

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA
DIPARTIMENTO di INGEGNERIA CIVILE



Teoria e Progetto di Ponti

A. Recupero

CONTENUTI e INDICE

- LA CLASSIFICAZIONE;
- LE AZIONI
- LA NORMATIVA ITALIANA;
- GLI EFFETTI REOLOGICI;
- L'IMPALCATO A GRATICCIO;
- L'IMPALCATO A CASSONE;
- LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA;
- LA SISMICA

An aerial photograph of a large cable-stayed bridge spanning a wide body of water. A large cargo ship is visible in the water below the bridge. In the background, a city skyline is visible across the water. A semi-transparent green rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text "LE AZIONI".

LE AZIONI

LE AZIONI

- I ponti devono essere progettati per resistere a diversi tipi di azioni, dai carichi gravitazionali a quelli trasversali;
- Generalmente il maggiore contributo alle azioni sui ponti stradali è dato dai pesi propri, dai carichi permanenti e dai carichi variabili, oltre che dalle azioni dovute al vento e al terremoto, alle azioni di frenatura e di collisione dei veicoli;

LE AZIONI

- Oltre alle azioni di tipo statico dovute ai carichi permanenti e alle azioni dinamiche dovute al vento e al terremoto, i ponti sono soggetti ad altre azioni dinamiche di varia natura, dovute alla presenza dei carichi mobili (forze longitudinali di frenatura, azioni di impatto, forze centrifughe nei ponti in curva, ecc.)



LE AZIONI

- I due aspetti più importanti nella progettazione di un ponte sono il progetto della sovrastruttura e il progetto della sottostruttura. Nasce di conseguenza la classificazione delle azioni sui ponti (AASHTO, 1992), distinguendo tra:
 - azioni sulla sovrastruttura
 - azioni sulla sottostruttura

The background of the slide is a faded, aerial photograph of a large cable-stayed bridge spanning a wide body of water. A large cargo ship is visible in the water below the bridge. The title 'LE AZIONI PERMANENTI' is overlaid on a teal rectangular box at the top center.

LE AZIONI PERMANENTI

- peso proprio
- sovraccarico permanente
- spinta dei rilevati di accesso, sottospinte idrauliche, ecc.

PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA (G_1)

- E' spesso il contributo più significativo e quindi va valutato con una certa cura, sulla base dei dati geometrici (volumi) e dei pesi unitari dei materiali da costruzione
- Nella valutazione dei pesi propri dei ponti in acciaio si hanno poche incertezze, dovute essenzialmente alle tolleranze che si hanno negli spessori delle lamiere;
- Notevole cura deve aversi nella quantificazione dei pesi dovuti alla presenza dei giunti bullonati;



PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA (G_1)

- Maggiori sono le incertezze nella valutazione dei pesi propri delle strutture in cls dipendono dalla difficoltà di conoscere a priori il peso specifico di questo materiale, assunto usualmente pari a:
 - 2400 kg/mc cls non armato
 - 2500 kg/mc cls armato

PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA (G_1)

- La variabilità è funzione del tipo di inerti impiegato e della effettiva quantità di armatura presente; si hanno inoltre differenze tra gli spessori teorici e quelli effettivi, dovute al reimpiego delle casseforme;
- Non bisogna dimenticare che in alcune realizzazioni vengono utilizzate delle casseforme a perdere, che devono essere considerate nella valutazione dei pesi propri;

PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA (G_1)

- La variabilità è funzione del tipo di inerti impiegato e della effettiva quantità di armatura presente; si hanno inoltre differenze tra gli spessori teorici e quelli effettivi, dovute al reimpiego delle casseforme;
- Non bisogna dimenticare che in alcune realizzazioni vengono utilizzate delle casseforme a perdere, che devono essere considerate nella valutazione dei pesi propri;



SOVRACCARICO PERMANENTE (G_2)

- Questo è costituito essenzialmente da:
 - pavimentazione stradale (o massicciata ferroviaria)
 - marciapiedi
 - sicurvia
 - parapetti
 - eventuali servizi (cavi, condutture, ecc.)

