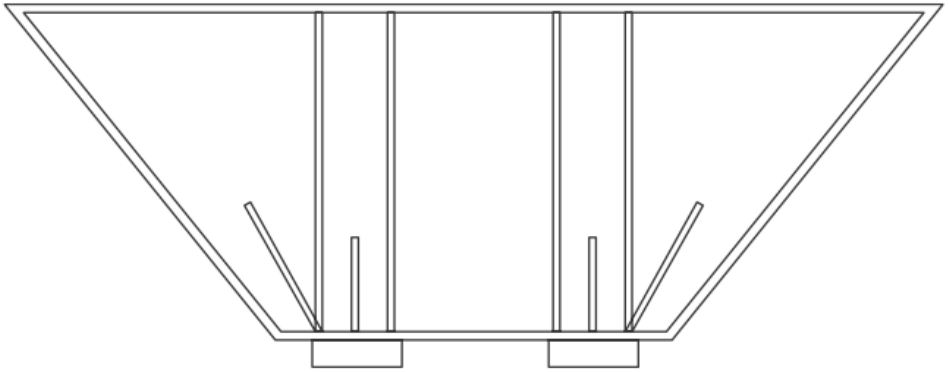


- Reazione verticale addizionale dovuta al serraggio dei tiranti che dovevano assorbire le reazioni di sollevamento durante il montaggio della successiva campata:



Tutti questi effetti provocavano concentrazioni di sforzi locali sugli appoggi, con conseguente instabilizzazione del diaframma, seguita dall'instabilizzazione delle anime inclinate e dal collasso della sezione trasversale.

Lezione: le zone a sforzi diffusivi devono essere controllate con attenzione. I diaframmi devono essere progettati con spessori maggiori ed irrigidimenti diffusi nelle zone di concentrazione degli sforzi:



Schema cassone di ponte in acciaio, con diaframma pieno ed irrigidimenti diffusi

❖ Esempio: SVINCOLO BORGHETTO S.S. – ing. Romano - 2004

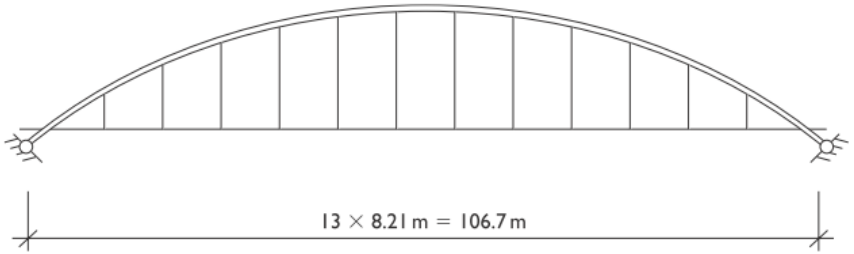
Vista del ponte a travata a via inferiore

Dettagli appoggio pila - irrigidimenti

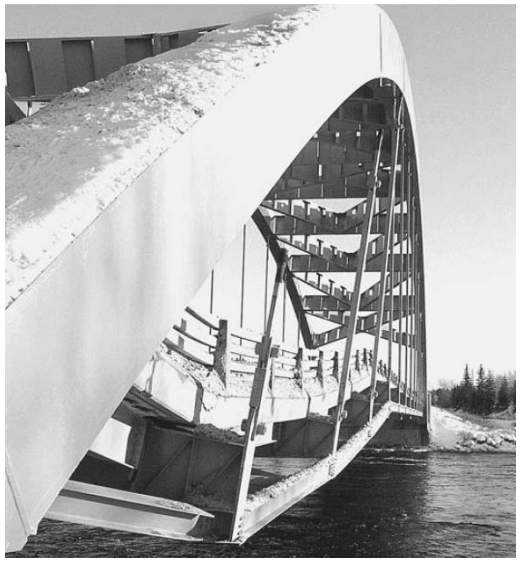
• COLLASSO PARZIALE DELL'AUBREY COSENS MEMORIAL BRIDGE – ONTARIO CANADA - 2003

Ponte ad arco in acciaio, costruito nel 1960 in Ontario, Canada, lungo 106.7 metri.

Crollato nel 2003 durante il passaggio di un mezzo pesante, per rottura dei pendini di sospensione.

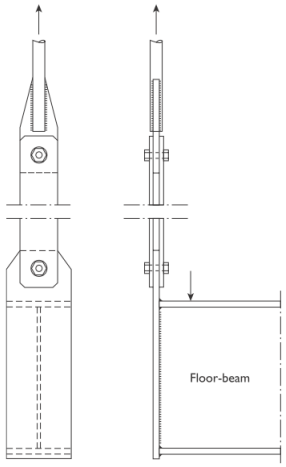


Vista laterale

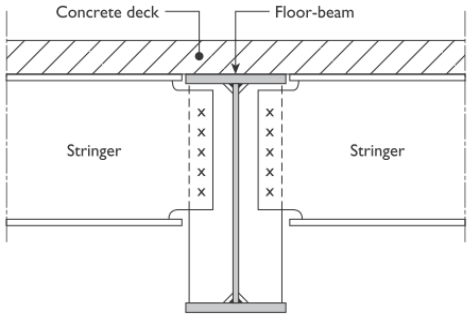


vista ponte collassato

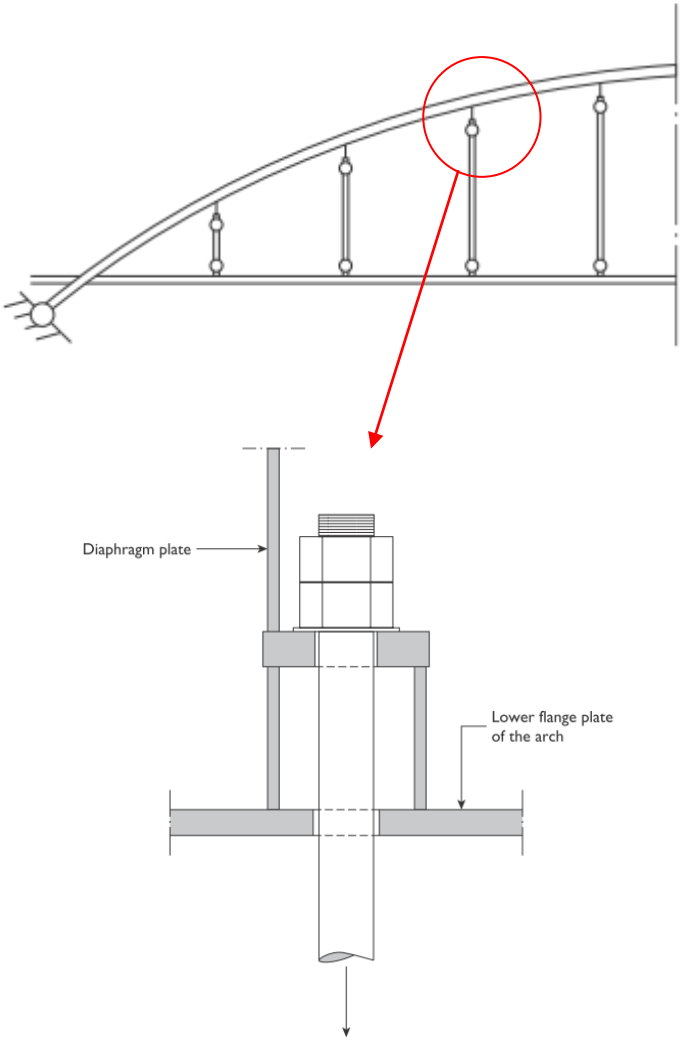
L’impalcato è sorretto da due archi e 12 coppie di pendini ogni 8.21 metri, che sorreggono i 12 traversi principali:



Sei travi longitudinali sono incernierate ai traversi e reggono l’impalcato in c.a.

