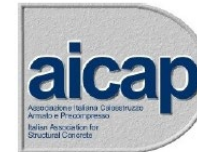




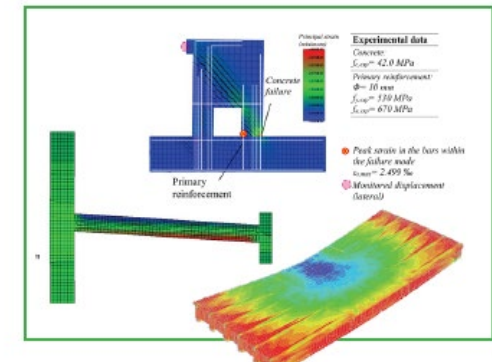
Politecnico
di Torino



Confronto tra analisi locale e globale agli elementi finiti di strutture in c.a./c.a.p.: esempi

Diego Gino

diego.gino@polito.it



8 Luglio 2024, On-line

Aspetti rilevanti nella modellazione NLFEM



Politecnico
di Torino



L'analisi non lineare agli elementi finiti (NLFEM)

MODELLO STRUTTURALE



STRATEGIA DI SOLUZIONE

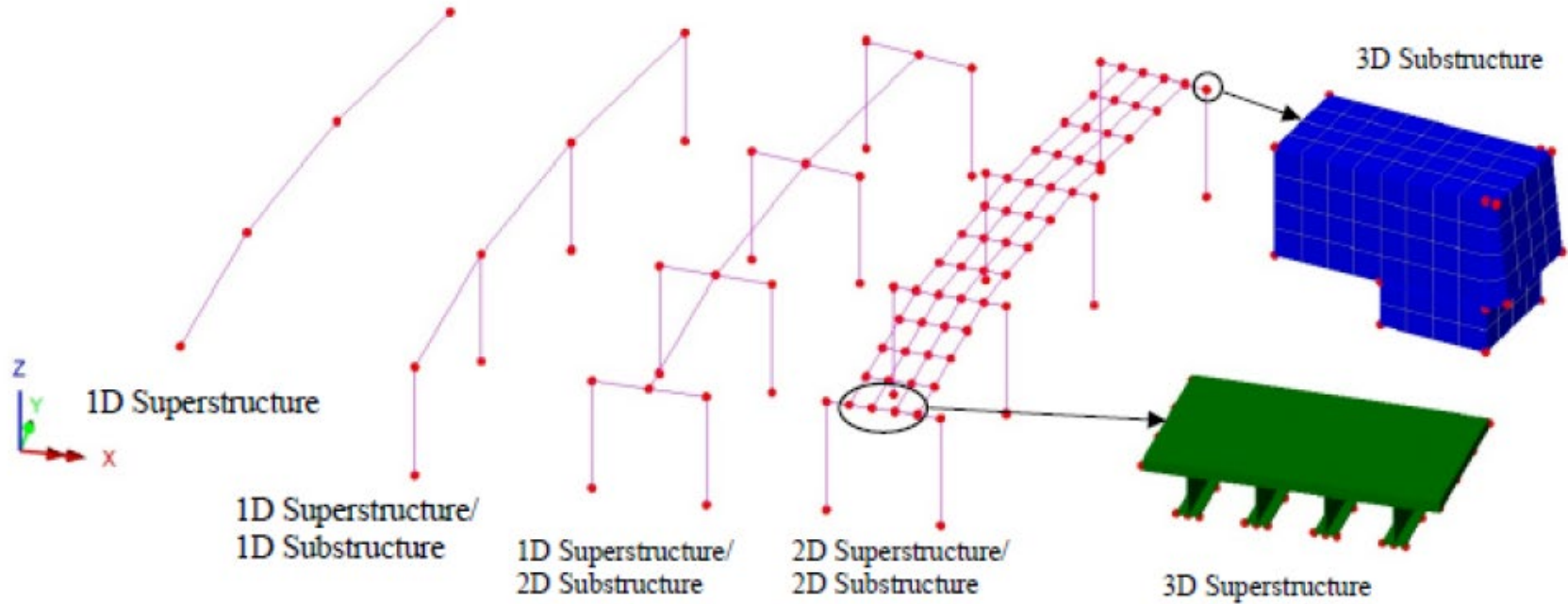


INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI



Il modello strutturale

➔ Quale modello?



La strategia di soluzione

➔ Un ingrediente chiave è la **strategia di soluzione** selezionata per l'effettuale la NLFEA.

➔ La **strategia di soluzione** comprende tutte le scelte relative a:

- (i) la **compatibilità cinematica**, ad esempio, i tipi e le dimensioni degli elementi finiti.
- (ii) l'**equilibrio**, ad esempio, il metodo di soluzione iterativo
- (iii) i **modelli di materiale**, ad esempio, le relazioni costitutive per il calcestruzzo e l'acciaio di armatura.

La strategia di soluzione copre anche argomenti più specifici del problema come:

- ❖ la discretizzazione del problema nel tempo e nello spazio
- ❖ l'idealizzazione della geometria e delle azioni applicate
- ❖ la rappresentazione delle condizioni al contorno, ad esempio, vincoli in singoli nodi con o senza piastre di carico o relazioni di contatto tra calcestruzzo e strutture circostanti o fondazioni.

➔ Quando viene selezionata una **strategia di soluzione**, l'analista dovrebbe fare un adeguato lavoro di:

1. Verifica: *stiamo risolvendo correttamente le equazioni?* → verifica della strategia di soluzione, in cui l'analista si assicura che, ad esempio, la sensibilità alla dimensione degli elementi finiti e alla dimensione dei passi di carico sia ragionevolmente bassa, o che il metodo iterativo incrementale sia adeguato per catturare le caratteristiche di base del comportamento del materiale e strutturale previsto.

2. Validazione: *stiamo risolvendo le corrette equazioni?* → l'analista confronta i risultati della simulazione con i risultati degli esperimenti fisici, ad esempio, riportati in letteratura, comunemente denominati **analisi di benchmark**. La validazione comporta quindi la quantificazione dell'incertezza di modellazione.

➔ Una **verifica** adeguata garantisce quindi che **l'incertezza nei risultati** delle simulazioni sia legata *all'idealizzazione del materiale, della geometria, dei carichi e delle condizioni al contorno*.

➔ In definitiva, è **responsabilità dell'analista** assicurarsi che l'incertezza di modellazione sia correttamente considerata prima di prendere decisioni basate sui risultati dell'NLFEA. Non si dovrebbe mai fare affidamento sui produttori di software per assumersi questa responsabilità, né è previsto che qualcuno lo faccia.

L'interpretazione dei risultati

- ❖ Dopo aver eseguito l'analisi, bisogna controllare se i risultati sono solo numeri o anche risultati (V.I. Carbone – PoliTo)

➔ Un **errore** nell'introduzione dei dati di input, sia esso concettuale o semplicemente di digitazione, può avere conseguenze disastrose.

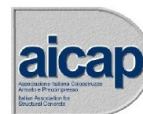
➔ Pertanto, sono necessari **metodi approssimativi e di calcolo manuale** che consentano un **controllo quantitativo dei risultati dell'analisi**, al fine di intercettare errori significativi nella generazione del modello di calcolo (e/o nell'introduzione e combinazione dei carichi), sempre più probabili man mano che la complessità del modello stesso aumenta.

Utilizzando NLFEM questa fase può essere estremamente complessa, in quanto le non-linearità possono dare origine a comportamenti inattesi e che vanno compresi

Richiamo dei concetti di base relativi al «metodo della resistenza globale»



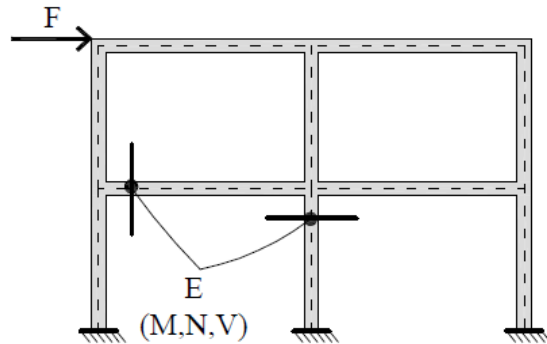
Politecnico
di Torino



Analisi locale vs globale delle risposta strutturale

ANALISI LOCALE

$$E_d \leq R_d$$



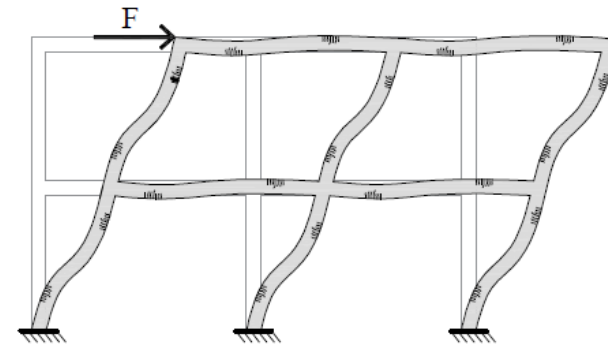
F : acting external actions

E_d : design value of internal of actions evaluated with linear elastic analysis

R_d : sectional resistance in terms of internal actions (M,N,V)

ANALISI GLOBALE

$$F_d \leq R_d$$



F : acting external actions

F_d : design value of external actions

R_d : global design resistance of the structure to the external action evaluated with non-linear analysis

