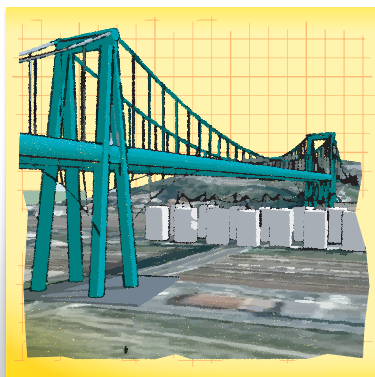


Antonio Cirillo

PONTI

PROGETTAZIONE, TIPOLOGIE, ELEMENTI

AGGIORNATO ALLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI 2018,
ALLA RELATIVA CIRCOLARE APPLICATIVA N. 7 DEL 21 GENNAIO 2019 E AGLI EUROCODICI



SOFTWARE INCLUSO
IN VERSIONE DESKTOP E WEBAPP

CALCOLO DI UN PONTE PEDONALE IN LEGNO CON DUE TRAVI PARALLELE

Glossario (termini più ricorrenti sull'argomento), **FAQ** (risposte alle domande più frequenti),
Test (verifiche sulla conoscenza dell'argomento)




GRAFILL

Antonio Cirillo

PONTI. PROGETTAZIONE, TIPOLOGIE, ELEMENTI

Ed. I (03-2019)

ISBN 13 978-88-277-0035-8

EAN 9 788827 700358

Collana **Manuali** (238), versione eBook

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313 – Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

CONTATTI IMMEDIATI



ProntoGRAFILL
Tel. 091 226679



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
grafill.it/telegram

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

SOMMARIO

PREFAZIONE	p.	13
INTRODUZIONE	"	15
– 1. Generalità	"	15
– 2. Classificazione dei ponti	"	16
– 3. Progettazione olistica e <i>conceptual design</i> per i ponti.....	"	17
– 4. Normativa di riferimento.....	"	19
– 5. Tipi di ponti in base al materiale utilizzato	"	20
– 6. Progettare un ponte	"	20
– 7. La scelta del tipo di ponte	"	21
– 8. Nomenclatura	"	22
 1. SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE	"	25
1.1. Introduzione.....	"	25
1.2. Principi fondamentali [§ 2.1 NTC2018]	"	26
1.3. Requisiti delle opere strutturali [§ 2.2 NTC2018].....	"	27
1.4. Valutazione della sicurezza [§ 2.3 NTC2018].....	"	29
1.5. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento [§ 2.4 NTC2018]	"	30
1.6. Azioni sulle costruzioni [§ 2.5 NTC2018]	"	31
1.7. Azioni nelle verifiche agli stati limite [§ 2.6 NTC2018].....	"	35
1.8. Verifiche alle tensioni ammissibili	"	36
1.9. Appendice a commento	"	36
 2. PONTI STRADALI [§ 5.1 NTC2018] CON INDICAZIONI DELLA C.M. N. 7/2019, ISTRUZIONI DELLA C.M. N. 34233/1991 E COMMENTI DELL'AUTORE	"	44
INTRODUZIONE [§ C1 – C.M. N. 7/2019]	"	44
PONTI [§ C5 – C.M. N. 7/2019]	"	44
PONTI STRADALI [§ 5.1 NTC2018]	"	45
– Oggetto [§ 5.1.1 NTC2018]	"	45
– Prescrizioni generali [§ 5.1.2 NTC2018]	"	45
– Azioni sui ponti stradali [§ 5.1.3 NTC2018]	"	52
– Verifiche di sicurezza [§ 5.1.4 NTC2018]	"	72

– Strutture portanti [§ 5.1.5 NTC2018]	p.	82
– Vincoli [§ 5.1.6 NTC2018]	"	84
– Opere accessorie [§ 5.1.7 NTC2018]	"	87
3. CARICHI SUI PONTI DA EC1	"	94
3.1. Nomenclatura relativa al ponte	"	94
3.2. Azioni	"	95
3.3. Divisione della carreggiata in corsie convenzionali [4.2.3. EC1]	"	95
3.4. Carichi sui ponti	"	96
3.4.1. Carichi verticali	"	96
3.5. Forze orizzontali [4.4 EC1]	"	100
3.6. Gruppi di carico da considerare in progetto per ponti stradali [4.5 EC1]	"	101
3.7. Combinazione di azioni	"	102
3.8. Combinazione di azioni allo SLE	"	103
3.9. Modelli di carico per fatica [4.6 EC1]	"	104
3.10. Modelli di carico per fatica	"	105
3.11. Azioni accidentali [4.7 EC1]	"	108
3.12. Azioni sui parapetti [4.8 EC1]	"	109
3.13. I modelli di carico sui rilevati [4.9 EC1]	"	110
3.14. Ponti pedonali o passerelle	"	110
3.14.1. Basi di calcolo	"	110
3.14.2. Azioni sui ponti pedonali (azioni sui ponti pedonali e sulle zone per pedoni e cicli)	"	110
4. INDICAZIONI DI CALCOLO	"	114
4.1. Premessa	"	114
4.2. Linee di influenza	"	114
4.3. Progettazione ponti stradali	"	120
4.3.1. Sito	"	120
4.3.2. Analisi idraulica e idrogeologica	"	121
4.3.3. Analisi geotecnica	"	121
4.3.4. Progettazione preliminare	"	121
4.3.5. Progettazione ponte	"	122
4.3.6. Azioni	"	123
4.3.7. Verifiche	"	124
4.3.8. Il sisma	"	124
4.3.9. Cedimenti delle imposte e delle fondazioni	"	125
4.4. Ripartizione trasversale dei carichi (formula di Courbon)	"	125
4.4.1. Dall'intero impalcato a una singola trave	"	125
4.4.2. Tipologie di impalcato	"	126
4.4.2.1. Impalcato deformabile	"	126
4.4.2.2. Impalcato rigido	"	127

4.4.3.	Calcolo eccentricità ponte a 2 corsie.....	p.	130
4.4.4.	Esempio ponte di 1 ^a categoria due corsie e marciapiedi ponte stradale (unica categoria NTC2018).....	"	132
4.4.5.	Esempio ponte di 2 ^a categoria due corsie e marciapiedi [eliminato da NTC2018]	"	135
4.4.6.	Sintesi passaggio da impalcato a una trave	"	138
4.4.7.	Sintesi calcolo trave	"	141
4.5.	Calcolo sollecitazione solette.....	"	142
4.5.1.	Considerazioni generali.....	"	142
4.5.2.	Considerazioni specifiche rispetto ai carichi concentrati	"	142
4.5.3.	Carico tandem in movimento.....	"	143
4.5.4.	Calcolo sollecitazioni nella soletta con le superfici di influenza	"	145
5.	CALCOLO ELEMENTI STRUTTURALI	"	158
5.1.	Soletta di collegamento.....	"	158
5.1.1.	Verifica soletta impalcato in c.a.	"	158
5.2.	Traversi	"	160
5.3.	Spalle	"	163
5.3.1.	Condizioni di carico.....	"	163
5.4.	Appoggi (cenni).....	"	164
5.5.	Parapetti	"	165
5.5.1.	Calcolo montante	"	165
5.5.2.	Calcolo corrimano.....	"	166
6.	TIPOLOGIE DI PONTI	"	168
6.1.	Introduzione: ponte struttura spaziale.....	"	168
6.1.1.	Comportamento spaziale della piastra di impalcato	"	169
6.1.2.	Schemi nel piano come forti semplificazioni	"	169
6.2.	Ponti a travi semplicemente appoggiate	"	169
6.2.1.	L'elogio della struttura isostatica	"	169
6.2.2.	Solettone semplice	"	170
6.2.3.	Travi parallele semplicemente appoggiate	"	170
6.2.4.	Ponte con "sedie laterali"	"	171
6.2.5.	Travi rese isostatiche.....	"	171
6.3.	Travi continue	"	172
6.3.1.	Trave su tre appoggi.....	"	172
6.3.2.	Trave su quattro appoggi.....	"	174
6.4.	Ponti a telaio	"	174
6.4.1.	Telaio a tre cerniere.....	"	175
6.4.2.	Telaio a due cerniere	"	175
6.4.3.	Telaio a due cerniere con travi a sbalzo	"	176
6.4.4.	Ponti a telaio incastrati al piede	"	177
6.4.5.	Ponte a telaio semplice aperto.....	"	178

6.4.6.	Ponte a telaio aperto detto “a cavalletto”	p.	180
6.4.7.	Ponte a telaio doppio	”	183
6.4.8.	Ponte a telaio triplo	”	184
6.4.9.	Ponte a telaio multiplo	”	185
6.4.10.	Ponti a telaio chiuso	”	185
6.5.	Ponte con pila raddoppiata	”	186
6.6.	Ponte reticolare	”	186
6.7.	Ponti ad arco	”	187
6.7.1.	Arco a tre cerniere	”	188
6.7.2.	Arco a due cerniere	”	188
6.7.3.	Schema statico ad arco incastrato	”	189
6.7.4.	Arco ideale	”	189
6.7.5.	Ponte ad arco a via inferiore	”	190
6.7.6.	Esempi di ponti ad arco a via inferiore	”	192
6.7.7.	Esempi di ponti ad arco a via superiore	”	194
6.7.7.1.	Ponte a tre cerniere	”	194
6.7.7.2.	Ponte a due cerniere	”	194
6.7.7.3.	Ponte a con doppie cerniere terminali	”	195
6.7.8.	Ponte ad arco a via superiore	”	196
6.7.8.1.	Esempi ponti ad arco a via superiore	”	197
6.7.9.	Ponte ad arco a via intermedia	”	198
6.7.9.1.	Esempi di ponti ad arco a via intermedia	”	199
6.8.	Ponti sospesi	”	200
6.8.1.	Brevetto dell’autore	”	204
6.8.2.	Esempi di ponti sospesi	”	207
6.9.	Ponti strallati	”	212
6.9.1.	Funzionamento statico	”	212
6.9.2.	Ponte di Morandi sul Polcevera a Genova	”	213
6.9.3.	Ponti strallati simmetrici con diversa orditura degli stralli	”	215
6.9.4.	Esempi di ponti strallati	”	217
6.9.5.	Ponte strallato con telaio	”	222
6.10.	Ponti levatoi	”	223
6.11.	Ponti girevoli	”	224
7.	APPARECCHI DI APPOGGIO	”	225
7.1.	Tipi di appoggio in base al funzionamento statico	”	225
7.1.1.	Schemi statici	”	225
7.1.2.	Funzione di vincolo	”	227
7.2.	Tipi di appoggio in base al materiale	”	227
7.2.1.	Apparecchi di appoggio in acciaio	”	227
7.2.2.	Appoggi in elastomero armato	”	231
7.2.3.	Appoggi in elastomero armato e contenitore in acciaio	”	232
7.2.4.	Apparecchi di appoggio in cemento armato	”	233

8. GIUNTI DI DILATAZIONE	p.	235
8.1. Tipi di giunti di dilatazione	"	237
9. TOMBINI	"	239
9.1. Tipologia di tombini	"	239
9.1.1. Tombino circolare	"	239
9.1.2. Tombino rettangolare	"	239
10. PILE	"	240
10.1. Tipi di sezioni	"	240
10.2. Tipi di schemi statici	"	241
10.3. Tipi di disposizioni trasversali	"	244
10.4. Pile a telaio	"	245
10.5. Tipi di forme	"	246
11. SPALLE	"	249
11.1. Tipi di spalle	"	250
12. PARTICOLARI DEL PONTE	"	252
12.1. Bordi ponte	"	252
12.2. Parapetti	"	254
12.3. Correzione nel rilevato	"	254
13. TRAVERSI	"	256
13.1. Disposizione traversi	"	256
13.2. Posizione traverso	"	256
14. SISTEMI COSTRUTTIVI	"	258
14.1. Costruzione ponti gettati in sito	"	258
14.2. Costruzione ponti con elementi prefabbricati	"	259
14.2.1. Varo di intere travi	"	259
14.3. Costruzione ponti con elementi a sbalzo	"	260
14.3.1. Avanzamento a sbalzo con travi di servizio montate per "conci".....	"	260
14.3.2. Avanzamento a sbalzo con gettate di calcestruzzo in sito	"	261
14.4. Costruzione ponti particolari	"	262
14.4.1. Sistemi costruttivi particolari	"	262
14.5. Considerazioni sui getti in opera	"	263
14.6. Considerazioni sulle sollecitazioni in corso d'opera	"	264
15. PONTI IN ZONA SISMICA		
NTC 2018 DI CUI AL D.M. 17 GENNAIO 2018 E C.M. N. 7/2019	"	265
15.1. PONTI [§ 7.9 NTC2018]	"	265
15.1.1. Campo di applicazione [§ 7.9.1 NTC2018]	"	265

15.1.2.	Criteri generali di progettazione [§ 7.9.2 NTC2018]	p.	265
15.1.3.	Modello strutturale [§ 7.9.3 NTC2018]	"	268
15.1.4.	Analisi strutturale [§ 7.9.4 NTC2018]	"	269
15.1.5.	Dimensionamento e verifica degli elementi strutturali [§ 7.9.5 NTC2018]	"	271
15.1.6.	Dettagli costruttivi per elementi in calcestruzzo armato [§ 7.9.6 NTC2018]	"	277
15.2.	Ponti con isolamento e/o dissipazione [§ 7.10 NTC2018]	"	281
15.2.1.	Scopo [§ 7.10.1 NTC2018]	"	282
15.2.2.	Requisiti generali e criteri per il loro soddisfacimento [§ 7.10.2 NTC2018]	"	283
15.2.3.	Caratteristiche e criteri di accettazione dei dispositivi [§ 7.10.3 NTC2018]	"	283
15.2.4.	Indicazioni progettuali [§ 7.10.4 NTC2018]	"	283
15.2.5.	Modellazione e analisi strutturale [§ 7.10.5 NTC2018]	"	285
15.2.6.	Verifiche [§ 7.10.6 NTC2018]	"	289
15.2.7.	Aspetti costruttivi, manutenzione, sostituibilità [§ 7.10.7 NTC2018]	"	290
15.2.8.	Accorgimenti specifici in fase di collaudo [§ 7.10.8 NTC2018]	"	291
15.3.	Commento da Circolare esplicativa n. 7/2019	"	291
16.	PROGETTO PONTE «RINASCITA»	"	306
16.1.	Analisi stato di fatto	"	306
16.2.	Progetto <i>Rinascita</i>	"	308
16.3.	Ponte <i>Rinascita</i> : il progetto	"	309
16.4.	Prima pila	"	310
16.5.	Seconda pila	"	311
16.6.	Viadotto esistente messo in sicurezza	"	311
16.7.	Costruzione veloce e montaggio agevole	"	312
16.8.	Protezione case non demolite	"	313
16.9.	No al viadotto	"	314
17.	PONTI IN LEGNO	"	315
17.1.	Storia	"	315
17.1.1.	Il ponte sul Reno	"	315
17.2.	Ponti in legno attuali	"	317
17.3.	Tipologie di ponti in legno	"	318
17.3.1.	Ponticelli in legno a travi parallele	"	318
17.3.2.	Ponticelli in legno con travi e saettoni	"	319
17.3.3.	Ponticelli in legno con travi irrobustite da sottotravi e saettoni	"	322
17.3.4.	Ponticelli in legno irrobustiti con tirante e contraffisso	"	323
17.3.5.	Ponticelli in legno irrobustiti con tirante e due contraffissi	"	325

18. IL SOFTWARE INCLUSO

(IN VERSIONE DESKTOP E WEBAPP)	p.	328
18.1. Note sul software incluso.....	"	328
18.2. Requisiti hardware e software.....	"	329
18.2.1. Utenti software Desktop.....	"	329
18.2.2. Utenti WebApp.....	"	329
18.3. Richiesta della password di attivazione del software	"	329
18.4. Installazione ed attivazione del software Desktop (utenti MS Windows).....	"	329
18.5. Utilizzo della WebApp.....	"	330
18.6. Assistenza tecnica (<i>TicketSystem</i>).....	"	330
18.7. Stampe	"	331

PREFAZIONE

*Che sempre ci sia un ponte
tra mondi diversi
che permetta uno scambio
che unisca le strade
che consenta un legame
che porti la pace
ma soprattutto che possa far capire
che quelli dall'altra parte, alla fin fine,
non sono che come noi.*

«Costruire ponti, reali o ideali, è la più bella opera dell'uomo»

Scrivere un libro sui ponti è il sogno di tanti progettisti. Sono diversi anni che sto redigendo questa opera, che nel tempo è divenuta sempre più complessa. Purtroppo non ho avuto occasione di progettare ponti e non mi sono mai legato troppo a politici e cordate potenti. Questo mi ha naturalmente escluso a priori, ma proprio per questo i ponti che ho progettato solo all'università di Pisa con il prof. Bartelletti, sono rimasti in un ambito di sogno irraggiungibile. Non sono molti i libri sui ponti e spesso sono impostati come un *catalogo* di opere realizzate, corredate da scarse indicazioni sul come l'opera "funzioni", corredando il tutto con analisi numeriche.

