



ERRORI FREQUENTI NELLE STRUTTURE IN C.A.

S. Tattoni

Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, Milano, Italy

SOMMARIO

Si descrivono, interpretandoli, alcuni errori tipici nella progettazione e realizzazione delle strutture in c.a. Non sempre gli errori hanno necessariamente conseguenze disastrose, ma possono comunque comportare significativi danni economici o limitazioni funzionali. A volte gli errori sono latenti e si manifestano solo nel caso di sima o di azioni eccezionali (incendio, urto, esplosione).

Fra le principali fonti di errore si annoverano: la scarsa cura nella progettazione ed esecuzione dei particolari costruttivi, l'inadeguatezza dei modelli di calcolo, l'eccessiva e acritica fiducia nei risultati di programmi di calcolo più o meno sofisticati.

1. PREMESSA

È sempre con un certo imbarazzo che si parla di errori, specie se altrui, per il timore di arrogarsi il ruolo di giudice. Tuttavia, indossato il vestito dell'umiltà e forte della massima "*Usus et experientia dominantur in artibus, neque est ulla disciplina, in qua non peccando discatur.*", mi accingo a presentare alcuni errori nella progettazione e realizzazione delle strutture in c.a., fra quelli che mi sono sembrati più significativi.

La genesi, l'analisi, la prevenzione degli errori umani costituisce ormai una disciplina a sé. Essa analizza fra l'altro la conoscenza dei meccanismi cognitivi che spiegano l'insorgenza di errori dovuti alla deviazione dell'azione dalla volontà cosciente, di quelli legati a una scelta volontaria sbagliata sino agli errori intenzionali (vedi Reason (6)).

Mi preme segnalare che alcuni degli errori descritti in questo intervento sono stati commessi da illustri progettisti (ovviamente non nominati) non certo per incuria o incompetenza, ma semplicemente perché all'epoca di realizzazione delle loro opere alcuni aspetti del comportamento delle strutture in c.a. non erano chiaramente conosciuti.

Altri errori sono stati commessi in buona fede, riponendo eccessiva fiducia in prassi costruttive ormai consolidate, ma trascurando il fatto che, aumentando progressivamente le prestazioni richieste alle strutture (p.e. la luce di un ponte), si manifestano problemi che prima rimanevano nascosti (5).

Spesso si sbaglia nel considerare sempre corrette ed affidabili le teorie matematiche poste alla base dei modelli di calcolo strutturale: è bene che l'ingegnere abbia sempre presente

quali siano le premesse e le ipotesi semplificative poste alla loro base (p.e. il principio di de Saint Venant).

Non poca responsabilità è da addossare alla pedissequa osservanza di norme e regolamenti, seguendo il principio “se è lecito è giusto”! Qui si aprirebbe un ampio dibattito filosofico e sociologico, ma non è questa la sede. Basti ricordare che, pur nell’osservanza del limite tensionale dell’acciaio FeB 44k controllato, sono state realizzate strutture eccessivamente deformabili ed ampiamente fessurate, a volte non utilizzabili.

Infine, citando liberamente Petroski (5), il vertiginoso progresso negli strumenti e modelli analitici consentiti dall’uso degli elaboratori elettronici non porta necessariamente al miglioramento dei prodotti dell’ingegneria; infatti, la scelta dei dati di ingresso (input) e l’interpretazione dei risultati dell’analisi (output) richiede capacità di giudizio che esulano a volte dai metodi strettamente scientifici. Nulla può rimpiazzare la cultura, l’esperienza, l’immaginazione e la capacità critica del progettista.

BIBLIOGRAFIA

1. Biondini F., Tattoni S., Titi M., “Analisi dello stato di degrado e valutazione dell’evoluzione nel tempo delle prestazioni strutturali degli edifici delle ex fonderie di Multedo”, *Atti del 20° Congresso CTE*, Milano 6-8 novembre 2014.
2. Ceccotti A., Giangreco E., Tattoni S. ed altri, “*Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*”, Centro Internazionale di Aggiornamento Scientifico-Sperimentale, Bolzano 2002.
3. Dei Poli S., “*Crolli e lesioni di strutture*”, Ed. EPC, 2015.
4. Menditto G., Migliacci A. Tattoni S., “*Consolidamento degli edifici*”, Manuale di Ingegneria Civile, Zanichelli/ESAC, Bologna 2001.
5. Petroski H., “*Design Paradigms*”, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
6. Reason J., “*L’errore Umano*”, EPC editore, 2014
7. Tattoni S., “Il ponte ad arco in c.a. di Carate Brianza: indagini ed interventi conservativi”, *Atti del 9° Congresso Scienza e Beni Culturali*, Bressanone 6-9 luglio 1993.
8. Tattoni S., Alchieri M. F., Della Volta G., “The Structural Refurbishment of a R.C. Highway Bridge by External Tendons: a Case History”, *Proc. 6° Int. Conf. On Structural Faults and Repair*, London July 1995.
9. Tattoni S., “Collapse of Prestressed Concrete Jetties: Durability and Fault Analysis”, *Elsevier, Case Studies in Engineering Failure Analysis* 1 (2013) 131–138, ISSN 2213-2902.

Cause eccezionali di natura ed intensità non esattamente conosciute in fase di studio

Terremoti

Legge 2/2/1974 n°64
Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche

Incendi

CM Interno 14/09/1971 n°61
Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile .

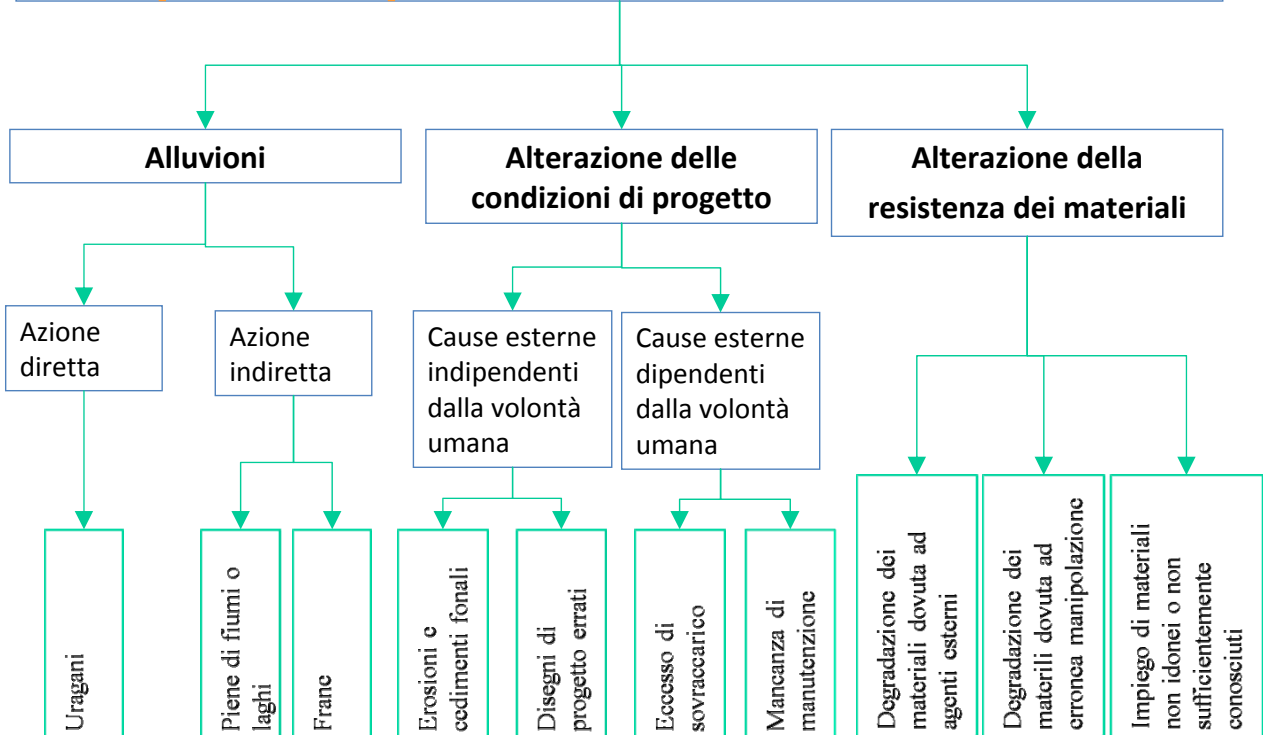
Esplosioni

DM 14/01/2008
Norme Tecniche per le Costruzioni

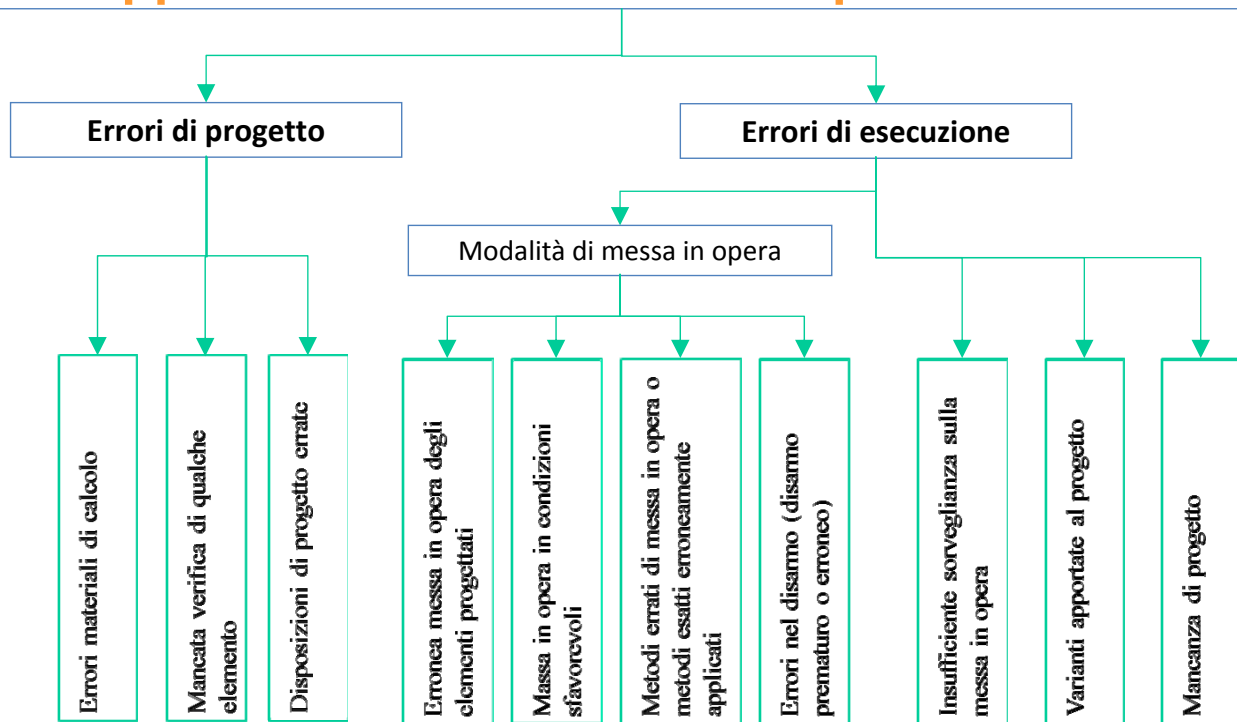
In realtà tale categoria poteva essere vera in passato. L'evoluzione normativa ha man mano dato indicazioni utili per la progettazione. Nelle caselle sono indicate le prime normative italiane emesse al riguardo delle singole cause cosiddette «eccezionali».



Cause eccezionali di cui la natura e l'intensità possono prevedersi in fase di studio



Cause eccezionali ovviabili con uno studio più approfondito ed una tecnica più accurata



IF CRASC'17

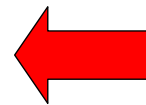
IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
 VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
 POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Crolli per raggiungimento dello SLU in sezione corrente

A parte rari casi di madornali errori nel calcolo delle azioni o nel progetto delle dimensioni della sezione (geometriche ed area delle armature) i collassi rovinosi per effetto di flessione, taglio, azione assiale, torsione sono rari.

- Gli errori di dimensionamento sono in genere agevolmente rilevabili in sede di controllo degli elaborati grafici.
- I coefficienti di sicurezza delle azioni e dei materiali sono largamente cautelativi.
- Nelle strutture in c.a. tradizionali si può contare sull'effetto dell'iperstaticità.



Esiste tuttavia una casistica di errori (ancorché commessi in buona fede) dovuti a una **imperfetta conoscenza dei meccanismi resistenti** degli elementi in c.a.

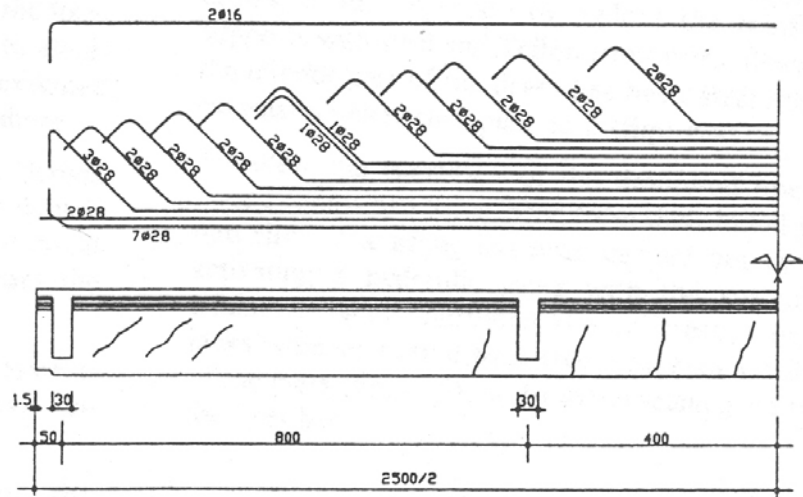
IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
 VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
 POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Carenza di armature a taglio

In questo manufatto (circa 1960) le armature di flessione sono state scalate in funzione del momento flettente sin quasi ad annullarsi in corrispondenza dell'appoggio.



La grande quantità di barre piegate è sufficiente a sostenere la maggior parte dello scorrimento, ma alle staffe compete solo una minima percentuale dello stesso (< 20%).

Ne consegue **l'impossibilità di instaurarsi del traliccio resistente** (ancorché isostatico alla Mörsch) e quindi la formazione di lesioni per taglio.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Armatura inadeguata a taglio



L'elemento verticale, molto rigido e tozzo, è stato sollecitato durante il sisma da un'azione di taglio non supportata da un'adeguata armatura trasversale.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Inadeguata armatura a taglio (e di contenimento)

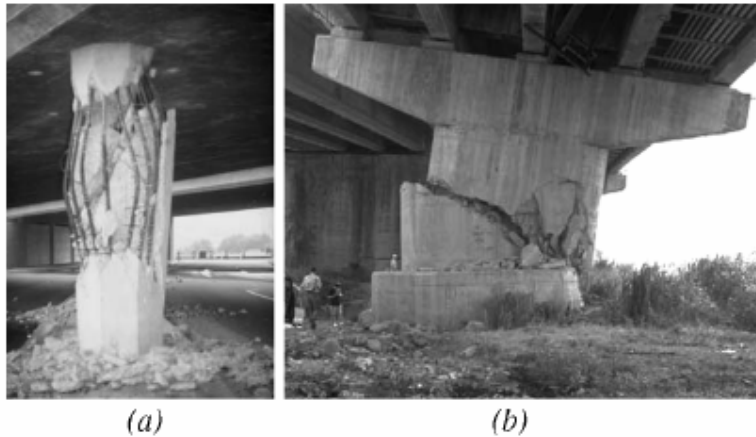


Fig. 2.5—(a) Column damage, Route 5/210, San Fernando earthquake; and (b) damage to squat column, Wu-Hsi Bridge, Chi-Chi earthquake.

Le pile, progettate con criteri non sismici, non presentano quei dettagli di armatura idonei a conferire all'elemento strutturale adeguata duttilità. Nel caso di pile di altezza variabile, gli elementi più corti (quindi più rigidi) assorbono una maggiore quota delle forze sismiche e non sempre hanno la necessaria resistenza all'azione tagliante.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Brusche variazioni di rigidezza

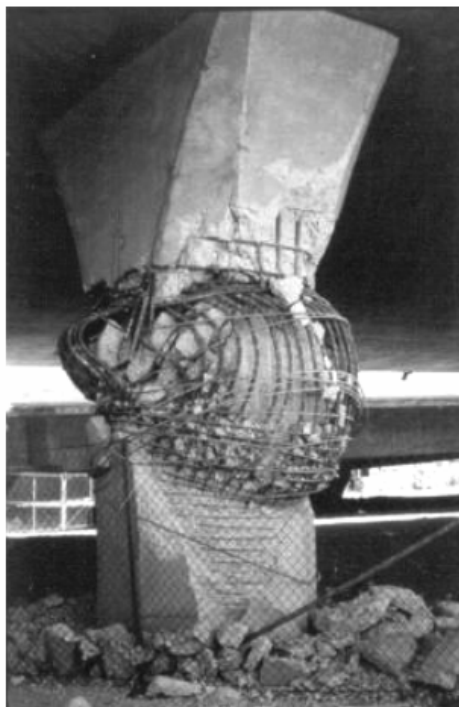


Fig. 2.6—Damage to column mainly due to flares near the column top. (Courtesy of University of California, San Diego.)

In presenza di brusche variazioni di sezione, le zone della pila distanti dalle estremità non essendo quelle normalmente associabili con la formazione di cerniere plastiche, potrebbero essere scarsamente armate sia nei confronti delle azioni normali (M , N) che per taglio (V). Inoltre la formazione della cerniera plastica lontano dalle estremità dell'elemento aumenta il gradiente di momento e quindi l'entità del taglio.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



La criticità dei particolari



La catena si rompe in corrispondenza dell'anello più debole ...
Non sempre però, specie in sistemi complessi, è agevole individuarlo.
Al progettista si richiede una grande cura dei particolari costruttivi e la revisione critica del proprio operato alla ricerca dei punti deboli..

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017

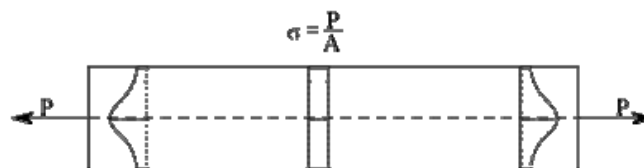


De Saint-Venant: chi era costui?