➔ **Verifica di sicurezza globale utilizzando analisi numerica non lineare** in accordo con l'indice di affidabilità β_t di riferimento (normato):

$$F_d \leq R_d \quad \text{per valore fissato di } \beta_t$$

Valori β_t e relativa P_f per vita nominale pari a 50 anni

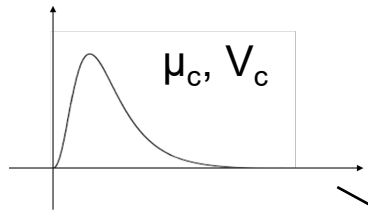


SLS	$\beta \cong 2.0$	$P_f = 0.02275$
ULS (esistente – no interventi)	$\beta_o \cong 2.8$	$P_f = 0.00256$
ULS (esistente - interventi)	$\beta_o \cong 3.3$	$P_f = 0.00048$
ULS	$\beta_o \cong 3.8$	$P_f = 0.00007$

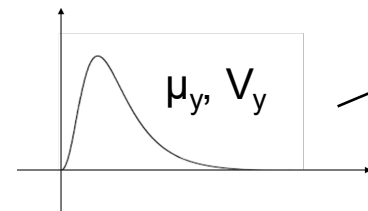
➔ Come le incertezze influenzano la **resistenza strutturale globale R** :

Incertezze aleatorie (γ_R)

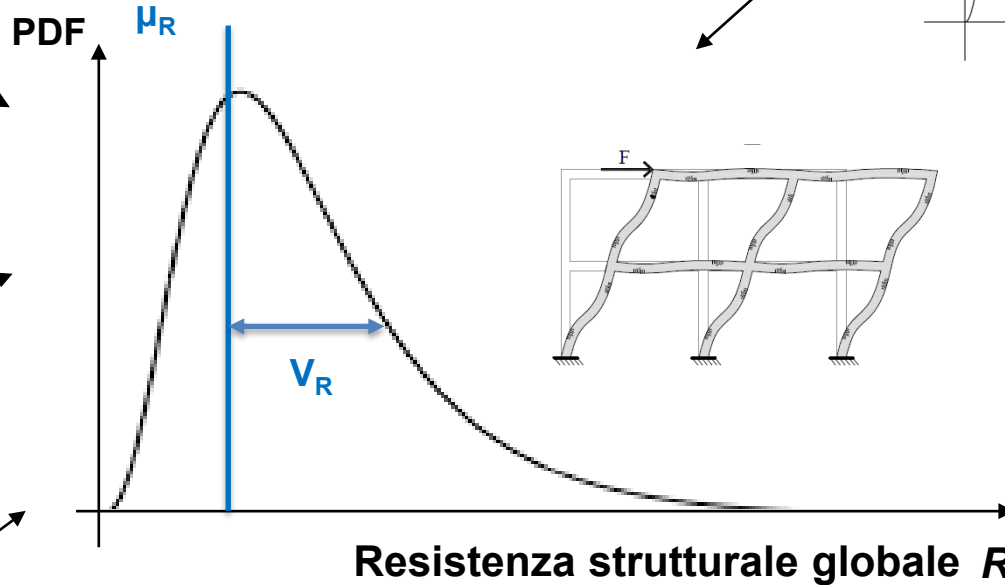
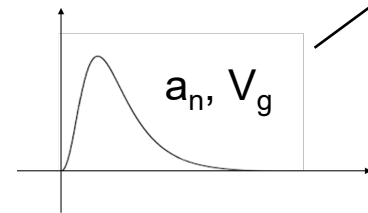
- Calcestruzzo f_c



- Armatura f_y

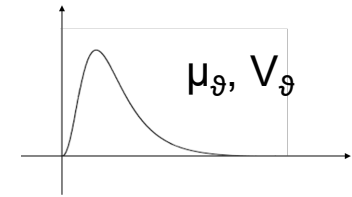


- Geometria a



Incertezze epistemiche (γ_{Rd})

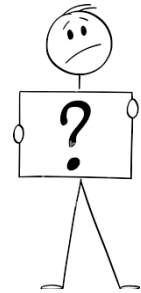
- Incertezza di modello ϑ



Verifica di sicurezza globale $F_d \leq R_d$ where $R_d = \frac{R_{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}}$

➔ Definizione della **resistenza strutturale globale R** :

La resistenza globale della struttura rispetto alla componente multipla delle azioni sotto la combinazione rilevante -> insieme di azioni che applicate alla struttura portano al collasso



Azioni

$$F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_P \cdot P + \gamma_Q \cdot Q_{k1} + \psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot Q_{k2}$$

$\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_P$ valori **fav** o **sfav**

Resistenza strutturale globale

$$R_d = \frac{R_{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}}$$

$$R_{NLFEM}(f_m; a_n) = \lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n) F_d$$

λ_u^{NLFEM} Fattore di amplificazione delle azioni a collasso

$$R_d = \frac{\lambda_u^{NLNA}(f_m; a_n) F_d}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}}$$

Stimabile attraverso una **analisi non lineare incrementale** a partire dalla combinazione di carico considerata.

➔ In accordo con l'approccio alla verifica di sicurezza, essa è soddisfatta se:

$$\boxed{F_d \leq R_d} \longrightarrow F_d \leq \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n) F_d}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \xrightarrow{\text{Livello di carico raggiunto nella simulazione NLFEM}} \gamma_R \cdot \gamma_{Rd} \leq \lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n) \xleftrightarrow{\text{Risultato NLFEM}} \lambda_d^{NLFEM} = \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \geq 1.00$$

➔ In alternativa, la verifica di sicurezza è soddisfatta anche nel caso in cui l'analisi strutturale NLFEM trovi **convergenza numerica** applicando la seguente combinazione di carico (in questo caso non si determina λ_u^{NLFEM} , che sicuramente sarà superiore):

$$(\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}) F_d \longrightarrow \lambda^{NLFEM} = \gamma_R \cdot \gamma_{Rd}$$

➔ **Applicazione della combinazione dei carichi $\lambda_u^{NLNA} F_d$ al modello strutturale**

- ❖ Non sono fornite regole nei codici normativi → è *raccomandato eseguire un'analisi del carico incrementale proporzionale alla combinazione considerata (EC2)*.

Come gestire la condizione di effetto **fav** o **sfav** in merito alle diverse azioni?



Possibile soluzione?? (ragionevole???)



Si può considerare di incrementare di λ_u^{NLFEM} solo le azioni che, nella combinazione considerata, abbiano un effetto **sfav**

❖ Esempio 1 : $\beta_t = 3.8$

Azioni

$$F_d = 1.35 \cdot G_k + 1.00 \cdot P + 1.5 \cdot Q_{k1} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot Q_{k2}$$

fav
sfav
sfav

Resistenza
strutturale
globale

$$\lambda_u^{NLNA} F_d = \lambda_u^{NLNA} \cdot 1.35 \cdot G_k + 1.0 \cdot P + \lambda_u^{NLNA} \cdot 1.5 \cdot Q_{k1} + \lambda_u^{NLNA} \cdot 0.6 \cdot 1.5 \cdot Q_{k2}$$

sfav
fav
sfav
sfav

❖ Esempio 2: $\beta_t = 3.8$

Actions

$$F_d = 1.0 \cdot G_k + 1.00 \cdot P + 1.5 \cdot Q_{k1} + 0.6 \cdot 1.5 \cdot Q_{k2}$$

fav
fav
sfav
sfav

Resistenza
strutturale
globale

$$\lambda_u^{NLNA} F_d = 1.0 \cdot G_k + 1.0 \cdot P + \lambda_u^{NLNA} \cdot 1.5 \cdot Q_{k1} + \lambda_u^{NLNA} \cdot 0.6 \cdot 1.5 \cdot Q_{k2}$$

fav
fav
sfav
sfav



➔ **Aspetti di rilevanza:**

$$F_d \leq R_d \text{ where } R_d = \frac{R_{NLNA}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \longleftrightarrow \lambda_d^{NLFEM} = \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \geq 1.00$$

γ_{Rd} **Coefficiente di sicurezza sull'incertezza di modello:** tipicamente calcolato usando specifici parametri statistici che rappresentino l'incertezza di modello → **non dipende dal risultato della simulazione NLFEM → noto prima di fare analisi NLFEM**

γ_R **Coefficiente di sicurezza sulla resistenza globale:** questo coefficiente dipende dalla risposta della struttura ed è correlato alla natura del meccanismo di collasso → **serve avere prima i risultati delle analisi NLFEM per calcolare questo fattore → non noto prima di fare analisi NLFEM**



Esistono diversi «formati di sicurezza» (safety formats) utili alla stima di tale coefficiente