SOVRACCARICO PERMANENTE (G_2)

- Per aumentare il rendimento del ponte occorre ridurre al massimo i sovraccarichi permanenti. Si è passati dalle pavimentazioni in blocchi di pietra (10 KN/mq) alle attuali pavimentazioni costituite da 7-10 cm di conglomerato bituminoso (1,5-2,5 KN/mq)
- Nel caso di piccoli ponti a travata in c.a. è di pratica comune considerare uniformemente ripartito sull'intero impalcato il carico dovuto ai parapetti, ai cordoli e alle banchine.

SOVRACCARICO PERMANENTE (G_2)

- Recenti ricerche hanno mostrato che tale pratica è erranea, poiché generalmente quasi l'80% del carico si localizza sulle travate esterne, mentre solo il 20% su quelle interne
- Nella valutazione dei carichi permanenti spesso occorre prevedere successivi interventi di manutenzione (possibilità di allargamenti della carreggiata, nuovi manti bituminosi, ecc.), ipotizzando lo spessore massimo della pavimentazione, tenendo conto che esso potrà variare nel tempo;

SOVRACCARICO PERMANENTE (G_2)

- Nel caso di ponti con impalcati metallici, per i quali la riduzione dei carichi permanenti è fondamentale, si adottano pavimentazioni di soli 3-5 cm in materiali speciali (mastici bituminosi, resine), che sono molto flessibili per non distaccarsi dalla lamiera di supporto
- Nei ponti ferroviari il mantenimento del "ballast" (massicciata) porta a sovraccarichi permanenti elevati (circa 11-15 KN/mq). Per i ponti metallici si pongono direttamente le rotaie sulla struttura con collegamenti di tipo elastico;



ALTRE AZIONI PERMANENTI (G_3)

- Queste azioni sono di difficile valutazione. E' opportuno quindi considerarle nel calcolo con i loro valori minimi e massimi, a seconda di quale risulta il caso più sfavorevole
- Esse sono:
 - spinta delle terre
 - spinte idrauliche
 - ecc...



ALTRE AZIONI PERMANENTI (G_3)

- La spinta delle terre si considera nel calcolo delle spalle, strutture di transizione tra il rilevato di accesso e il ponte. Per essa si assume generalmente l'ipotesi di Rankine (andamento triangolare delle pressioni)



ALTRE AZIONI PERMANENTI (G_3)

- Nel caso di spinta generata da rilevati, si deve tenere conto dell'effetto del sovraccarico agente su di essi, che si assume in genere pari a:
 - 20 kN/mq per strade principali
 - 10 kN/mq per strade secondarie



ALTRE AZIONI PERMANENTI (G_3)

- Nel caso di spinta generata da rilevati, si deve tenere conto dell'effetto del sovraccarico agente su di essi, che si assume in genere pari a:
 - 20 kN/mq per strade principali
 - 10 kN/mq per strade secondarie



ALTRE AZIONI PERMANENTI (G_3)

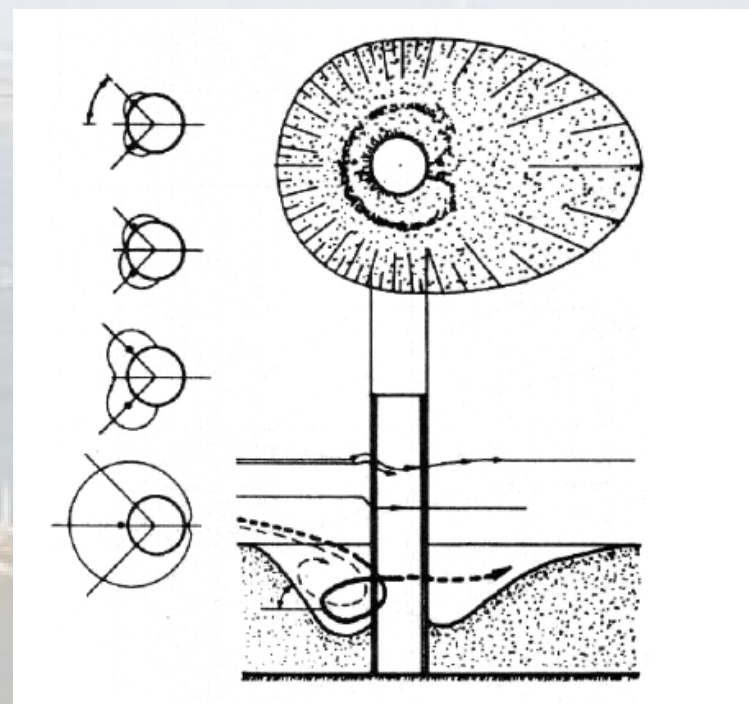
- Le spinte idrauliche possono essere generate da un corso d'acqua sulle pile, nel caso di piena.
- Esse possono avere carattere statico, ovvero è necessario tenere conto delle azioni dinamiche