Io ritengo, invece, che sia importantissimo che il progettista comprenda il funzionamento dell'opera, le motivazioni che conducono a una soluzione piuttosto che a un'altra, i costi di costruzione e quelli di manutenzione.

Il fine che mi prefiggo è di trasferire al progettista, al verificatore, al semplice utente che attraversa un ponte, la comprensione dell'opera che si attraversa nei suoi aspetti tecnici, funzionali ed economici.

Il ponte non è un'opera qualsiasi, è un'opera di grande importanza per i trasporti, per i collegamenti, per la sicurezza, per il tessuto sociale stesso, per i rapporti che riescono a instaurarsi tra le persone con la presenza del collegamento realizzato dal ponte e che si interrompono bruscamente senza di esso.

La progettazione dei ponti è molto complicata e pochi sono i progettisti che riescono a eseguire un buon progetto; il lavoro non è banale e necessita di grande coraggio, preparazione tecnica e capacità artistiche al fine di ottenere un'opera funzionale, esteticamente gradevole e durevole nel tempo. Il rischio di crisi o di collasso incombe sempre sull'opera, vulnerabile ad alluvioni e sismi, soprattutto per opere con fondazioni in alveo.

Il progetto di un ponte deve basarsi sui concetti di "*capacity design*": resistente e in grado di incassare distorsioni; esso, in altre parole, deve essere capace di resistere alle importanti azio-

ni del traffico ma anche ad essere capace di sopportare le distorsioni istantanee sotto carico, le distorsioni viscosi nel tempo, le azioni dinamiche indotte dai carichi in movimento, le distorsioni indotte dallo scalzamento delle basi su cui appoggia il ponte stesso. Il ponte è un'opera esposta alle intemperie, all'inquinamento del traffico e all'azione erosiva del corso d'acqua che eventualmente scavalca, per cui grande attenzione deve essere data ai materiali, ai collegamenti, ai particolari costruttivi affinché si addivenga a soluzioni che non si deteriorino nel tempo, che siano di agevole manutenzione, che siano in sintesi "durevoli".

L'attenzione sulla capacità distorsiva è recente, resa esplicita solo nelle ultime norme tecniche. La capacità di incassare distorsioni dagli elementi di un ponte in genere è stata implicitamente considerata dal progettista, ma che in taluni casi, precompresso in primis, ha comportato auto-distorsioni interne amplificate nel tempo che hanno indotto notevoli problemi di stabilità e manutenzione alle opere realizzate.

Il testo della presente pubblicazione è aggiornatissimo e in linea con gli Eurocodici, le NTC 2018 e la recentissima circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. recante «*Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*» pubblicata sulla *Gazzetta Ufficiale* 11 febbraio 2019, n. 35 – Suppl. Ord. n. 5.

INTRODUZIONE

1. Generalità

Il ponte non è solo una struttura. Il ponte è il meraviglioso collegamento di due rive opposte, separate da un corso d'acqua o da un ostacolo importante.

Senza il ponte le due rive non sarebbero unite, esso si trasforma in un collegamento nuovo, sociale, carico di volontà politiche foriero di una forte potenziale di unione tra i popoli.

Il ponte è da sempre considerato un'opera "speciale"; tecnicamente definita in una strada come "opera d'arte". Il ponte classico è quello che scavalca un ostacolo altrimenti insormontabile, quale una vallata o un fiume permettendo la continuazione di una strada.

La forma del ponte è strettamente collegata alle capacità dei costruttori ma anche dei materiali utilizzabili, alle tecniche disponibili, allo stato dell'arte. Dato che l'opera è molto importante nelle varie epoche vi sono state "mode" varie che hanno portato a serie di prodotti simili ad altri già realizzati, al fine di "rassicurare" committenti, utenti, esecutori.



Fig. 01. *Il ponte tra Buda e Pest è un esempio di unione di due città*

Volendo continuare a sottolineare l'importanza del ponte si cita quello sul Danubio tra Buda e Pest, che di fatto ha reso possibile la formazione dell'attuale Budapest.

Un esempio "simbolico" importante è il ponte di Mostar, esempio di collegamento tra persone di religione diversa che possano "interfacciarsi" e convivere. Molto antico, è un esempio di

pon- te ad arco in pietra, bom- bardato è stato ricostruito simile al precedente, a dimostrazione che diritti e convivenza possano vincere la barbarie.

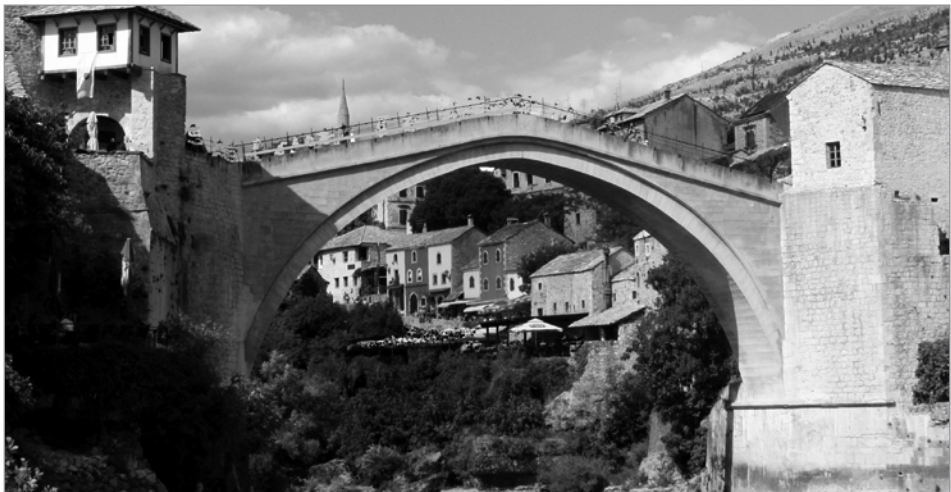


Fig. 02. Il ponte Mostar, bombardato e ricostruito, è un simbolo di pace e di guerra

Il breve excursus precedente è solo teso a sottolineare alcuni aspetti, non secondari, che possono affiancare un ponte e trasformarlo in un’opera veramente importante, simbolicamente e dal punto di vista funzionale.

2. *Classificazione dei ponti*

Ponte è una parola che designa una molteplicità di soluzioni, accomunate dalla funzione di “portare” una strada oltre un ostacolo.

La classificazione può racchiudersi nel quadro sintetico seguente.

In funzione dell’ostacolo da superare	– Ponte: si sviluppa sopra un corso d’acqua – Viadotto: in presenza di vallate o gole montagnose, spesso con travi in successione – Sopraelevata: rientra tra i viadotti, realizzato nei centri urbani come strada a scorrimento veloce – Cavalcavia: attraversa a quota superiore una strada d’importanza secondaria
In funzione della destinazione	– Ponte stradale: adibito al traffico veicolare – Ponte ferroviario: adibito al traffico ferroviario – Ponte misto: adibito al traffico promiscuo stradale e ferroviario – Ponte canale: permettono il trasporto di un liquido – Passerella pedonale: adibito al solo traffico pedonale
In funzione del materiale utilizzato	– Ponte in muratura: realizzato in pietrame o mattoni – Ponte in legno – Ponte in acciaio, in acciaio e calcestruzzo, in alluminio – Ponte in cemento armato

[segue]

SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

1.1. Introduzione

Il fine del progetto è avere una struttura adatta all'uso nello scenario di esercizio e pronta al peggio in una situazione eccezionale. La moderna progettazione si basa sul *capacity design*.

Progettare con il *capacity design* vuol dire configurare una struttura in modo che essa presenti una idonea capacità resistente e una sufficiente capacità distorsiva.

Capacità resistente

Per controllare se in una certa zona la struttura ha una sufficiente capacità resistente *di progetto* nello scenario con le combinazioni di carico imposte dalle norme si ottengono effetti di progetto E_d che devono essere comparati con gli effetti di calcolo massimi che in quella zona la struttura è in grado di incassare in situazione di sicurezza, ovvero con la resistenza di calcolo R_d .

Il sottoscritto preferisce descrivere la situazione che scaturisce dal confronto con il *LCR* dato in percentuale:

Livello di cemento relativo

$$LCR = E_d / R_d = \zeta^{-1}$$

In questo modo si visualizza immediatamente il livello di cemento; 50% vuol dire che gli effetti possono crescere ancora fino a raddoppiare, per raggiungere il 100%.

Le norme NTC2018 hanno introdotto in sordina un rapporto inverso:

Livello o fattore di sicurezza

$$\zeta = R_d / E_d$$

Capacità distorsiva

Gli effetti distorsivi di progetto e_d devono essere minori degli effetti di calcolo massimi (resistenti) che in quella zona la struttura è in grado di incassare in situazione di sicurezza, ovvero con la resistenza distorsiva di calcolo r_d .

Il sottoscritto preferisce descrivere la situazione che scaturisce dal confronto con il *LCD* dato in percentuale:

Livello distorsivo relativo

$$LDR = e_d / r_d = \zeta_D^{-1}$$

In questo modo si visualizza immediatamente il livello di cemento distorsivo; 50% vuol dire che gli effetti distorsivi possono crescere ancora fino a raddoppiare, per raggiungere il 100%.

Il rapporto inverso seguendo la capacità resistente:

Livello o fattore di sicurezza distorsivo

$$\zeta_D = r_d / e_d$$

Un sistema strutturale è in sicurezza se il livello di distorsione o di cemento distorsivo che lo impegna è sufficientemente al di sotto del livello di distorsione sopportabile, o distorsivo.

Citando con e_d la distorsione, o effetto di progetto e con r_d la distorsione resistente di progetto si conclude che la struttura è in sicurezza distorsiva se: $e_d \leq r_d$.

1.2. Principi fondamentali

[§ 2.1 NTC2018]

Le opere e le componenti strutturali devono essere progettate, eseguite, collaudate e soggette a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalle presenti norme.

La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale di progetto. Si definisce stato limite una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze elencate nelle presenti norme.

In particolare, secondo quanto stabilito nei capitoli specifici, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- *Sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)*: capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;
- *Sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE)*: capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;
- *Sicurezza antincendio*: capacità di garantire le prestazioni strutturali previste in caso d'incendio, per un periodo richiesto;
- *Durabilità*: capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione;
- *Robustezza nei confronti di azioni eccezionali*: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti.

- Requisiti di una struttura:
 - RESISTENTE E DUTTILE allo SLU
 - ACCETTABILE allo SLE
 - ROBUSTA
 - DUREVOLE

- La *robustezza* è una caratteristica particolare che vuole permettere alla struttura di trovare un suo nuovo equilibrio in casi di eventi eccezionali. Si deve evitare il crollo della struttura al mancare accidentale di qualche elemento strutturale. Si deve evitare il crollo *a castello di carte*, come quello avvenuto nel 1968 nel *Rouan point apartment building*; in tale evento, successivamente allo scoppio in un locale di un edificio a pannelli portanti, si verificò il crollo a catena di tutta l'ala interessata per l'intera altezza dell'edificio. Per i ponti si deve evitare che la crisi di una pila possa innescare un processo di crolli a catena.

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile. Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile.

Per le opere esistenti è possibile fare riferimento a livelli di sicurezza diversi da quelli delle nuove opere ed è anche possibile considerare solo gli stati limite ultimi (maggiori dettagli sono dati al capitolo 8 delle NTC2018).

PONTI STRADALI [§ 5.1 NTC2018]

CON INDICAZIONI DELLA C.M. N. 7/2019,

ISTRUZIONI DELLA C.M. N. 34233/1991 E COMMENTI DELL'AUTORE

INTRODUZIONE**[§ C1 – C.M. N. 7/2019]**

Il capitolo 5 delle NTC2018 disciplina i criteri generali e le indicazioni tecniche per la progettazione e l'esecuzione dei ponti stradali e ferroviari.

Per i ponti stradali, oltre alle principali caratteristiche geometriche, definisce le diverse possibili azioni agenti, con i diversi schemi di carico per quanto attiene le azioni variabili da traffico.

Per i ponti ferroviari particolare attenzione è posta sui carichi ed i relativi effetti dinamici. Particolari e dettagliate prescrizioni sono, poi, fornite per le verifiche, sia agli SLU che agli SLE.

PONTI**[§ C5 – C.M. N. 7/2019]**

Il capitolo 5 delle NTC2018 tratta i criteri generali e le indicazioni tecniche per la progettazione e l'esecuzione dei ponti stradali e ferroviari.

In particolare, per quanto attiene i ponti stradali, oltre alle principali caratteristiche geometriche, vengono definite le diverse possibili azioni agenti ed assegnati gli schemi di carico corrispondenti alle azioni variabili da traffico.

Gli schemi di carico stradali e ferroviari da impiegare per le verifiche statiche e a fatica sono generalmente coerenti con gli schemi della UNI EN 1991-2 (EC1.2), cui si può far riferimento per aspetti di dettaglio particolarmente specialistici non trattati nelle NTC.

I carichi da traffico per ponti stradali del modello principale sono indipendenti dall'estensione della zona caricata, includono gli effetti dinamici e sono indifferenziati per le verifiche locali e le verifiche globali, cosicché le possibili ambiguità e/o difficoltà applicative sono minimizzate.

Per i ponti stradali sono anche forniti appositi modelli di carico per il calcolo degli effetti globali in ponti di luce superiore a 300 m.

Per i ponti ferroviari particolare attenzione viene posta sui carichi ed i relativi effetti dinamici. Particolari e dettagliate prescrizioni vengono fornite per le verifiche, sia SLU che SLE.

I modelli di carico assegnati, sia per i ponti stradali sia per i ponti ferroviari, sono modelli ideali, intesi riprodurre gli effetti del traffico reale, caratterizzati da assegnato periodo di ritorno. Essi non sono pertanto rappresentativi di veicoli o convogli reali.

Si segnala ancora che i coefficienti parziali di sicurezza relativi ai carichi variabili da traffico sono minori di quelli pertinenti alle altre azioni variabili; infatti, il coefficiente γ_Q per le azioni da traffico stradale vale 1,35 per le combinazioni EQU e STR e 1,15 per la combinazione GEO, e il coefficiente γ_Q per le azioni da traffico ferroviario vale 1,45 per le combinazioni EQU e STR e 1,25 per la combinazione GEO.