Applicazioni e confronto tra analisi locale e globale utilizzando il NLFEM



Politecnico
di Torino



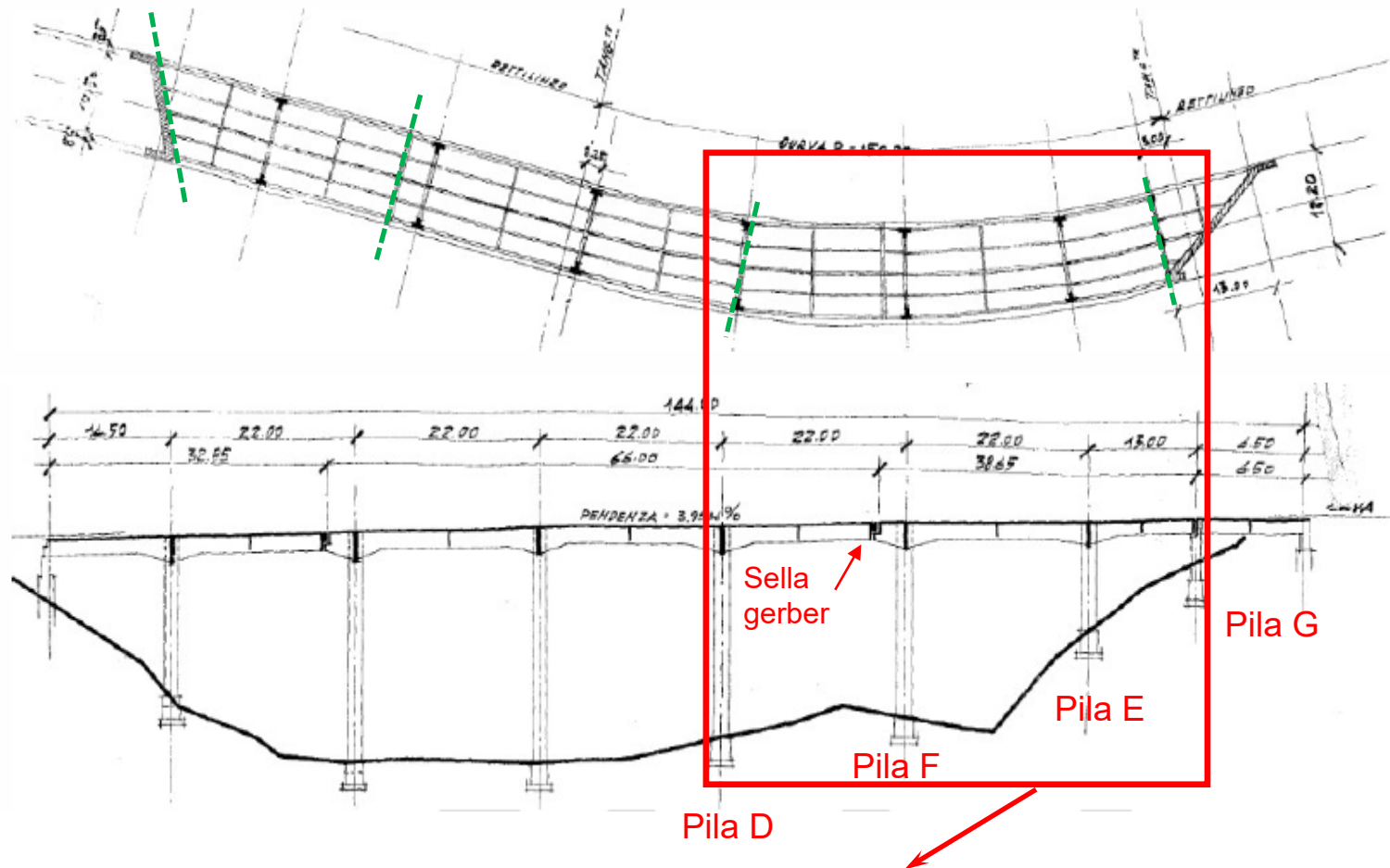
Esempio 1: viadotto autostradale in c.a. esistente



Politecnico
di Torino

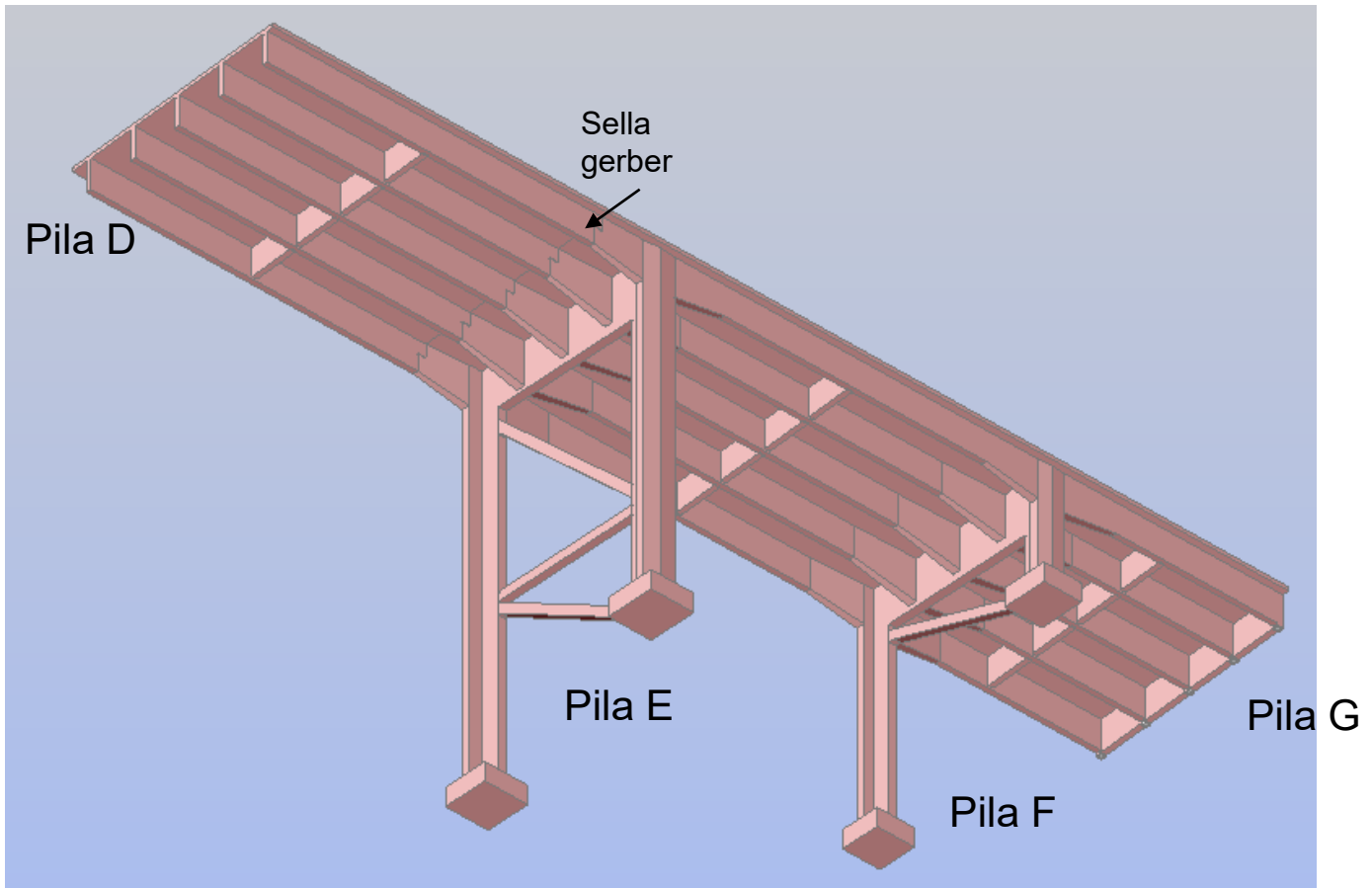


Il caso studio



Porzione analizzata

- Trave continua a telaio con le pile da 2° sella Gerber a pila G
- $L=3.65+22+13$
- Impalcato a 5 travi
- Pila a telaio piano con due colonne e traverso che fa da appoggio alle travi intermedie



Analisi locale (tradizionale)

Travi principali appoggio Pila E	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	951	1951	2.05	>1
Momento [kNm]	2339	3006	1.29	>1

Traversi intermedi Campate A-B B-C C-D D-E E-F	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	484	270	0.56	0.43
Momento positivo [kNm]	1035	1036	1.001	>1
Momento negativo [kNm]	500	509	1.02	>1

Travi principali campata Pila E-Pila F	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	487	433	0.89	0.84
Momento [kNm]	4464	3278	0.73	0.60

Pulvino Pila A-F	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	1478	1366	0.92	0.85
Momento [kNm]	4830	5230	1.08	>1

Travi principali appoggio Pila F	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	1051	1355	1.29	>1
Momento [kNm]	2616	3721	1.42	>1

Pulvino Pila B-C-D-E	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	1462	1366	0.93	0.87
Momento [kNm]	9907	6851	0.69	0.31

Travi principali campata Pila F-Pila G	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	377	433	1.15	>1
Momento [kNm]	1669	1614	0.97	0.95

Sella Gerber	Sollecitante Ed	Resistente Rd	Rd/Ed	ξ
Taglio [kN]	1225	765	0.62	0.39

Sollecitazioni stimate con modello FEM elastico lineare (grigliato)

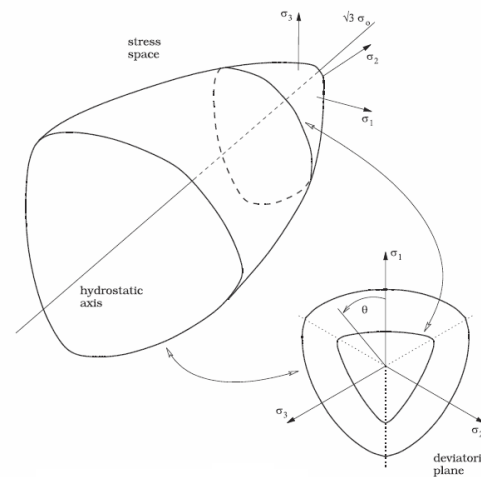
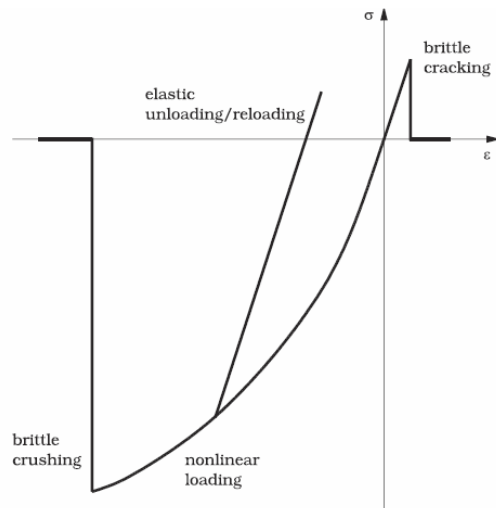
❖ **ADINA** (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)

