



COSTRUIRE IN CALCESTRUZZO



**REALIZZAZIONI – RICERCA
ATTUALITÀ E PROSPETTIVE**

POLITECNICO DI MILANO

15 Ottobre 2020

SAIE in Calcestruzzo

Pad. 26 Stand A02

h.11:10



Collegio dei Tecnici della
Industrializzazione
Edilizia
www.cte-it.org



Associazione Italiana
Calcestruzzo Armato e
Precompresso
www.assoziazioneaicap.it



Robustezza Strutturale delle Infrastrutture

Prof. Franco Mola

Professore Ordinario - Reinforced and Prestressed Concrete Structures

Departmento ABC - Politecnico di Milano

Direttore Tecnico

ECSD Srl - Milano





- Il termine robustezza strutturale definisce la capacità della costruzione di evitare danni sproporzionati rispetto alla entità della azione che da luogo ad un danno iniziale
- Il concetto di robustezza è di acquisizione relativamente recente nei Codici di Misura della Sicurezza ed ha assunto importanza e significato crescenti a seguito di eventi le cui conseguenze si sono rivelate di carattere catastrofico
- Con specifico riferimento alle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni, DM 17-01-2018, il problema è introdotto al punto 2.2.5 ed al corrispondente paragrafo della Circolare applicativa
- Al riguardo si illustrano alcune specifiche strategie di progettazione atte a garantire un adeguato livello di sicurezza strutturale



- Progettazione della struttura in grado di resistere ad azioni di carattere convenzionale combinando valori nominali delle azioni eccezionali ad altre esplicite di progetto;
- Prevenzione degli effetti indotti dalle azioni eccezionali alle quali la struttura può essere soggetta o riduzione della loro intensità;
- Adozione di una forma e tipologia strutturale poco sensibile alle azioni eccezionali considerate;
- Adozione di una forma e tipologia strutturale tale da tollerare il danneggiamento localizzato causato da una azione di carattere eccezionale;
- Realizzazione di strutture quanto più ridondanti, resistenti e duttili
- Adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta



- Si afferma peraltro che l'effettivo livello di robustezza di una costruzione dipende anche, ed in modo non trascurabile, dalle peculiarità del progetto, ed è estremamente complesso da quantificare attraverso prescrizioni progettuali, unicamente riconducibili a verifiche numeriche. Esso attiene, più in generale, alla corretta concezione dell'organismo strutturale e dei suoi dettagli costruttivi.
- L'attuale approccio normativo postula inoltre che in via generale la progettazione delle costruzioni condotta secondo le prescrizioni delle NTC, tenuto conto dei criteri di progettazione per le azioni sismiche, garantisce il conseguimento di livelli di robustezza che possono essere ritenuti, in generale, soddisfacenti. Per costruzioni di particolare importanza o complessità strutturale o laddove ritenuto necessario, anche in relazione alle specificità del progetto, il livello di robustezza potrà essere incrementato attraverso l'adozione di motivate strategie progettuali tra quelle elencate che possono essere combinate fra loro.
- Si riconosce che l'approccio delle NTC può classificarsi nell'ambito dell'approccio prescrittivo, per il quale le scelte progettuali sono demandate a strategie di carattere concettuale, mediate dalla sensibilità del progettista, definendo così un processo di tipo essenzialmente olistico, mantenendo l'aspetto probabilistico del problema entro i livelli assunti nella Norma.



- Ha quale obiettivo quello di formulare un procedimento capace di giungere ad una quantificazione del problema, riducendo il peso di scelte di tipo soggettivo sulle modalità assunte per la sua risoluzione
- Riconosciuto che il problema della robustezza è intimamente connesso alla comparsa di eventi eccezionali, lo scenario corrispondente deve essere dapprima definito e descritto in termini quantitativi.
- Al riguardo, il processo illustrato nel CNR DT 214-2018, si sviluppa secondo i seguenti stadi
 - a. Quantificazione della intensità della azione e del relativo scenario di rischio**
 - b. Rischio di collasso sproporzionato e sua analisi probabilistica;**
 - c. Strategie atte a mitigare il rischio;**
 - d. Concezione strutturale**
 - e. Metodologie di progetto per la robustezza**