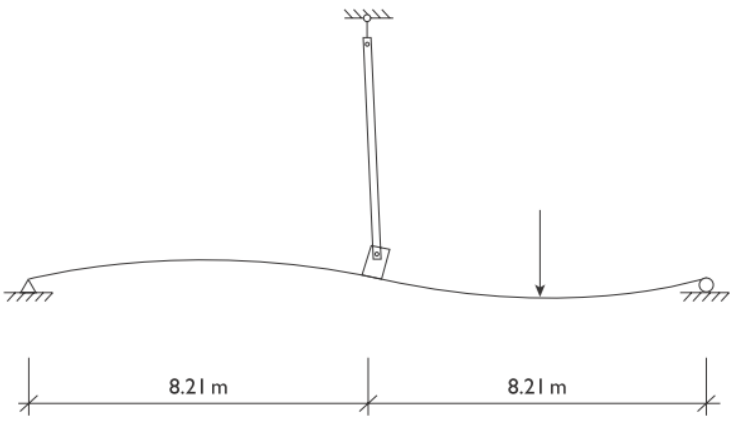


Nell’idea del progettista ogni pendino verticale era incernierato superiormente ed inferiormente, per evitarne ogni flessione:

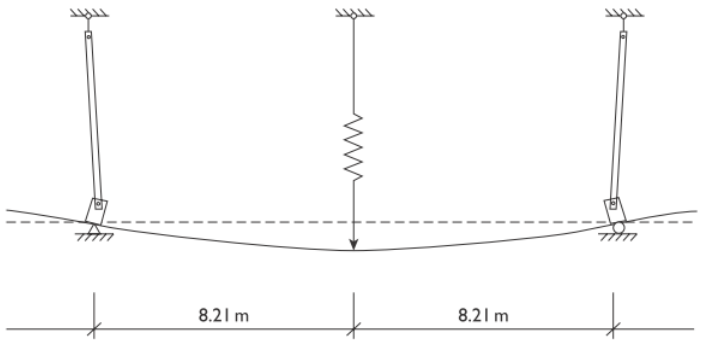


Dettaglio reale dell’attacco superiore, con eccentricità e senza possibilità di rotazione

Rotazioni possibili agli attacchi dei pendini:

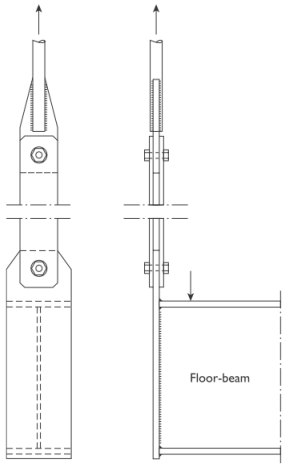


Rotazioni nel pendino dovute a carichi asimmetrici in una zona adiacente

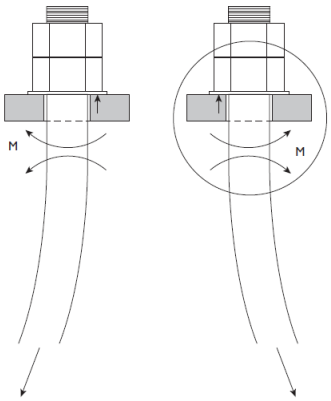


Rotazioni nei pendini dovute a carichi in corrispondenza di un traverso (flessibilità dell'impalcato)

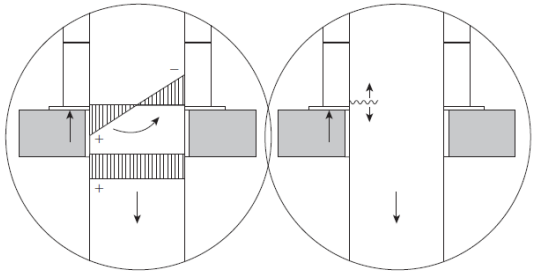
Per mancanza di controlli, non ci si è resi conto che l'insorgere di ossidazione nelle cerniere causò difficoltà di rotazione nel giunto inferiore:



Con conseguente insorgenza di sollecitazioni flettenti secondarie nell'attacco superiore dei pendini, che si invertivano col passare dei mezzi pesanti:

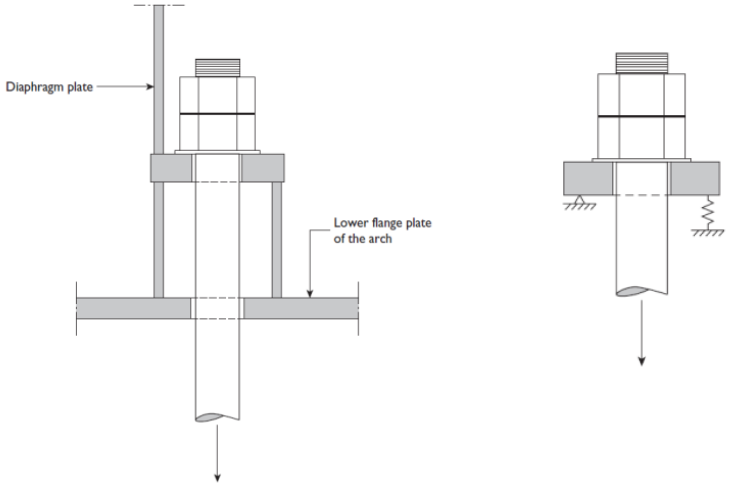


Se la connessione del pendino fosse stata una vera cerniera, non si avrebbero avuti particolari problemi, ma l'attacco è chiaramente un incastro per la barra di appensione e ne seguono tensioni secondarie che hanno determinato l'insorgenza di una fessura per fatica nel dettaglio:

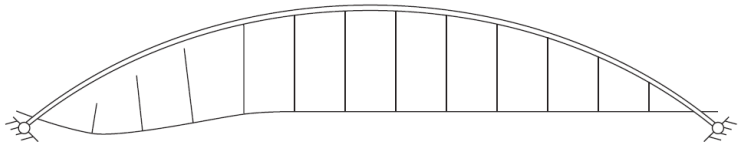


Poiché la fessura non è visibile con normale ispezione, essendo nascosto tale attacco, il pendino è destinato a rottura fragile, improvvisa. Tale rottura sarebbe avvenuta anche con un acciaio più duttile, sarebbero solo stati necessari più cicli di carico.

La fessurazione fu anche favorita dalla differenza di rigidezza dei piatti dell'attacco (importanza del dettaglio!):



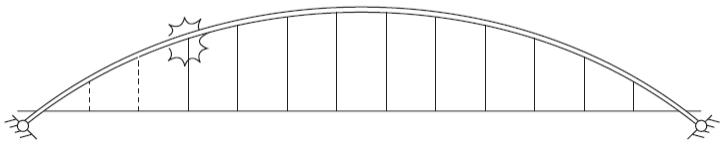
Da un'analisi post crollo ci si è resi conto che si è rotto dapprima il pendino più corto e rigido, il più vicino all'arco, ma nessuno si accorse della cosa poiché il dettaglio era tale per cui la barra rimase al suo posto e in verticale:



Rompendosi il pendino "1", un maggior carico si trasferì al pendino "2", che si ruppe qualche anno dopo, ma anche allora nessuno si rese conto della rottura e dell'aumentata flessione dell'impalcato.

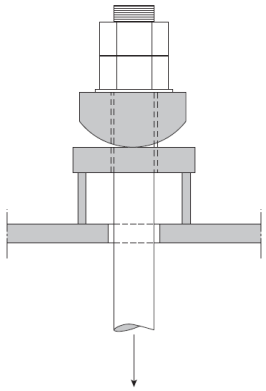
Il ponte aveva molte iperstaticità interne e riuscì a non collassare dopo la frattura di due pendini (concetto di "**robustezza**", fondamentale per i ponti ed ora richiamata dalle NTC 2008 - cap. 2.1).

Quando alla fine si ruppe anche il pendino "3", durante il passaggio di un mezzo pesante in una giornata molto fredda, il ponte collassò:



Nota: identico incidente si ebbe in Svezia negli anni '80, ma durante un'ispezione si notò un rumore di sferragliamento che permise di scoprire la rottura di un pendino all'attacco superiore, pendino che restava in posizione e sembrava integro.

Lezione: Se l'attacco superiore avesse previsto un dettaglio migliore, il ponte non sarebbe crollato:



Nota: il ponte venne riparato nel 2005 e rimesso in servizio.