❖ **Modelli di materiale:**

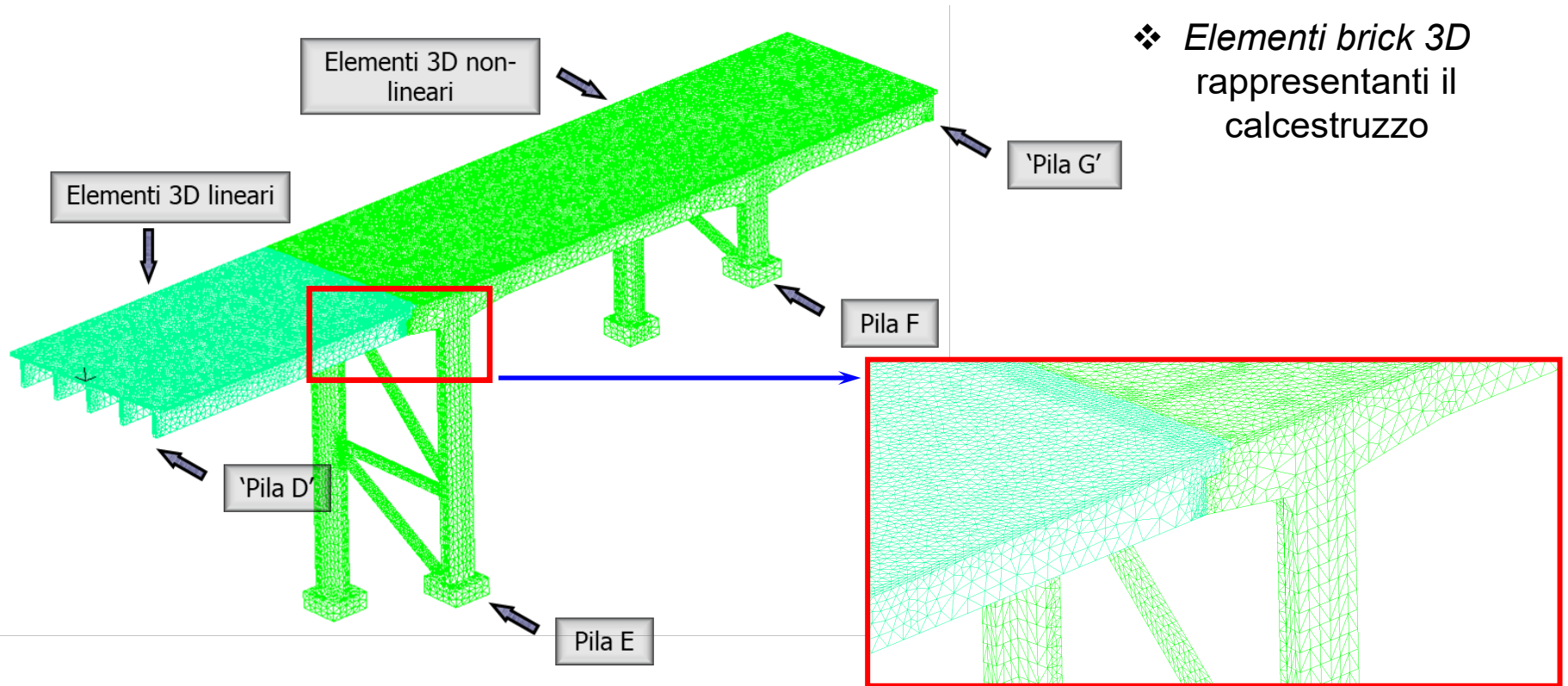
- **Calcestruzzo:** materiale CONCRETE in grado di cogliere fenomeni fragili legati alla fessurazione del calcestruzzo, non-linearità in compressione, l'influenza dello stato di compressione triassiale sulla legge costitutiva e sulla resistenza
- **Acciaio:** Materiale ELASTO-PLASTIC per rappresentare le armature ed il relativo snervamento

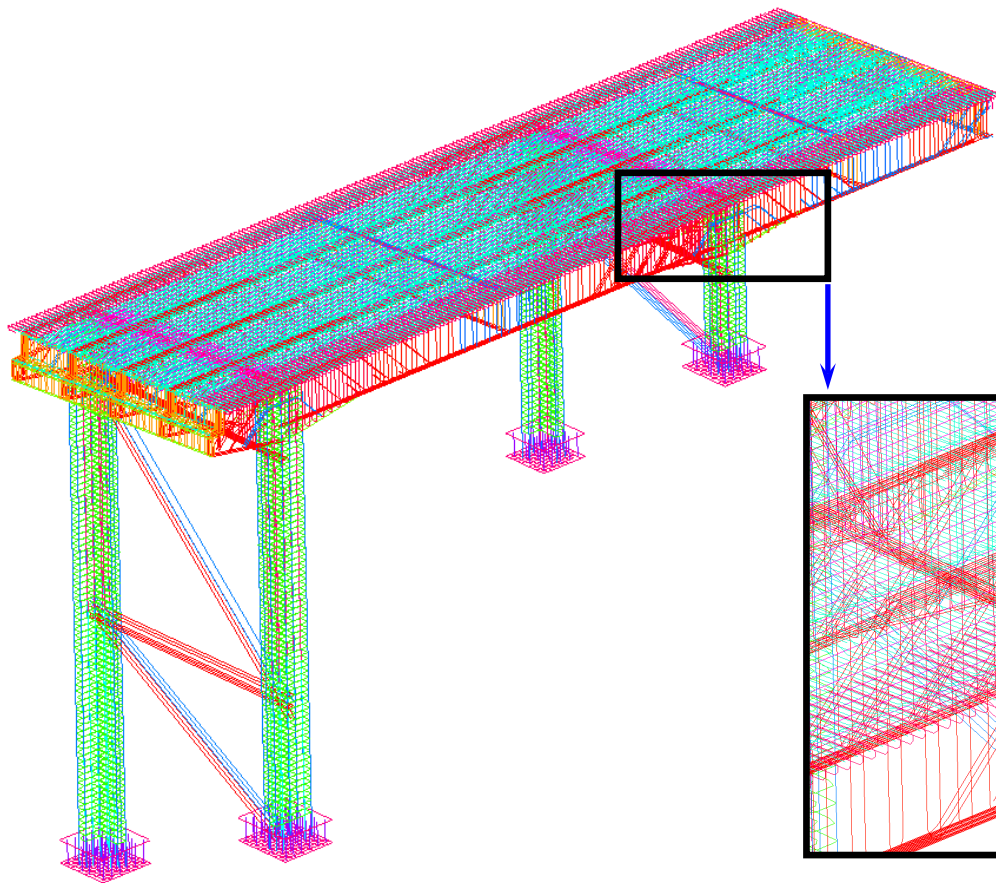
❖ **Elementi finiti:**

- CLS rappresentato da elementi finiti SOLID 3D (brick)
- Barre di armatura rappresentate da elementi TRUSS