- I primi due stadi riguardano la descrizione della azione in termini di natura, frequenza di accadimento e intensità.
- In particolare riguardo la natura si riconoscono le tre categorie:
 - **pericoli derivanti da fenomeni naturali o attività umana involontaria;**
 - **azioni causate intenzionalmente quali vandalismi e atti terroristici;**
 - **errori di concezione, progettazione ed esecuzione**



- Il rischio di collasso sproporzionato R è definito dalla relazione:

$$R=P^{\wedge}V^{\wedge}E$$

Intendendosi con il simbolo \wedge combinazione, non prodotto

- L'analisi probabilistica del rischio può perseguirsi mediante la relazione:

$$P[C]=P[C/SL] \times P[SL/H] \times P[H]$$

Essendo

- P[C] la probabilità di collasso associata all'evento [H];
 - P[H] la probabilità di accadimento dell'evento [H];
 - P[SL/H] la probabilità condizionata di danno locale, dato [H];
 - P[C/SL] la probabilità condizionata di collasso sproporzionato, dato [SL]
-
- **La espansione della probabilità P[C] in più contributi permette di calibrare gli interventi atti a ridurre l'evenienza del collasso sproporzionato. A tale riguardo la riduzione di P[C/SL] è propria delle strategie progettuali mirate al raggiungimento di adeguati livelli di robustezza strutturali**



- La mitigazione del rischio si estrinseca attraverso le seguenti fasi:
 - **Prevenzione dell'accadimento dell'evento (riduzione di $P[H]$)**
 - **Prevenzione dello sviluppo di danneggiamenti locali che possano innescare un collasso sproporzionato (riduzione di $P[SL/H]$;**
 - **Prevenzione della loro evoluzione che possa generare un collasso sproporzionato (riduzione di $P[C/SL]$)**
- Questi obiettivi si perseguono attraverso il processo progettuale, temperato da una attenta e mirata concezione strutturale



- In relazione alle modalità di approccio:
 - **Progetto prescrittivo**
 - **Progetto prestazionale**

- In relazione alle modalità operative:
 - **Metodo indiretto (Approccio prescrittivo)**
 - **Metodo diretto (Analisi strutturale e relative scelte progettuali)**



- Nell'affrontare il problema della progettazione in robustezza è utile ricordare che su un'indagine condotta su 800 collassi strutturali è risultato che:
 - **Il 30% è imputabile a errori di progettazione**
 - **Il 23% a errori di costruzione**
 - **Il 23% ad inadeguatezze dei materiali**
 - **Il 14% a un utilizzo improprio della costruzione**



- **Approccio essenzialmente olistico**, basato su una approfondita conoscenza del comportamento strutturale capace di formulare un quadro predittivo affidabile dal quale trarre scelte progettuali capaci di evitare effetti sproporzionati alle cause.
- Le cause possono essere definite in sede progettuale anche in modo convenzionale.
- Le modalità resistenti derivano dalla applicazione di concetti, formulazioni, metodologie di analisi che il progettista ritiene attendibili e convenienti per la valutazione della sicurezza strutturale a fronte di eventi le cui conseguenze sono sproporzionate rispetto alle cause che li generano.
- Al riguardo il progettista potrà avvalersi di specifiche indicazioni tratte da documenti specialistici, la cui affidabilità non deve essere associata alla complessità e alla apparente precisione di procedure di cui sia difficile o impossibile la preventiva valutazione della loro consistenza.



- La marcata differenza dell'approccio al problema che ne deriva richiede di separare i due casi di:
 - **Strutture di nuova progettazione**
 - **Strutture esistenti**
- Nelle strutture di nuova progettazione il problema della robustezza si manifesta nella sua più immediata evidenza e può essere risolto assumendo preventivamente tutti gli accorgimenti necessari.
- Nelle strutture esistenti il problema della robustezza è strettamente connesso al degrado strutturale che ne esalta le conseguenze e può innescare un fenomeno di danno sproporzionato solo potenziale in strutture non degradate.