Si usarono 4 cavi al posto della singola barra, una buona scelta da un punto di vista della sicurezza strutturale e della "robustezza":

❖ Esempio: SOLUZIONI DI SOSPENSIONE NON ADEGUATE

- Pendino non regolabile e non sostituibile
- Sollecitazioni flessionali nella barra
- Saldatura superiore su piatto con rischio fatica e strappi lamellari
- Mancanza di robustezza

Attacco superiore pendino

attacco inferiore pendino

❖ Esempio: PONTE SUL PARCO ARCHEOLOGICO DI POZZUOLI (NA) – ing. Pistoletti e Romano - 1997

Vista del ponte ad arco

Dettagli arco-controventi

ATTACCO PENDINI:

- Anima che fuoriesce dalla sezione composta
- Barre in tondo pieno con piatti e perno
- Filettatura e dado di regolazione inferiore

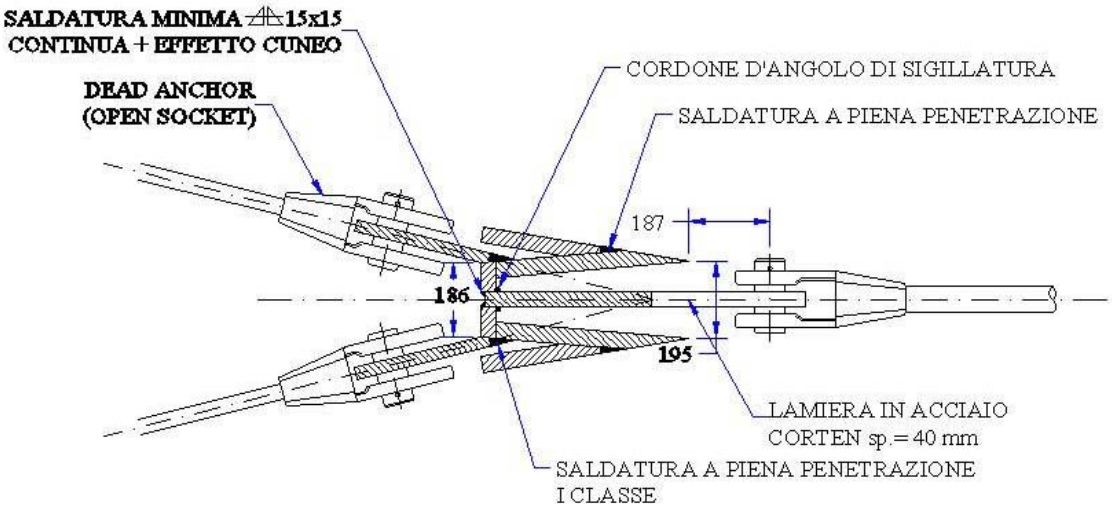
Dettaglio pendini, traversi, controventi e giunto