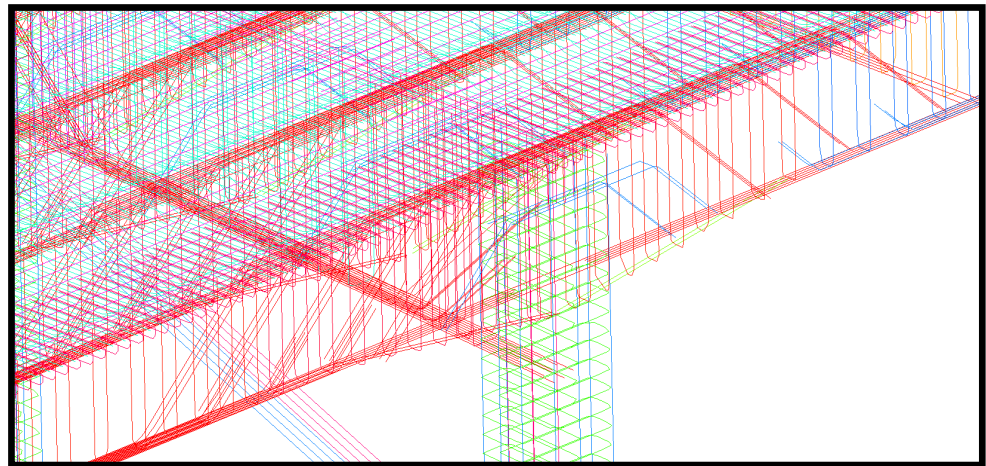


Modello strutturale

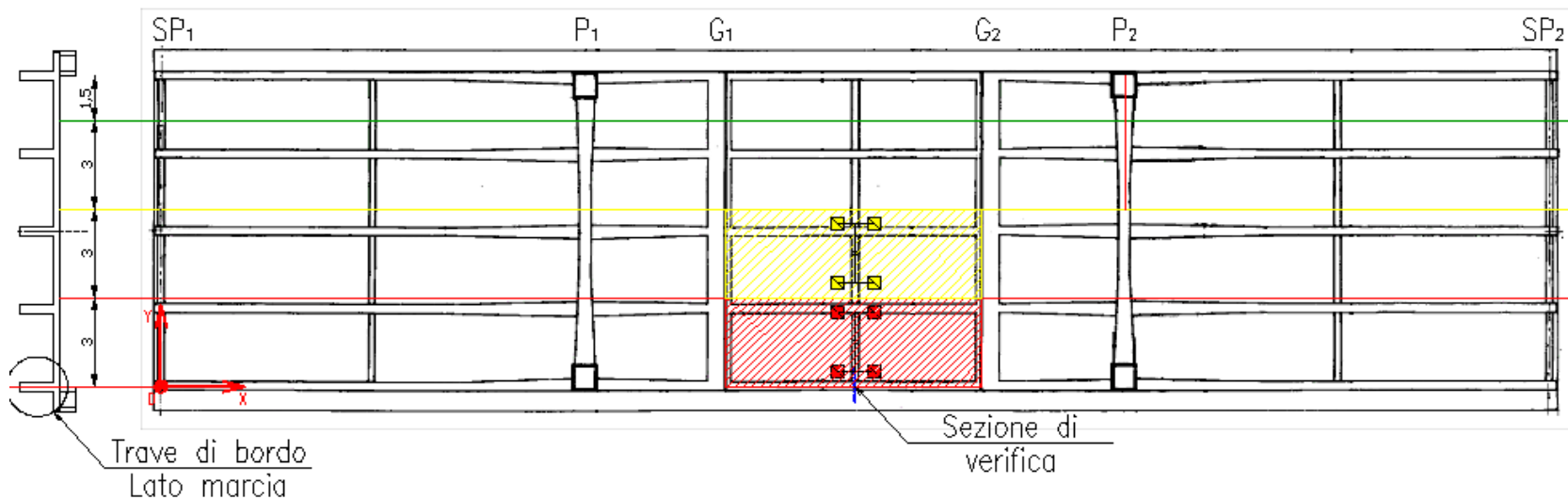




❖ *Elementi truss*
rappresentanti le
armature



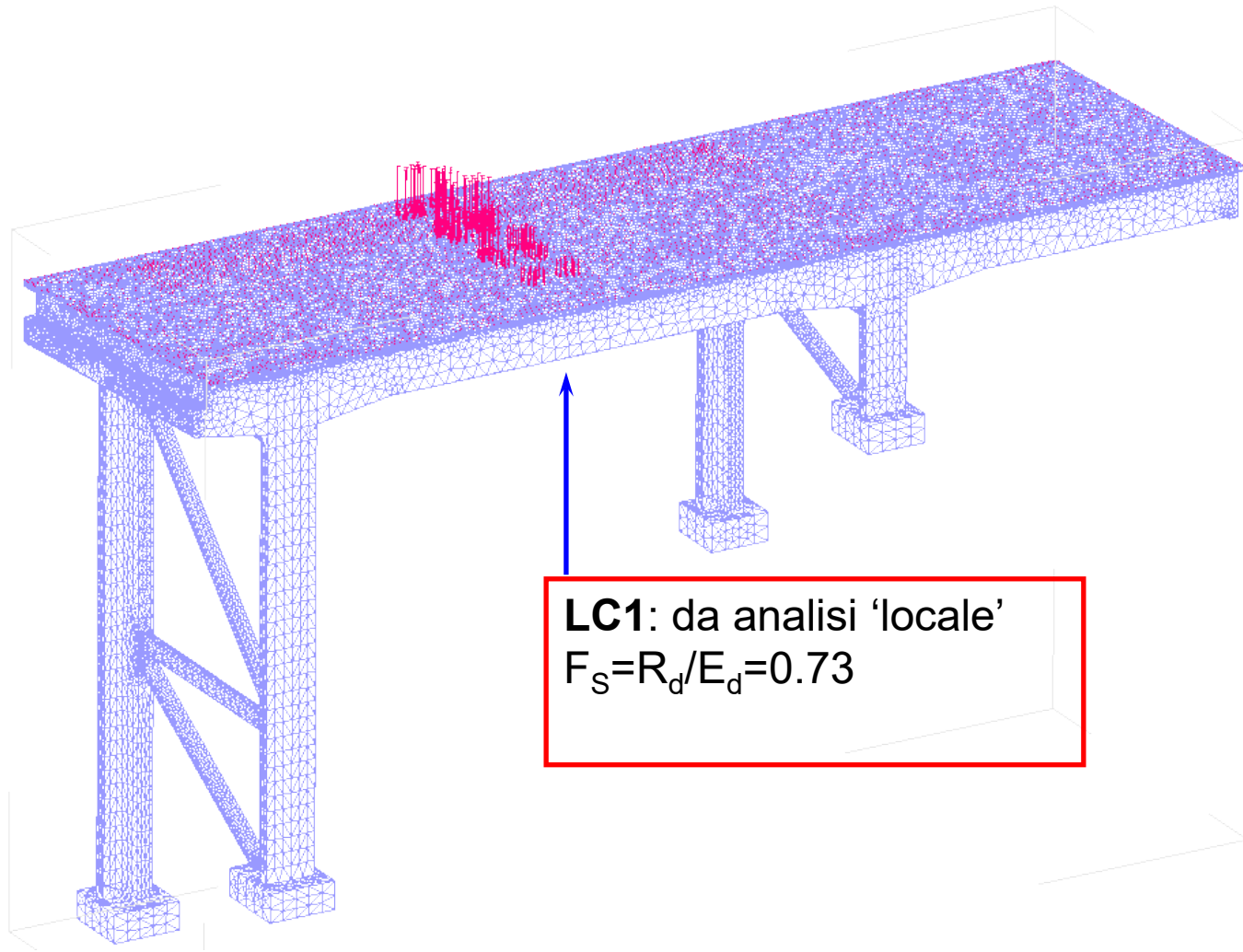
Condizione di carico



Sezione di simmetria trave di bordo



Schema di carico 1 (dimensioni in [m])



LC1: da analisi 'locale'
 $F_S = R_d / E_d = 0.73$

Verifica e validazione del modello strutturale

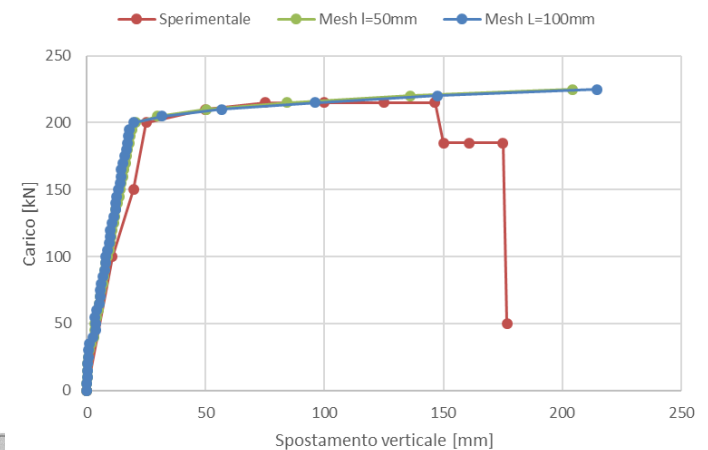
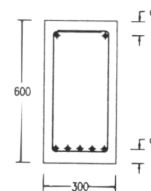
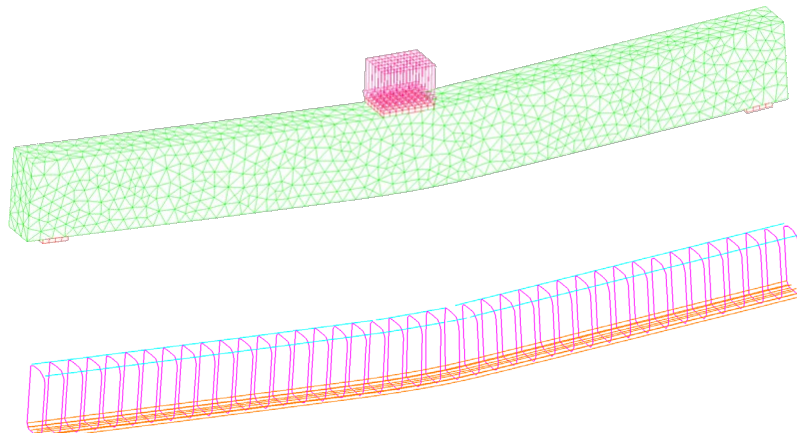
1. **Verifica:** *stiamo risolvendo correttamente le equazioni?*

- ❖ la sensibilità alla dimensione degli elementi finiti: 10, 15, 20 cm
- ❖ passi di carico
- ❖ scelta del metodo iterativo di soluzione e criteri di convergenza: *Newton-Raphson, 200 iterazioni, criterio di convergenza basato sulle forze (1%) ed energia (0.1%)*