[ISTRUZIONI C.M. N. 34233/1991; § 1.2]

Coordinamento con altre norme

Le presenti istruzioni, oltre ad essere coordinate con le norme tecniche emanate nell'ambito della legge 2-2-1974, n. 64 e della legge 5-11-1971, n. 1086, fanno riferimento anche alle vigenti norme del C.N.R. relative alle strade urbane ed alle strade extraurbane.

5.1. PONTI STRADALI**[§ 5.1 NTC2018]****● Oggetto****[§ 5.1.1 NTC2018]**

Il presente capitolo contiene i criteri generali e le indicazioni tecniche per la progettazione e l'esecuzione dei ponti stradali.

Nel seguito col termine *ponti* si intendono anche tutte quelle opere che, in relazione alle loro diverse destinazioni, vengono normalmente indicate con nomi particolari, quali: viadotti, sottovia o cavalcavia, sovrappassi, sottopassi, strade sopraelevate, ecc..

Le presenti norme, per quanto applicabili, riguardano anche i ponti mobili.

● Prescrizioni generali**[§ 5.1.2 NTC2018]****Commento dell'autore**

In sede di progetto vanno definite le caratteristiche generali del ponte, ovvero la sua localizzazione, la destinazione e la tipologia, le dimensioni principali, il tipo e le caratteristiche dei materiali strutturali impiegati ed il tipo delle azioni considerate ai fini del suo dimensionamento. In sede di realizzazione si accerterà che le modalità tecnico esecutive adottate nell'esecuzione dell'opera siano rispondenti alle assunzioni ed alle prescrizioni di Progetto ed alle specifiche di Capitolato¹.

○ Geometria della sede stradale**[§ 5.1.2.1 NTC2018]**

Ai fini della presente normativa, per larghezza della sede stradale del ponte si intende la distanza misurata ortogonalmente all'asse stradale tra i punti più interni dei parapetti.

La sede stradale sul ponte è composta da una o più carreggiate, eventualmente divise da uno spartitraffico, da banchine o da marciapiedi secondo l'importanza, la funzione e le caratteristiche della strada.

La superficie carrabile del ponte è composta dalla piattaforma e da eventuali marciapiedi sormontabili, ovvero di altezza inferiore a 20 cm e non protetti da barriere di sicurezza stradale o da altri dispositivi di ritenuta.

[ISTRUZIONI C.M. N. 34233/1991, § 2.1]

Geometria della sede stradale

La sede stradale deve essere progettata in accordo con quanto previsto dalle norme C.N.R. di cui al punto 1.2. Sui ponti deve essere di regola mantenuta la sezione stradale corrente, ivi comprese le pendenze trasversali, salvo quanto attiene ai marciapiedi, come successivamente indicato.

¹ L'osservazione riporta quanto citato nelle NTC2018, in quanto premessa utile per il progettista.

CARICHI SUI PONTI DA EC1

NORME EUROPEE CONTENUTE IN EUROCODICE 1

Nel seguito si fa riferimento alla UNI EN 1991-2, che tratta i carichi da traffico sui ponti e fa parte dell'Eurocodice 1 (EC1) che detta le basi di progettazione e azioni sulle strutture. Vengono illustrati i carichi previsti sui ponti stradali, ancora non recepiti dalla normativa italiana.

Per ogni approfondimento si rimanda al citato Eurocodice 1. Il testo espone le nuove impostazioni introdotte dalle norme europee, con riferimento ad un futuro, da considerarsi già un presente, che viaggia in parallelo alle normative nazionali.

I ponti possono essere pedonali, stradali e ferroviari; a seguire, i ponti pedonali verranno detti passerelle e i ponti stradali semplicemente ponti. I ponti ferroviari non sono trattati.

3.1. Nomenclatura relativa al ponte

Un ponte stradale consente ad una strada di scavalcare un ostacolo e di permetterne la continuità. La strada è caratterizzata da una carreggiata, limitata da cordoli (≥ 10 cm) o da barriere di sicurezza di larghezza W (Way); in pratica la carreggiata è la parte percorribile dai veicoli.

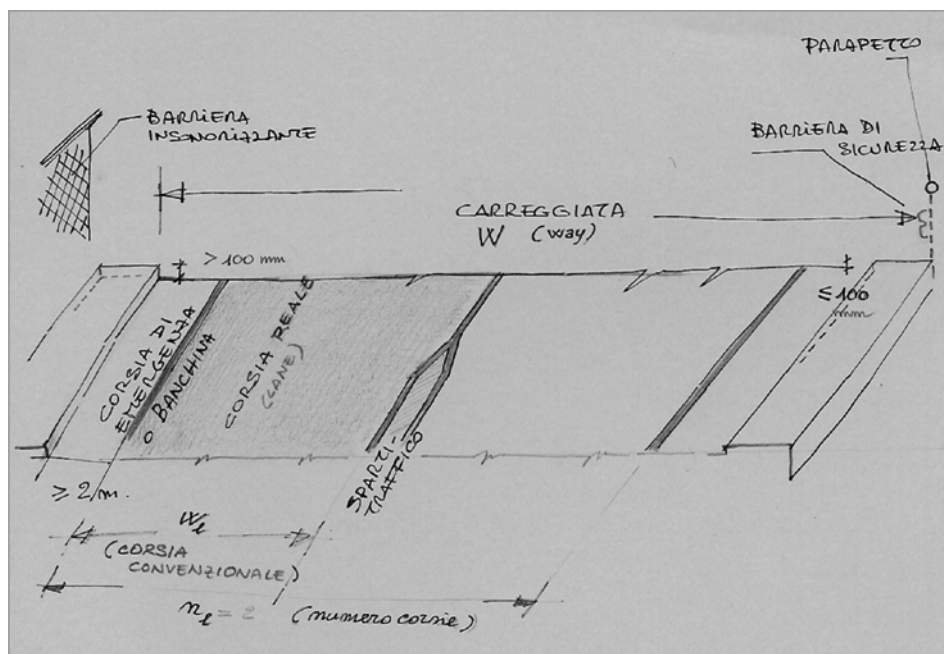


Fig. 3.1. Nomenclatura per un ponte stradale ad unica carreggiata

La carreggiata è divisa in ***corsie*** (*'lanes' larghe W_l*) che possono essere fisiche o reali (individuate dai tratteggi segnaletici del fondo stradale) e ***corsie convenzionali*** (che individuano strisce sulle quali potrebbero essere posizionati i modelli di carico che simulano una fila di veicoli).

Le banchine e le corsie di emergenza individuano strisce ≥ 2 m posizionate lateralmente alla carreggiata; le seconde sono destinate alla sosta in caso di emergenza.

3.2. Azioni

– Azioni variabili

I valori rappresentativi delle azioni vengono suddivisi in:

- Valori caratteristici (che presentano un'elevata probabilità di insistere sul ponte nel normale esercizio);
- Valori non frequenti (che hanno un periodo di ritorno di circa un anno);
- Valori frequenti (che hanno un periodo di ritorno settimanale);
- Valori quasi permanenti.

– Azioni accidentali

Sono azioni provocate da collisione o a seguito di eventi accidentali.

3.3. Divisione della carreggiata in corsie convenzionali

[4.2.3. EC1]

Nel seguito si riporta per le diverse larghezze della carreggiata w :

- La larghezza della corsia convenzionale w_l ;
- Il numero di corsie convenzionali n_l ;
- La larghezza della zona rimanente w_{rim} .

CORSIE CONVENZIONALI DA CONSIDERARE			
w	w_l	n_l	w_{rim}
$w < 5,4 \text{ m.}$	$w_l = 3 \text{ m.}$	$n_l = 1$	$w - 3 \text{ m.}$
$5,4 \leq w < 6 \text{ m.}$	$w_l = w/2$	$n_l = 2$	0
$w \geq 6 \text{ m.}$	$w_l = 3 \text{ m.}$	$n_l = \text{int.}(w/3)$	$w - 3n_l$

Fig. 3.2. Corsie convenzionali

La divisione in corsie convenzionali è fondamentale per lo studio del progetto di un ponte. L'analisi strutturale deve essere effettuata in modo da ottenere l'effetto più gravoso, facendo riferimento a ciascun tipo di verifica e per ciascuna corsia convenzionale.

INDICAZIONI DI CALCOLO

4.1. Premessa

Gli elementi portanti di un ponte sono interessati da carichi mobili, intensi per entità e posizionati in modo vario. Ogni sezione di una trave da ponte o di un altro elemento in generale deve essere analizzata nello scenario di massimo effetto indotto dai possibili carichi in transito.

Per addivenire al calcolo del massimo effetto in ogni sezione si ricorre alle linee di influenza, citate in modo semplificato nel presente capitolo. Tali diagrammi consentono di segnalare al progettista di volta in volta la posizione peggiore in cui posizionare e considerare i carichi mobili al fine di determinare le sollecitazioni massime assolute, evitando lunghi quanto inutili tentativi ottenuti con una successione di carichi posti in varie posizioni.

4.2. Linee di influenza

L'effetto di un carico mobile su una struttura è complesso da studiare poiché dipende dalla posizione e dalla forma del carico e dipende dalla sezione nella quale l'effetto viene considerato.

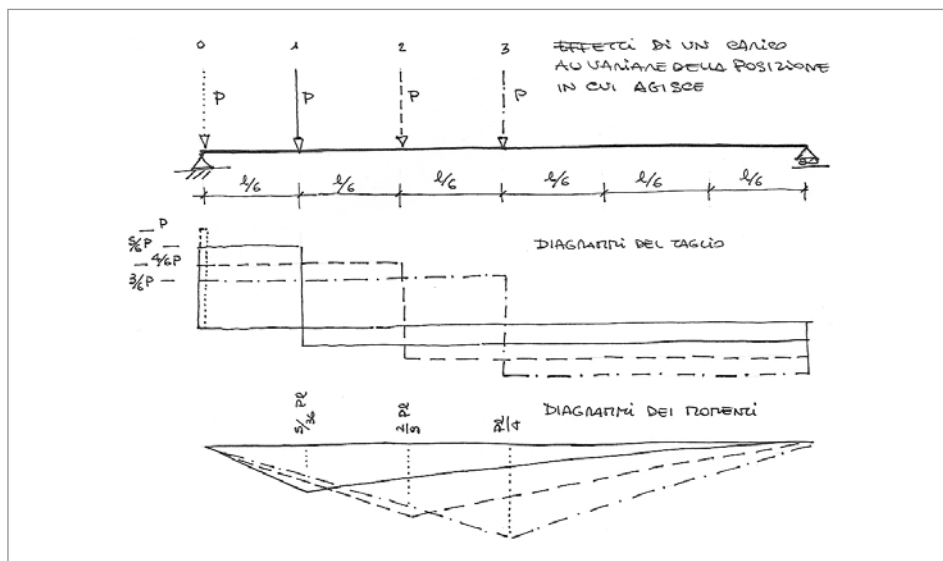


Fig. 4.1. Diagrammi del taglio e del momento al variare della posizione di un carico mobile

Nella figura 4.1 si analizzano i diagrammi del taglio e dei momenti al variare della posizione di un carico concentrato che si trova in 4 punti diversi di una trave semplicemente appoggiata.

Si evince che i diagrammi variano per ciascuna sezione in cui il carico possa agire, per cui non è pensabile il tracciamento in successione di tutti i diagrammi possibili che si individuano per tutte le possibili posizioni del carico.

L'effetto variabile che viene indotto in una certa sezione da un carico situato in una posizione generica può essere individuato con il tracciamento di particolari linee dette di influenza. Esse rappresentano all'incirca una deformata virtuale della struttura effettuata con particolari artifici allo scopo di ottenere un grafico che permetta di individuare l'effetto sulla sezione considerata di un carico situato in qualsiasi posizione.

• Trave semplicemente appoggiata

Al variare della posizione in cui P agisce i diagrammi delle sollecitazioni cambiano di forma. L'analisi è volta alla ricerca delle sollecitazioni più gravose che un carico che agisce su una trave possa provocare. Dato un carico il problema è in questo caso trovare in ogni sezione la posizione che provoca il taglio massimo possibile e il momento flettente massimo. I metodi sono due: o si opera per tentativi posizionando il carico in una serie di sezioni oppure si analizza il quadro della situazione con le linee di influenza.

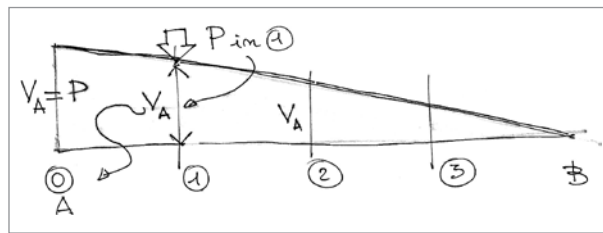


Fig. 4.2. Linea di influenza della reazione in A: la massima ordinata è pari a 1

Linea di influenza della reazione V_A

La linea di influenza è una rappresentazione grafica del valore che la reazione V_A assume al variare della posizione del carico. Fissata la sezione in cui si trova il carico P si può trovare la reazione come altezza (o ordinata) della linea di influenza, moltiplicata per P . Nel caso della reazione V_A si ha un massimo quando P è praticamente sull'appoggio (posizione 0), con $V_A = P$.

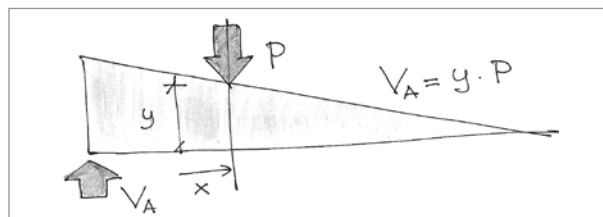


Fig. 4.3. Reazione che si calcola in A per il carico agente sulla sezione

Per una generica posizione a una generica ascissa x da B basta leggere l'ordinata sotto il carico P ; V_A risulta dal prodotto tra l'ordinata sotto il carico cui si fa riferimento per l'entità di P .

CALCOLO ELEMENTI STRUTTURALI

5.1. Soletta di collegamento

La soletta di cui si tratta è quella che collega le travi del ponte a travi parallele o i setti verticali di un ponte a cassone. La soletta è cimentata dalle azioni delle ruote che transitano, dal suo peso proprio in forma più blanda.

5.1.1. Verifica soletta impalcato in c.a.

La verifica della soletta va effettuata in modo rigoroso discretizzandola agli elementi finiti.

La soletta si comporta come una piastra solidarizzata alle travi o ai setti longitudinali e interagisce inoltre con i traversi sottostanti se essi sono solidarizzati alla soletta stessa. Un secondo metodo è quello di far riferimento a superfici di influenza di piastre di forma e vincoli perimetrali simili a quelli della soletta in oggetto. Le sollecitazioni sono ricavate come somme di singoli apporti, letti sulle superfici di influenza stessi, moltiplicati per l'entità del carico applicato.

Il metodo semplificato schematizza la soletta come un elemento sottile inflesso incastrato alle travi principali.

Il comportamento di una piastra a striscia indefinita si assimila in modo accettabile al comportamento di una soletta deformabile sono in direzione perpendicolare agli incastrati lunghi, per cui essa si può schematizzare come una trave piatta incastrata alle travi principali, senza incorrere in approssimazioni troppo evidenti. In pratica si trascura il contributo a piastra delle strisce adiacenti, con uno schema in pratica a favore della sicurezza.

La soletta che unisce le travi in c.a. è schematizzabile dunque come incastrata alle travi in c.a., o almeno l'appoggio può essere in ogni caso considerato un semincaastro.