❖ Esempio: PONTE STRALLATO A VILLANOVA D'ALBENGA – ing. Romano - 2003

Vista del ponte

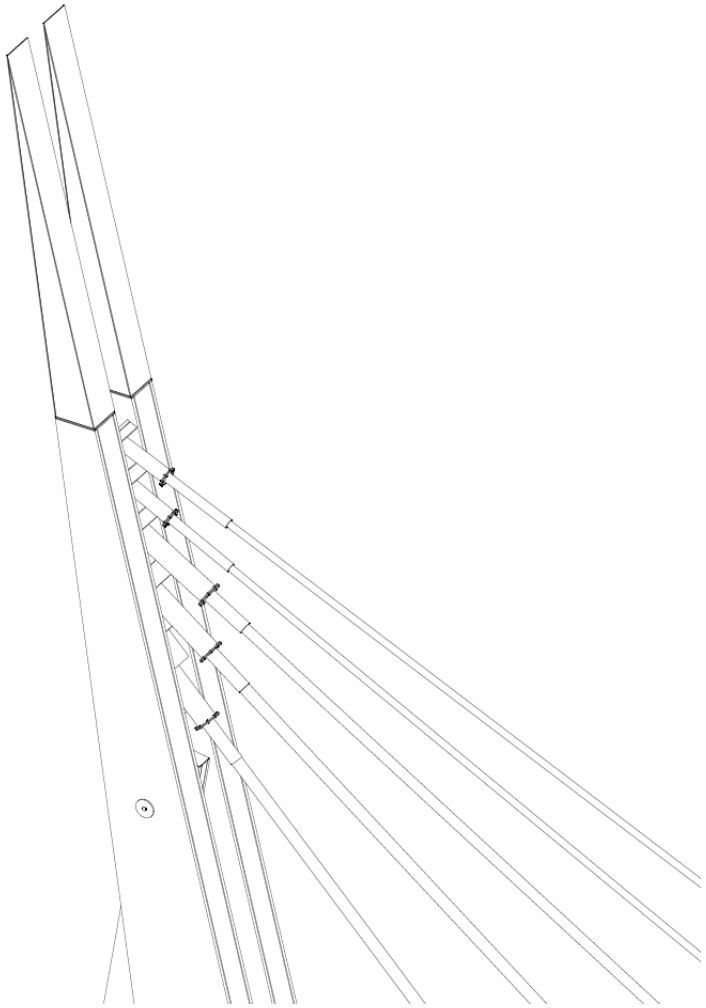
render di progetto

Dettaglio attacco stralli

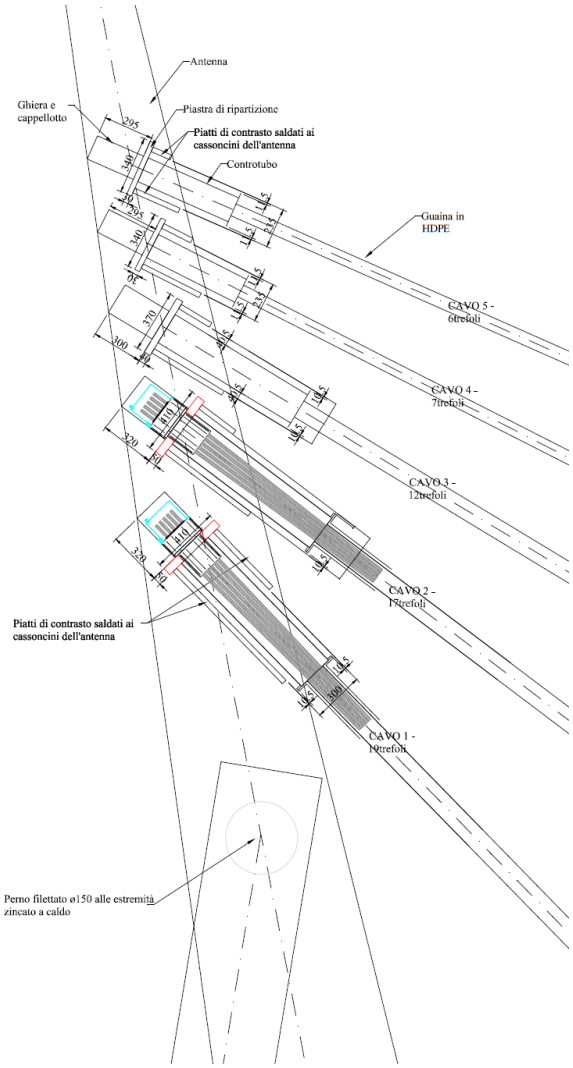


❖ Esempio: PONTE STRALLATO MOLASSANA (GE). – ing. Romano - 2015

Vista del ponte strallato obliquo



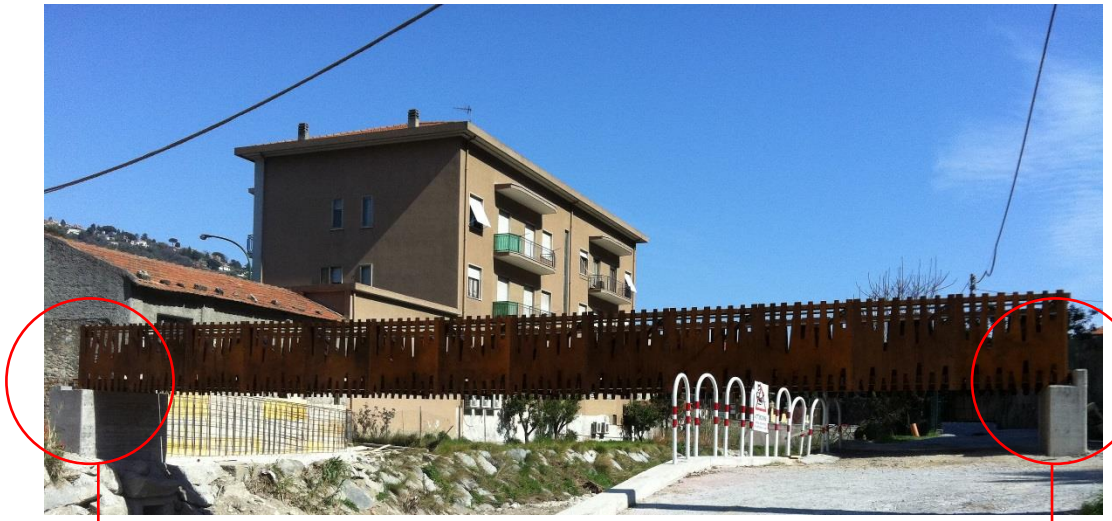
Dettaglio antenna



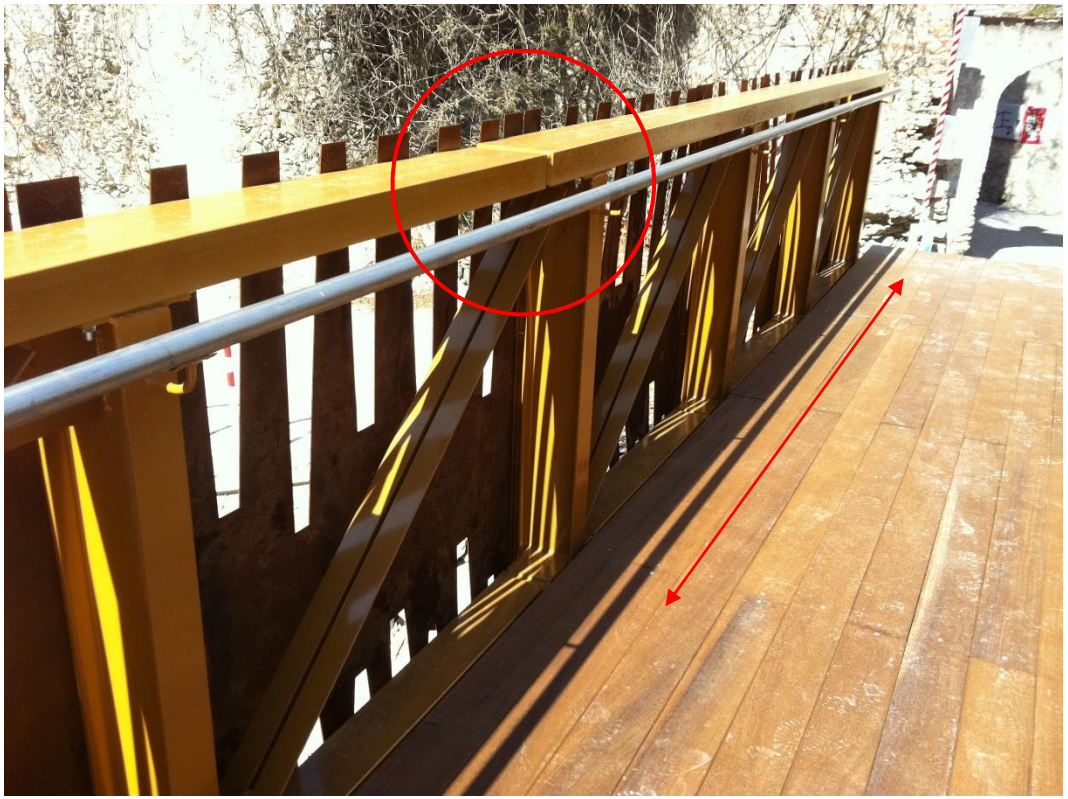
Dettagli antenna-attacco stralli

❖ Esempio: SOLUZIONI STRUTTURALI NON ADEGUATE

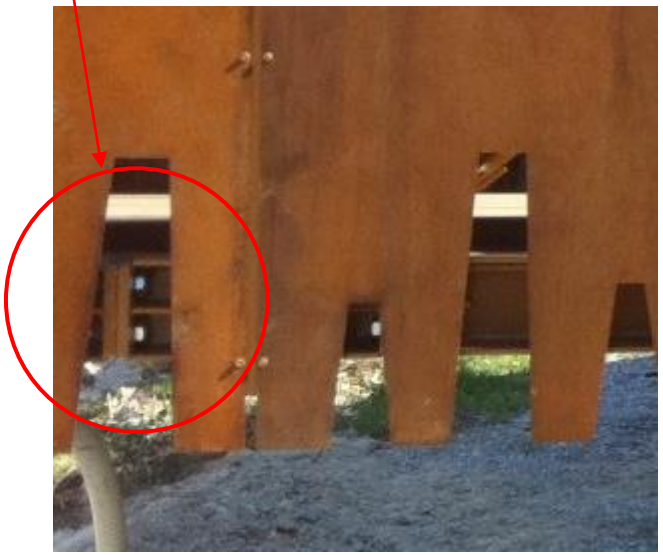
- Problemi di esercizio: eccesso di deformabilità già coi soli pesi propri
- Vincoli non adeguati: spalla fissa su una fila singola di micropali



- Mancanza di robustezza nell'impostazione strutturale: struttura a pannelli modulari



Briglia superiore in semplice contrasto



Briglia inferiore con bulloni in trazione

❖ **Esempio: PRESTAZIONI DI PROGETTO ED EFFETTIVE DEL PONTE AD ARCO DI ALBENGA - ing. Romano - (1995)**

DESCRIZIONE

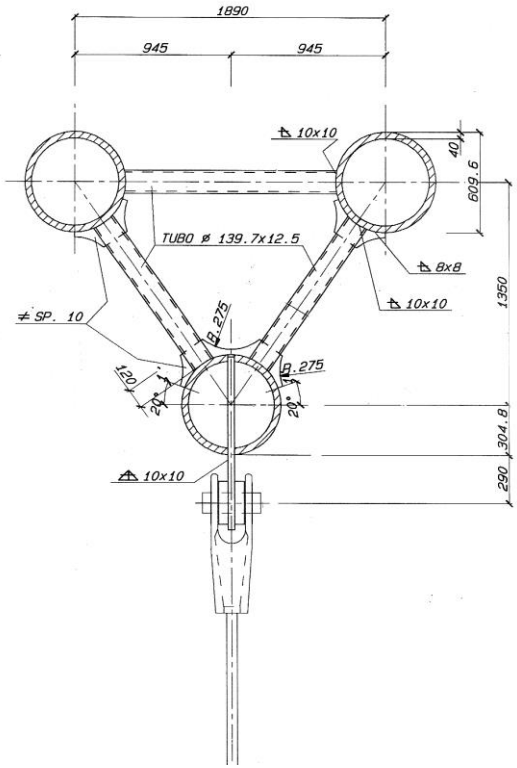
PROGETTO 1994 E REALIZZAZIONE NEL 1995 norme PONTI: DM 1990

Ponte ad arco a spinta eliminata, di 98 metri di luce in campata unica, a sospensione centrale, con cassone torsio-rigido.

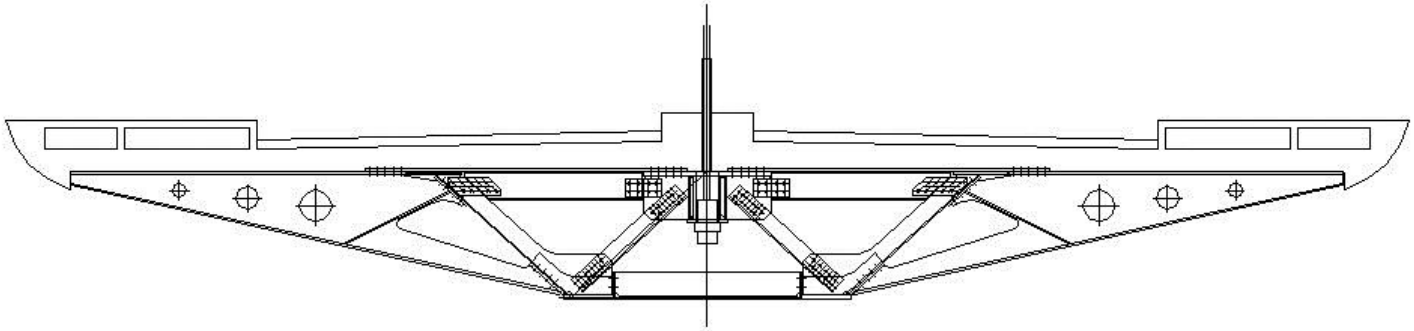
Arco reticolare in acciaio, formato da tre tubi principali ϕ609.6 x40 mm

Impalcato a cassone in acciaio, di spessore ridotto a 140 cm, sostenuto da un'unica serie di funi spiroidali ϕ65 mm ogni 5 m, poste al centro delle carreggiate, areato con fori all'intradosso ogni 5 metri: da questi fori si accede al cassone, che è totalmente ispezionabile.