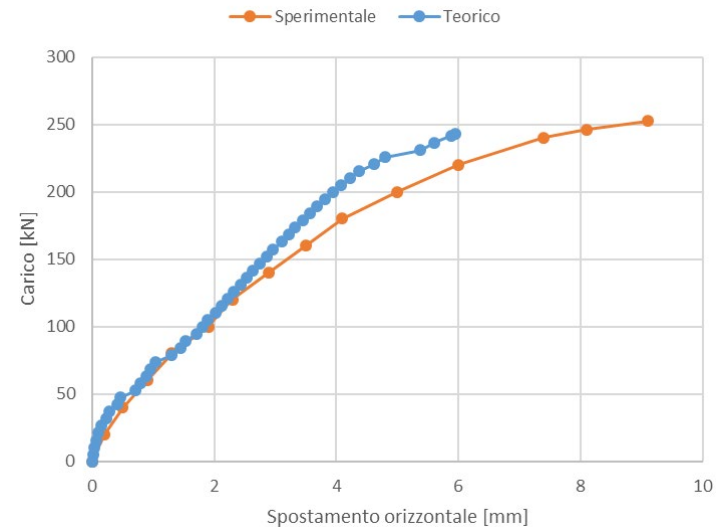
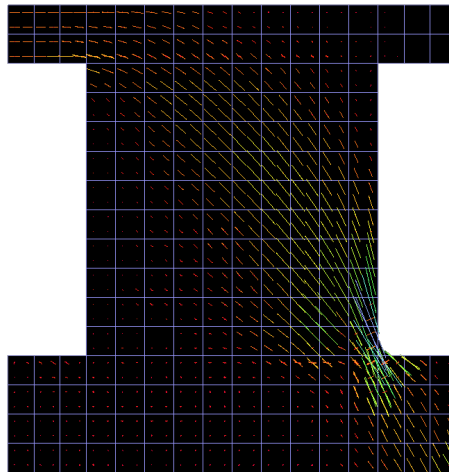
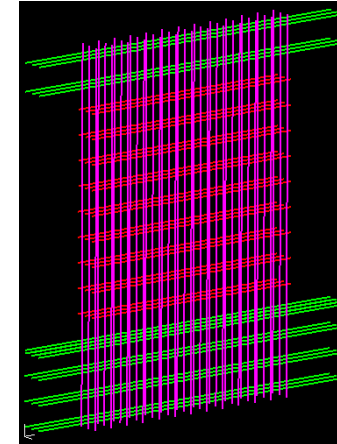
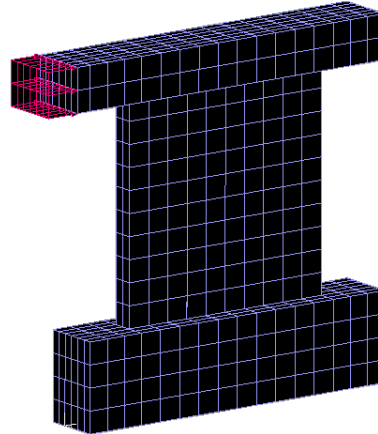
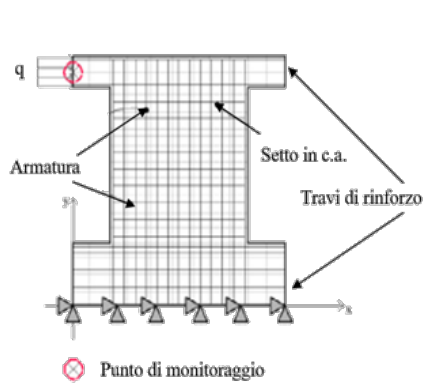
2. **Validazione:** *stiamo risolvendo le corrette equazioni?* → analisi di benchmark

La selezionata strategia di modellazione è stata impiegata per riprodurre degli esperimenti di laboratorio con risultato noto dimostrando la sua capacità di predire correttamente il comportamento strutturale.

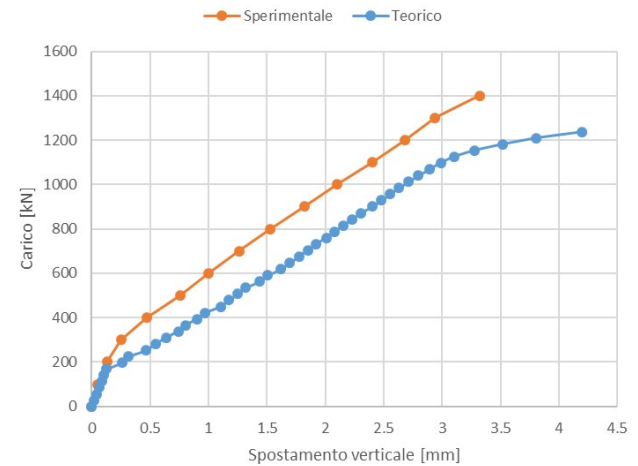
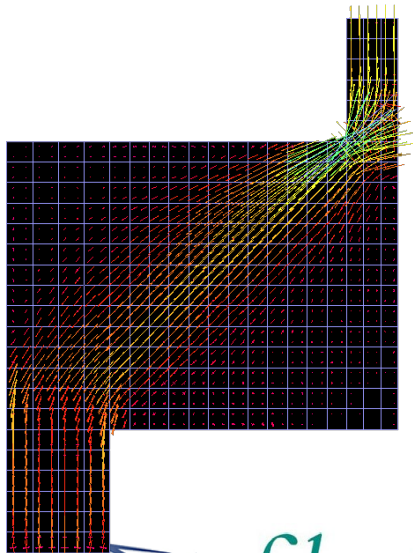
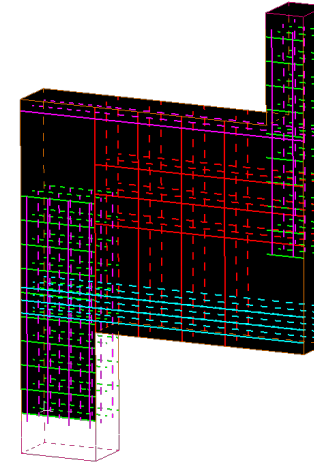
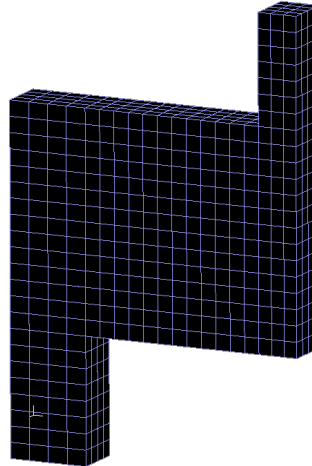
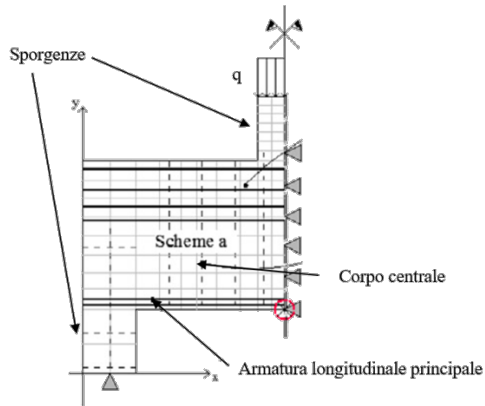
- ❖ **Benchmark 1:** (Bosco C., Debernardi P.G. "Influence of some basic parameters on the plastic rotation of reinforced concrete elements" BULLETIN D'INFORMATION n. 218)



❖ **Benchmark 2:** (Lefas ID, Kotsovos MD. “Behaviour of reinforced concrete structural walls: strength, deformation characteristics and failure mechanism” ACI Struct J 1990;87:23–31)



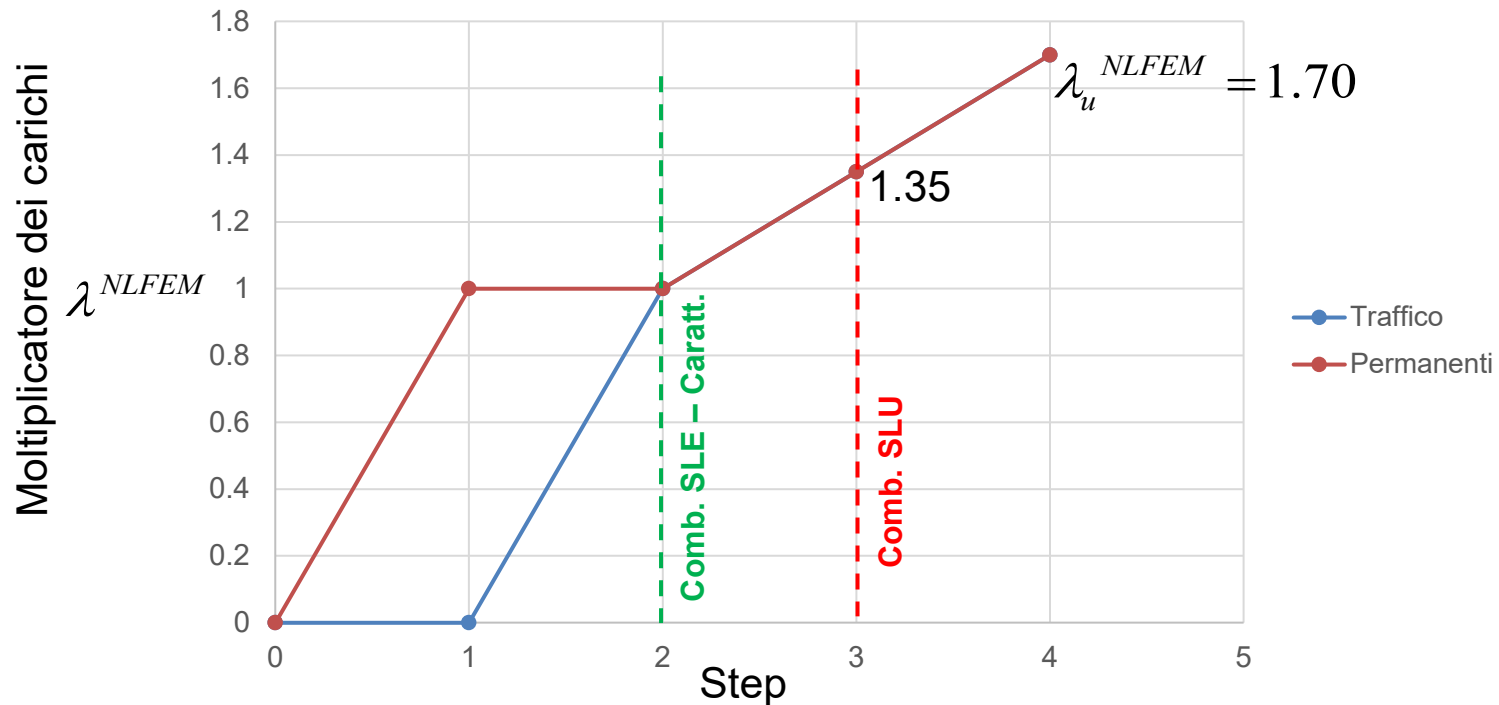
❖ **Benchmark 3:** (Foster SJ, Gilbert J. “Experimental studies on high strength concrete deep beams” *ACI Struct J* 1998;95:382–90)