Adhémar-Jean-Claude
Barré de Saint-Venant
(1797-1886)

Il **principio di de Saint-Venant** afferma che se un sistema di forze in equilibrio agisce su una parte della superficie di un solido composto di materiale omogeneo, isotropo ed elastico lineare, i suoi effetti si attenuano allontanandosi dalla parte di superficie sollecitata.

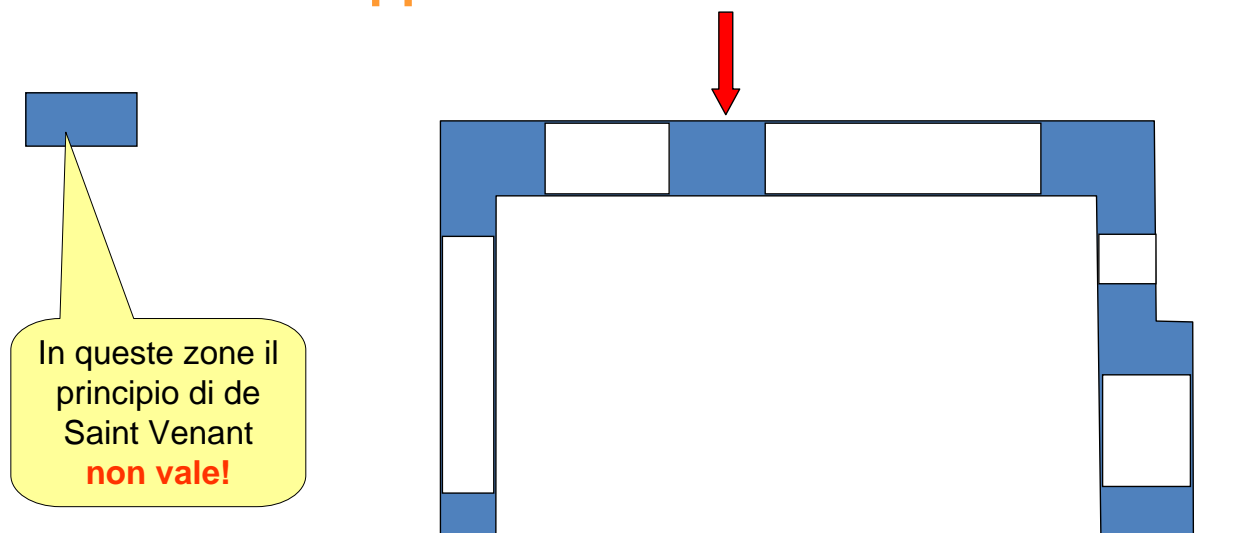


IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Dove è applicabile De Saint Venant?



Ne consegue che i metodi di progetto e verifica in sezione corrente normalmente impiegati non sono adeguati nelle zone di nodo o variazione della sezione.

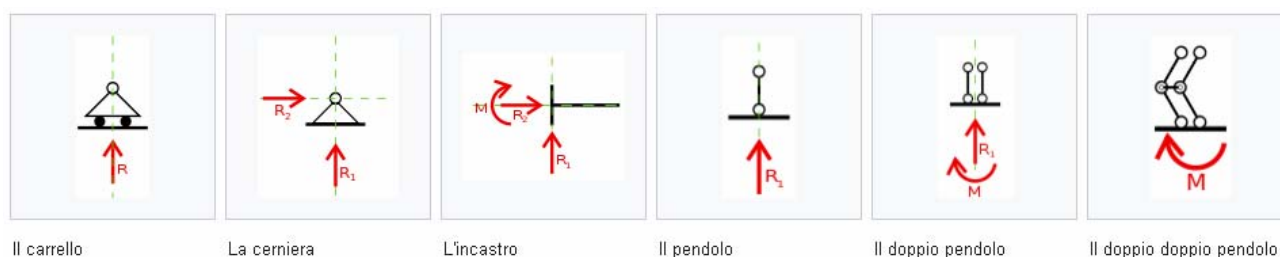
Si deve ricorrere a metodi differenti (p.e. "strut & ties").

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



La criticità dei particolari: i vincoli realizzati sono anche quelli progettati?



Il carrello

La cerniera

L'incastro

Il pendolo

Il doppio pendolo

Il doppio doppio pendolo

La realizzazione di un vincolo fra elementi strutturali diversi (trave-trave, trave pilastro, pilastro-pilastro, trave-soletta, ecc.) richiede una particolare cura, ben nota ai costruttori di strutture in acciaio, ma troppo spesso trascurata dai progettisti e costruttori di strutture in c.a..

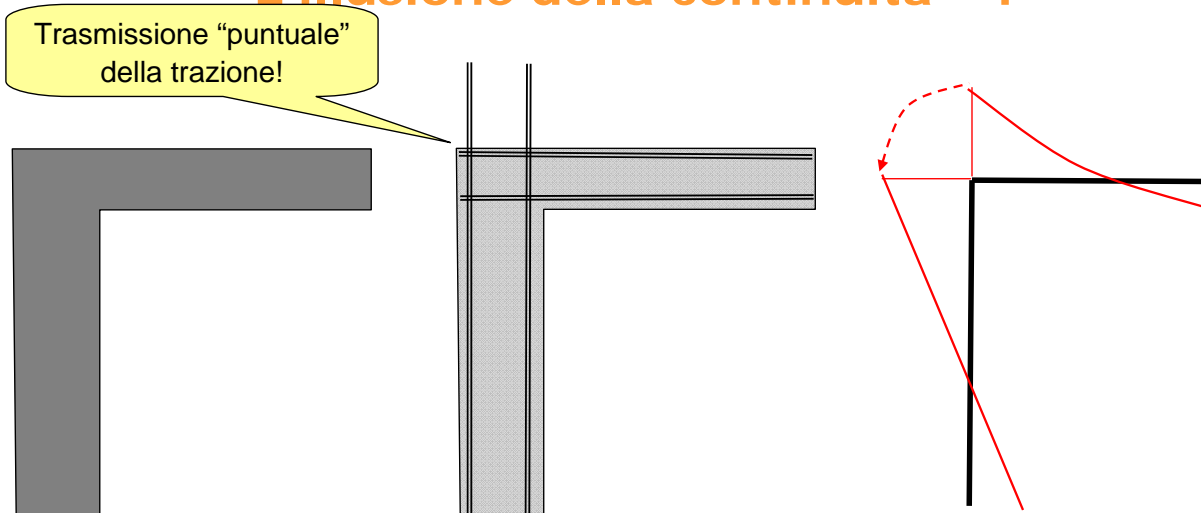
Non sempre il vincolo effettivo corrisponde a quello ipotizzato.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



L'illusione della continuità - 1



La trazione indotta dall'azione flessionale non è in grado di trasmettersi dalla trave al pilastro. Anche se in apparenza il vincolo è un incastro, in realtà il nodo si comporta come una **cerniera**.

Non è possibile contare sulla redistribuzione dei momenti.

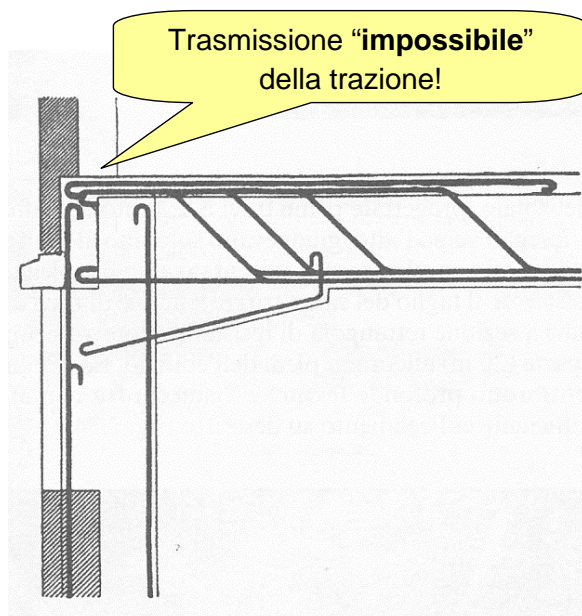
Non è neanche possibile contare sull'effetto cerchiatura delle armature di travi e corree.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



L'illusione della continuità - 2



L'effetto "incastro" è puramente **illusorio**, anche se il disegno della carpenteria mostra un significativo irrigidimento del nodo.

L'edificio è collassato in concomitanza di un incendio, non avendo adeguate risorse di iperstaticità.

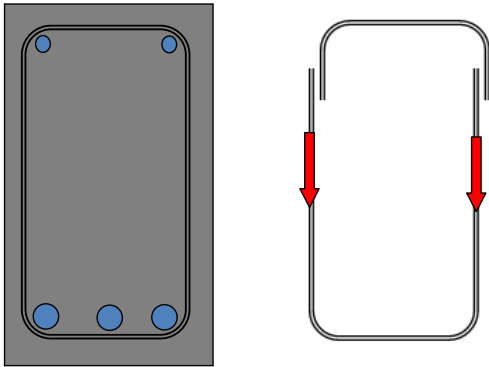
Edificio Industriale in Germania.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



L'illusione della continuità - 3



Tecnica costruttiva delle staffe “a cappello”, molto diffusa in alcune regioni d'Italia.

Esecutivamente comoda, ma staticamente **inefficiente**.

La staffa aperta non è in grado di trasmettere la trazione conseguente all'instaurarsi del traliccio di Mörsch.

Finché il taglio V rimane contenuto entro valori per cui è sufficiente il contributo del solo cls. la staffa è scarsamente sollecitata.