Semplificando lo studio si considera la soletta come perfettamente incastrata.

I carichi imposti dalle norme sulla soletta sono: azione del traino e peso proprio.

Verifica con 2 ruote del tandem pari a 150 kN – amplificare $\times 1,35$ (I cat)¹

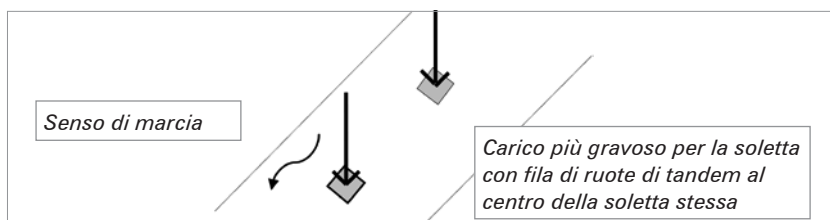


Fig. 5.1. Ruote di un tandem sulla soletta

¹ Per ex ponte di II categoria si ha invece $120 \times 1,35$.

La situazione di carico più gravosa per la sezione di mezzeria per la soletta considerata come una trave larga ordita in direzione ortogonale alle travi principali, è quella che sopporta le ruote del treno che transita su di essa.

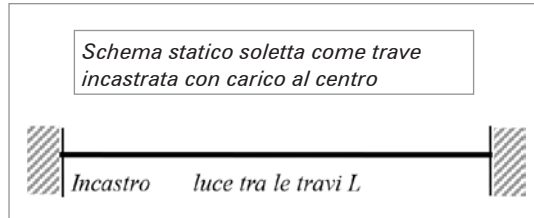


Fig. 5.2. Sollecitazione soletta

Diagramma dei momenti, con:

- $P_u = 2 Q_{kd}$
- $M_{\max} = P_u \cdot L / 10$

Fig. 5.2.a



Diagramma dei momenti indotto da:

- $g_u = 1,35 \cdot g$
- $M_{\max} = g_u L^2 / 24$
- $M_{\min} = g_u L^2 / 12$

Fig. 5.2.b



La striscia di soletta che si comporta come trave (la larghezza della trave in c.a. soggetta al carico delle ruote del treno) viene ricavata con l'ipotesi di ripartizione a 45° del carico e la larghezza diventa pari a $(1,2 m + L)$ e viene indicata con B, detta larghezza efficace.

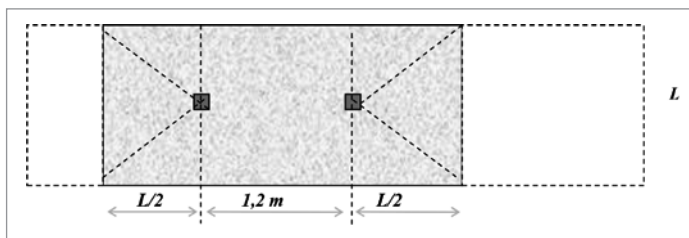


Fig. 5.3. Parte di soletta sollecitata da due ruote longitudinali di un tandem

Il momento dovuto al sovraccarico mobile deve essere sommato al momento indotto dal peso proprio della soletta e della pavimentazione.

Si determina il peso proprio globale g (carico al m^2 di soletta), si moltiplica per la larghezza resistente B citata in seguito e si ricava il carico distribuito al ml, indicato con g' .

A questo punto si schematizza la soletta come una trave continua appoggiata, incastrata o semi-incastrata alle travi.

Nella maggior parte dei casi la rigidezza flessionale della soletta è relativamente piccola rispetto alla rigidezza torsionale della trave e si può schematizzare il collegamento come incastrato

TIPOLOGIE DI PONTI

6.1. Introduzione: ponte struttura spaziale

Il ponte viene schematizzato e indicato in genere come una struttura nel piano. Si disegna in genere solo il profilo longitudinale dell'opera. Il profilo riveste effettivamente un'importanza molto elevata, ma la struttura è sostanzialmente spaziale.

La riduzione a una struttura piana è molto utile per il progettista e buona parte del calcolo avviene con riferimento alla struttura piana. Ma il progettista non deve mai dimenticare che la struttura è tridimensionale, anche se poi si avvale per il calcolo di schematizzazioni piane.

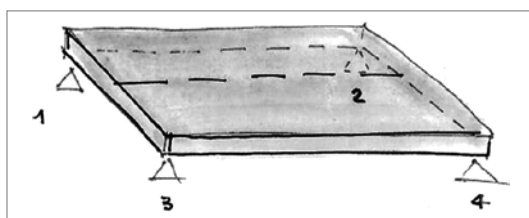


Fig. 6.1. Schema semplice ponte su 4 appoggi

Il ponte è una struttura spaziale. Tre appoggi sono lo stretto indispensabile per tener fermo il ponte; con 4 appoggi il ponte ha già un vincolo in più oltre l'isostaticità. L'appoggio in più crea dunque una iperstatica; tale evenienza comporta nella struttura e nei cimenti interni una interazione tra la deformazione della struttura e le reazioni degli appoggi. Si pensi per meglio comprendere che con 4 appoggi la situazione è simile a quella di un tavolo con 4 piedi. Spesso un piede non tocca terra, per cui con un carico ridotto il tavolo appoggia solo su tre piedi. Il quarto piede diventa efficace quando il carico aumenta, il piano si abbassa e tocca per terra anche il quarto piede. All'aumento del numero di appoggi il comportamento del ponte diviene sempre più complesso e sempre più difficile la valutazione di quanto porti ciascun vincolo sovrabbondante. Il crescere degli appoggi stabilizza il tutto ma rende la struttura sempre meno adattabile ai supporti.

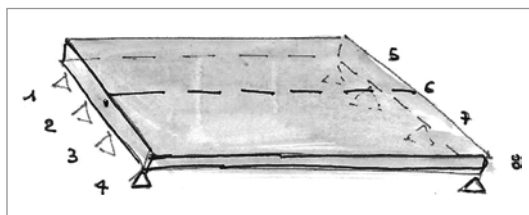


Fig. 6.2. Schema semplice ponte su 8 appoggi, sovrabbondanti

6.1.1. *Comportamento spaziale della piastra di impalcato*

Il comportamento della piastra dell'impalcato risente del numero e della posizione degli appoggi, dato che il carico *transita* nella piastra e fluisce agli appoggi, che interagiscono con essi. La struttura si stabilizza quando carichi, pesi propri e reazioni sono in equilibrio. La struttura della piastra si contorce e gli appoggi reagiscono meno o più a seconda del cimento che riescono a mettere in gioco.

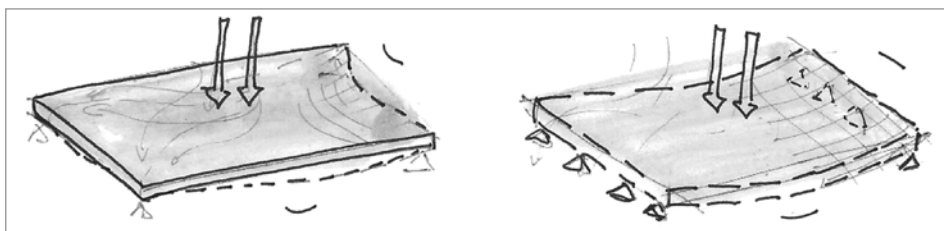


Fig. 6.3. *Flussi di tensione a seconda del numero degli appoggi*

La congruenza dei punti di vincolo e le iperstatiche interne della struttura, tipiche della struttura spaziale con incastri interni, portano a delle condizioni reali spesso poco decifrabili.

6.1.2. *Schemi nel piano come forti semplificazioni*

Le schematizzazioni seguenti, basate sulla forma della sagoma del ponte vista come una struttura piana verticale è in pratica alquanto schematica e va intesa come una semplificazione da considerare come tale. Il comportamento e lo schema va visto nel complesso della struttura spaziale.

Se le strutturali longitudinali sono sufficientemente interdipendenti tra loro la schematizzazione piana ha una sua valenza e trova un riscontro nella realtà. Se le parti schematiche sono interconnesse il funzionamento è spaziale e i risultati di calcoli nel piano possono essere sensibilmente diversi da quelli reali.

6.2. *Ponti a travi semplicemente appoggiate*

Il ponte con trave semplicemente appoggiata è quello più diffuso. Il successo di questo schema statico è soprattutto legato alla facilità con cui si costruisce. La trave si presta ad essere prefabbricata e poi varata e lo schema può essere ripetuto, come avviene nei viadotti.

Il semplice appoggio, con un appoggio mobile e uno fisso, consente di avere una struttura isostatica.

6.2.1. *L'elogio della struttura isostatica*

Una struttura isostatica è in grado di deformarsi sotto l'effetto di cedimenti differenziali degli appoggi, in modo agevole.

Al cedimento non si hanno delle contrazioni interne e il ponte trova una sua nuova dislocazione, con la trave leggermente inclinata, ma senza che in essa vi nascano effetti flettenti connessi al cedimento. Di contro una struttura iperstatica è vulnerabile nei confronti dei cedimenti differenziali e per questo deve essere studiata anche nello scenario di appoggi cedevoli.

APPARECCHI DI APPOGGIO

Gli apparecchi di appoggio realizzano nei ponti il vincolo di cerniera o di carrello. Essi devono rispondere alle NTC2018 (di cui al D.M. 17 gennaio 2018), alle norme UNI EN 1337 e per i dispositivi antisismici alle UNI EN 15129.

L'appoggio dei ponti deve essere in grado di trasferire alla struttura di supporto sottostante i carichi trasmessi dall'impalcato. I carichi trasmessi sono spesso rilevanti e impegnano notevolmente le parti demandate ad assolvere la funzione di appoggio.

L'appoggio nei ponti può essere realizzato a grandi linee in diversi modi; la sua progettazione e la sua verifica controlla che esso non collassi sotto l'azione di una combinazione eccezionale di carichi imposti al ponte e che consenta gli spostamenti necessari al buon funzionamento dell'opera. Se la struttura è isostatica gli appoggi devono consentire le deformazioni longitudinali indotte da precompressione, variazioni termiche o ritiro senza che nascano tensioni di coazione.

Nel caso di strutture iperstatiche gli appoggi devono resistere alle forze di coazione indotte dalle suddette sollecitazioni. L'appoggio deve risultare anche durevole, ovvero non deteriorarsi in modo sensibile nel corso della vita della struttura sostenuta; si richiede un costo di acquisto e messa in opera accettabile, unitamente ad un costo di manutenzione contenuto.

A seconda del materiale si possono avere apparecchi di appoggio realizzati con calcestruzzo, in acciaio o in gomma.

7.1. Tipi di appoggio in base al funzionamento statico

7.1.1. *Schemi statici*

Gli appoggi possono essere schematizzabili con incastro, cerniera o carrello.

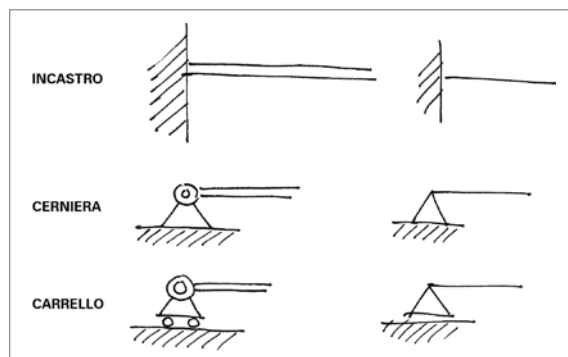


Fig. 7.1. Simboli per i tipi di appoggio

- **Collegamenti ad incastro**

Sono realizzati solidarizzando in modo completo fondazione e struttura, come avviene ad esempio nei ponti con spalle solidali all'impalcato, con pile incastrate e soprattutto come si verifica nell'attacco di ponti ad arco in c.a. incastrati alle estremità.

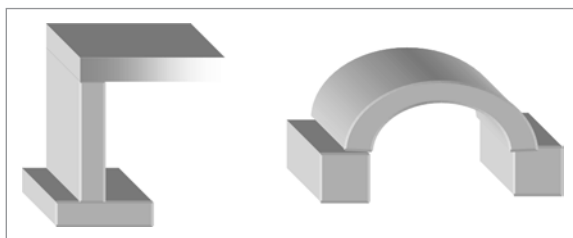


Fig. 7.2. *Esempi di incastro*

- **Collegamenti a cerniera e a carrello**

Questi tipi di appoggi consentono la rotazione dell'impalcato collegato e il carrello anche lo scorrimento sul piano di appoggio. Sono i vincoli più usati per i ponti in quanto consentono di avere parti scollegate, non sensibili ai cedimenti differenziali.



Fig. 7.3. *Appoggio a cerniera in acciaio a lavagna*



Fig. 7.4. *Bellinzona, particolare appoggio a calotta sferica, che funziona come una cerniera spaziale*

GIUNTI DI DILATAZIONE

L'impalcato del ponte è sottoposto a forti sbalzi di temperatura. La variazione termica induce sull'impalcato modifiche dimensionali. Un riscaldamento di 1 grado induce nel ponte un aumento nelle dimensioni di $1/100000$, valore pari al coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo e all'incirca pari a quello dell'acciaio. Per ogni grado di variazione termica un elemento di 1 m di lunghezza (1.000 mm) si allunga di $1/100$ mm.

Dato che lo sbalzo di temperatura cui un ponte è sottoposto si aggira intorno ai 40° si ottiene per ogni metro una variazione di lunghezza pari a $40/100$ di mm, pari a 0,4 mm.

Un ponte di 10 m varia di lunghezza tra inverno ed estate di circa 4 mm, mentre un ponte di 100 m ha una variazione di lunghezza complessiva di 4 cm e uno di mille ne ha una di 40 cm. La variazione di lunghezza deve essere permessa al ponte poiché un eventuale impedimento farebbe nascere all'interno della struttura delle enormi tensioni interne, valutabili approssimativamente come quelle indotte da forze tali da riaccorciare il ponte della variazione di lunghezza impedita.

A titolo di esempio per un ponte a solettone largo 9 e spesso 0,4 m di lunghezza 10 m, un eventuale impedimento della dilatazione conseguente ad una dilatazione termica che avrebbe provocato un allungamento di 0,5 cm provoca una forza sulle estremità pari a circa 5400 tonnellate. Infatti:

- Allungamento unitario $\varepsilon = \Delta l/l$; espresso in funzione della tensione: $\varepsilon = \sigma/E$, tenendo conto che per il calcestruzzo $E \approx 300000$ daN/cm²
- Tensione normale $\sigma = N/A$; ovvero $N/A = (\Delta l/l) \cdot E$ e quindi la forza connessa è: $N = (\Delta l/l) \cdot E \cdot A = (900 \cdot 40) (0.5/1000) 300000 = 5400000$ daN

Permettere al ponte una variazione di lunghezza è agevole a livello degli apparecchi di appoggio, in quanto basta che un appoggio sia scorrevole; consentire la variazione longitudinale di lunghezza del ponte comporta però una sconnessione terminale che interessa l'intero impalcato, ed in particolare la soletta e la pavimentazione.

Il giunto di dilatazione ha la funzione di consentire l'avvicinamento e l'allontanamento delle due parti di pavimentazione interrotte e nel contempo ha la funzione di rendere continua la pavimentazione. Il giunto avrà in generale una resistenza a taglio verticale notevole e una elasticità adeguata alla escursione estensimetrica da consentire all'impalcato.

Nelle seguenti figure 8.1 e 8.2 sono illustrati due tipi di giunti.