Remi esterni che hanno il compito di riportare i carichi eccentrici al cassone attraverso un comportamento schematizzabile in uno schema puntone-tirante; alleggeriti con vari fori per aumentarne la leggerezza ed evidenziarne il funzionamento.



SEZIONE SU ARCO E ATTACCO TIRANTE: CAPOCORDA FISSO TIPO ‘FORK’



SEZIONE TRASVERSALE CASSONE E PARTICOLARE ATTACCO INFERIORE FUNI SUL TRAVERSO: CAPOCORDA REGOLABILE

PRESTAZIONI DI PROGETTO: MANUTENZIONE E DURABILITA'

- Scelta dell'acciaio e sua preparazione
- Interno cassone: verniciatura, areazione pendenze e scolo acque
- Esterno cassone: verniciatura
- Arco: verniciatura esterna e iniezione interna ai tubi di calcestruzzo
- Passi d'uomo e ispezionabilità di ogni parte del cassone
- Predisposizioni irrigidimenti nel traverso di testa dimensionati per sollevamento e sostituzione appoggi
- Predisposizioni per sostituzione pendini di apprensione e relative verifiche con traffico limitato

PROGETTO DEL CICLO DI PROTEZIONE DELLA CARPENTERIA METALLICA DEL PONTE DI ALBENGA:

Per le indicazioni progettuali e del piano di manutenzione, si è fatto riferimento alle seguenti indicazioni sui cicli di intervento e manutenzione:

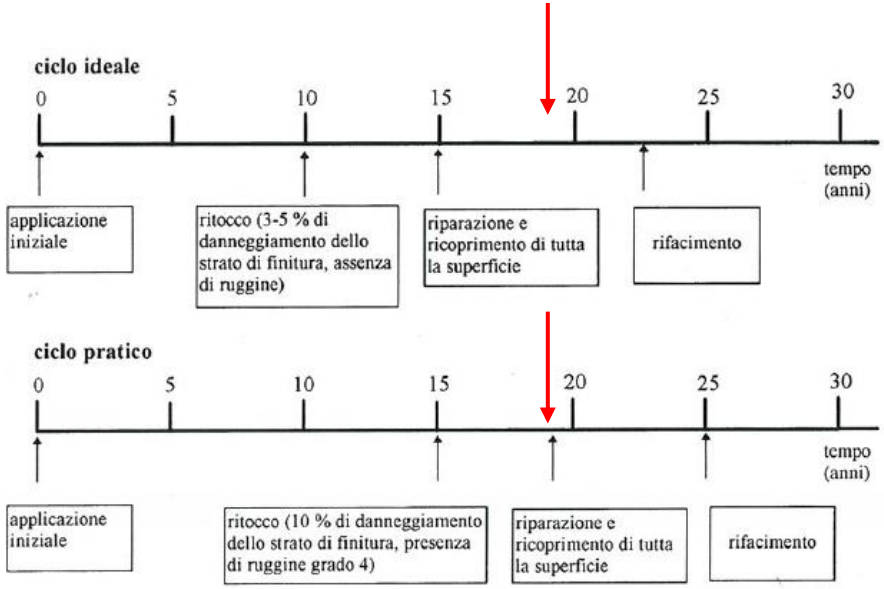


Figura 16. Cicli di manutenzione per strutture rivestite (da Brevoort e Roebuck).

Il ciclo protettivo scelto ha fatto riferimento alle seguenti indicazioni di preparazione e protezione delle superfici metalliche:

Ciclo	Preparazione superficiale	Spessore minimo (µm)	Ambiente marino (anni)	Ambiente urbano (anni)
HB ST epossidico/HB ST epossidico/ poliestere uretanico	SP 6 = Sa.2	300	12 (16)	14 (21)
uretanico allo zinco/HB acrilico uretanico/acrilico uretanico	SP 10 = Sa.2.½	250	12 (16)	14 (21)
zinco inorganico/HB epossidico/HB epossidico	SP 10	280	12 (16)	15 (22.5)
zinco inorganico/HB acrilico uretanico/HB acrilico uretanico	SP 10	280	12 (16)	15 (22.5)
zinco inorganico/HB epossidico/poliestere uretanico	SP 10	225	12 (16)	15 (22.5)
zinco inorganico/HB epossidico/acrilico uretanico	SP 10	225	12 (16)	14 (21)
zinco epossidico/HB epossidico/HB epossidico	SP 10	280	12 (16)	14 (21)
zinco organico/HB acrilico uretanico/HB acrilico uretanico	SP 10	280	12 (16)	15 (22.5)
zinco epossidico/HB epossidico/poliestere uretanico	SP 10	225	12 (16)	14 (21)
zinco inorganico/HB vinilico/HB vinilico	SP 10	280	12 (16)	13 (19.5)
zinco inorganico	SP 10	75	(15)	(17)
zinco organico	SP 10	75	(6)	(5)
HB = alto spessore; ST = surface tollerant; SP10 = sabbiatura a metallo bianco;				

Tabella 2. Vita prevista prima del primo ritocco per alcuni tipi di cicli di pitturazione in ambiente marino ed urbano. Valori riferiti ad un ciclo di manutenzione ideale e, tra parentesi, pratico (da Brevoort e Roebuck).

In conformità alle precedenti tabelle, la progettazione esecutiva della protezione delle strutture metalliche ha imposto:

- ACCIAIO:

  Fe 510 grado C per spessori minori o uguali di 20 mm

  Fe 510 grado D per spessori maggiori di 20 mm

- Preparazione superficiale prima della verniciatura in officina:

  sabbiatura Sa $2_{1/2}$ a metallo quasi bianco

  prima mano di verniciatura (primer): immediatamente dopo la preparazione

- Ciclo protettivo: basato su tre strati di verniciatura:

  mano di fondo (primer)

  mano intermedia (copertura)

  mano di finitura

I cicli sono stati così differenziati:

- Esterno cassone ed esterno arco: verniciatura su tre mani così specificate:

Primer:	zinco epossidico	spessore:	80 μm
Strato intermedio:	epossidico alto spessore	spessore:	100 μm
Strato finitura:	poliuretanico	spessore:	50 μm

Spessore totale: 230 μm

- Interno cassone: verniciatura ciclo “B” ANAS:

Primer:	zinco epossidico	spessore:	40 μm
Strato intermedio:	epossidico alto spessore	spessore:	100 μm
Strato finitura:	poliuretanico	spessore:	40 μm

Spessore totale: 180 μm

Per evitare l’insorgenza di microclimi aggressivi negli interni delle strutture scatolari, il cassone è stato progettato areato, con importanti forature nella lamiera inferiore.

Tali forature permettono anche l’accesso al cassone e ne disegnano l’intradosso, pur mantenendo il funzionamento torsio – rigido dell’impalcato.

Il drenaggio è stato garantito da fori sul fondo lamiera, in tutte le zone di rischio di accumulo d’acqua.

- Interno dei tubi dell’Arco: considerata la difficoltà di verniciare l’interezza della parte interna dei tubi, le alternative erano quelle di accettare una certa corrosione, limitata alla poca aria presente nei tubi, stagni, oppure iniettare i tubi con una miscela cementizia che ne proteggesse l’interno col suo ambiente basico. La seconda scelta è stata effettuata al termine della costruzione, iniettando da un foro nei tubi, fino alla fuoriuscita da un foro contrapposto.