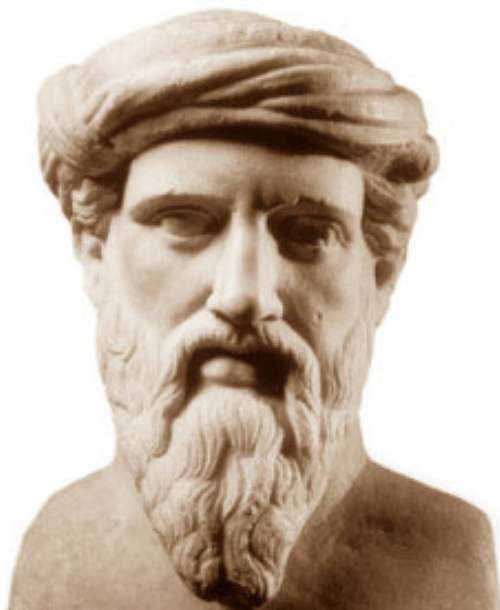
All'atto dell'apertura di una fessura da taglio, la staffa potrebbe **sfilarsi** dal corpo della trave (rottura per aderenza e non per snervamento dell'acciaio).

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



L'appoggio



«da mihi ubi consistam, et terram movebo» (Pitagora)

Più modestamente ci accontenteremmo che l'appoggio fosse in grado di **sostenere** il peso delle nostre costruzioni ...

IF CRASC'17

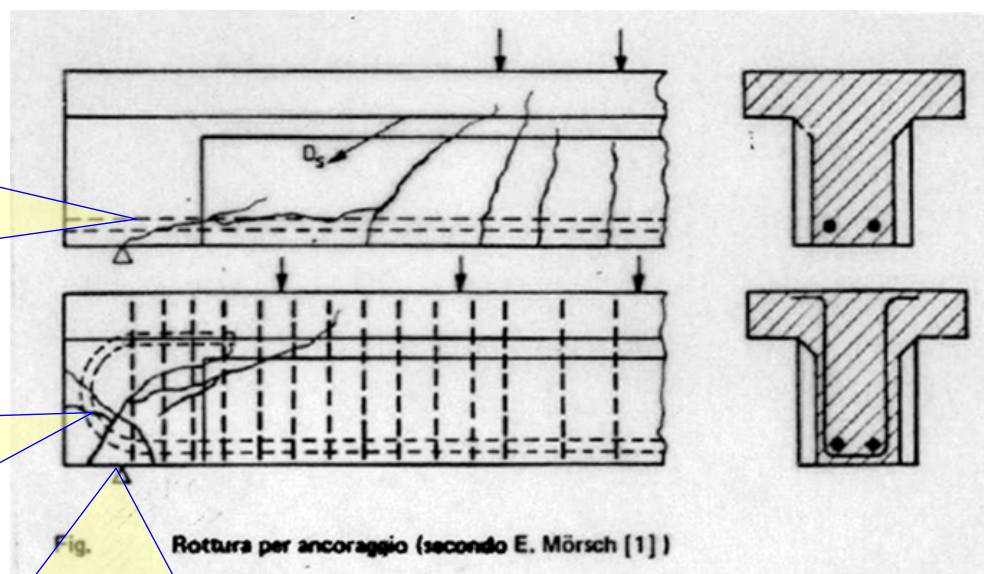
IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Criticità degli appoggi

Perdita di ancoraggio e sfilamento dell'armatura inferiore

Rottura dell'appoggio e possibile caduta dell'elemento.



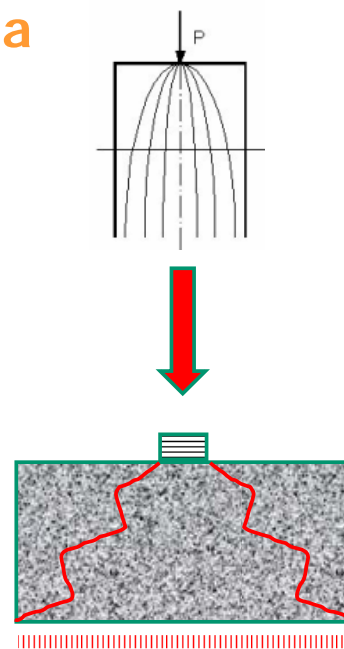
La reazione d'appoggio (anche decine di ton) si concentra in un'area ristretta

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Reazione di appoggio concentrata



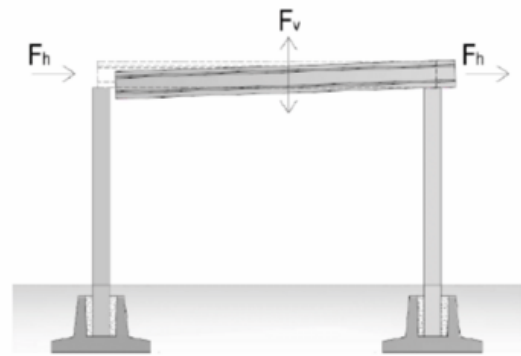
Baggiolo in c.a. con fessure inclinate causate da effetti locali di concentrazione degli sforzi (nella foto appoggio di una trave a doppio T in acciaio).
Le fessure indicano **non adeguata armatura di «frettage»**.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Sottrazione di appoggio



Le forze di inerzia indotte dal sisma superano la forza di attrito esercitata dal semplice appoggio e provocano la caduta della copertura.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Sottrazione di appoggio



La capacità di un ponte di sostenere l'azione sismica dipende in larga misura dalla larghezza degli appoggi intermedi e sulle spalle, nonché dalla capacità di spostamento e dalla resistenza di elementi di ritenuta e chiavi di taglio. In caso di sisma di forte entità può verificarsi **la caduta delle travi dalle loro sedi** (appoggi).

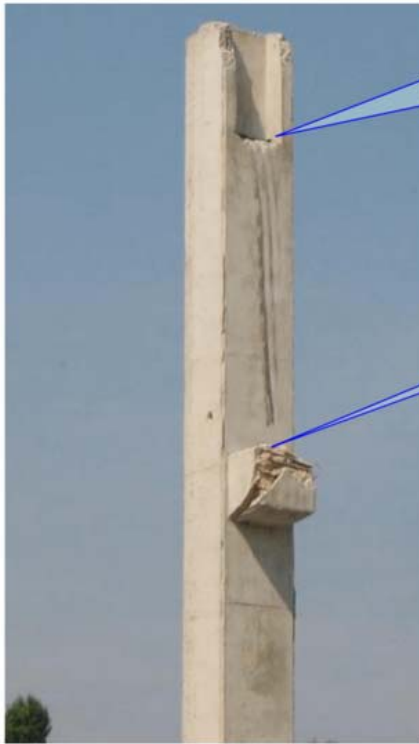
Fig. 2.4—Collapse of a bridge superstructure due to inadequate expansion joint details. (Courtesy of University of California, San Diego.)

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Insufficiente lunghezza dell'appoggio



Rottura del calcestruzzo per insufficiente lunghezza dell'appoggio.

Successiva rottura della mensola per la caduta della capriata.



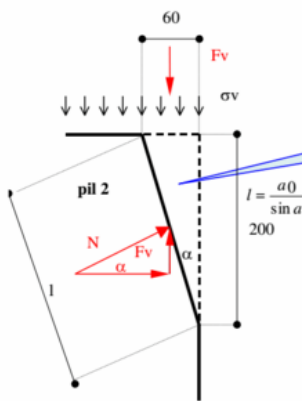
IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Insufficiente lunghezza dell'appoggio

Cuneo di distacco (dimensioni rilevate al pil 2): zona priva di armature



Rottura della mensola per insufficiente lunghezza dell'appoggio.

Coefficiente di sicurezza a rottura per il solo contributo del cls << 1!!

Azione verticale sul cuneo

$$F_v = \sigma_v \cdot b \cdot a_0 \quad F_v = 8.30 \cdot 260 \cdot 60 \quad F_v = 129.48 \text{ kN}$$

Per equilibrio

$$N = \frac{F_v}{\sin \alpha}$$

Tensione obliqua

$$\sigma_N = \frac{N}{b \cdot l} = \frac{F_v \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha \cdot b \cdot a_0} = \frac{F_v}{b \cdot a_0} = \sigma_v \quad \sigma_N = 8.30 \text{ Nmm}^{-2}$$

Resistenza a trazione calcestruzzo C40/50 (tab. 3.1 UNI ENV 1992-1-1)

$$f_{ctk} = 2.50 \text{ Nmm}^{-2}$$

Rapporto di sollecitazione

$$\psi = \frac{\sigma_N}{f_{ctk}}$$

$$\psi = 3.3 > 1$$

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017

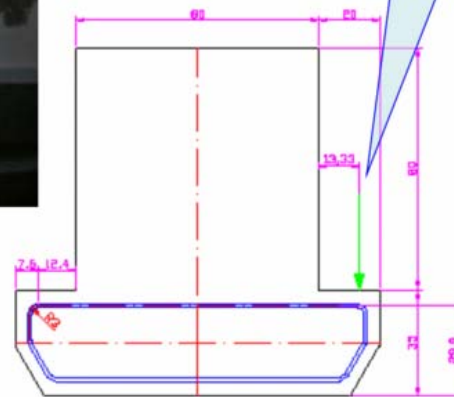


Insufficiente lunghezza dell'appoggio



Rottura della mensola per insufficiente lunghezza dell'appoggio.