A sinistra si ha un giunto realizzato con denti metallici, detto a pettine, che consente movimenti relativamente elevati. A destra viene illustrato schematicamente un giunto realizzato in gomma, composto da neoprene armato con fili metallici. Il giunto in gomma permette delle escursioni estensimetriche fino a qualche centimetro.

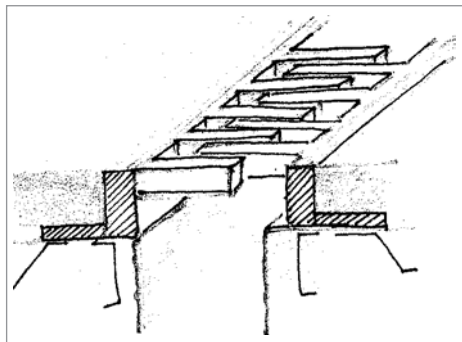


Fig. 8.1. *Giunto a pettine*

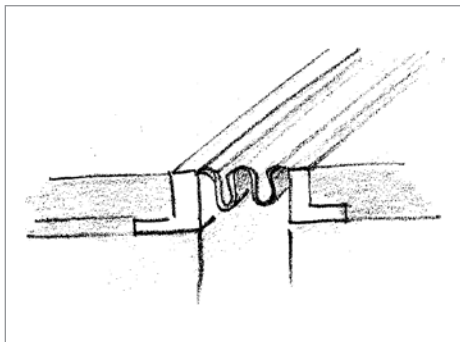


Fig. 8.2. *Giunto in gomma*

Il giunto in gomma più semplice, per strutture modeste di qualche metro di luce si può realizzare riempiendo con materiale plastico cedevole una intercapedine apposta tra soletta e spalla opportunamente lasciata.

Si consiglia di scorporare nel giunto la parte strutturale che è atta a sostenere la ruota del mezzo in transito e la parte elastica, che deve consentire la continuità del manto stradale; la parte elastica, cedevole per poter ottemperare alla sua funzione, deve essere opportunamente protetta da un elemento superficiale che abbia una buona continuità superficiale con la pavimentazione adiacente.

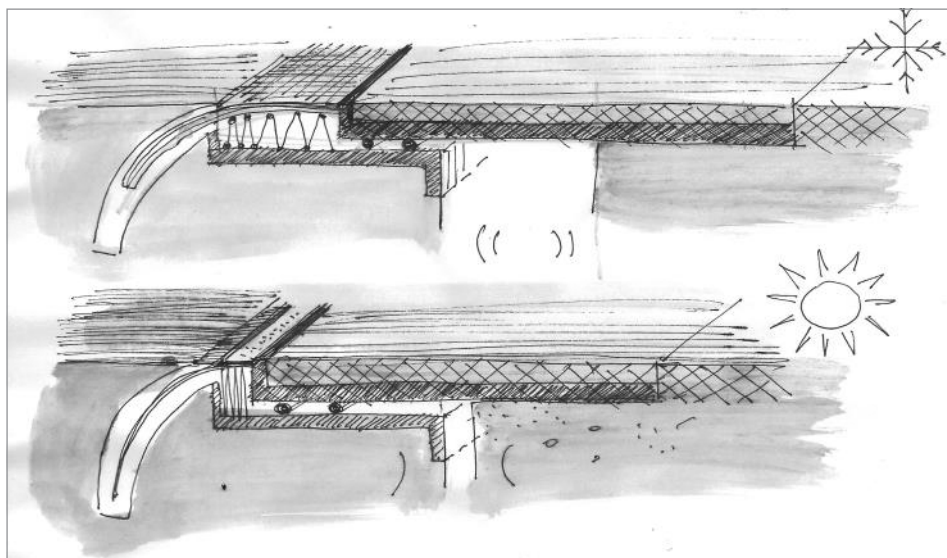


Fig. 8.3. *Giunto suggerito con una parte vincolata alla spalla e una parte libera di scorrere, con materiale elastico protetto da lastra metallica trattata superiore a scomparsa*

Se l'elemento portante ha su entrambe le parti materiale elastico si dimezza la corsa del materiale elastico e il giunto diviene più equilibrato.

TOMBINI

Si parla di tombini quando l'opera d'arte ha dimensioni esigue. In particolare si ha un tombino quando la strada scavalca un piccolo corso d'acqua o quando è necessario ricavare un piccolo attraversamento sotto il piano stradale.

Il tombino ha in genere una dimensione che varia tra 1,5 e 3 m e può avere una forma circolare o rettangolare.

9.1. Tipologia di tombini

9.1.1. *Tombino circolare*

In questo caso si realizza l'opera con un tubo in cemento prefabbricato o con un tubo realizzato piegando una lamiera ondulata in acciaio zincato.

La soluzione è relativamente economica e permette di far fluire sotto il piano stradale piccolissimi corsi d'acqua.

9.1.2. *Tombino rettangolare*

La struttura viene realizzata in genere in cemento armato ma potrebbe essere anche composta da strutture murarie con volta superiore e volta rovesciata come fondazione.

Il comportamento del tombino in oggetto è simile a quello di un ponte a telaio chiuso.

Il tombino permette non solo di far fluire piccoli corsi d'acqua ma anche di consentire il transito di pedoni.

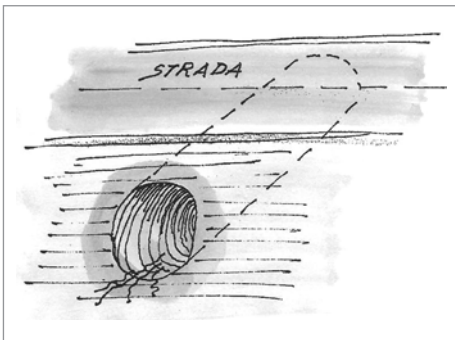


Fig. 9.1. *Tombino circolare*

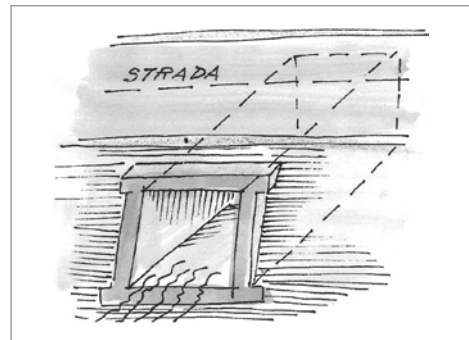


Fig. 9.2. *Tombino rettangolare*

PILE

Le pile sono sostegni intermedi del ponte e sono sollecitate soprattutto dal carico verticale trasmesso dall'impalcato attraverso gli apparecchi di appoggio.

La pila è in generale un elemento importantissimo e la sua crisi si accompagna inevitabilmente a quella del ponte. La sua progettazione, apparentemente semplice, nasconde aspetti *collaterali* importanti dei quali il progettista deve tener conto.

10.1. Tipi di sezioni

Le pile sono simili a pilastri e la loro sezione dipende dalla posizione degli apparecchi di appoggio che deve sostenere, dalla base, dai vincoli terminali e dall'altezza della pila. Per pile alte si possono adottare sezioni cave, che in genere sono evitate per pile tozze e modeste.

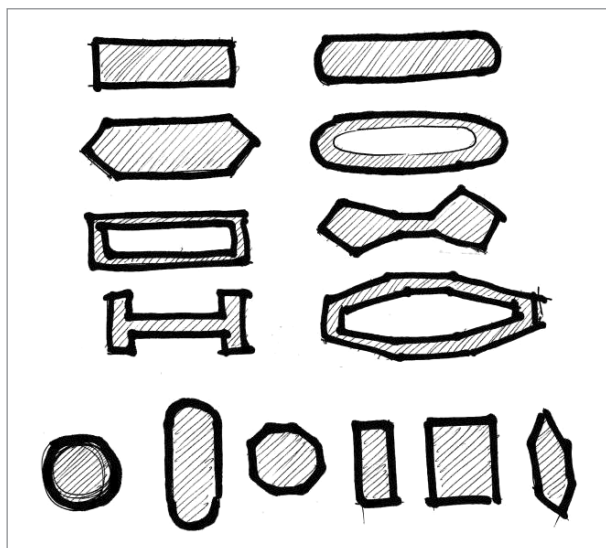


Fig. 10.1. *Tipi di sezioni per le pile*

Spesso le sezioni sono in calcestruzzo armato e hanno aree molto maggiori di quelle richieste dal calcolo a compressione. In effetti la pila viene spesso molto irrobustita dal progettista e il suo cimento in condizioni di esercizio è molto modesto. Il cemento gravoso è connesso al cedimento della base, agli effetti sismici ondulatori sull'impalcato, agli effetti della corrente se in alveo, unitamente al possibile scalzamento della sua fondazione.

10.2. Tipi di schemi statici

La pila può essere vincolata alle estremità in vario modo. La soluzione più usata è quella di avere un incastro alla base e un appoggio scorrevole in sommità.

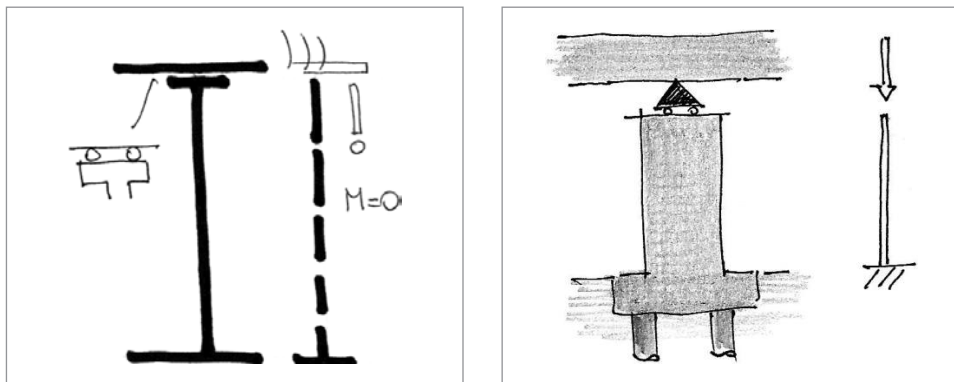


Fig. 10.2. Base incastrata e appoggio scorrevole in sommità

La soluzione classica con pila a sezione rettangolare piena può comportare uno schema statico diverso in senso longitudinale e in quello trasversale.

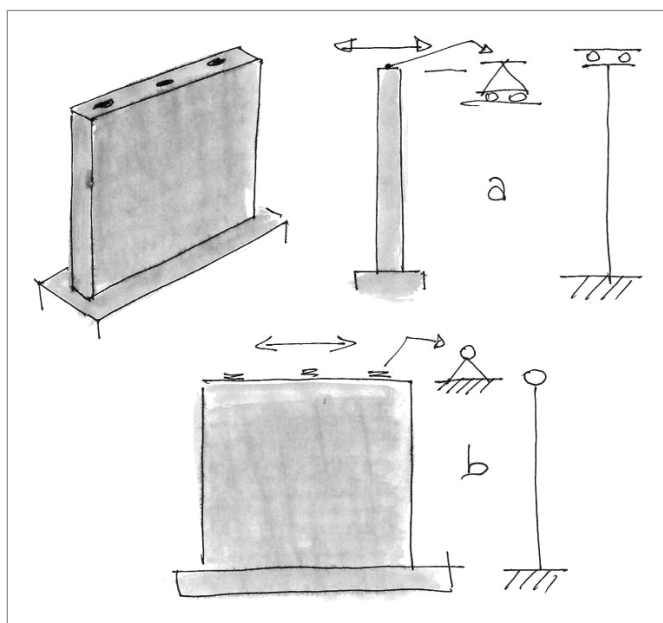


Fig. 10.3. Possibile schema statico longitudinale (a) e trasversale (b)

Tale soluzione comporta un diagramma dei momenti crescente dall'alto in basso in occasione di azioni orizzontali trasmesse dall'impalcato.

CAPITOLO 11

SPALLE

La spalla che sostiene il ponte e sulla quale grava la spinta della terra del rilevato terminale è sostanzialmente simile a un muro di sostegno sul quale grava il carico del ponte.

Le azioni verticali sono crescenti con la luce del ponte e sono maggiori per ponti in c.a. rispetto a quelle del ponte in acciaio.

Insieme alle azioni correnti menzionate la spalla è sollecitata dall'azione di frenamento, che si verifica sull'appoggio fisso quando una colonna di carichi improvvisamente si arresta mentre transita sul ponte. Le norme italiane valutano la forza di frenamento pari a 1/10 del peso di una colonna che interessa tutta la corsia più caricata.

In zona sismica si devono considerare le azioni del sisma, in direzione longitudinale (in questo caso nella direzione in cui spinge la terra è la condizione più gravosa) e in direzione trasversale.

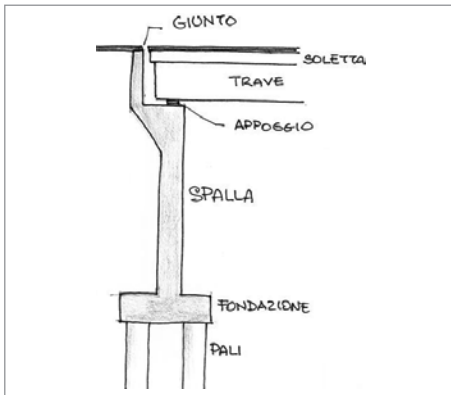


Fig. 11.1. Sezione spalla con nomenclatura

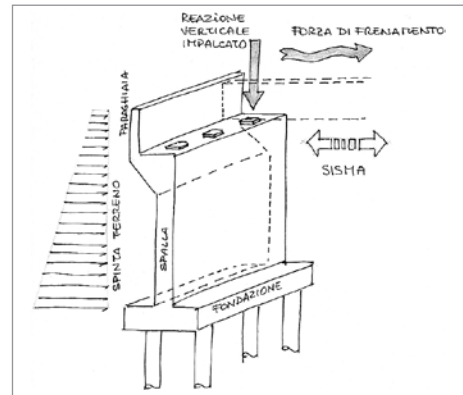


Fig. 11.2. Azioni su una spalla

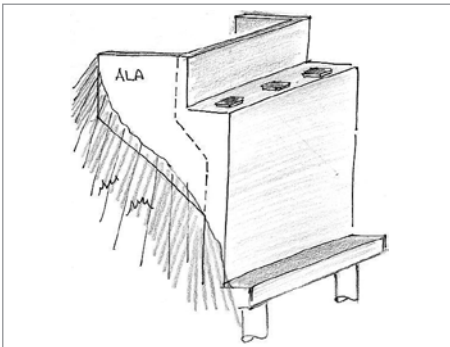


Fig. 11.3. Spalla che sostiene un terrapieno

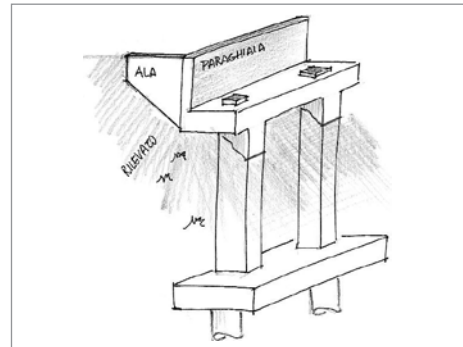


Fig. 11.4. Spalla passante

La spalla passante è una soluzione che consente di non avere sulla spalla l'azione spingente della terra.