AL TRE AZIONI PERMANENTI (G₃)

Per opere in attraversamento di corsi d'acqua naturali o artificiali, il progetto dovrà essere corredato da una relazione riguardante i problemi idrologici, idrografici ed idraulici.

Per pile e spalle in zone golenali o in zone potenzialmente interessate da correnti idrauliche, sono richiesti uno studio dei potenziali fenomeni di erosione e di scalzamento e la definizione delle azioni idrauliche agenti sulle pile e sulle spalle interessate dalla corrente.

Per la valutazione dell'azione idraulica agente sulle pile e sulle spalle il periodo di ritorno sul quale va valutata la massima intensità dell'azione è assunto pari a 200 anni.



AL TRE AZIONI PERMANENTI (G₃)

**VALUTAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA IN CORRISPONDENZA
DEGLI ATTRAVERSAMENTI FLUVIALI PER EVENTI DI PERIODO DI
RITORNO CORRELATO ALLA VITA UTILE DELL'OPERA
RISPETTO DEL FRANCO MINIMO**





AZIONI DI TRANSITO DEI VEICOLI

- Il tipo ed il numero di veicoli il cui peso è da considerare nel progetto di un ponte sono specifici del tempo e del luogo in cui il ponte ricade
- I carichi che vengono presi oggi nel calcolo sono solo convenzionali e rappresentano quelli che forniscono equivalenti effetti statici e cinematici.

AZIONI DI TRANSITO DEI VEICOLI

- I carichi vengono in genere dati come ripartiti a m^2 di impalcato; in alcune norme si usano anche carichi isolati notevole, posizionato nella maniera più sfavorevole sulla base di uno studio con le I.d.i.
- Tale tipo di approccio è di tipo "semiprobabilistico", fissando il valore dei carichi massimi rispetto con i quali progettare l'opera

AZIONI DI TRANSITO DEI VEICOLI

- L'approccio attuale permette anche un ulteriore trattamento probabilistico:
 - la probabilità che il ponte sia interessato interamente dai carichi mobili decresce al crescere della stesa di carico.
 - maggiore è il numero di corsie e minore è la probabilità che tutte siano caricate contemporaneamente.
 - la frequenza dei carichi ha una distribuzione statistica variabile a seconda del peso dei veicoli

AZIONI DI TRANSITO DEI VEICOLI

- Tali circostanze sono considerate dalle Normative, che prevedono di assegnare a ciascuna corsia, oltre ad un carico ripartito, un mezzo pesante isolato, il cui effetto decresce al crescere della luce del ponte; inoltre le Norme prevedono una esplicita riduzione dei carichi con l'aumentare delle corsie caricate

AZIONI DI TRANSITO DEI VEICOLI

- La considerazione dell'effettivo "spettro di carico" si risente nella scelta dei coefficienti da applicare nella combinazione delle azioni
- Inoltre, per tenere conto del basso numero di ripetizioni dei carichi massimi, le Norme prescrivono che le verifiche a fatica vengano effettuate considerando carichi ridotti rispetto ai massimi previsti

EFFETTI DINAMICI DI TRANSITO

- Un veicolo che transita con una certa velocità su di un ponte induce delle azioni di natura dinamica che sono in genere superiori a quelle che si avrebbero se lo stesso carico fosse applicato al ponte staticamente
- Nei vecchi ponti in muratura percorsi da veicoli lenti e leggeri il problema dell'amplificazione dinamica non è sentito. Con l'avvento nel secolo scorso della ferrovia e dei ponti in acciaio, su cui transitano carichi veloci e pesi dello stesso ordine di grandezza della struttura che li sostiene, il problema è diventato importante.