Reazione d'appoggio molto esterna.



Il danno si ripete per diverse decine di volte nella copertura del piano interrato di un grande centro commerciale.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Inadeguati apparecchi di appoggio



Fig. 2.11—Damage at Fourth Avenue on-ramp in 2001 Nisqually earthquake. (Courtesy of Washington Department of Transportation.)

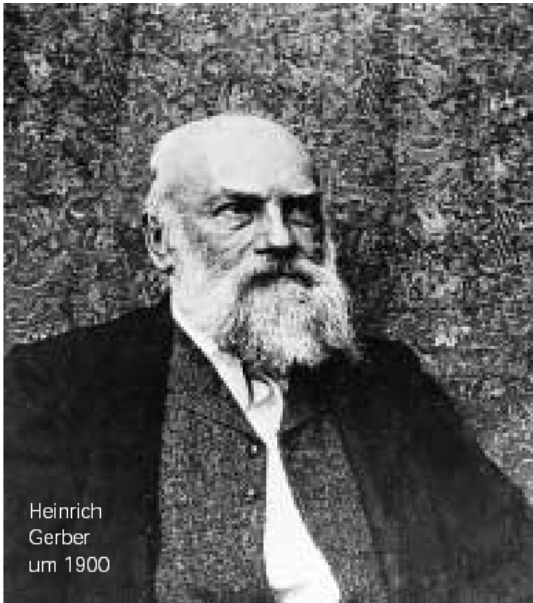
L'effetto di trascinamento dell'impalcato sulle mensole Gerber con appoggio non adeguato ha provocato danni all'elemento di supporto.

IF CRASC'17

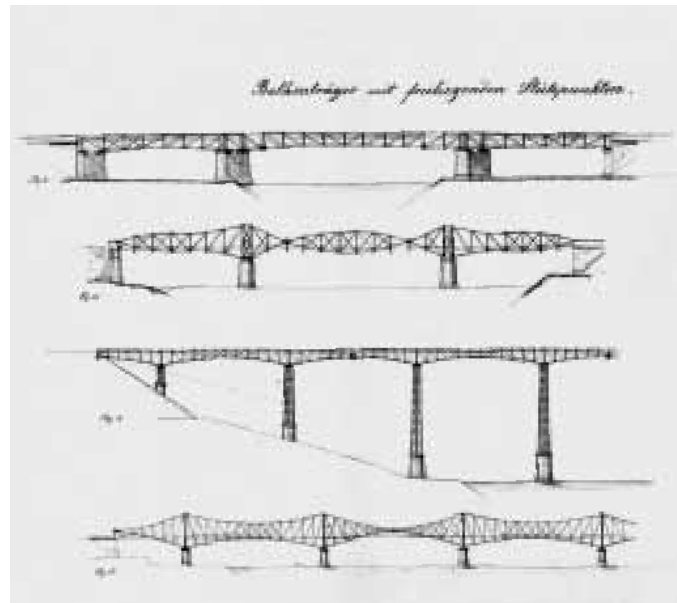
IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Trave Gerber



Heinrich
Gerber
um 1900



Heinrich Gerber
Nato a Hof il 2 dicembre 1832.

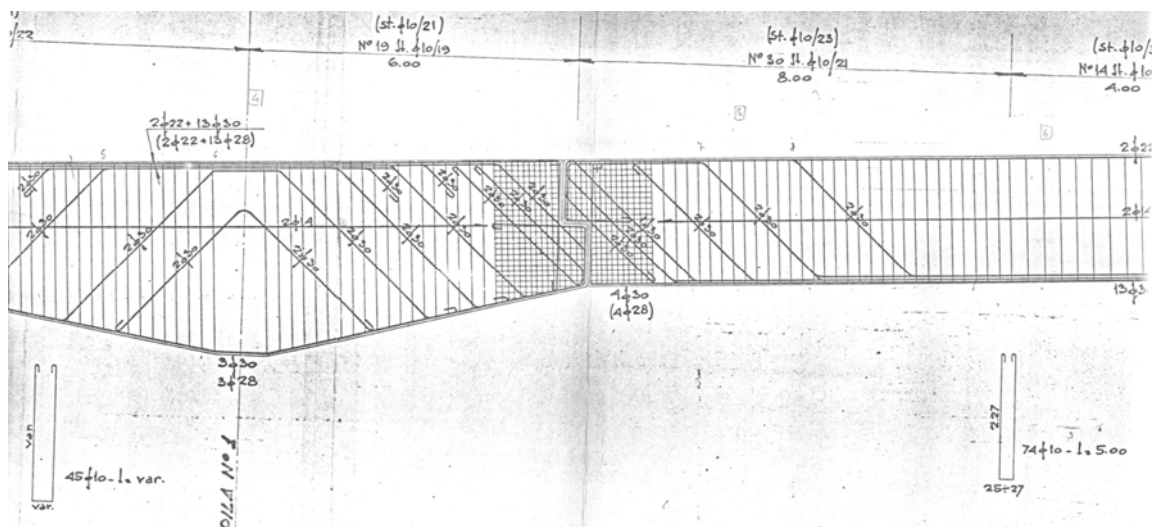
La travatura con appoggi sospesi da lui messa punto (Balkenträger mit freiliegendstützpunkten) è oggi nota come **trave Gerber**

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Selle Gerber - 1



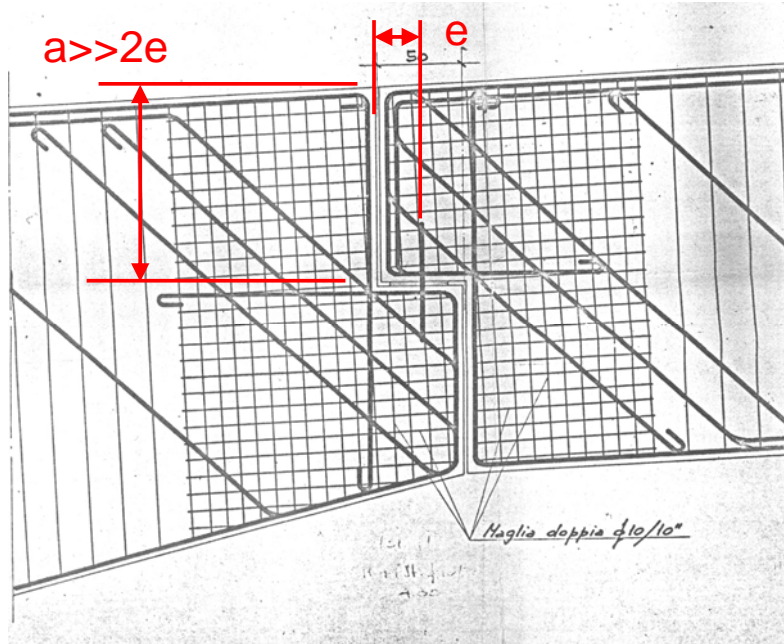
Lo schema a travatura Gerber ha trovato molto favore nella costruzione dei ponti poiché consentiva di abbinare i vantaggi delle travature continue a quelli delle strutture isostatiche (insensibilità ai cedimenti vincolari, i.e. abbassamenti delle pile)