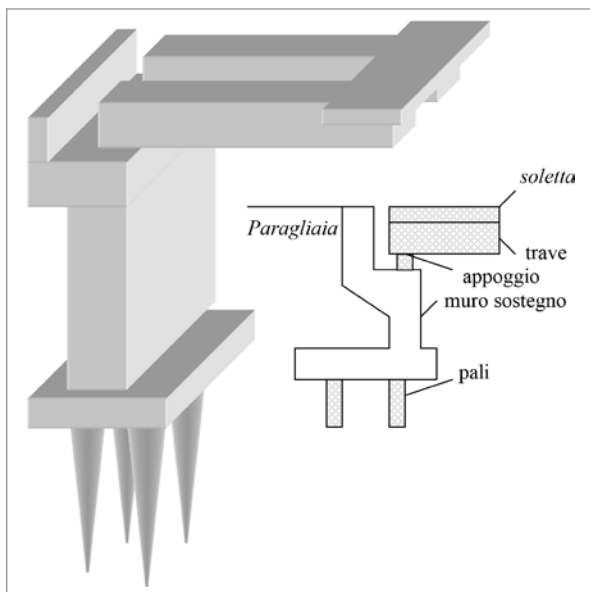


Fig. 11.5. Esempio spalla

11.1. Tipi di spalle

I tipi di sottofondazioni delle spalle sono:

- a) **Palificate infisse**, realizzate infiggendo pali a distanza ravvicinata.

La soluzione consente di scavare il terreno a valle successivamente al completamento della palificata. I pali sono spesso in cemento armato con punta rinforzata, in acciaio, raramente in legno e solo per piccoli lavori.

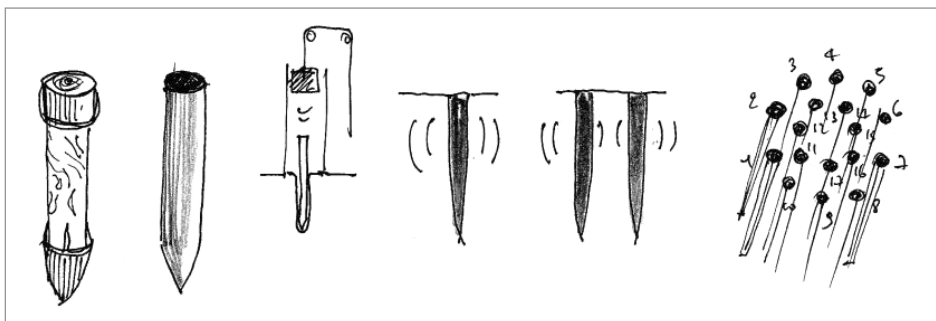
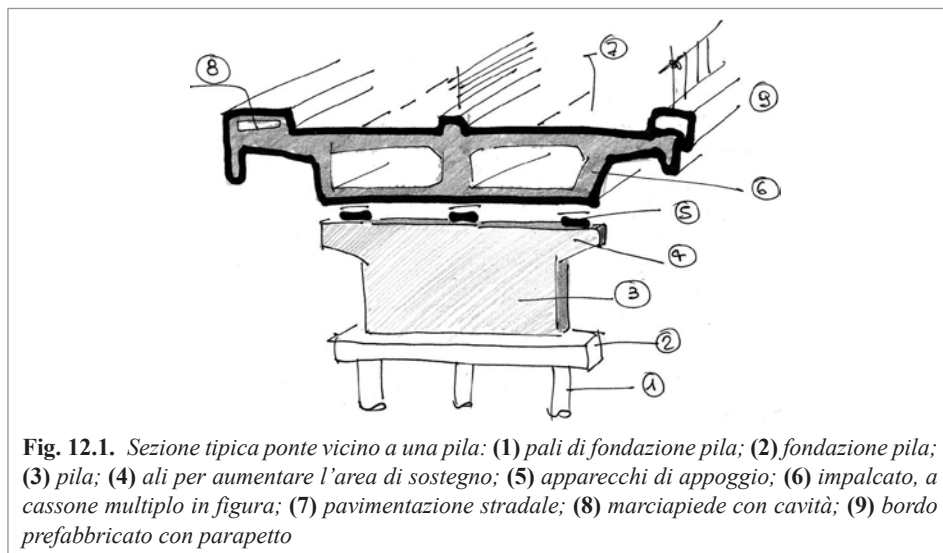


Fig. 11.6. Pali infissi

- b) **Palificate trivellate**, realizzando una successione di pali trivellati a distanza ravvicinata.

PARTICOLARI DEL PONTE



12.1. Bordi ponte

Il bordo trasversale dell'impalcato presenta in genere il parapetto e la barriera di sicurezza. La sua conformazione deve essere accuratamente studiata ed eseguita. Il bordo necessita di cura particolare poiché è in una posizione difficilmente raggiungibile per le manutenzioni. In genere si usano elementi prefabbricati.

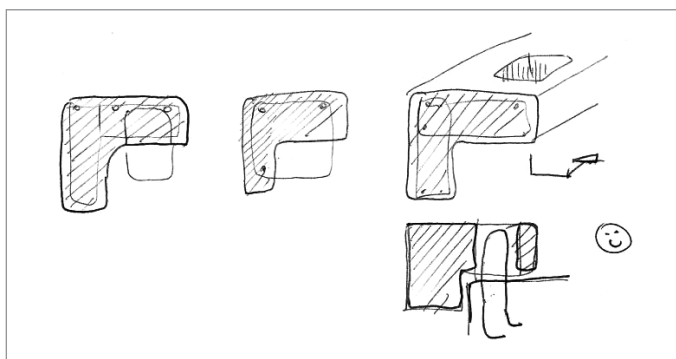


Fig. 12.2. Blocchi prefabbricati per bordo impalcato

La pendenza trasversale può portare l'acqua in vari punti di arrivo e raccolta; il progettista deve valutare accuratamente il problema e curare che la raccolta delle acque superficiali avvenga in modo razionale, convogliata in apposite canalizzazioni, resistenti e facili da mantenere.

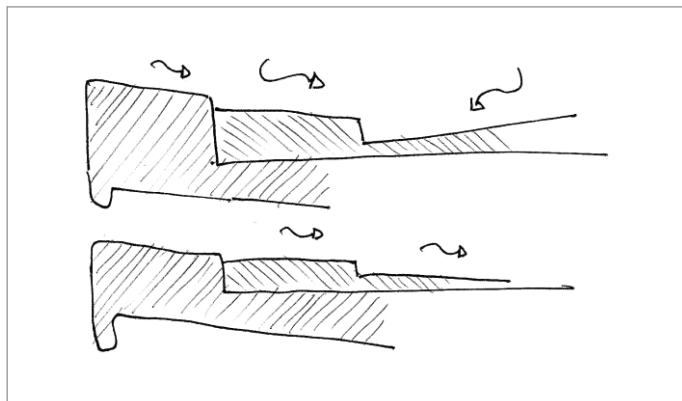


Fig. 12.3. Pendenze nelle parti laterali dell'impalcato

Il bordo deve avere una conformazione sagomata a rompi-goccia in modo da evitare che le acque superficiali che lambiscono il bordo del ponte, ricche di polvere e depositi calcarei e ferrosi possano colare sulla superficie laterale dell'impalcato.

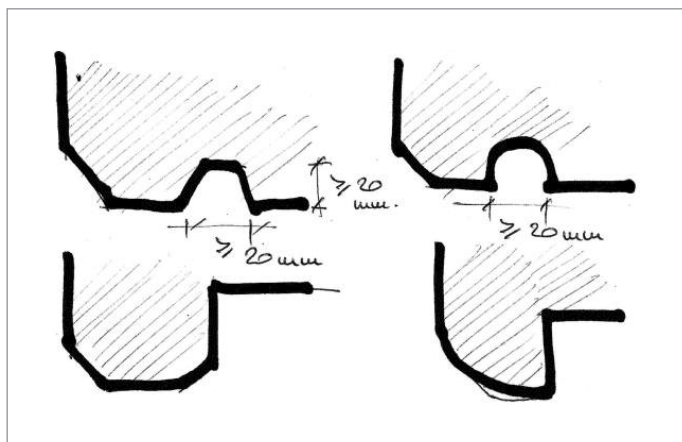


Fig. 12.4. Profili rompigoccia laterali

La parte laterale del bordo deve avere una conformazione sagomata in modo in modo da evitare che le acque superficiali che lambiscono il bordo del ponte, possano colare sulla superficie laterale dell'impalcato. In particolare si devono curare gli intagli laterali, per evitare che le parti sulle quali si deposita la polvere quando non piove possano essere dilavate da pioggia poco intensa o peggio da alcune gocce.

TRAVERSI

13.1. Disposizione traversi

I traversi possono anche non essere presenti, soluzione sconsigliata; si consigliano 3 o meglio 4 traversi per un buon collegamento delle travi principali.

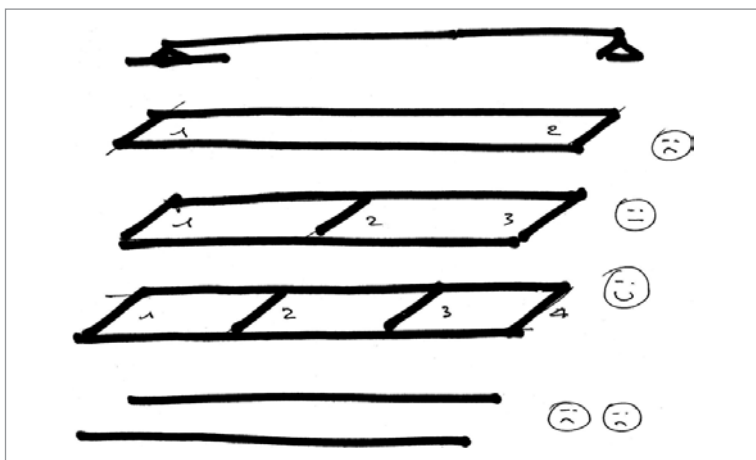


Fig. 13.1. Numero traversi a collegare due travi

13.2. Posizione traverso

I traversi in genere sono collegati alla soletta dell'impalcato e in tal caso consentono un buon comportamento di insieme; inoltre la soletta dell'impalcato contribuisce alla resistenza e alla rigidità del traverso, che in sezione si trasforma da sola anima a T.

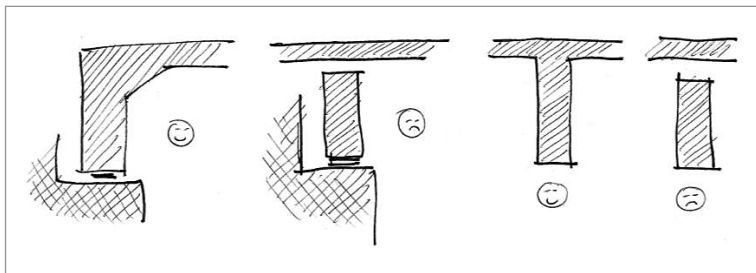


Fig. 13.2. Posizione traverso con collegamento alla soletta

Il collegamento con traverso staccato, effettuato in genere in strutture prefabbricate, consente un collegamento peggiore ed è in genere sconsigliabile.

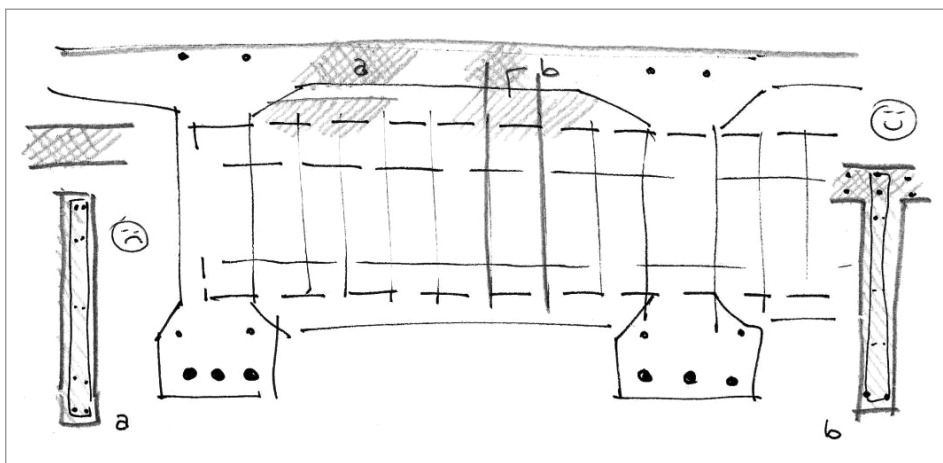


Fig. 13.3. *Armature nel traverso staccato e solidale alla soletta*

Le armature presenti nel traverso sono longitudinali, concentrate all'intradosso solamente se la soletta dell'impalcato è collaborante o concentrate all'estradosso o all'intradosso nel caso di traverso staccato dalla soletta.

SISTEMI COSTRUTTIVI

La costruzione dei ponti è in generale molto difficoltosa. In linea di massima i ponti che scavalcano un corso d'acqua non possono usufruire di un piano di appoggio sottostante. Il ponte è in genere difficoltoso e la sua costruzione ricca di pericoli. Le parti da mettere in opera sono spesso molto pesanti e la loro situazione in corso di costruzione comporta notevoli rischi di collasso. Il rischio principale è connesso alla perdita di equilibrio di pezzi pesanti che si trovano in corso di costruzione in uno stato non pienamente stabile.

I ponti possono essere realizzati con elementi prefabbricati in stabilimento trasportati in opera e montati, elementi gettati in opera, elementi montati a lato o piè d'opera e poi spostati, o *varati* nella giusta posizione.

14.1. Costruzione ponti gettati in sito

I ponti possono essere gettati con le seguenti modalità:

- *Con cassature su centine fisse*: realizzate oggi per lo più con ponteggi metallici, mentre raramente con impalcature in legno.

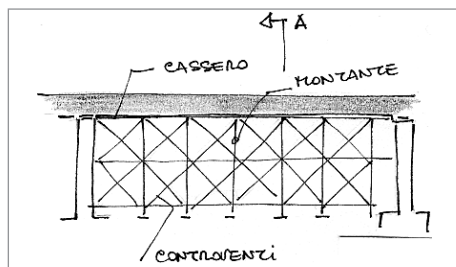


Fig. 14.1. Casseri fissi su incastellatura di sostegno

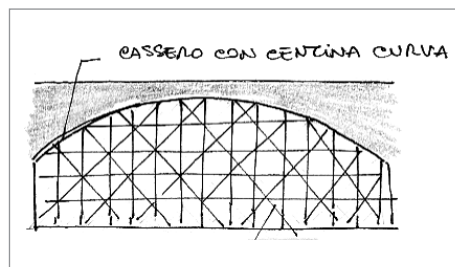


Fig. 14.2. Centina per trave curva su incastellatura di sostegno

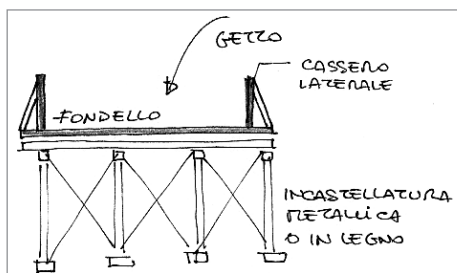


Fig. 14.3. Sezione casseri e incastellatura di sostegno

- *Casserature su centine mobili*: le centine mobili risultano economiche se si devono fabbricare più di 3 campate di ponte di sezione trasversale uguale.

La cassetta mobile è utile per gettare sul posto travi in successione, con un giunto consigliato a un quarto della luce, in cui il momento flettente presenta un valore molto basso.