EFFETTI DINAMICI DI TRANSITO

- I parametri che influenzano il fenomeno sono:
 - le caratteristiche del ponte (schema statico, distribuzione delle masse, delle rigidzze, ecc.)
 - le caratteristiche dinamiche dei veicoli (massa, rigidzza, caratteristiche viscosse di sospensioni e pneumatici, ecc.)
 - le caratteristiche della pavimentazione (rugosità e irregolarità singolari)

EFFETTI DINAMICI DI TRANSITO

- L'esame di molti ponti esistenti ha mostrato come sia significativa la frequenza fondamentale di vibrazione, parametro strettamente correlato alla luce delle campate, in rapporto al tempo di attraversamento del veicolo (legato in un certo qual modo al periodo proprio dell'eccitazione)
- Studi effettuati hanno mostrato che l'amplificazione dinamica è maggiore quanto più si avvicinano le due frequenze (quella propria della struttura e quella dell'eccitazione)

LE FORZE DI FRENATURA E DI ACCELERAZIONE

- Sono azioni orizzontali trasmesse alla pavimentazione ed hanno interesse ai fini del dimensionamento degli apparecchi di appoggio e degli elementi verticali (pile e spalle)
- La forza di frenatura agisce parallelamente all'asse longitudinale del ponte ed è data dalla normativa come una aliquota del carico accidentale (10%). Essa è trasferita alle pile e alle spalle solo attraverso gli "appoggi fissi"

LE FORZE DI FRENATURA E DI ACCELERAZIONE

- Nel caso di un locomotore ferroviario occorre considerare anche l'azione del suo avviamento;
- La condizione peggiore è quella di frenatura e accelerazione contemporanee in opposizione

AZIONE CENTRIFUGA

- Si desta nei ponti in curva di raggio R ed agisce ortogonalmente all'asse del ponte ad una certa altezza dal piano viabile;
- La forza centrifuga viene trasmessa alla sottostruttura (pile e spalle) da tutti quegli apparecchi di appoggio, siano essi fissi o mobili, che impediscono gli spostamenti trasversali all'asse del ponte.

AZIONE SUI PARAPETTI E SUI SICURVIA

- Queste azioni vengono date come forze statiche orizzontali applicate ad una data altezza. Esse portano in genere a rinforzi locali della struttura in corrispondenza dei montanti di questi elementi, oltre che al loro dimensionamento
- Le Norme stabiliscono l'entità delle forze da utilizzare nei calcoli;

AZIONI DEL VENTO

- Tali azioni vanno attentamente valutate soprattutto nel caso di ponti di grande luce e di altezze notevoli, potendo in questi casi risultare alquanto onerose rispetto ai casi comuni
- Essa di solito viene schematizzata come una forza statica orizzontale che agisce su tutta la superficie investita dell'opera, più una eventuale fascia al di sopra del piano viario (di 3 m) che rappresenta l'ingombro dei veicoli;

AZIONI DEL VENTO

- La direzione del vento viene generalmente assunta orizzontale e ortogonale all'asse del ponte.
- Il vento esercita azioni dinamiche che, se trascurabili nella maggior parte dei casi, possono divenire pericolose nel caso di strutture molto snelle ed in particolare nei ponti sospesi, a causa di vibrazioni indotte per fenomeni aerodinamici.

AZIONI SISMICHE

- Si può tenerne conto effettuando una analisi pseudo-statica o dinamica. Nel primo caso l'effetto del sisma viene assimilato a quello di una serie di forze orizzontali e verticali applicate ai baricentri delle masse della struttura e ad esse proporzionali;
- Non conoscendosi a priori la direzione di ingresso del sisma, si dovranno considerare diverse direzioni nelle verifiche

AZIONI SISMICHE

- Per garantire al ponte la possibilità di resistere a terremoti di forte intensità, occorre fornire quella riserva di duttilità che gli consente di dissipare l'energia trasferita dal terremoto mediante cicli di isteresi
- Oppure è possibile montare dei dispositivi che dissipano energia sismica e si danneggiano al posto della struttura, per essere sostituiti al termine dell'evento.