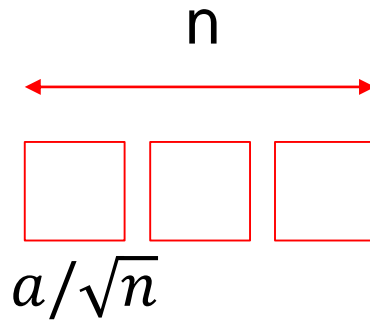
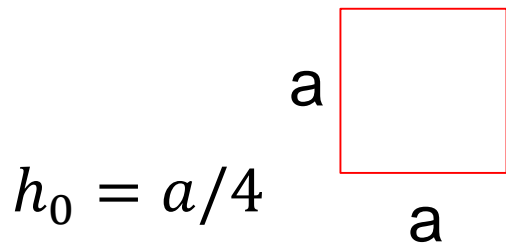


- Nelle opere infrastrutturali in calcestruzzo armato e presollecitato di nuova progettazione sono da privilegiarsi:
 - **Le strutture staticamente indeterminate;**
 - **Le strutture durabili;**
 - **Le strutture ad elevato grado di duttilità.**



- Indice di durabilità:

$$h_0 = A/p$$



$$A_n = a^2/n$$

$$p_n = 4a/\sqrt{n}$$

$$h_{0n} = a/4\sqrt{n}$$

$$h_{0n} = h_0/\sqrt{n}$$





STRUTTURE ESISTENTI CON POTENZIALI PROBLEMI DI ROBUSTEZZA, EFFETTI DEL DEGRADO

- Strutture con giunti in appoggio (i problemi di degrado indotti da una non corretta regimentazione delle acque possono dare luogo a disorganizzazione delle sezioni resistenti con perdita dell'aderenza e possibilità di collasso caratterizzato da elevata fragilità)



- Strutture con giunti di campata, selle Gerber (i problemi precedenti sono amplificati da possibili insufficienze progettuali)





STRUTTURE CON POTENZIALI PROBLEMI DI ROBUSTEZZA

- Strutture presollecitate a cavi post tesi iniettati (i problemi di degrado sono generati da svariate cause, vedasi fotografia di sezione, che possono portare alla avanzata corrosione dei cavi con possibilità di crisi fragile in sezioni con modesti quantitativi di armatura ordinaria)





STRUTTURE CON POTENZIALI PROBLEMI DI ROBUSTEZZA

- Strutture a segmenti prefabbricati connessi mediante cavi post-tesi iniettati. Sono le più deboli nei riguardi della robustezza in quanto l'unione fra le parti prefabbricate è garantita dalla forza di presollecitazione che, se ridotta dalla parziale rottura dei cavi può generare collasso improvviso.



- I ponti e viadotti realizzati con segmenti prefabbricati connessi mediante presollecitazione con cavi post-tesi iniettati rappresentano una categoria strutturale particolarmente delicata sotto l'aspetto della robustezza in quanto devolvono al solo componente costituito dal cavo di presollecitazione il compito di assicurare l'equilibrio dell'intera struttura. Il danneggiamento di tale componente è causa determinante il crollo totale della struttura. **Questo aspetto è chiaramente riconosciuto nelle recenti linee guida, ove per tali tipi strutturali, sono richieste ispezioni speciali e la valutazione accurata della sicurezza.**