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017

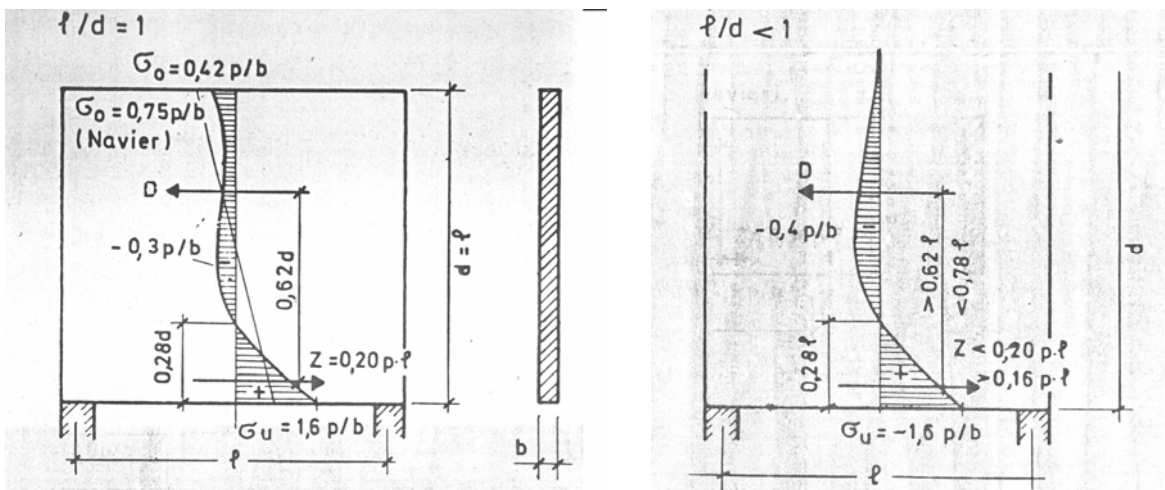


Selle Gerber - 2



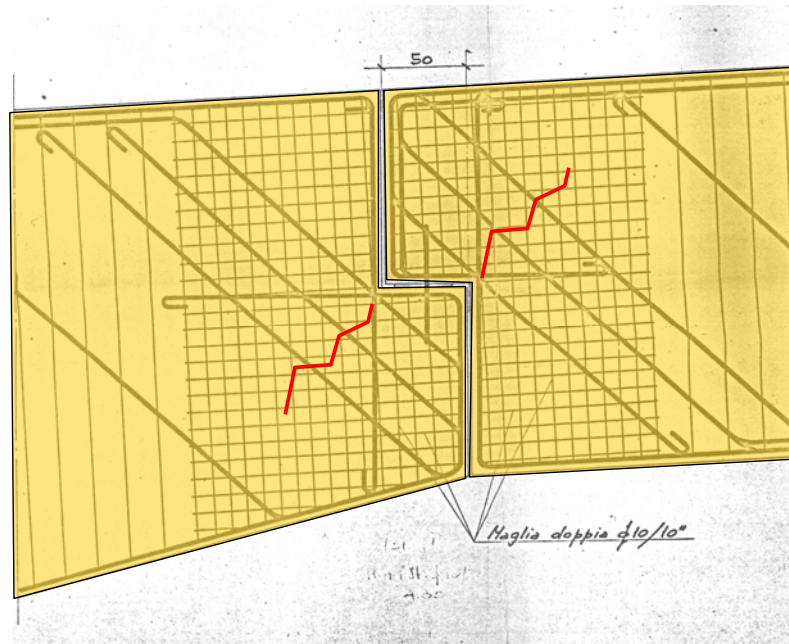
Si sono verificati tuttavia numerosi inconvenienti a carico delle mensole che sostituiscono le selle a causa di un errato rapporto sbalzo/altezza

Selle Gerber - 3



La teoria delle travi alte mostra che per valori del rapporto $L/d > 1$ (luce/altezza) lo stato tensionale della lastra non cambia sensibilmente ed il valore della coppia interna resta pressoché costante $z \cong 0.7L$
Il braccio di coppia dipende non più dall'altezza della trave, ma dalla luce.

Selle Gerber - 4



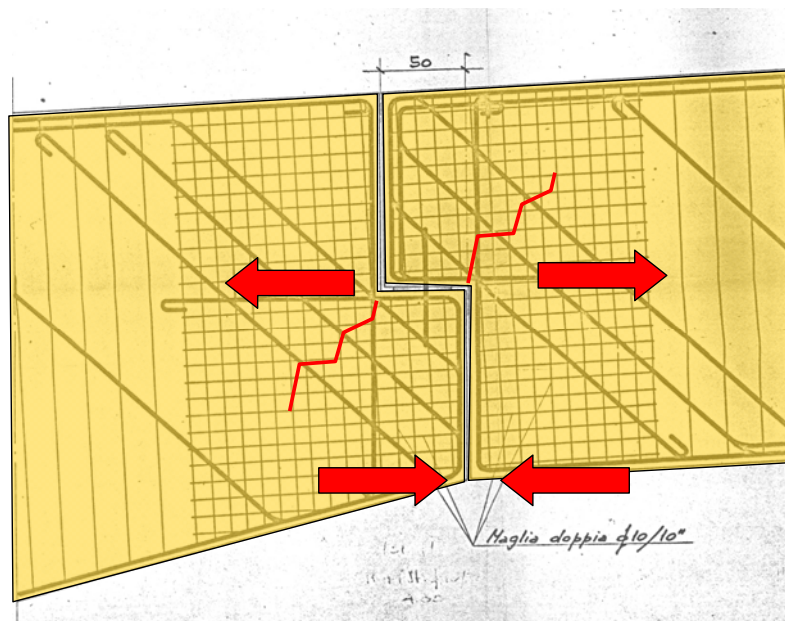
L'armatura, dimensionata sulla base di un braccio di coppia proporzionale all'altezza geometrica della mensola ($z \cong 0.9a$), risulta spesso sottodimensionata e si innescano fenomeni di fessurazione.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Selle Gerber - 5



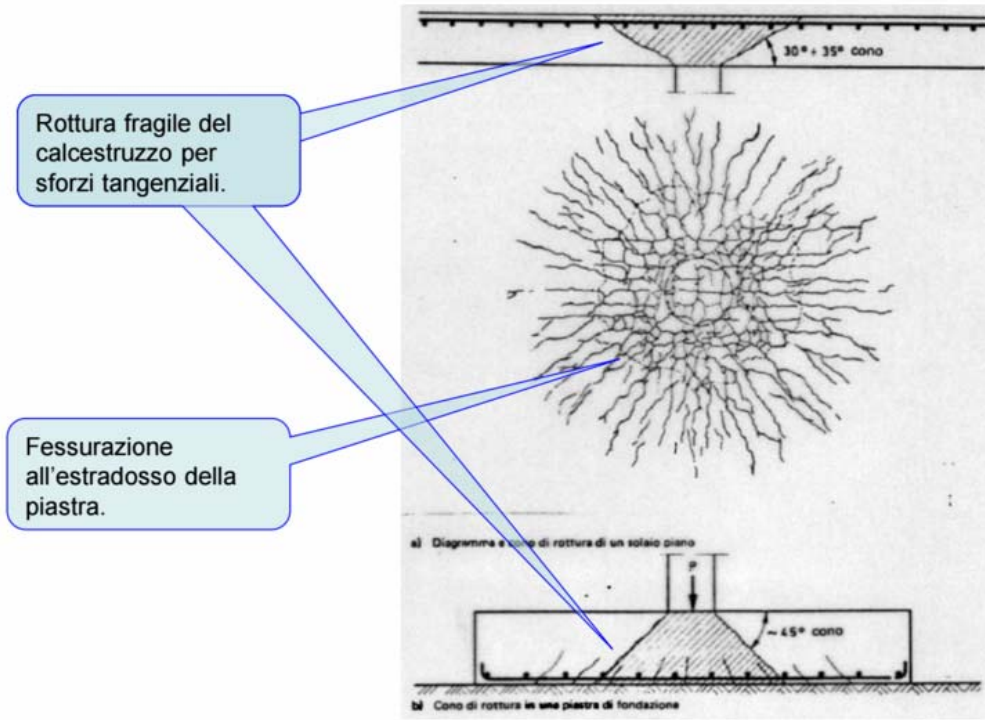
L'apertura della fessura incrementa la rotazione reciproca dell'appoggio sulla sella Gerber; se il "gap" fra gli elementi non è sufficiente, nasce un momento resistente con trazioni anomale sullo spinotto e compressioni eccessive sul calcestruzzo.

IF CRASC'17

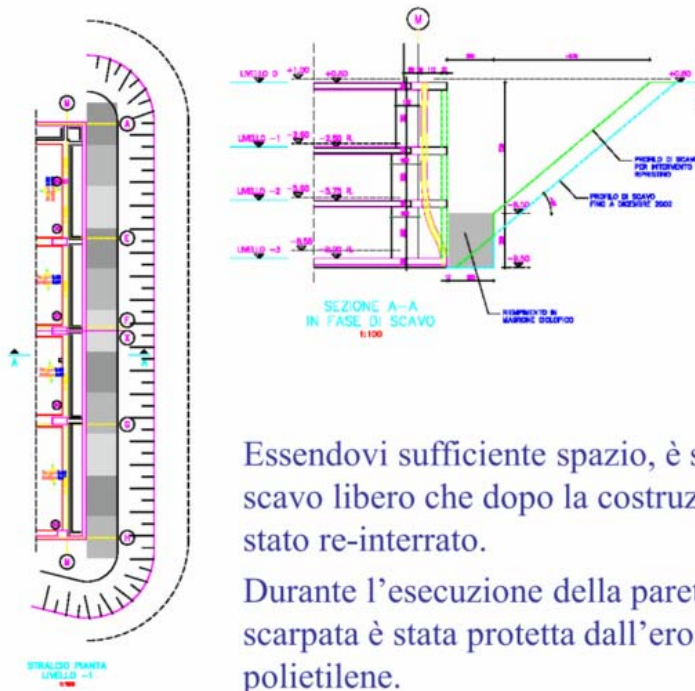
IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Effetti locali: il punzonamento



Esempio di punzonamento - 1

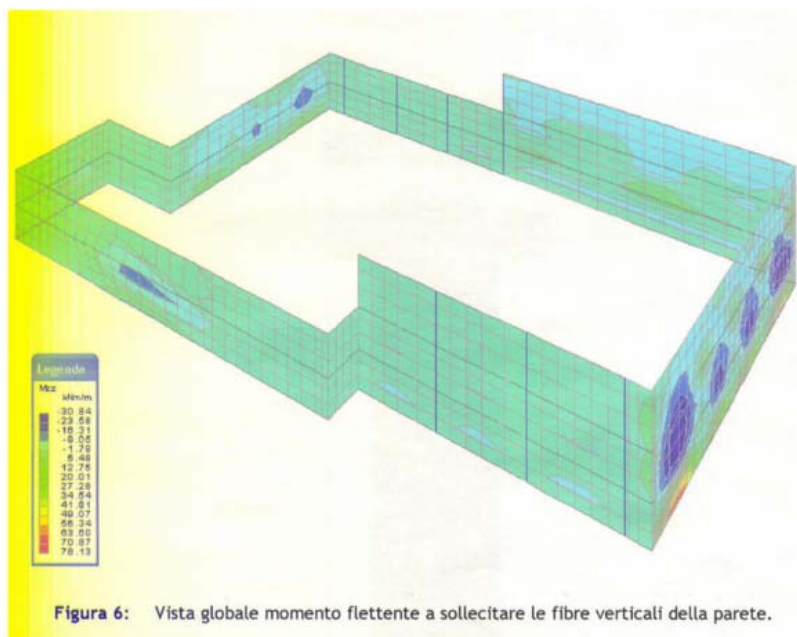


Nella realizzazione di un edificio residenziale in c.a., era prevista la realizzazione di 3 piani di box interrati.