CONTROLLI E PROVE DI COLLAUDO E SPERIMENTALI

- Montaggio: prescrizioni e controlli
- Bullonature: prescrizioni e controlli
- Saldature: prescrizioni e controlli
- Collaudo statico in tre diversi configurazioni: max flettente, max emisimmetrico, max torcente
- Prova dinamica di validazione del modello numerico del ponte: passaggio su traversina, frenatura longitudinale, frenatura trasversale, eccitazione arco

Progetto del montaggio: conci di dimensione trasportabile

La connessione strutturali dei conci del ponte era così organizzata:

Giunti dell'arco:	saldati in piena penetrazione
Giunti di forza del cassone:	bullonati ad attrito
Giunti di connessione di remi e traversi:	bullonati a taglio

Prescrizioni di controllo ed esecuzione

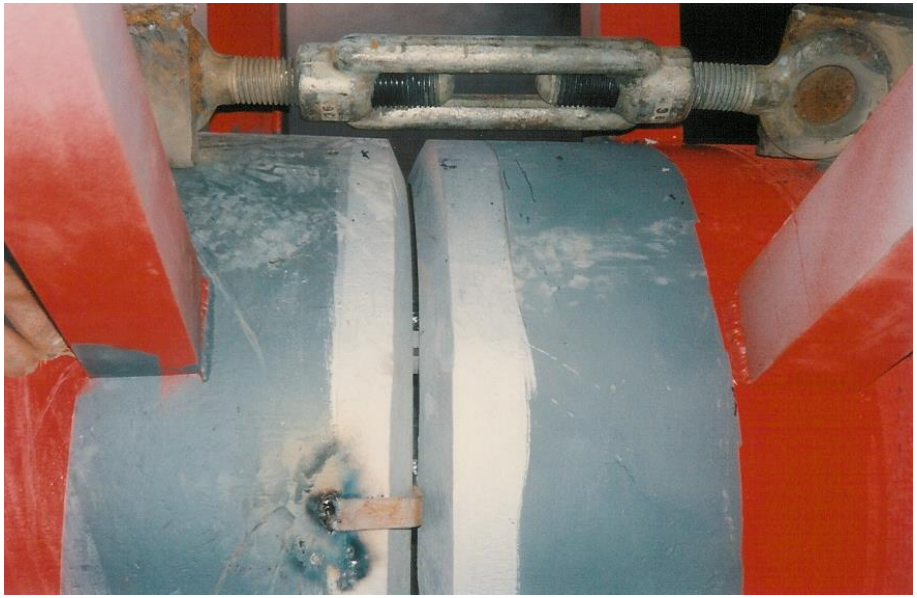
Premontaggio in officina:

Il premontaggio ha permesso l'ottimizzazione degli accoppiamenti e la minimizzazione dei difetti costruttivi.

E' stato effettuato sia per il cassone che per l'arco.

Saldature dei tubi dell'arco:

Saldature a piena penetrazione dei tubi Φ609.6x40: sono state organizzate con l'Istituto Italiano della Saldatura, provate all'Istituto con saldatori qualificati e controllate tutte in opera, con ultrasuoni sul 100% dello sviluppo:



Preparazione saldatura piena penetrazione tubi arco: no piatto di sostegno, gap di 4 mm

Giunti bullonati: prescrizioni di controllo sulle coppie di serraggio bulloni

Le prescrizioni di controllo sulle coppie di serraggio dei bulloni delle varie connessioni sono state direttamente controllate dalla DL, con chiave dinamometrica tarata.

Per ogni giunto è stato controllato almeno il 10% dei bulloni, se uno solo non raggiungeva la corretta coppia di serraggio, tutti i bulloni del giunto venivano controllati e riserrati.

Prescrizioni di controllo sulle saldature

Nel capitolato erano stati imposti controlli sulle saldature, effettuati da controllore indipendente (Istituto Italiano della Saldatura):

NUOVO PONTE SUL FIUME CENTA

Controlli da effettuare sulle saldature delle opere in carpenteria metallica

Per tutte le saldature facenti parte dell'arco e dell'impalcato si raccomanda un controllo visivo e dimensionale.
Nel seguito si specifica il tipo di controllo da effettuare per ogni parte strutturale e la percentuale di controlli da effettuare sulle stesse.

N.B. dove si e' indicato saldatura in "piena penetrazione" eseguire controlli ad ultrasuoni sul 100% delle saldature

ARCO

- tubi principali: controlli con ultrasuoni sulle saldature di tutti i giunti
- tubo principale inferiore: ultrasuoni sulla lamiera del tubo nel punto di attacco delle bielle , per controllare che non presenti sfogliature
- attacco tirante: controlli con magnaflux sul 100% delle saldature degli attacchi sia superiori che inferiori
- saldature tubo inferiore-bielle di collegamento: magnaflux sul 100%
- saldature tubo superiore-bielle di collegamento: magnaflux sul 30%
- primi due ordini di diagonali tra tubo sup.e inf.: ultrasuoni 100%
- controventi a croce di S.Andrea tra i tubi superiori dell'arco: magnaflux sul 15%

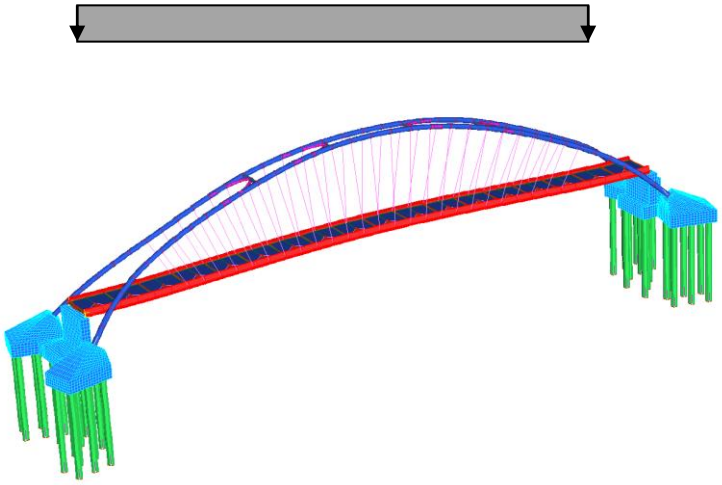
CASSONE

- composizione travi: magnaflux sul 15% delle saldature
- attacco superiore ed inferiore dei remi correnti: magnaflux sul 100% delle saldature degli attacchi e dei corrispondenti irrigidimenti interni nel cassone
- cassone di testa:
  - lamiere di innesto con i tubi: magnaflux sul 100% delle saldature coinvolte
  - penultimo ed ultimo traverso: magnaflux sul 100% delle saldature coinvolte
  - rimanenti saldature del concio di testa: magnaflux sul 30%

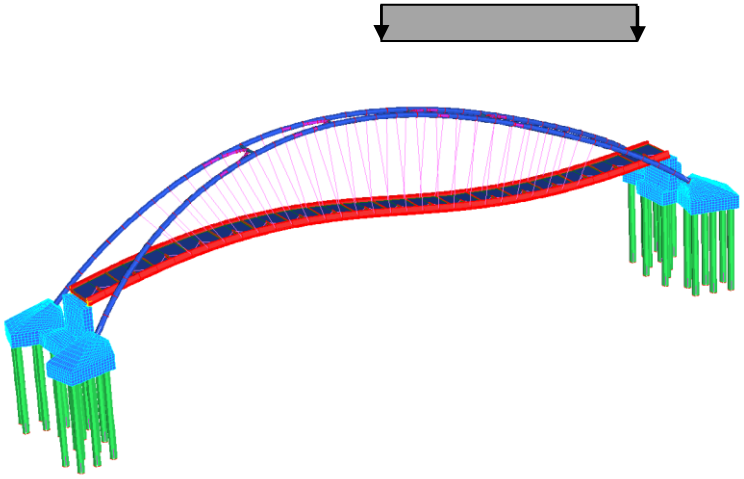
COLLAUDO STATICO (obbligatorio)

Per i ponti ad arco:

- Prove di carico max flessionale
- Prove di carico max emisimmetrico
- Prove di carico max torcente (tutti i mezzi su una sola corsia)



Carico simmetrico



carico emisimmetrico

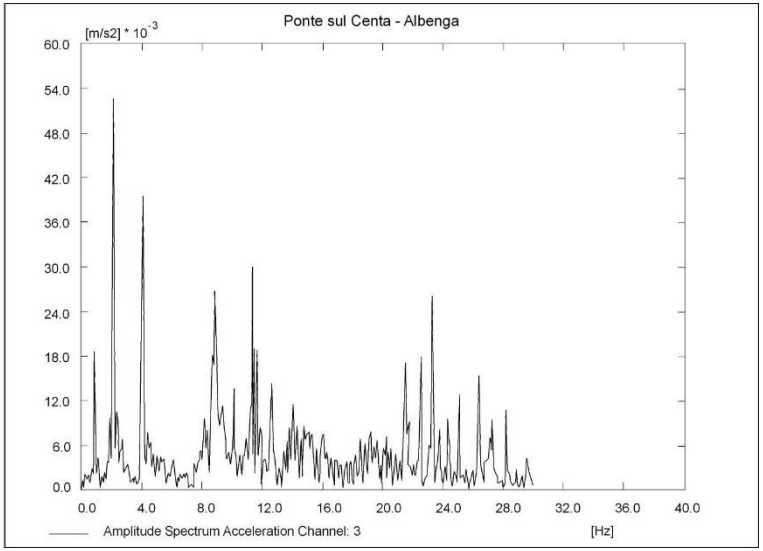
COLLAUDO DINAMICO (per strutture speciali)

Prova fondamentale per validare il modello agli elementi finiti:

- singolo camion pesante 40 ton transitante sul ponte e sopra ad una traversina, 'bump', di sezione 12x12 cm.
- camion che frena al centro dell'impalcato sia in direzione longitudinale che leggermente trasversale.
- eccitazione l'arco ortogonalmente alla sua direzione principale, per mezzo di un cavo d'acciaio collegato in chiave e tirato da un escavatore agente nel greto del fiume: il cavo era dotato di un provino con sezione di rottura tarata a 4 tonnellate che, rompendosi improvvisamente metteva in vibrazione l'arco.