Situazione Ante Crollo

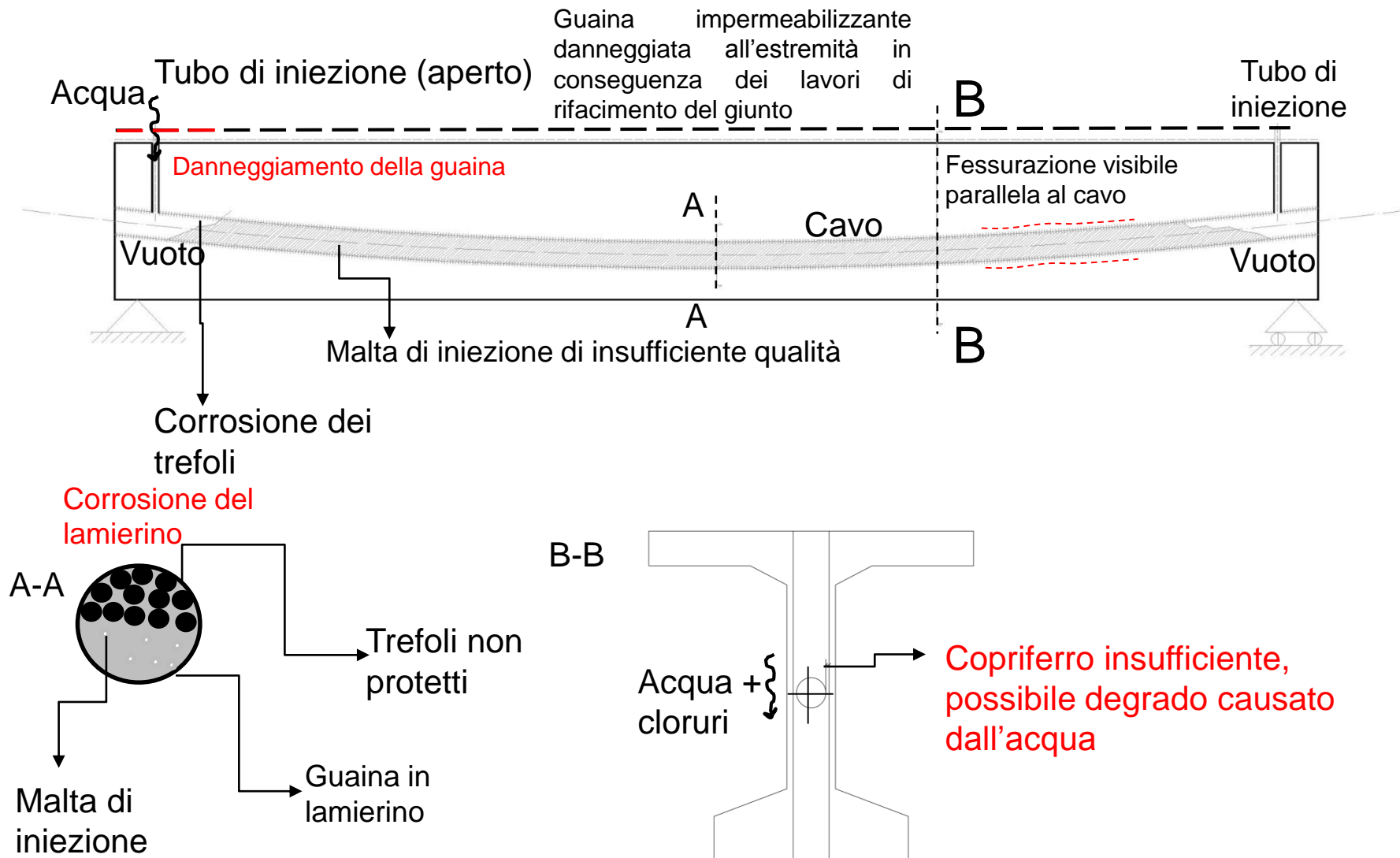


Situazione Post Crollo (Attuale)