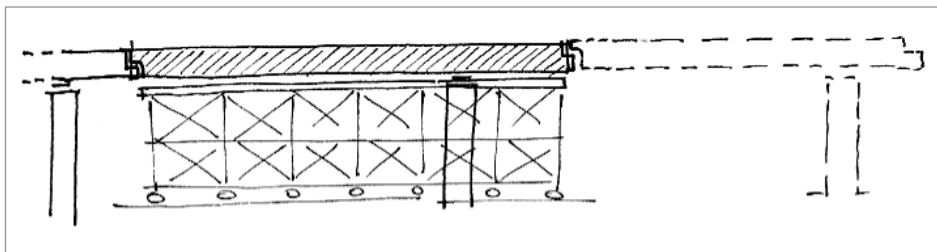


Fig. 14.4. Esempio cassetta mobile

Le fasi operative sono le seguenti: si effettua la gettata di una campata alla volta, con le travi continue fino al punto nullo dei momenti del campo successivo, si abbassa il cassero con l'impalcatura dopo la precompressione della campata finita, effettuando la traslazione fino al campo seguente.

Sono state recentemente sviluppate travi d'impalcatura autoportanti in acciaio che possono essere spostate da campata a campata.

Per l'avanzamento queste travi vengono prolungate alle due estremità con un leggero traliccio che scivolano su traverse in acciaio imbullonate sulle pile del ponte e vengono montate sulla gru disposta sulla trave reticolare a sbalzo. Le parti del cassero nella zona delle pile vengono ribaltate, per poter avanzare.

Nel *metodo del regolo calcolatore* si utilizzano per l'avanzamento travi a cassone in acciaio, disposte sulla mezzera del ponte e appoggiate in una cavità delle pile.

Vi sono ulteriori varianti di centine mobili autoportanti.

14.2. Costruzione ponti con elementi prefabbricati

L'uso di elementi prefabbricati è la soluzione più adottata. Si possono costruire singoli pezzi o singole travi o inneri impalcati. Di volta in volta scegliere la soluzione non è facile e richiede la valutazione dei rischi connessi alle complicate e pericolose fasi che portano al posizionamento finale dei pezzi prefabbricati.

14.2.1. Varo di intere travi

Il ponte può essere realizzato mediante impalcato interamente prefabbricato a piè d'opera.

In tal caso la trave deve essere trasportata dal luogo di costruzione al cantiere e varata, ovvero messa nella posizione finale.

In figura 14.5 si illustra il varo di una trave prefabbricata effettuato mediante una struttura reticolare appoggiata su 2 o più pile, detta trave di servizio.

PONTI IN ZONA SISMICA

NTC 2018 DI CUI AL D.M. 17 GENNAIO 2018 E C.M. N. 7/2019

15.1. PONTI**[§ 7.9 NTC2018]****15.1.1. Campo di applicazione****[§ 7.9.1 NTC2018]**

Il presente capitolo tratta il progetto di ponti a pile e travate, queste ultime del tipo continuo su più pile o semplicemente appoggiate ad ogni campata e ad arco.

Le pile si intendono a fusto unico, con sezione trasversale di forma generica, piena o cava, mono o multicellulare. Anche pile in forma di portale sono trattabili con i criteri e le regole contenute in questo capitolo. Pile a geometria più complessa, ad es. a telaio spaziale, richiedono in generale criteri di progetto e metodi di analisi e verifica specifici.

Per ponti di tipologia diversa da quella indicata le ipotesi ed i metodi di calcolo devono essere adeguatamente documentati, fermi restando i fattori di comportamento riportati in tabella 7.3.II.

15.1.2. Criteri generali di progettazione**[§ 7.9.2 NTC2018]**

Nel caso di comportamento strutturale non dissipativo, la capacità delle membrature e dei collegamenti deve essere valutata in accordo con le regole di cui al Capitolo 4, senza nessun requisito aggiuntivo, a condizione che: per le strutture di calcestruzzo armato, nessuna sezione superi la curvatura convenzionale di prima plasticizzazione, come definita al § 7.4.4.1.2; per le strutture di calcestruzzo armato precompresso e per le strutture in carpenteria metallica, nessun materiale superi la deformazione di snervamento di progetto.

Nel caso di comportamento strutturale dissipativo, la struttura del ponte deve essere concepita e dimensionata in modo tale che, sotto l'azione sismica relativa allo SLV, essa dia luogo alla formazione di un meccanismo dissipativo stabile, nel quale la dissipazione sia limitata alle pile.

Ai soli fini del progetto dei pali di fondazione, con riferimento al § 7.2.5, è possibile considerare una limitata capacità dissipativa, dividendo per 1,5 le sollecitazioni sismiche sui pali derivanti dall'analisi strutturale con comportamento non dissipativo. In questo caso, per una lunghezza pari a 10 diametri dalla sommità del palo, devono applicarsi i dettagli costruttivi di cui al § 7.9.6.1 relativi alla CD "B".

La capacità delle membrature e dei collegamenti deve essere valutata in accordo con le regole di cui dal § 7.1 al § 7.3, integrate dalle regole di progettazione e di dettaglio fornite ai paragrafi successivi.

Nel valutare la capacità delle sezioni in calcestruzzo armato, si può tener conto dell'effetto del confinamento (v. § 4.1.2.1.2.1), purché si consideri la perdita dei copriferri al raggiungimento, in essi, della deformazione ultima di compressione del calcestruzzo non confinato (0,35%).

Il proporzionamento della struttura deve essere tale da favorire l'impegno plastico del maggior numero possibile di pile. Il comportamento inelastico dissipativo deve essere di tipo flessionale, con esclusione di possibili meccanismi di rottura per taglio.

Per quanto possibile, le zone dissipative devono essere posizionate in punti accessibili, pur con ragionevole difficoltà, per facilitarne l’ispezione e la riparazione.

In genere, il comportamento sismico di ponti con impalcato continuo è migliore di quello di ponti a travata appoggiata, purché si riesca ad assicurare una formazione delle cerniere plastiche pressoché simultanea sotto tutte le pile scelte come elementi dissipativi.

Gli elementi ai quali non è mai richiesta capacità dissipativa devono mantenere un comportamento sostanzialmente elastico; essi sono: gli elementi progettati per avere un comportamento non dissipativo, le porzioni esterne alle zone dissipative delle pile, l’impalcato, gli apparecchi di appoggio, le strutture di fondazione, le spalle, le pile che non scambiano azioni orizzontali con l’impalcato. A tal fine si adotta il criterio della *progettazione in capacità* descritto nel seguito per ogni caso specifico.

○ Valori del fattore di comportamento

[§ 7.9.2.1 NTC 2018]

Nel caso di comportamento strutturale non dissipativo, per le due componenti orizzontali dell’azione sismica, q_0 è assunto pari a 1,0.

Nel caso di comportamento strutturale dissipativo, per le due componenti orizzontali dell’azione sismica, i valori massimi del valore di base q_0 del fattore di comportamento sono riportati in Tab. 7.3.II ; in essa $\lambda(\alpha) = 1$ se $\alpha \geq 3$ e $\lambda(\alpha) = (\alpha/3)^{0,5}$ per $3 > \alpha \geq 1$, essendo $\alpha = L/H$ dove L è la distanza della sezione di cerniera plastica dalla sezione di momento nullo ed H è la dimensione della sezione nel piano di inflessione della cerniera plastica.

Per gli elementi duttili in calcestruzzo armato, i valori di q_0 della Tab. 7.3.II valgono se la sollecitazione di compressione normalizzata n_k ottenuta dividendo lo sforzo di calcolo N_{Ed} per la resistenza a compressione semplice della sezione ($v_k = N_{Ed}/A_{cfck}$) non eccede il valore 0,3. La sollecitazione di compressione normalizzata non può superare il valore $v_k = 0,6$.

Per valori di v_k intermedi tra 0,3 e 0,6, il valore di q_0 è dato da:

$$q_0(v_k) = q_0 - \left[\frac{v_k}{0,3} - 1 \right] (q_0 - 1)$$

(7.9.1)

essendo q_0 il valore applicabile per $v_k \leq 0,3$.

Nella tabella 7.3.II sono riportate anche le strutture che si muovono con il terreno. Esse non subiscono amplificazione dell’accelerazione del suolo poiché sono caratterizzate da periodi naturali di vibrazione in direzione orizzontale molto bassi ($T \leq 0,03$ s). Appartengono a questa categoria anche le spalle connesse all’impalcato mediante collegamenti flessibili o appoggi mobili.

[ESTRATTO TAB. 7.3.II NTC 2018]

Tab. 7.3.II – Valori massimi del valore di base q_0 del fattore di comportamento allo SLV per diverse tecniche costruttive ed in funzione della tipologia strutturale e della classe di duttilità CD

Tipologia strutturale	q_0	
	CD “A”	CD “B”
[...]		

PROGETTO PONTE «RINASCITA»

PROPOSTA DELL'ING. ANTONIO CIRILLO

La presente proposta è stata inoltrata al Sindaco di Genova, al Presidente della Regione, al comitato per la ricostruzione; si invita a visionare su *youtube* digitando “Ponte Cirillo” la presentazione fatta in modo semplice e poco formale dall’Autore.

Come noto invece che a tener conto dei progetti suggeriti è la scelta del ponte è stata fatta con una specie di appalto concorso in cui grandi imprese hanno proposto la loro soluzione.

Ma la soluzione proposta da una impresa che poi sa di realizzare l’opera può essere la migliore? All’impresa conviene presentare la soluzione che presenta il maggior vantaggio all’impresa stessa.

Il sottoscritto ritiene la scelta della demolizione dell’intero viadotto e la ricostruzione con circa 19 pile altissime, con travi appoggiate ad esse una soluzione non razionale e ingiustificatamente troppo costosa; i tempi che si prevedono per realizzare le fondazioni profonde delle pile, realizzarle, posare le quasi venti campate si ipotizzano molto lunghi, valutabili tra 2 e 4 anni.

Si presenta la proposta che lo scrivente ritiene essere 10 volte meno onerosa del viadotto tradizionale scelto, speditiva poichè consentirebbe tempi ridottissimi di costruzione, durevole in quanto di alluminio, non aggredibile dalla corrosione. Il ponte sarebbe il ponte in alluminio più lungo del mondo, quindi innovativo e fiore all’occhiello per la nostra grande nazione, che sembra essere diventata nave senza nocchiero in gran tempesta.

Spero vivamente di sbagliarmi, anche se le tantissime voci di protesta di tanti cattedratici italiani supportano i miei timori.

16.1. Analisi stato di fatto

Gli stralli in c.a. si sono distorti nel tempo a causa del loro peso proprio e della concomitante forte trazione dei cavi iniziali e di quelli aggiunti. La soluzione con precompresso anche per i tiranti ha comportato una distorsione differita nel tempo sull’intera struttura. Gli stralli per effetto del peso proprio da rettilinei sono divenuti archi di cerchio; tale evenienza ha comportato un avvicinamento degli estremi dell’impalcato alla testa del pilone, sia per semplici motivi geometrici, passando da un segmento a un arco di cerchio con sviluppo costante gli estremi si avvicinano. Inoltre sotto l’effetto del peso proprio e della compressione delle estremità che nel tempo è divenuta da centrata a eccentrica per lo spostamento della sezione rispetto agli assi dei cavi ha aggravato l’inflessione dell’elemento e nel contempo ha contribuito ad accorciarlo ulteriormente. La distorsione differita degli stralli presso-inflessi ha comportato in sostanza una distorsione globale del sistema. Le cerniere terminali si sono in parte disattivate, per il sollevamento di un estremo; nella parte con elementi intermedi la questione non è stata oggetto di criticità, infatti l’elemento di collegamento vincolato ai due *piloni composti* ha seguito il movimento dei suoi estremi e si è dislocato, inclinandosi ma tenendo in posizione le estremità dei piloni composti che

vi giungevano. Il problema è divenuto alquanto critico per l'attacco del pilone complesso terminale al viadotto. In questo caso il sollevamento della cerniera dell'impalcato del pilone composto ha comportato probabilmente la perdita del contatto tra impalcato facente parte del pilone complesso e l'impalcato facente parte del viadotto.



Fig. 16.1. *In alto il Ponte Morandi prima del crollo*



Fig. 16.2. *A fianco la seconda pila che incombe sulle case*

Il pilone composto prossimo al viadotto, probabilmente, si è trovato sbilanciato, con una parte senza appoggio efficace e una parte con appoggio spostato, con elemento di collegamento del pilone centrale efficiente parzialmente, ma non sufficiente a tenere il pilone composto in caso di sollecitazioni flessio-torsionali. In sintesi il pilone composto prossimo al viadotto si è trovato dopo un certo numero di anni sempre più isolato, sempre più distorto, con distorsioni spaziali non necessariamente simmetriche per la distorsione diversa dei tiranti da un lato e dall'altro connessa all'efficacia spaziale dell'appoggio prossimo al tirante stesso. La lezione da trarre dal crollo del ponte Morandi, progettato da un illustre ingegnere, è questa: il progettista oltre ad accertare la capacità resistente di una struttura deve accertare che la struttura abbia idonee capacità di assorbire le distorsioni che la interessano.

CAPITOLO 17

PONTI IN LEGNO

17.1. Storia

I ponti in legno sono utilizzati soprattutto per transito pedonale, ma anche eventualmente per i ponti stradali.

Nel seguito si tratteranno esclusivamente di ponti pedonali, detti anche passerelle.

I ponti in legno si dividono in *protetti* e *non protetti dalle intemperie*. Questa divisione è molto importante per le condizioni ambientali e per i carichi da prevedere.

Storicamente il ponte passato alla storia per importanza logistica e per tecnica costruttiva è il ponte sul Reno costruito da Cesare in occasione della conquista della Germania.

Menzione a parte merita il ponte sul Reno fatto costruire da Cesare, opera provvisoria passata alla storia per la sua arditezza e per la sua tecnica.

17.1.1. Il ponte sul Reno

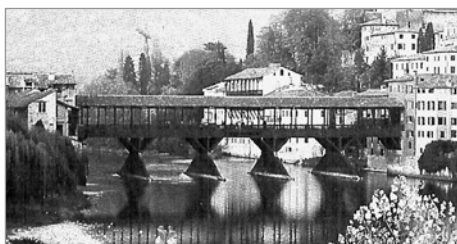


Fig. 17.1. Il ponte di Bassano del Grappa è un raro esempio di ponte protetto dalle intemperie da una copertura a struttura lignea



Fig. 17.2. Ponte dell'Accademia. Originariamente si presentava in legno ma con l'intervento di consolidamento effettuato nei primi anni '80, ha perso la sua singolare valenza a causa delle integrazioni in acciaio poste nella parte sottostante



Fig. 17.3. A sinistra, ponticello in legno non protetto da legno trentino; a destra ponticello in legno coperto (protetto), da: legno trentino



Fig. 17.4. *L'esercito di Roma attraversa il Reno*

Da Caio Giulio Cesare – *De bello gallico* – libro IV (XVII-XVIII), libera traduzione di Mariano Gallo.

«Dalle memorie di guerra del grande condottiero ci è stata trasmessa la documentazione delle attività di un cantiere dell'anno 55 a.C.. Dal punto di vista umano è da rilevare lo spirito di sfida che da sempre anima i costruttori di grandi opere d'Ingegneria. Dal punto di vista tecnico si apprezza la concezione delle pile a telaio con piedritti inclinati, frutto dell'evidente intuizione del favorevole effetto irrigidente dovuto al comportamento prevalentemente assiale rispetto a quello flessionale. La descrizione, necessariamente sommaria, lascia trasparire un progetto nel quale sono ben chiari i ruoli statici e funzionali dei diversi elementi della costruzione: il complesso integrato fondazione-pila, gli irrigidimenti supplementari, le strutture principali e secondarie dell'impalcato, senza dimenticare le opere di difesa passiva. Poco credibili, naturalmente, i tempi di esecuzione, pur immaginando l'alacrità di questo gruppo di genieri di due millenni or sono».