Analisi strutturale globale

➔ Simulazione eseguita con i valori medi delle proprietà dei materiali

$$R_{NLNA}(f_m; a_n) \rightarrow \lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_{nom}) = 1.70$$



SLE Caratteristica $F_{SLE,car} = G_k + LM1$

SLU

$$F_d = 1.35 \cdot G_k + 1.35 \cdot LM1$$

Applicazione formato per la sicurezza globale: metodo del fattore globale (global factor method) – Annex F EC2

$$F_d \leq R_d \text{ where } R_d = \frac{R_{NLNA}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \longleftrightarrow \lambda_d^{NLFEM} = \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \geq 1$$

- **Coefficiente di sicurezza sulla resistenza globale** (Incertezza materiali e geometria)

$$\gamma_R = \frac{\exp(\alpha_R \beta_t \cdot V_R)}{\delta_R} \quad \text{with } V_R \leq 0.3$$

$$\alpha_R = 0.8$$

FORM

$$\beta_t = 3.8$$

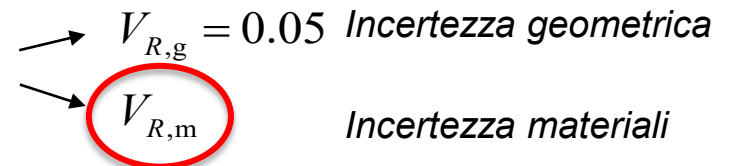
Valore di riferimento dell'indice di affidabilità (50 anni)

$$\delta_R = \delta_{R,m} \cdot \delta_{R,g} \approx 1.00$$

Coefficiente di deviazione

$$V_R = \sqrt{V_{R,m}^2 + V_{R,g}^2}$$

Coefficiente di variazione della resistenza globale



➔ Coefficiente di variazione della resistenza globale (materiali) $V_{R,m}$

L' **Annesso F al nuovo EC2** consente di determinare tale valore con i seguenti approcci:

1. *Stima tramite analisi probabilistica* → **non percorribile in pratica**
2. *Metodo della stima del coefficiente di variazione (ECoV):*

$$V_{R,m} = \frac{1}{1.65} \ln \left(\frac{R_{NLFEM}(f_m; a_{nom})}{R_{NLFEM}(f_k; a_{nom})} \right)$$



$$V_{R,m} = \frac{1}{1.65} \ln \left(\frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_{nom})}{\lambda_u^{NLFEM}(f_k; a_{nom})} \right)$$

❖ Simulazione 1 (*valori medi*): $\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_{nom}) = 1.70$

❖ Simulazione 2 (*valori caratteristici*): $\lambda_u^{NLFEM}(f_k; a_{nom}) = 1.54$

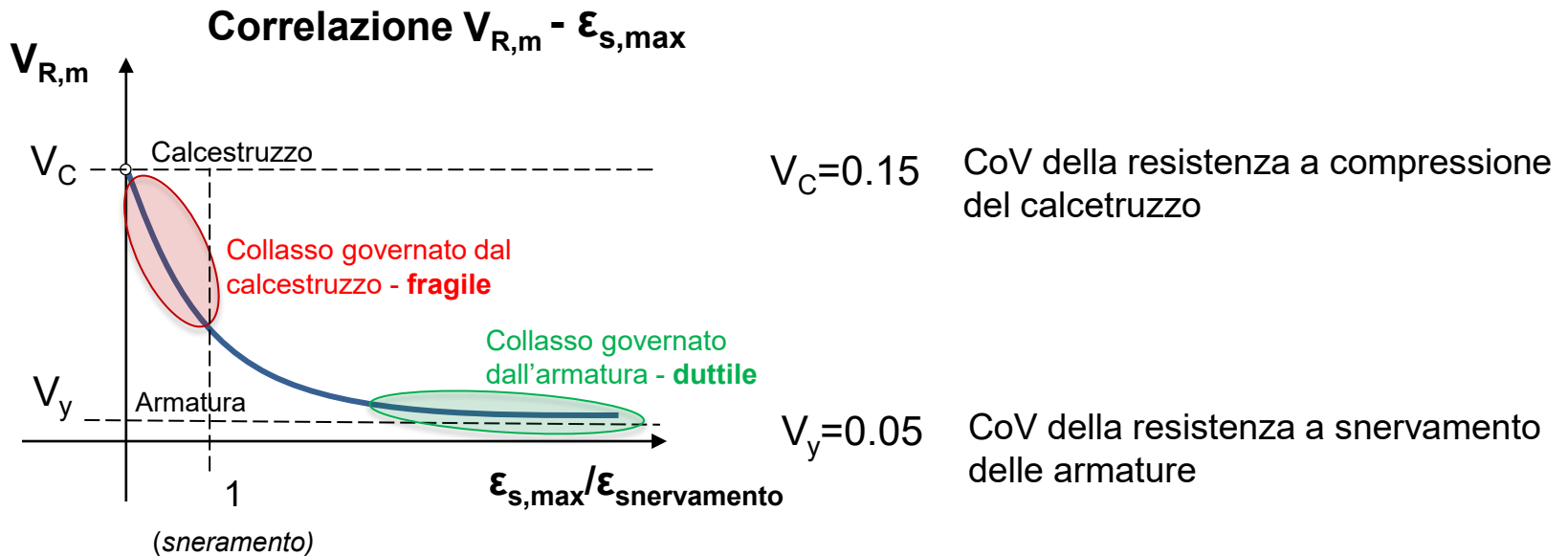
$$V_{R,m} = \frac{1}{1.65} \ln\left(\frac{1.70}{1.54}\right) = 0.060$$

➔ Quindi, utilizzando il metodo ECoV:

$$V_R = \sqrt{V_{R,m}^2 + V_{R,g}^2} = \sqrt{0.060^2 + 0.05^2} = 0.078$$

$$\gamma_R = \frac{\exp(\alpha_R \beta_t \cdot V_R)}{\delta_R} = \frac{\exp(0.8 \cdot 3.8 \cdot 0.078)}{1.00} = 1.27$$

3. Stima approssimata del coefficiente di variazione (ECoV):



In assenza di valutazioni accurate di $V_{R,m}$, e possibile porsi nella situazione più cautelativa ed assumere:

$$V_{R,m} = V_C = 0.15$$

➔ Quindi, utilizzando questo approccio:

$$V_R = \sqrt{V_{R,m}^2 + V_{R,g}^2} = \sqrt{0.15^2 + 0.05^2} = 0.158$$

$$\gamma_R = \frac{\exp(\alpha_R \beta_t \cdot V_R)}{\delta_R} = \frac{\exp(0.8 \cdot 3.8 \cdot 0.158)}{1.00} = 1.62$$



Circa il **30% più grande** rispetto al caso di ECoV, che tiene conto dell' effettivo meccanismo di collasso

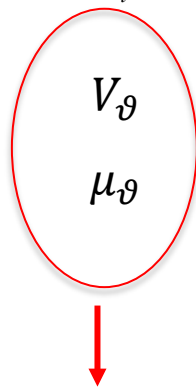
- Coefficiente di incertezza di modello γ_{Rd} (incertezza epistemica)

$$\gamma_{Rd} = \frac{\exp(\alpha_R \beta_t \cdot V_g)}{\mu_g}$$

$$\alpha_R = 0.32 \quad \text{FORM}$$

$$\beta_t = 3.8 \quad \text{Valore di riferimento dell'indice di affidabilità (50 anni)}$$

$$g = \frac{R_{Exp}}{R_{NLNA}(f_{Exp}, a_{Exp})}$$



Coefficiente di variazione incertezza di modello

Valor medio incertezza di modello

1. Stimabili da analisi statistica di risultati sperimentali rapportati a risultati NLFEM (benckmark)
2. Letteratura scientifica riconosciuta $V_g=0.12$ $\mu_g=1.00$ Engen et al, 2021
3. Valore raccomandato per NLFEM Annex F EC2: $\gamma_{Rd} = 1.30$