IL DEGRADO E IL COLLASSO DI UN CAVALCAVIA A CONCI PREFABBRICATI

LE CAUSE DEL DANNEGGIAMENTO DEI TREFOLI

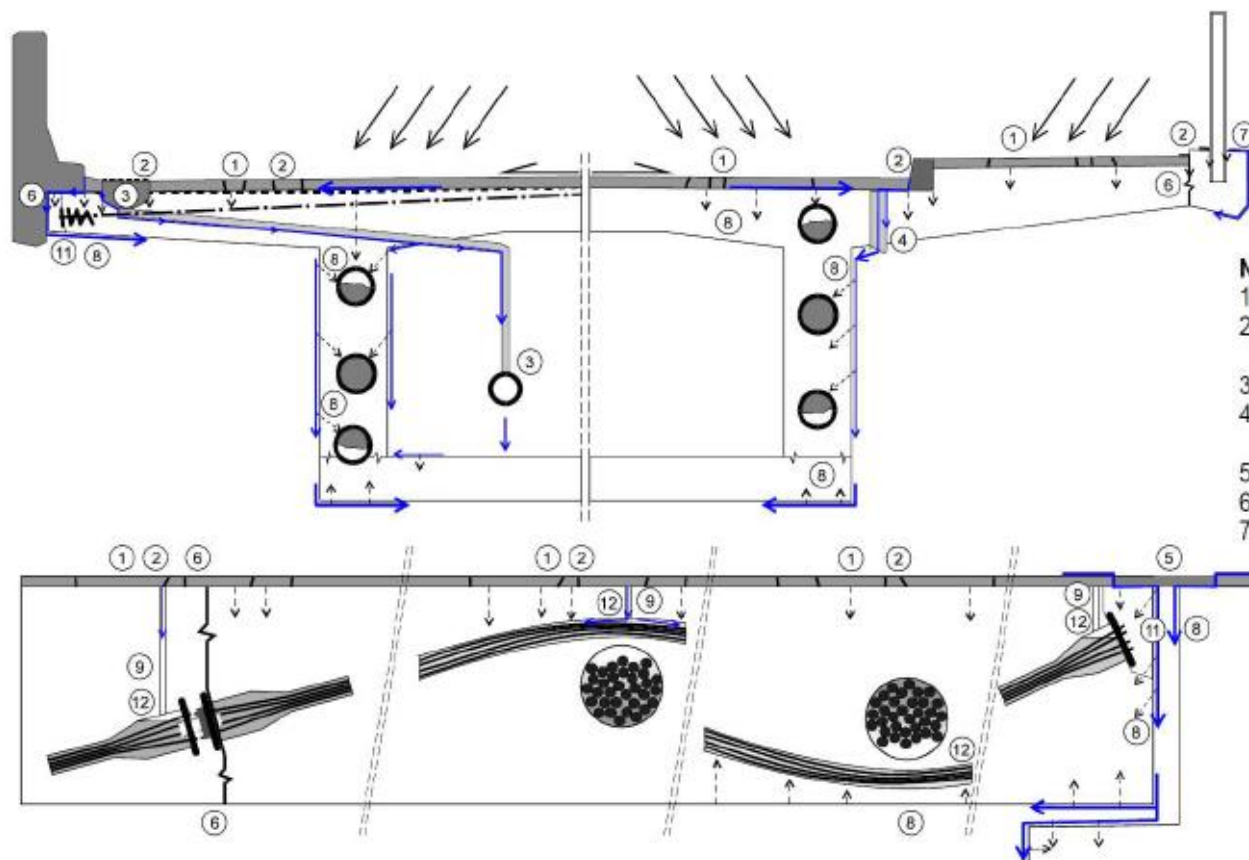




LE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO PRESOLLECITATO

LE CAUSE STRUTTURALI E NON STRUTTURALI DI DEGRADO

Possibili percorsi di penetrazione dell'acqua



Non-structural elements:

1. Defective wearing course (e.g. cracks)
2. Missing or defective waterproofing membrane incl. edge areas
3. Defective drainage intakes and pipes
4. Wrongly placed outlets for the drainage of wearing course and waterproofing
5. Leaking expansion joints
6. Cracked and leaking construction or element joints
7. Inserts (e.g. for electricity)

Corrosion protection system :

8. Defective concrete cover
9. Partly or fully open grouting in- and outlets (vents)
10. Leaking, damaged metallic ducts mechanically or by corrosion
11. Cracked and porous pocket concrete
12. Grout voids at tendon high points

Note: In precast segmental construction the dry packing of lifting holes, and stressing pockets in segment faces need to be checked.