Registrazione delle oscillazioni strutturali attraverso accelerometri posizionati sia sull'impalcato che sull'arco.

Dai segnali ottenuti si ricavano le trasformate di Fourier: gli spettri di accelerazione per individuare i picchi di frequenza ed i modi principali di vibrare ad essi collegati.



Esempio: spettro accelerazioni dell’arco, trasversali al piano verticale

Esempio: confronto teorico-sperimentale dei modi principali di vibrazione dell'arco

ARCO	teorico	sperimentale
1° flessionale arco fuori dal piano verticale	0.871 Hz	0.8 Hz
2° flessionale arco nel piano verticale	0.997 Hz	0.8 Hz
3° flessionale arco nel piano verticale	1.856 Hz	1.9 Hz
2°flessionale arco fuori dal piano verticale	1.999 Hz	2.1 Hz

PIANO DI MANUTENZIONE

Nel 1994 il piano di manutenzione non era un documento previsto nel progetto esecutivo.

Considerata la delicatezza dell'opera ci si è posto il problema di indicare all'Ente proprietario come gestire il ponte. Per questo era stato inserito nel capitolato speciale di appalto un capitolo riguardante i controlli da effettuare dopo l'esercizio del ponte.

Sapendo che tale documento non sarebbe stato più considerato una volta terminati i lavori, d'accordo col collaudatore, si inserì un capitolo di addendum alla relazione di collaudo, che facesse riferimento ad un documento di manutenzione obbligatoria del ponte.

I controlli erano imposti e specificati col seguente schema temporale:

- dopo 1 anno dall'apertura del ponte (richiesta particolare di controllo serraggio bulloni dei giunti e valutazione sull'efficienza dell'impermeabilizzazione soletta)
- dopo 5 anni
- dopo 10 anni
- dopo 20 anni
- controllo successivi da valutare e comunque non oltre i 10 anni

Si riporta esempio del controllo a 10 anni del documento originario.

Esempio: ***CONTROLLI OGNI 10 ANNI DALL'APERTURA AL TRAFFICO***

- Apparecchi d'appoggio:
    - libertà d'escursione;
    - stato di conservazione del piano di scorrimento.
- Cassone d'impalcato:
    - controllo stato di conservazione della verniciatura;
    - controllo del serraggio bulloni;
    - controllo visivo delle saldature correnti;
    - controllo u.s. e/o magnaflux per nodi dei remi e attacchi delle funi
    - controllo delle vie d'acqua interne ed eventuale esecuzione di fori sul fondo per smaltimento delle acque infiltrate;
    - controllo del sistema di smaltimento delle acque di piattaforma.
- Arco:
    - verniciatura;
    - controllo visivo 100% delle saldature;
    - controllo u.s. 10% giunti principali
    - controllo visivo dei particolari d'attacco delle funi.
- Funi:
    - controllo della tesatura delle funi;
    - controllo visivo dell'integrità della protezione delle funi;
    - controllo visivo dell'integrità e funzionalità dei capicorda.
- Soletta:
    - controllo dell'impermeabilizzazione;
    - controllo dell'integrità dei copriferri;
    - controllo dello stato di fessurazione e dell'ampiezza delle stesse (ove possibile).
- Spalle:
    - controllo visivo, per quanto possibile, atto a verificare l'eventuale presenza di fessurazioni, lesioni o cedimenti.
- Verifica di tutta la verniciatura della struttura metallica

MANUTENZIONE:

- Pulizia del sistema di scolo delle acque di piattaforma.

- Ritocchi dello strato di vernice protettiva della struttura metallica (circa il 30%)

TABELLA RIASSUNTIVA DEGLI INTERVENTI OTTIMALI DI

MANUTENZIONE E CONTROLLO E RELATIVI COSTI

Tipo di controllo/manutenzione	Cadenza del controllo	Costo in Lire	Incidenza annuale
Visivo funi e capicorda	annuale	500.000	500.000
Pulizia sistema di smaltimento acque	annuale	500.000	500.000
Libertà e funzionalità appoggi	5 anni	300.000	60.000
Visivo protezione struttura metallica, saldature e bulloni	5 anni	5.000.000	1.000.000
Controllo tesatura delle funi	10 anni	50.000.000	5.000.000
Impermeabilizzazione e integrità soletta	10 anni	1.000.000	100.000
Ritocco verniciatura	20 anni	10.000.000	500.000
Riverniciatura totale	40 anni	30.000.000	750.000
			8.410.000/anno

ESAME DELLE PRESTAZIONI EFFETTIVE: CONTROLLO A 6 ANNI DI ESERCIZIO

Nel 2001, per iniziativa personale, ho voluto controllare l'interno del cassone del ponte ed il suo stato di conservazione.

Entrando ho verificato una situazione di forte degrado dovuta a improvvidi interventi da parte di un elettricista del Comune.

Infatti per riparare i proiettori che illuminavano l'arco, mal funzionanti, avevano deciso di alimentarli separatamente e così facendo, avevano realizzato due fori nella soletta, nella zona spartitraffico, non impermeabilizzandoli.

Inoltre, durante l'esecuzione dei fori, avevano intasato i fori di drenaggio del cassone coi residui di calcestruzzo, determinando accumuli d'acqua e ambiente aggressivo.

Il risultato è visibile nelle foto di seguito allegate.

Ho personalmente eseguito il progetto d'intervento di manutenzione, che è costato 110.000 euro, una cifra cinque volte superiore a quella di una corretta manutenzione quinquennale.

Nelle immagini che seguono si documentano i problemi riscontrati e la loro soluzione.

Cassoni d’estremità: accumuli d’acqua e forte arrugginimento di bulloni e lamiere

Stato delle lamiere e bulloni dopo idonea spazzolatura meccanica

Controllo e ripristino coppie di serraggio con chiave dinamometrica

Stato finale dell’interno del cassone a manutenzione completata

Stato finale dell’interno del cassone a manutenzione completata

Parte esterna del concio di testa del cassone: bulloni sostituiti e ri-verniciatura

Protezione e impermeabilizzazione dei pendini di sospensione

Ripristino della protezione dei capicorda danneggiati

ESAME DELLE PRESTAZIONI EFFETTIVE: CONTROLLO A 18 ANNI DI ESERCIZIO

Il Comune, più volte sollecitato, non ha provveduto a fare né incaricare nessun controllo e ispezione.

Nel 2013, sempre su iniziativa personale ho deciso di controllare l'interno del cassone del ponte ed il suo stato di conservazione generale al raggiungimento della "maggior età".

Nelle immagini che seguono si documenta lo stato generale di conservazione, i problemi riscontrati e la loro motivazione.

STATO DI CONSERVAZIONE GENERALE DELLA PROTEZIONE INTERNA

L'interno del cassone presenta un generale buono stato di conservazione, indice che sabbiatura e verniciatura sono stati efficaci:

Fianco cassone interno e nodi di attacco traversi e remi esterni

Conservazione giunti interni al cassone

STATO DI CONSERVAZIONE GENERALE DELLA PROTEZIONE ESTERNA

Le zone sabbiate e verniciate in officina si presentano ben conservate:

Le zone di giunto saldato, verniciate in cantiere, presentano deterioramento notevole e ruggine diffusa:

Zona giunto saldato del primo concio di arco

Non essendo mai stata eseguita una manutenzione preventiva, consistente in ritocchi e ricoperture parziali, il deterioramento della vernice è tale da richiedere riparazioni e ricoprimento su tutta la superficie.