Nota misure romane

Il piede romano corrisponde a 0,296 m, dieci piedi erano una pertica, passus 75 cm e doppio passus circa 1,5 m. Le misure piccole erano: digitus, circa 2 cm, palmus (4 dita), circa 8 cm. **XVII.** Cesare, per le ragioni che ho ricordato, aveva stabilito di attraversare il Reno; ma giudicava che l'attraversamento con navi, oltre a non essere sufficientemente sicuro, non si addiceva al suo decoro personale né a quello del popolo romano.

Pertanto, nonostante le grandi difficoltà che la costruzione di un ponte comportava, considerata la larghezza l'impetuosità e la profondità del fiume, tuttavia riteneva di dover affrontare questa sfida, anche a costo di rinunciare a trasferire l'esercito. Concepì dunque il ponte in questo modo. Piedritti in legno dello spessore di un piede e mezzo, un poco appuntiti all'estremità inferiore e di altezza adeguata alla profondità del fiume, furono collegati a coppie tenendoli distanziati di due piedi. Questi, calati nel fiume con apposite attrezzature, furono messi in posizione e infissi con battipali, non verticalmente come le comuni palificate, ma inclinati secondo corrente; di fronte ad essi, quaranta piedi a valle, furono disposte coppie di piedritti analoghe, ma inclinate contro corrente.

IL SOFTWARE INCLUSO (IN VERSIONE DESKTOP E WEBAPP)

18.1. Note sul software incluso

Il software incluso installa un applicativo Excel per il calcolo di un ponte pedonale in legno con due travi parallele che supportano dei travicelli; sui travicelli vi è il tavolato.

L'applicativo consente di ricavare le verifiche allo SLU e allo SLS di:

- travi parallele;
- travicelli;
- tavolato;
- parapetto;
- montanti del parapetto.

Si ricava anche la verifica a deformazione di lunga durata. Le verifiche sono conformi alle norme vigenti ed europee, allegabili alle relazioni di calcolo da effettuare per le strutture.

L'applicativo è utile in vista della richiesta da parte della norma di *verifiche manuali* da allegare ai complessi e spesso incomprensibili risultati che scaturiscono da programmi di calcolo agli elementi finiti in commercio. Inoltre, l'applicativo colma la lacuna di tanti software in commercio, che si occupano della struttura nel suo complesso ma non forniscono indicazioni su elementi secondari, o al massimo inglobano tali elementi nell'insieme sono nello scenario ultimo.

L'utente può utilizzare i fogli di calcolo, che hanno uno scopo puramente didattico, introducendo i dati nelle celle contrassegnate con lo sfondo giallo (usando come il separatore decimale il punto). Il programma ricava automaticamente i parametri di resistenza dalle tabelle dei materiali previste dalle norme UNI EN 338.

Salvo errori e omissioni i risultati sono automatici e devono essere sempre controllati e verificati dal progettista.

L'Autore consiglia di controllare i valori ottenuti e rimanda all'uso di programmi appositi per il calcolo di strutture in ambito professionale.

Le verifiche sono solo qualitative, per cui per un maggiore dettaglio si rimanda all'EC5: queste controllano che il grado di sollecitazione indotto dalla combinazione eccezionale allo stato limite ultimo (SLU) si mantenga al di sotto della soglia di snervamento, quest'ultimo calcolato attraverso il valore caratteristico e il coefficiente di sicurezza.

I calcoli sono svolti seguendo l'EC5 e i carichi applicati corrispondono a quelli previsti dalla NTC18 e dall'EC5.

Unitamente all'applicativo Excel il software installa:

- **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento);
- **FAQ** (risposte alle domande più frequenti);
- **Test** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

18.2. Requisiti hardware e software

18.2.1. Utenti software Desktop

- Processore da 2.00 GHz;
- MS Windows Vista/7/8/10
(è necessario disporre dei privilegi di amministratore);
- MS .Net Framework 4+;
- 250 MB liberi sull'HDD;
- 2 GB di RAM;
- MS Office 2007+;
- Accesso ad internet e browser web.

18.2.2. Utenti WebApp

- Dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- MS Office 2007+;
- Accesso ad internet e browser web con *Javascript* attivo.

18.3. Richiesta della password di attivazione del software

- 1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0034_1.php

- 2) Inserire i codici “A” e “B” (vedi ultima pagina del volume) e cliccare su **[Continua]**;
- 3) **Per utenti registrati su www.grafill.it:**
 - inserire i dati di accesso e cliccare su **[Accedi]**, accettare la licenza d’uso e cliccare su **[Continua]**;
- 4) **Per utenti non registrati su www.grafill.it:**
 - cliccare su **[Iscriviti]**, compilare il form di registrazione e cliccare su **[Iscriviti]**, accettare la licenza d’uso e cliccare su **[Continua]**;
- 5) Un **link per il download del software** e la **password di attivazione** saranno inviati all’indirizzo e-mail inserito nel form di registrazione.

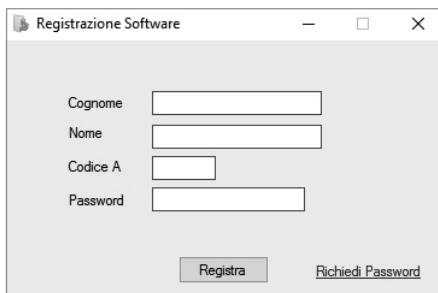
18.4. Installazione ed attivazione del software Desktop (utenti MS Windows)

- 1) Scaricare il setup del software cliccando sul link ricevuto per e-mail (file *.exe);
- 2) Installare il software facendo doppio-click sul file **88-277-0035-8.exe**;
- 3) Avviare il software:

Per utenti MS Windows Vista/7/8: **[Start]** › **[Tutti i programmi]** › **[Grafill]**
› **[Ponti]** (cartella) › **[Ponti]** (icona di avvio)

Per utenti MS Windows 10: **[Start]** › **[Tutte le app]** › **[Grafill]**
› **[Ponti]** (icona di avvio)

- 4) Compilare la maschera *Registrazione Software* e cliccare su **[Registra]**:



- 5) Dalla finestra *Starter* del software sarà possibile accedere ai documenti disponibili:



18.5. Utilizzo della WebApp

- 1) Registrare il prodotto ed attivare il software come indicato nei paragrafi precedenti;
- 2) Accedere al profilo utente su **www.grafill.it**;
- 3) Cliccare sul pulsante **[G-CLOUD]**;
- 4) Cliccare sul pulsante **[Vai alla WebApp]** in corrispondenza del prodotto acquistato.

18.6. Assistenza tecnica (*TicketSystem*)

I prodotti **Grafill** sono coperti da assistenza tecnica gratuita per 365 giorni dall'acquisto. L'assistenza è prevista per l'installazione, l'avvio o la reinstallazione del prodotto (*non è prevista assistenza per il recupero dei dati*), se la configurazione hardware rispetta i requisiti richiesti.

L'assistenza ***TicketSystem*** è disponibile all'indirizzo **<https://www.supporto.grafill.it>**. Effettuare il login al ***TicketSystem*** utilizzando i dati del profilo utente di **www.grafill.it** ed aprire un ticket seguendo le istruzioni.

La cronologia dei ticket resterà disponibile sulla schermata principale del ***TicketSystem***.

18.7. Stampe

Nel seguito si riporta la stampa esemplificativa corrispondente all'applicativo Excel allegato al volume, allo scopo di aiutare l'utente ad applicare quanto riportato nel foglio di calcolo.

In caso di malfunzionamento si consiglia all'utente di inserire i dati del foglio esemplificativo, allo scopo di verificare se le impostazioni del proprio computer non entrino in conflitto con quelle che hanno generato il foglio di calcolo.

Per eventuali aggiornamenti, errata corrige e problemi relativi all'applicativo Excel contattare l'autore sul sito internet **www.antoniocirillo.com** o mediante e-mail **antonioingcirillo@libero.it**

Passerella in legno (secondo EC5)

parametri introdotti dall'utente

i carichi sono come da DM 17 gen. 2018 e eurocodice 5

dati da inserire su fondo giallo

DUE TRAVI PRINCIPALI

MATERIALI

TRAVI PRINCIPALI

Tipo di materiale: legno

D18 EN338

13

Peso specifico (daN/mc)

570

Modulo di elasticità E_{0mean} =

95000 (daN/cm²)

categoria di esposizione

3

per ponte non protetto 3

Resistenza caratteristica del materiale

f_{myk} resistenza caratteristica a flessione per snervamento della fibra più lontana dall'asse neutro

f_{myk} =

180 daN/cm²

$f_{mdk} = f_{myk} / \gamma_m$

120,00

f_{vk}

resistenza caratteristica a taglio

coeff. di sicurezza =

1,5

f_{vk} =

34 daN/cm²

$f_{vdk} = f_{vk} / \gamma_m$

22,67 daN/cm²

TRAVICELLI

Tipo di materiale: legno

D18 EN338

13

Peso specifico (daN/mc)

570

Modulo di elasticità E_{0mean} =

95000 (daN/cm²)

categoria di esposizione

3

per ponte non protetto 3

Resistenza caratteristica del materiale

f_{myk} resistenza caratteristica a flessione per snervamento della fibra più lontana dall'asse neutro

f_{myk} =

180 daN/cm²

$f_{mdk} = f_{myk} / \gamma_m$

120,00

f_{vk}

resistenza caratteristica a taglio

coeff. di sicurezza =

1,5

f_{vk} =

34 daN/cm²

$f_{vdk} = f_{vk} / \gamma_m$

22,67 daN/cm²

TAVOLONI

Tipo di materiale: legno

C22 EN338

5

Peso specifico (daN/mc)

410

Modulo di elasticità E_{0mean} =

100000 (daN/cm²)

categoria di esposizione

3

per ponte non protetto 3

Resistenza caratteristica del materiale

f_{myk} resistenza caratteristica a flessione per snervamento della fibra più lontana dall'asse neutro

f_{myk} =

220 daN/cm²

$f_{mdk} = f_{myk} / \gamma_m$

146,67

f_{vk}

resistenza caratteristica a taglio

coeff. di sicurezza =

1,5

f_{vk} =

38 daN/cm²

$f_{vdk} = f_{vk} / \gamma_m$

25,33 daN/cm²

MONTANTI

Tipo di materiale: legno

D18 EN338

13

Peso specifico (daN/mc) **570**Modulo di elasticità $E_{0mean} =$ **95000** (daN/cm²)categoria di esposizione **3** per ponte non protetto 3

Resistenza caratteristica del materiale

 f_{myk} resistenza caratteristica a flessione per snervamento della fibra più lontana dall'asse neutro $f_{myk} =$ **180** daN/cm² $f_{mdk} = f_{myk} / \gamma_m$ **120,00** f_{vk} resistenza caratteristica a taglio coeff. di sicurezza = **1,5** $f_{vk} =$ **34** daN/cm² $f_{vdk} = f_{vk} / \gamma_m$ **22,67** daN/cm²**PARAPETTI**

Tipo di materiale: legno

D18 EN338

13

Peso specifico (daN/mc) **570**Modulo di elasticità $E_{0mean} =$ **95000** (daN/cm²)categoria di esposizione **3** per ponte non protetto 3

Resistenza caratteristica del materiale

 f_{myk} resistenza caratteristica a flessione per snervamento della fibra più lontana dall'asse neutro $f_{myk} =$ **180** daN/cm² $f_{mdk} = f_{myk} / \gamma_m$ **120,00** f_{vk} resistenza caratteristica a taglio coeff. di sicurezza = **1,5** $f_{vk} =$ **34** daN/cm² $f_{vdk} = f_{vk} / \gamma_m$ **22,67** daN/cm²**DORMIENTE**

Tipo di materiale: legno

D18 EN338

20

Peso specifico (daN/mc) **1080**Modulo di elasticità $E_{0mean} =$ **200000** (daN/cm²)categoria di esposizione **3** per ponte non protetto 3Resistenza caratteristica del materiale coeff. di sicurezza = **1,45** f_{c90k} resistenza caratteristica a compressione in direzione perp. alle fibre $f_{c90k} =$ **135** daN/cm² $f_{c90d} = f_{c90k} / \gamma_m$ **93,10**

I ponti sono una pietra miliare della tecnica ingegneristica e conoscere come funziona un ponte non è una cosa che riguarda solo il tecnico, ma chiunque vi transiti.

La presente pubblicazione si configura come un manuale teorico-pratico per ingegneri e architetti, progettisti di nuove opere o tecnici incaricati di intervenire o mantenere ponti esistenti; tuttavia si rivolge anche al semplice appassionato di ponti o semplicemente a chi voglia capire come funziona il ponte che osserva o che attraversa.

Il manuale fornisce informazioni sui ponti, sulla loro progettazione, sulla estetica e sulla loro funzionalità immediata e nel tempo. Ha inoltre l'ambizione di trasmettere la passione per questo tipo di opere con un invito a cercare nuove soluzioni e a non aver paura di "osare"; spesso i ponti sono stati ridotti a successioni di travi tutte uguali, su pile tutte simili, con soluzione corretta ma francamente squallida. Nel contempo si vuole caldeggiare la cura di un'opera così importante e delicata.

Il testo descrive puntualmente le parti salienti che compongono la struttura di un ponte, cercando per quanto possibile di semplificare i problemi allo scopo di trasmettere la comprensione del funzionamento di ciascuna parte. Solo se si comprende il funzionamento di un ponte e il perché di determinate scelte del progettista si può agire in modo razionale e oculato. Per ogni tipologia di ponte il testo fornisce la chiave per comprenderne il funzionamento, in modo da consentirne il progetto. La comprensione del comportamento è altresì utile anche per chi deve intervenire o mantenere un ponte esistente, seguendo la sua filosofia progettuale, per migliorarne o correggerne la funzione.

SOFTWARE INCLUSO (in versione Desktop e WebApp)

Il software incluso installa un applicativo Excel per il calcolo di un ponte pedonale in legno con due travi parallele che supportano dei travicelli sui quali vi è il tavolato.

L'applicativo esegue le verifiche allo SLU e allo SLS di travi parallele, travicelli, tavolato, parapetto e montanti del parapetto; si ricava anche la verifica a deformazione di lunga durata.

I calcoli sono svolti seguendo l'EC5 e i carichi applicati corrispondono a quelli previsti dalla NTC18 e dall'EC5. Le verifiche sono conformi alle norme vigenti ed europee, allegabili alle relazioni di calcolo da effettuare per le strutture.

L'utilità dell'applicativo trova riscontro nella richiesta da parte delle norme di verifiche manuali da allegare ai complessi e spesso incomprensibili risultati che scaturiscono dai più comuni programmi di calcolo agli elementi finiti.

L'installazione comprende: **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento); **FAQ** (risposte alle domande più frequenti); **Test** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

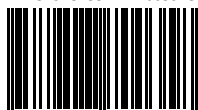
REQUISITI HARDWARE E SOFTWARE

Software Desktop: processore da 2.00 GHz; MS Windows Vista/7/8/10; MS .Net Framework 4+; 250 MB liberi sull'HDD; 2 GB di RAM; MS Office 2007+; Accesso ad internet e browser web.

WebApp: qualsiasi dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android; MS Office 2007+; Accesso ad internet e browser web con Javascript attivo.

Antonio Cirillo (www.antoniocirillo.com), ingegnere specialista di strutture e libero professionista. È professore PCI all'ITIS Meucci di Massa ed autore di volumi su sismica, cemento armato, acciaio, geotecnica, opere di sostegno, legno basati sugli Eurocodici.

ISBN 13 978-88-277-0035-8



9 788827 700358 >