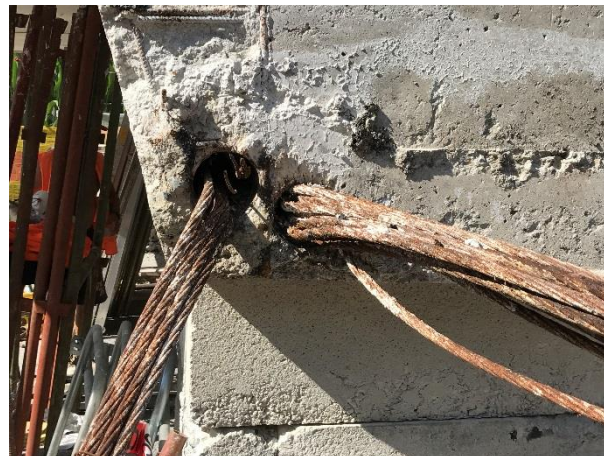
IL DEGRADO E IL COLLASSO DI UN CAVALCAVIA A CONCI PREFABBRICATI



Situazione Ante Crollo

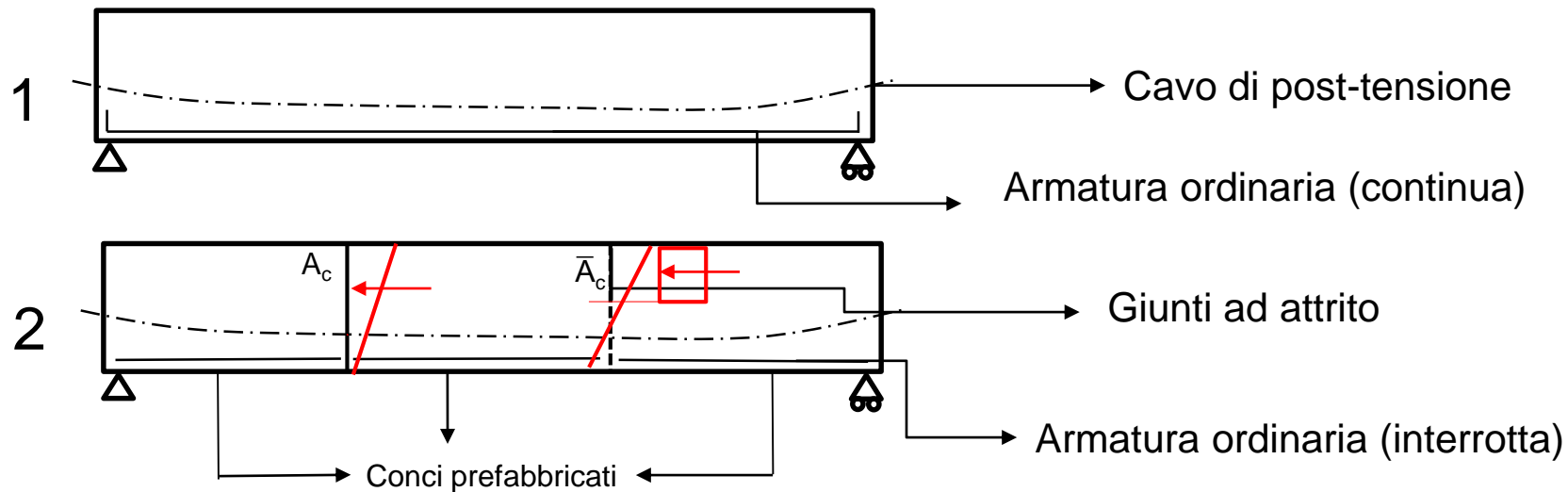


Situazione Post Crollo (Attuale)





IL DEGRADO E IL COLLASSO DI UN CAVALCAVIA A CONCI PREFABBRICATI



Le due configurazioni strutturali sono marcatamente differenti in termini di robustezza.