E' evidente anche la perdita di colore generalizzata, dovuta all'aggressione atmosferica ed all'azione degli ultravioletti

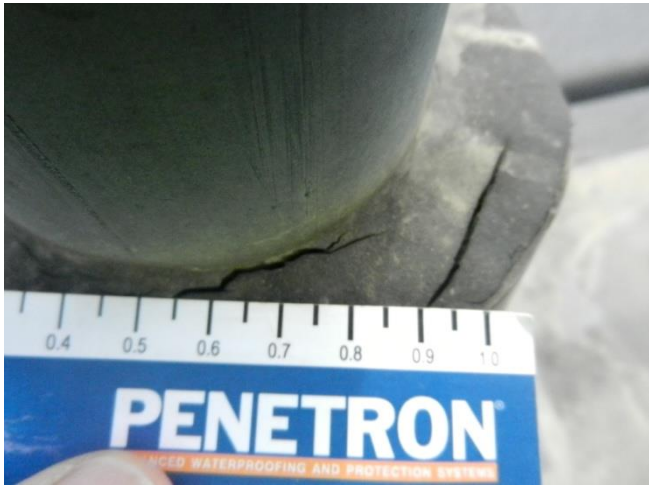
PROBLEMI ALL'IMPERMEABILIZZAZIONE DELL'ATTACCO FUNI-IMPALCATO

fune 16: 3 cm di varco nell'impermeabilizzazione

CONSEGUENTI DANNI ALL'ATTACCO INFERIORE DEI PENDINI:

Appensione 16: infiltrazioni, deterioramento di vernice e ruggine

PROBLEMI ALLE GUARNIZIONI DI IMPERMEABILIZZAZIONE FUNI



fune 12: fessure millimetriche nella guarnizione

Appensione 12: infiltrazione d'acqua nella fune con aggressione alla testa filettata

PROBLEMI INFILTRAZIONI D'ACQUA DA POZZETTI E ACCESSORI VARI

Rottura pozzetto del corpo illuminante con acqua nel pozzetto non impermeabilizzato

DANNI RICONDUCIBILI ALLE INFILTRAZIONI DA POZZETTI E ACCESSORI VARI:

Effetti dentro il cassone: infiltrazioni, deterioramento protezione e ruggine diffusa

PROBLEMI DI TENUTA E FUNZIONAMENTO GIUNTI

Deterioramento meccanico del giunto, no manutenzione – mancanza di tenuta all'acqua

Mancanza sigillatura dei bulloni – vie d'infiltrazione d'acqua

DANNI RICONDUCIBILI AI GIUNTI:

Scolatura sulle strutture e danno diffuso

Deterioramento protezione e ruggine diffusa

PROBLEMI AGLI APPOGGI

Appoggio fisso: rottura inghisaggio per mancanza spine di ancoraggio (solo resina)

Appoggio unidirezionale longitudinale: escursione 40 mm sui 50 mm ammissibili

PROBLEMI DOVUTI ALLA SCARSA QUALITA' DELL'IMPERMEABILIZZAZIONE

infiltrazioni dentro il cassone: danneggiamento protezione della carpenteria e ruggine

infiltrazioni dentro il cassone: inizio processo di danneggiamento soletta c.a.

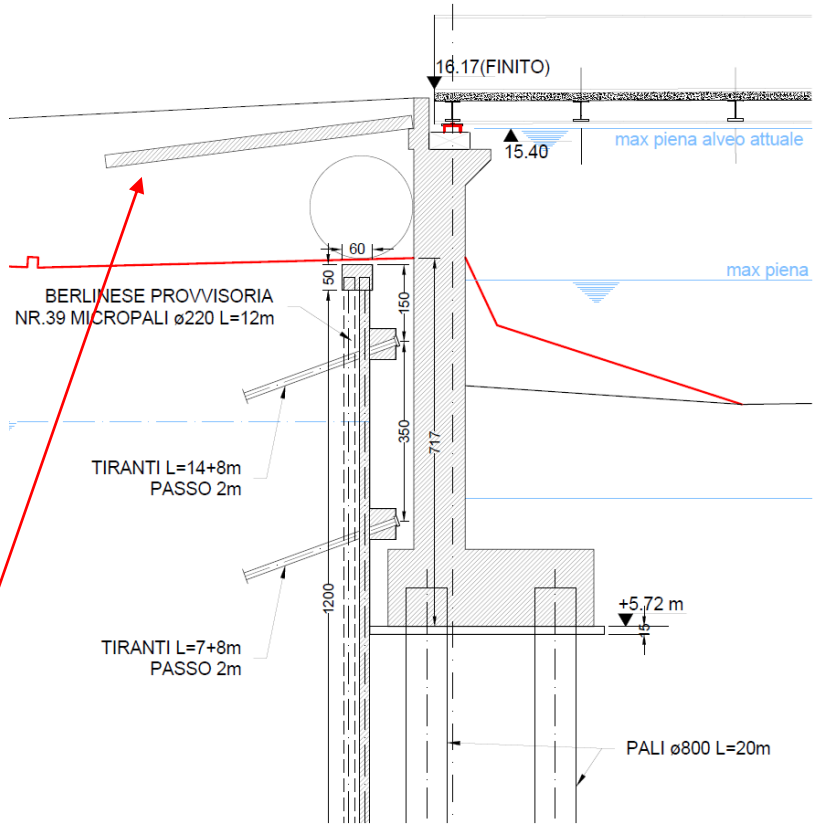
PROBLEMI DOVUTI ALLO SMALTIMENTO DELLE ACQUE PIOVANE

Mancanza di pulizia delle griglie raccolta acque e dei bocchettoni sulla carreggiata

Tubi di evacuazione troppo corti, scolo e danno sulla soletta

Necessità di pulizia griglie, manutenzione e sostituzione tubi di evacuazione

PROBLEMI AI RILEVATI DI ACCESSO: CEDIMENTI



Mancanza di soletta di transizione tra rilevato e spalla e conseguenti cedimenti

PROBLEMI CONSEGUENTI AI CEDIMENTI:

Dislivello di 10 cm: urto dinamico ed incremento del danno

Dislivello di 5 cm sulla pista ciclabile e disagio per gli utenti

PRESCRIZIONI DOPO VERIFICA ISPETTIVA

Considerato il livello di danno riscontrato, si prescrivono vari interventi classificabili in:

- **Urgenti**: devono essere progettati ed eseguiti nell'arco di pochi mesi perché possono pregiudicare la stabilità o la vita utile del ponte
- **Programmabili**: devono essere comunque programmati ed eseguiti entro due anni per il corretto funzionamento del ponte ed il suo futuro servizio.

INTERVENTI URGENTI:

1. Riparazione della protezione di tutti i giunti dell'arco (spazzolatura meccanica e verniciatura)
2. Rifacimento impermeabilizzazione di tutti gli inserimenti funi nell'impalcato
3. Sigillatura delle guarnizioni tra funi di sospensione e coni protettivi
4. Riparazione della protezione di tutti gli apparecchi di aggancio inferiori delle funi (spazzolatura meccanica e verniciatura)
5. Riparazione cassette del sistema illuminante ed impermeabilizzazione di tutti i pozzetti
6. Riparazione protezione interna dei due conci di testa del cassone (spazzolatura meccanica e verniciatura)
7. Sostituzione integrale dei giunti stradali, con modelli di pari escursione e raccolta d'acqua fuori dalle zone di scolo
8. Riparazione della protezione dei traversi di testa (spazzolatura meccanica e verniciatura)
9. Riparazione del danno nelle spalle in calcestruzzo (idropulizia, passivazione armature, ricostruzione copriferri e trattamento anticarbonatazione)
10. Consolidamento del baggiolo ed inghisaggio dell'appoggio fisso in spalla destra
11. Pulizia griglie smaltimento acqua, rifacimento tubi di scolo ed impermeabilizzazione
12. Riparazione del danno all'intradosso soletta nelle zone di scolo (picchettatura, passivazione armature, ricostruzione copriferri)
13. Passivazione armature esposte sui marciapiedi
14. Impermeabilizzazione generale di marciapiedi e spartitraffico centrale con "poliurea"
15. Ripristino zona di transizione tra rilevati e spalle con realizzazione di misto cementato e rifacimento pavimentazione

INTERVENTI PROGRAMMABILI:

1. Ricoprimento di tutta la superficie verniciata
2. Spazzolatura e verniciatura di tutti i giunti principali interni al cassone
3. Controllo funi da parte della ditta esecutrice “Tensoteci”: tesatura, valutazione stato di conservazione testa filettata inferiore, realizzazione di fori di scolo acque nel dado di blocco del capocorda regolabile inferiore

CRITICITA’ SPECIFICHE DEI PONTI IN ACCIAIO

ing. Luca ROMANO – STUDIO ROMANO – ALBENGA - www.studioromano.org - luca@studioromano.org