Essendovi sufficiente spazio, è stato effettuato uno scavo libero che dopo la costruzione della parete è stato re-interrato.

Durante l'esecuzione della parete la superficie della scarpata è stata protetta dall'erosione con fogli di polietilene.

Esempio di punzonamento - 2



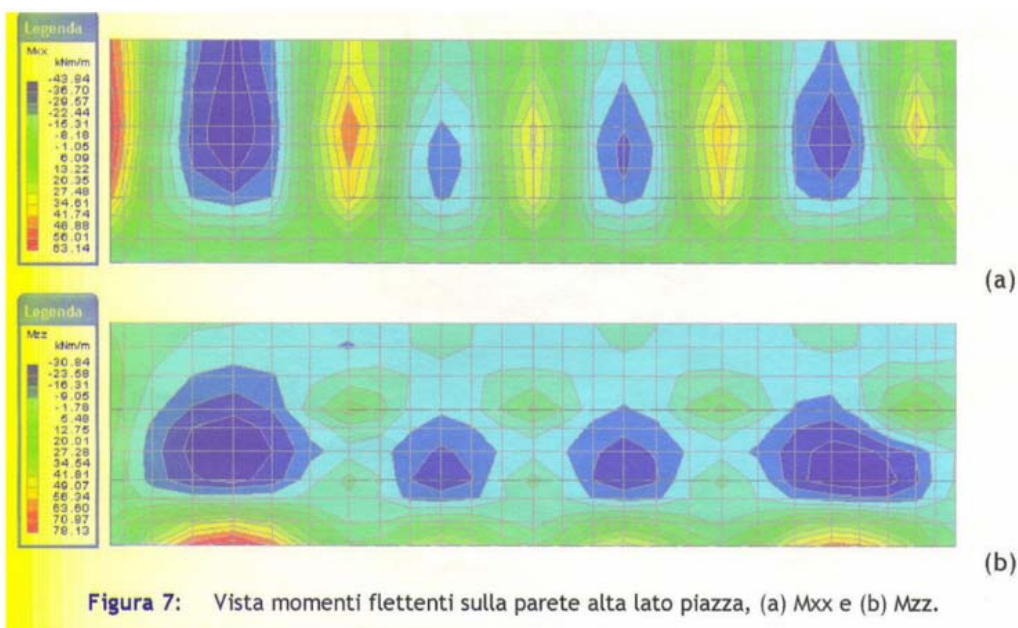
Il muro di contenimento, è stato calcolato col metodo degli E.F. tenendo conto della spinta attiva del terreno e con i vincoli rappresentati dai puntoni in c.a.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Esempio di punzonamento - 3



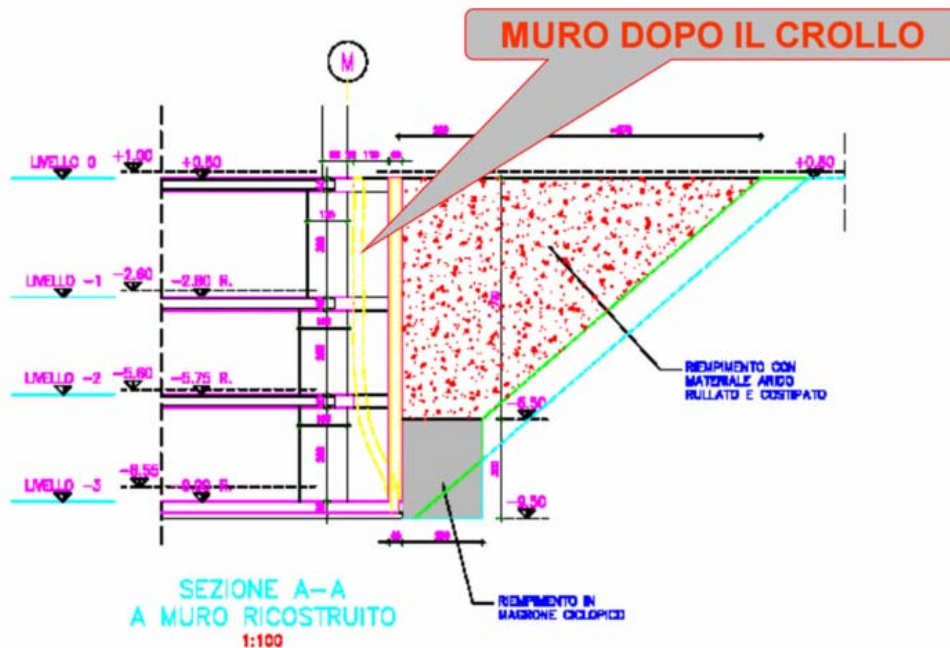
L'analisi, anche se accurata, ha però preso in considerazione solamente gli effetti flessionali della spinta sul muro di contenimento, consentendo di definire le relative armature di parete.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Esempio di punzonamento - 4



Dopo il riempimento dello spazio a tergo del muro, l'intera parete ha ceduto andando ad appoggiare alla struttura dell'edificio.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Esempio di punzonamento - 5

L'esempio proposto mostra il punzonamento come causa primaria del crollo.

In realtà l'evento è frutto di una sequenza di errori di diversa natura: geotecnica, di analisi, esecutiva e strutturali qui elencate.

- Sottovalutazione **dell'angolo di attrito del terreno** di riporto.
- Sottovalutazione della **spinta attiva** per la impossibilità del muro (contrastato dall'edificio) di spostarsi.
- Preesistenza di una **superficie privilegiata di scorrimento**.
- Inadeguata **compattazione** del terreno a tergo del muro.
- **Accettazione acritica** dei risultati forniti da un programma di calcolo.
- Mancata verifica dello **SLU di punzonamento**.
- Mancata cura del **particolare costruttivo** (nodo piastra-pilastro).

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Deformabilità



Frangar, non flectar

L'aspetto generalmente massiccio delle strutture in c.a., specie nel caso delle prime costruzioni, ha indotto i progettisti a dare per scontato che le strutture in c.a. fossero molto (o infinitamente) rigide.

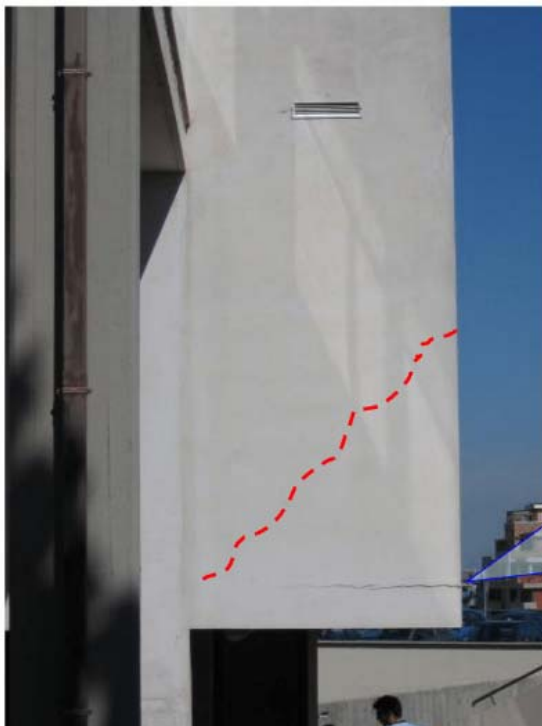
Molta attenzione è stata giustamente data alla **resistenza** (SLU), mentre la **deformabilità** (SLS) è stata troppo spesso trascurata.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Deformabilità sbalzo



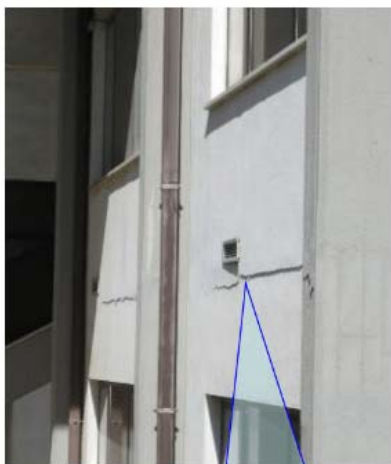
La fessura è dovuta al distacco della soletta a sbalzo dalla sovrastante muratura che, accidentalmente, si è trasformata in una trave-parete. Tale situazione non è ovviamente permanente poiché le sollecitazioni di trazione nella muratura potranno in seguito superare la soglia di rottura e causare la formazione di un altro quadro fessurativo (in rosso).