AZIONI IDRODINAMICHE

- Si hanno su parti di struttura investite da'acqua in movimento. La pressione che si esercita è data da:

$$p = \frac{1}{2} \rho C_D v^2$$

ρ è la densità dell'acqua, pari a $1 \text{ KN sec}^2/\text{m}^4$

C_D è il coefficiente di forma, pari a 0,5-1,5

v è la velocità dell'acqua;

SPINTA DEL GHIACCIO

- Irrilevante nei nostri climi, diventa importante nei paesi ove si prevede che l'acqua geli per forti spessori (dell'ordine dei metri).
- In Svezia, per es., le norme prescrivono una pressione di 280 t/mq sulla parte di ponte interessata dalla glaciazione

URTO DI MEZZI O DI NATANTI

- Parte dell'energia cinetica del natante (circa la metà) viene dissipata nella deformazione plastica del guscio del natante e nei moti turbolenti dell'acqua, mentre la restante parte deve essere assorbita dalla struttura del ponte in fase elastica o con eventuali plasticizzazioni locali, che non devono comunque compromettere la stabilità globale dell'opera

URTO DI MEZZI O DI NATANTI

- E' evidente che nei casi di grossi natanti e di velocità d'urto previste rilevanti, è economicamente più conveniente ricorrere all'impiego di opere di difesa indipendenti dal ponte (scogliere o vere e proprie isole artificiali)
- Problemi analoghi si hanno nel caso di urti di automezzi su pile di viadotti o cavalcavia

AZIONI DA DEFORMAZIONI IMPRESSE

- Alcune di queste azioni possono essere volutamente provocate all'atto della costruzione, mentre altre si hanno comunque e possono indurre o no sollecitazioni secondo il tipo di struttura;
- Esse causano sollecitazioni e deformazioni e sono da considerare ai fini del dimensionamento degli apparecchi d'appoggio e dei giunti e per effettuare le verifiche;

AZIONI DA DEFORMAZIONI IMPRESSE

- Alcune di queste azioni possono essere volutamente provocate all'atto della costruzione, mentre altre si hanno comunque e possono indurre o no sollecitazioni secondo il tipo di struttura;
- Esse causano sollecitazioni e deformazioni e sono da considerare ai fini del dimensionamento degli apparecchi d'appoggio e dei giunti e per effettuare le verifiche;

AZIONI DA COAZIONI IMPRESSE

- E' il caso della precompressione nel cemento armato, ma si può avere precompressione anche in particolari strutture metalliche (tesatura di cavi, sollecitazioni indotte mediante martinetti, ecc)
- Gli effetti positivi dovuti a tali coazioni spesso diminuiscono nel tempo, a causa di fenomeni lenti come la viscosità e il rilassamento (ad es. cadute di tensione nel c.a.p.)

AZIONI DA CEDIMENTI DEI VINCOLI

- Spesso si usa provocare volontariamente un cedimento dei vincoli per generare stati di sollecitazione benefici, come ad es. per diminuire il momento negativo agli appoggi di una trave continua, aumentando quelli positivi in campata (situazione ottima nel caso di ponti a struttura mista acciaio-clc)
- I cedimenti dei vincoli possono peraltro essere anche non voluti, derivando da cause accidentali (difetti degli apparecchi d'appoggio, cedimenti del terreno di fondazione, ecc.)

AZIONI TERMICHE

Variazioni termiche differenziali

- Sono spesso sottovalutati, perché abitualmente si considerano solo variazioni uniformi di temperatura (sull'intera struttura);
- In realtà, l'effetto generato da:
 - escursioni termiche giornaliere su elementi strutturali con diversa inerzia termica
 - l'irraggiamento solare
 - l'azione del vento
 - altre cause climatiche locale

AZIONI TERMICHE

Variazioni termiche differenziali

- Tali variazioni possono portare a:
 - distribuzioni di temperatura non uniformi nell'ambito della stessa sezione
 - temperature medie differenti in elementi strutturali diversi del medesimo ponte

AZIONI TERMICHE

Variazioni termiche differenziali

- Questi fenomeni possono indurre sollecitazioni elevate e sono causa di molti fenomeni fessurativi in ponti in c.a. e in c.a.p.
- I loro effetti devono quindi essere attentamente valutati, assieme a quelli generati dalle più comuni variazioni termiche uniformi

AZIONI TERMICHE

Andamento delle temperature nelle sezioni di impalcato

- Sulla base della conoscenza di tutti i parametri del problema (caratteristiche dell'ambiente e dei materiali), è possibile valutare la distribuzione delle temperature in una sezione. Ma spesso i dati non sono sufficienti e l'analisi è assai impegnativa