1

Armature sane

$$M_{Rd} = M_{Rd,p} + M_{Rd,s}$$

$$V_{Rd} = f_{yd} A_{ss} \frac{0.9d}{e_{ss}} ctg\theta$$

1

Armature di presollecitazione danneggiate

$$M_{Rd} = (M_{Rd,p} - \Delta M_{Rd,p}) + M_{Rd,s}$$

$$V_{Rd} = f_{yd} A_{ss} \frac{0.9d}{e_{ss}} ctg\theta$$

$$M_{Rd} \geq M_{Ek}$$

Assenza di
collasso, possibili
fessurazioni

2

Armature sane

$$M_{Rd} = M_{Rd,p}$$

$$V_{Rd} = \mu f_{cd} A_c (N_{Rd,p})$$

2

Armature di presollecitazione danneggiate

$$M_{Rd} = (M_{Rd,p} - \Delta M_{Rd,p}) \leq M_{Ek}$$

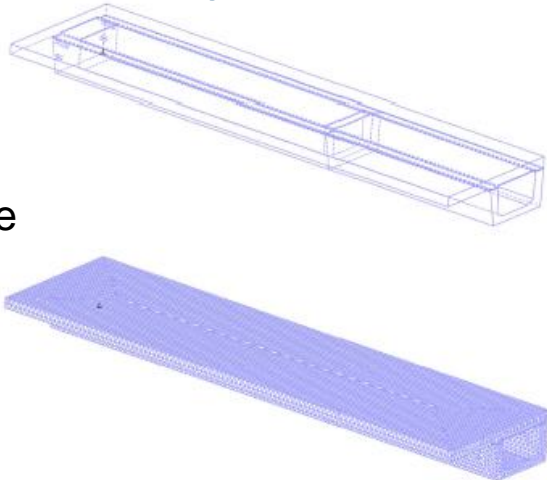
$$V_{Rd} = \mu f_{cd} \bar{A}_c (N_{Rd,p} - \Delta N_{Rd,p}) \leq V_{Ek}$$

Collasso per
flessione o
per taglio



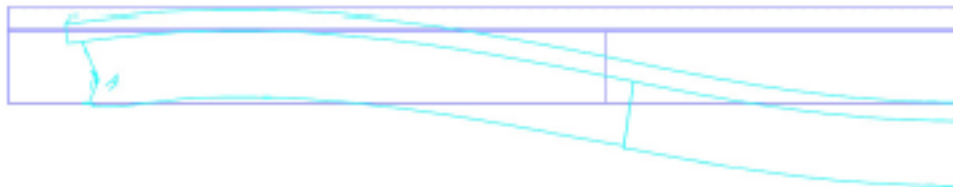
IL DEGRADO E IL COLLASSO DI UN CAVALCAVIA A CONCI PREFABBRICATI

Modello strutturale

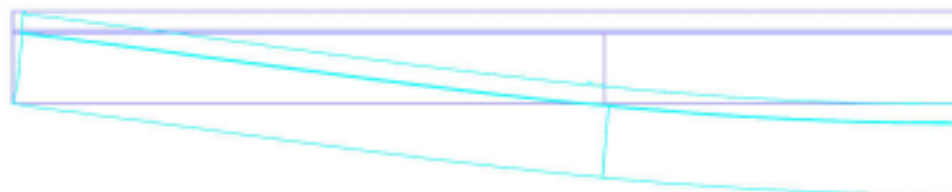


Evoluzione del meccanismo di collasso

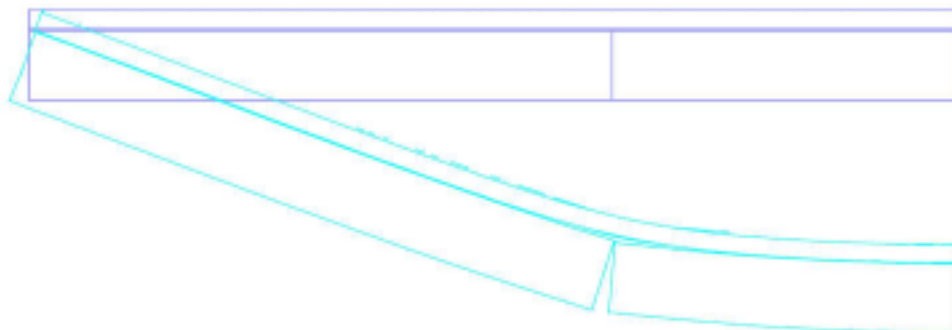
DESP MAG 8463



DESP MAG 9679



DESP MAG 9878





- La robustezza strutturale è fattore determinante per la sicurezza delle opere infrastrutturali
- Nelle strutture di nuova costruzione la robustezza deve essere garantita attraverso un affidabile processo progettuale nel quale l'approccio concettuale e la analisi critica ei dettagli costruttivi sono aspetti primari
- Le strutture esistenti, nelle quali potenziali difetti di robustezza possono essere innescati dal degrado con conseguenze catastrofiche richiedono analisi specifiche ed attente valutazioni del rischio
- Tipiche al riguardo sono le strutture a segmenti prefabbricati solidarizzati con cavi di presollecitazione post-tesi iniettati, il cui degrado può essere causa di collasso sproporzionato
- Questa eventualità è chiaramente evidenziata nelle recenti Linee Guida, ove per questi tipo strutturali sono richieste ispezioni speciali e la valutazione accurata della sicurezza