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Deformabilità soletta



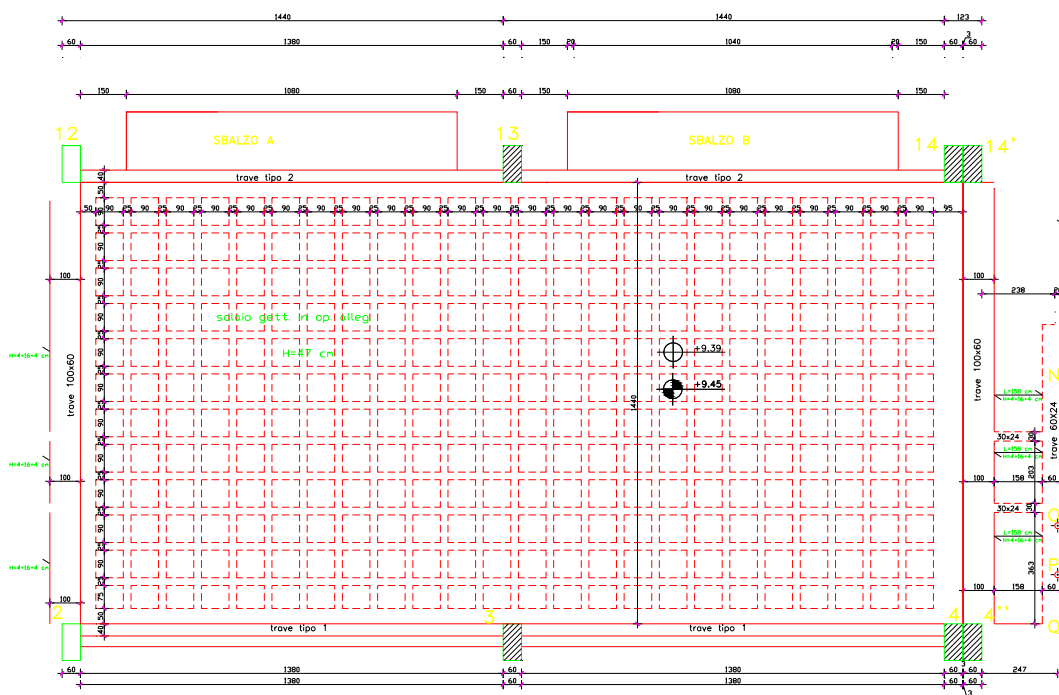
Fessurazione all'appoggio con scorrimento della soletta rispetto alla parete per effetto della rotazione.



Freccia di diversi centimetri.

Soletta in latero-cemento con luce di 8 m circa. Problemi anche con l'integrità e la funzionalità della finestra a nastro.

Deformabilità piastra nervata



Piastra continua in c.a. luce 14 m di, appoggi puntiformi e travi di bordo.

Deformabilità piastra nervata - 2



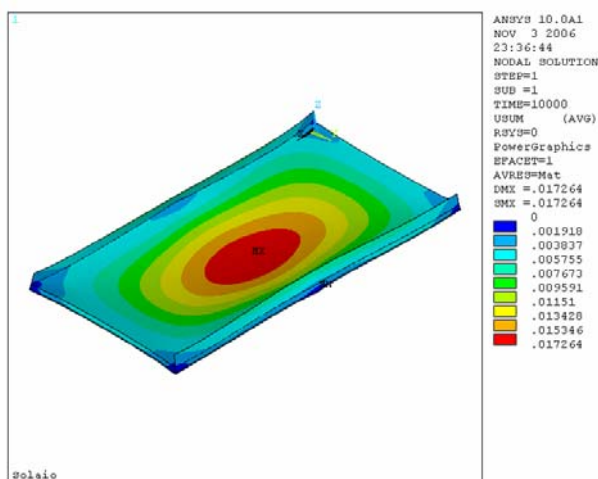
La piastra mostrava frecce elevate per soli pp + permanenti.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Deformabilità piastra nervata analisi FEM



In sede di collaudo la struttura è stata oggetto di analisi non lineare, tenendo conto di viscosità e fessurazione.

In termini di deformazione i risultati dell'analisi sono molto diversi da quelli del calcolo elastico
(max 2.5 cm)
e maggiormente aderenti al comportamento effettivo della piastra.

Tipo analisi	UZ
1 analisi con effetto creep	-6.90 cm
2 analisi non lineare	-4.37 cm
3 prove di carico	-1.70 cm

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Deformabilità piastra nervata - conclusioni

- Resistenza del cls. accettabile per lo stato di sollecitazione, ma leggermente inferiore a quella prescritta.
- Miscela del conglomerato poco compatta.
- Estesa fessurazione delle nervature di cls.
- Non adeguata valutazione della deformabilità
- Non accurata valutazione dell'appoggio puntiforme della soletta sui pilastri.
- Errata scelta progettuale: con luci di 14 m si doveva adottare la precompressione.

Errori nella confezione del cls.

Mancata verifica degli SLS.

Modelli di calcolo non adeguati.

Concept design errato.

Durabilità del c.a.

... inizialmente e per molti anni si pensò che il calcestruzzo armato potesse avere **una vita eterna** ...
... e così **calcestruzzo e acciaio vissero felici e contenti!**



Effetti della corrosione

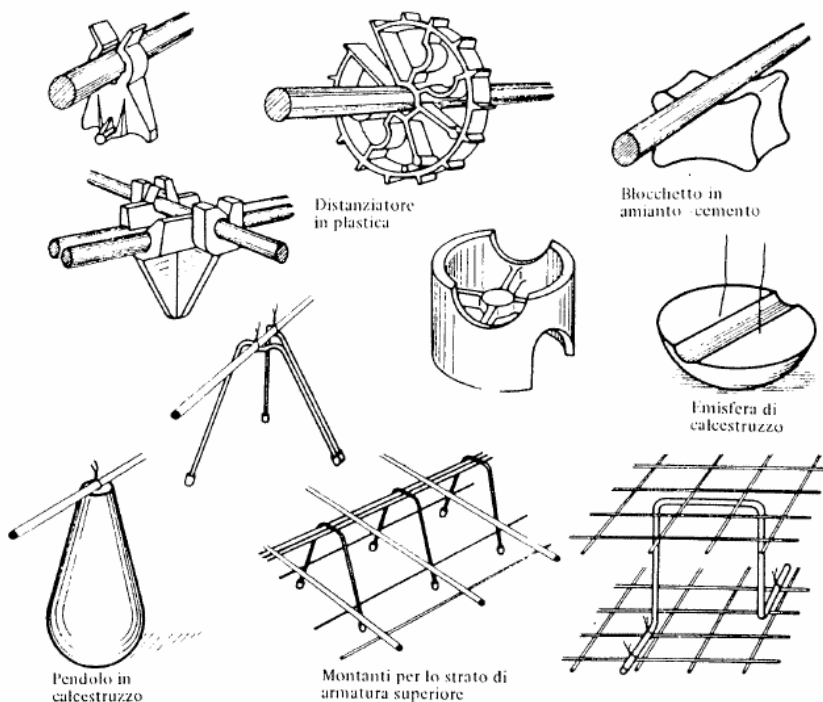


Viadotto Rocche (CN).

Molto si è detto e scritto sulla durabilità. Qui basta un semplice richiamo al problema.



Il distanziatore ... questo sconosciuto!



Difetti esecutivi: tecnologia del cls.



Esiste poi una vasta casistica di errori legati alla scarsa cura nella scelta del mix design (**progettazione**), della posa in opera e del “curing” del cls. (**esecuzione**).

Il buon successo di una struttura in c.a. dipende fortemente dall'accuratezza e professionalità del suo confezionamento
... ma questa è un'altra storia!

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Difetti esecutivi: ripresa di getto



Una ripresa di getto non adeguata crea una sezione di discontinuità che riduce le capacità resistenti dell'insieme strutturale e facilita il passaggio di acqua aggressiva.

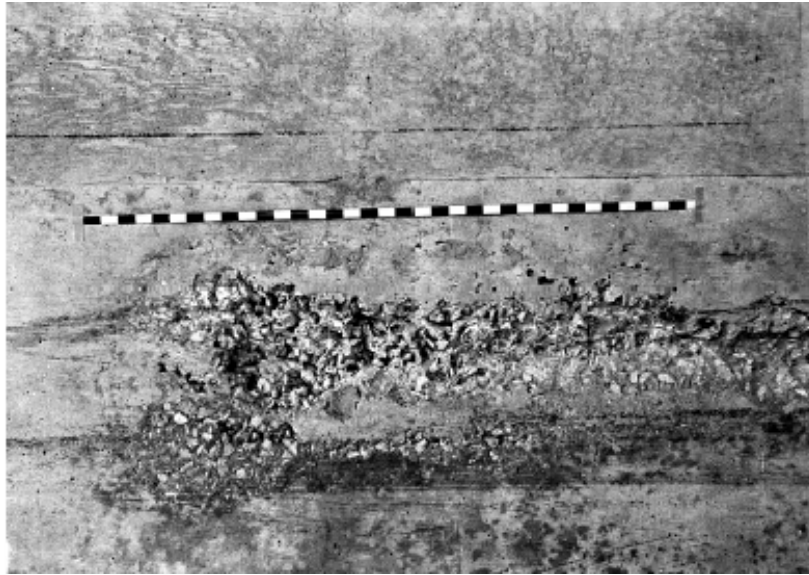


IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



Difetti esecutivi: vespaio



Durante il getto si è verificata la segregazione degli aggregati.
L'assenza della frazione fine impedisce un adeguato riempimento dei vuoti
e ne risulta una zona di ridotta resistenza meccanica.

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017



L'errore più pericoloso?



Confondere le **normative** con i **libri di testo**.

Le prime ci danno le regole del “gioco”, i secondi ci insegnano come
“giocare” e perché!

IF CRASC'17

IV CONVEGNO DI INGEGNERIA FORENSE
VII CONVEGNO SU CROLLI, AFFIDABILITÀ STRUTTURALE, CONSOLIDAMENTO
POLITECNICO DI MILANO, 14-16 SETTEMBRE 2017