AZIONI TERMICHE

Andamento delle temperature nelle sezioni di impalcato

- Ci si accontenta di operare seguendo le normative (italiana e straniera). In alcuni casi le semplificazioni introdotte conducono comunque a risultati in buon accordo con i dati sperimentali e le indagini numeriche effettuate
- Particolarmente interessante è la normativa neozelandese (NZ), relativa ad un paese con condizioni climatiche simili alle nostre. Da considerare anche le norme inglesi (BS);

AZIONI TERMICHE

Andamento delle temperature nelle sezioni di impalcato

- Le (NZ) tengono conto dello spessore della pavimentazione per la temperatura da assumere all'estradosso della soletta:

$$T = 32 - 0.2h \quad (^\circ\text{C})$$

ove h è lo spessore della pavimentazione espresso in mm. Si passa da 32°C in assenza di pavimentazione a 12°C nel caso frequente di $h = 100$ mm di conglomerato bituminoso

AZIONI TERMICHE

Andamento delle temperature nelle sezioni di impalcato

- Inoltre le (NZ) assumono la legge non lineare che descrive l'andamento delle temperature lungo l'altezza della sezione;
- In Italia si ipotizza un andamento lineare delle temperature sull'altezza dell'impalcato, che si discosta alquanto dalla realtà fisica, ma che semplifica molto i calcoli di verifica;

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche longitudinali

- Sono quelle sollecitazioni che nascono nell'impalcato inteso come trave, per effetto di una distribuzione non uniforme di temperatura lungo l'altezza delle varie sezioni
- Si distinguono due situazioni:
 1. Temperatura variabile linearmente (come per le norme italiane)
 2. Temperature variabile con legge qualunque (NZ e BS)

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche longitudinali

Temperatura variabile liberamente

- Essa ha sulla struttura gli stessi effetti di temperatura uniforme uniforme, cioè provoca solo spostamenti se la struttura è isostatica, induce anche sollecitazioni se la struttura è iperstatica. Il procedimento di analisi è noto dalla S.d.C.

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche longitudinali

Temperatura variabile con legge qualunque

- Essa induce sollecitazioni anche se la struttura è isostatica!!.
- Se ciascuna fibra potesse deformarsi liberamente, si avrebbe:

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot T(y)$$

con un conseguente ingobbamento della sezione;

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche longitudinali

Temperatura variabile con legge qualunque

- Nell'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, l'andamento effettivo delle deformazioni deve essere lineare, cioè:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \chi y$$

essendo ε_0 la deformazione all'altezza della fibra di riferimento e χ la curvatura, entrambe delle incognite;

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche longitudinali

Temperatura variabile con legge qualunque

- La differenza tra la deformazione libera e quella effettiva implica l'esistenza di uno stato tensionale dato da:

$$\sigma = E\varepsilon_e = E(\varepsilon - \varepsilon_t) = [\varepsilon - \alpha \cdot T(y)]$$

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche longitudinali

Temperatura variabile con legge qualunque

- Le incognite ε_0 e χ si ricavano imponendo la condizione che lo sforzo normale e il momento intorno all'asse baricentrico devono essere nulli, per una struttura isostatica:

$$N = \int \sigma b(y) dy = 0 \qquad M = \int \sigma b(y)(y - y_G) dy = 0$$

- con $b(y)$ la legge di variazione della larghezza della sezione

$$\chi = \frac{\alpha}{J} \int t(y) b(y)(y - y_G) dy \qquad \varepsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \int t(y) b(y) dy - y_G \chi$$

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche trasversali

- Sono quelle sollecitazioni che nascono nel piano ortogonale all'asse del ponte e che riguardano quegli impalcati la cui sezione è riconducibile ad un telaio chiuso (ponti a cassone)
- Si destano sollecitazioni per il fatto che, tenuto conto delle distribuzioni di temperatura suddette, la soletta superiore viene a trovarsi ad una temperatura diversa da quella delle altre pareti

AZIONI TERMICHE

Sollecitazioni termiche trasversali

- Dato il piccolo spessore della soletta, si può accettare una distribuzione lineare di temperatura nello spessore. Di conseguenza le sollecitazioni possono pensarsi somma degli effetti dati da una distribuzione uniforme e di una a farfalla