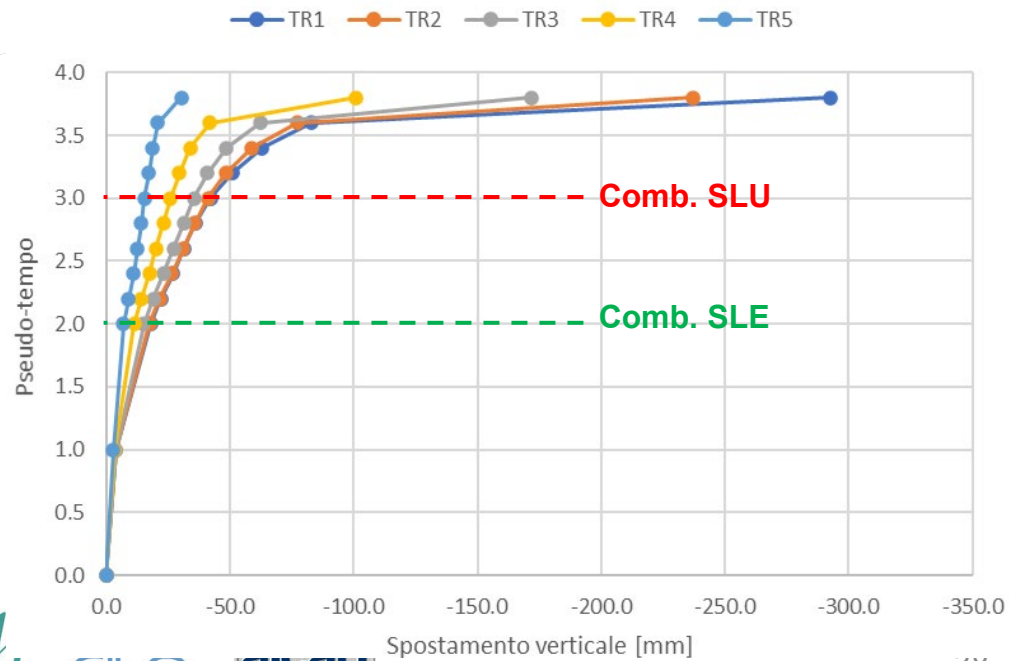
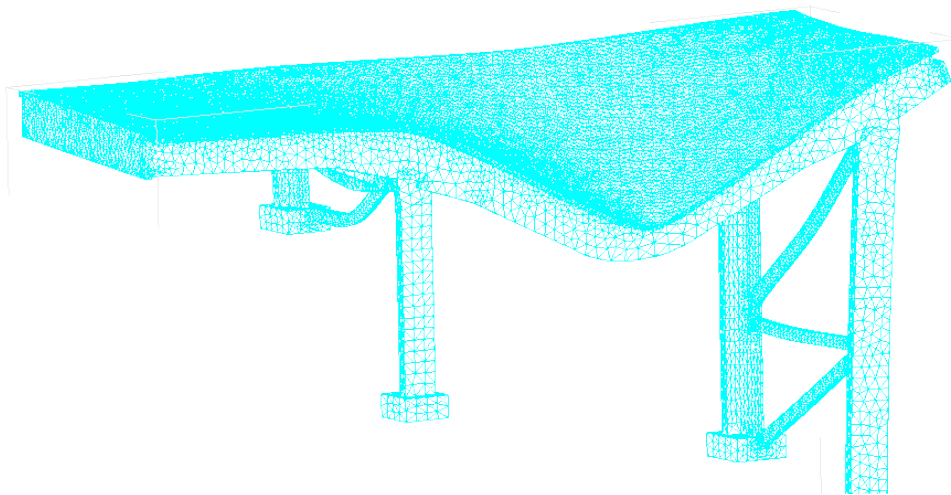
➔ In questo esempio, considereremo:

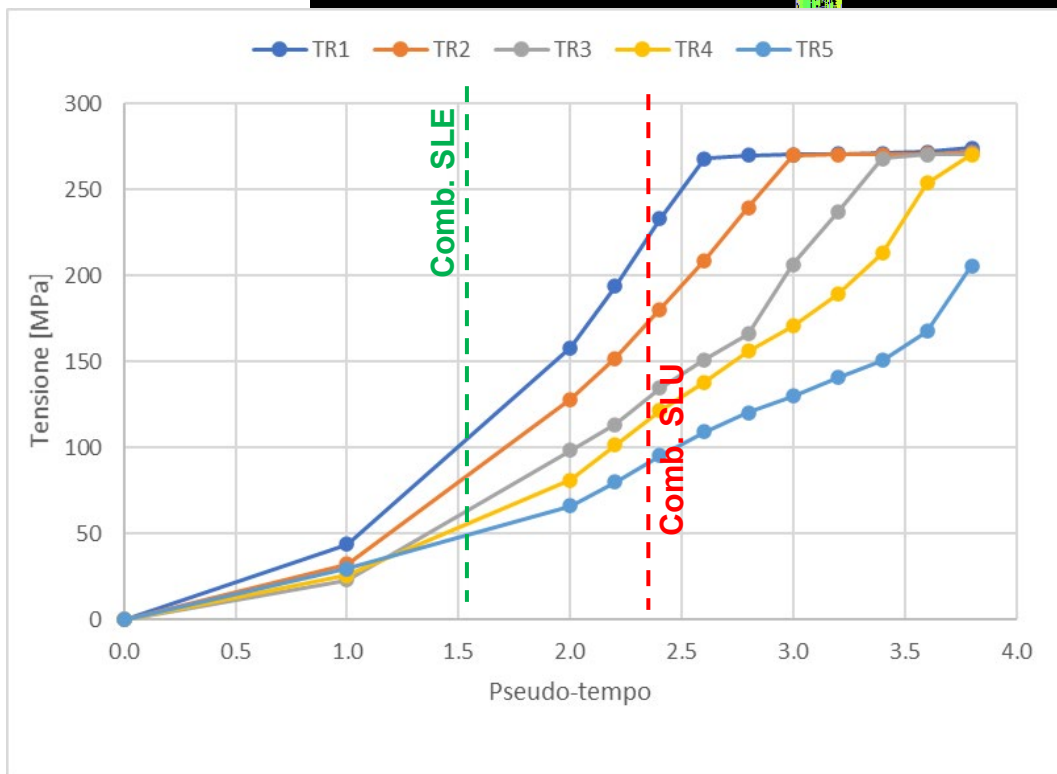
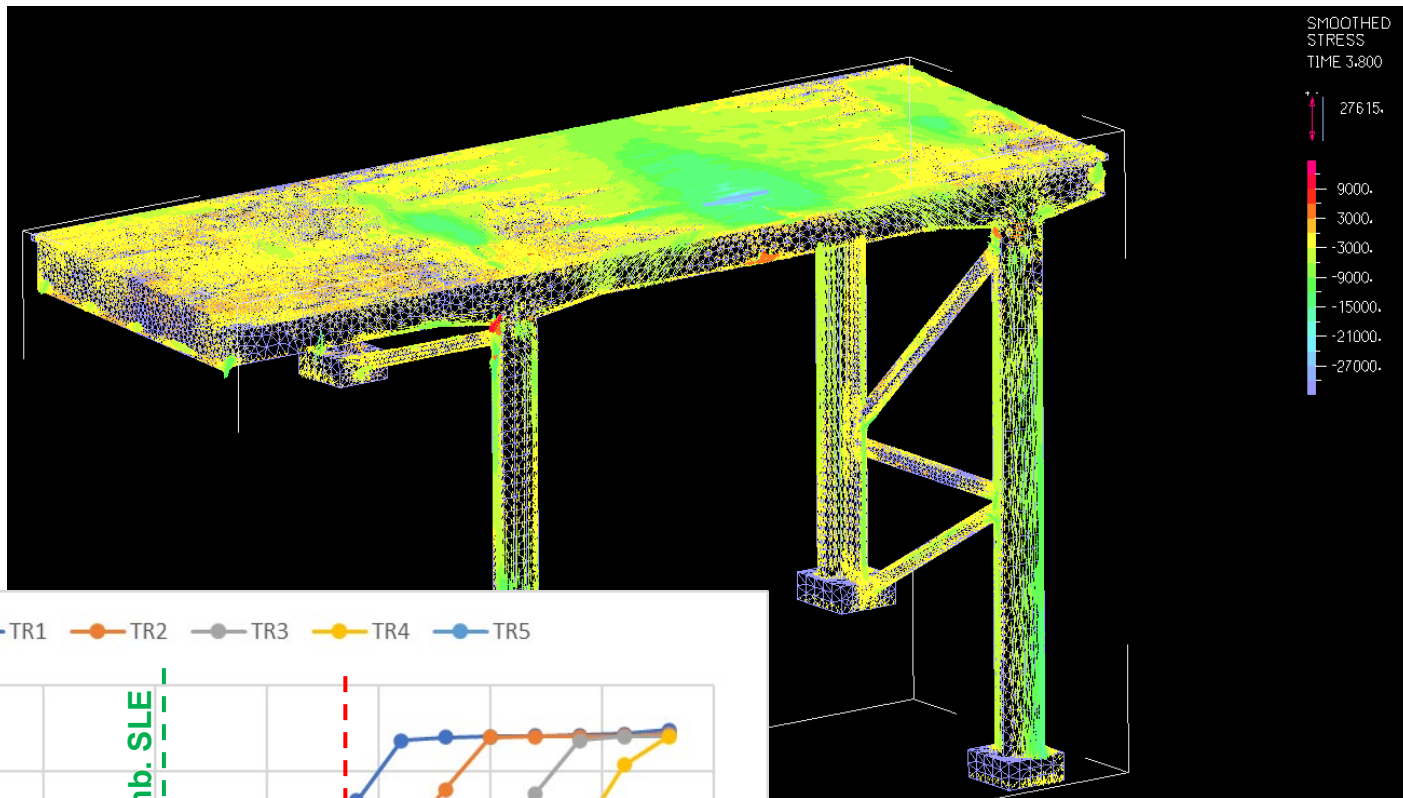
2. Letteratura scientifica riconosciuta $V_g=0.12$ $\mu_g=1.00$

$$\gamma_{Rd} = \frac{\exp(\alpha_R \beta_t \cdot V_g)}{\mu_g} = \frac{(0.32 \cdot 3.8 \cdot 0.12)}{1.00} = 1.15$$

3. Valore raccomandato per NLFEM Annex F EC2: $\gamma_{Rd} = 1.30$

Resultati NLFEM LC1





❖ Importante effetto di redistribuzione trasversale del carico tra le travi grazie ai traversi → sistema fortemente iperstatico!!

➔ La verifica applicando il GFM risulta:

(da analisi 'locale'
 $F_s=0.73$)

$$\lambda_d^{NLFEM} = \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \geq 1.00$$

Applicazione della
sicurezza in modo **più
accurato**

$$\frac{1.70}{1.27 \cdot 1.15} = 1.16 \geq 1.00$$

➔ Fattore di sicurezza $F_s=1.16$

$$\frac{1.70}{1.27 \cdot 1.30} = 1.03 \geq 1.00$$

➔ Fattore di sicurezza $F_s=1.03$

Applicazione della
sicurezza in modo
meno accurato

$$\frac{1.70}{1.62 \cdot 1.30} = 0.80 < 1.00$$

➔ Fattore di sicurezza
 $F_s=0.80$

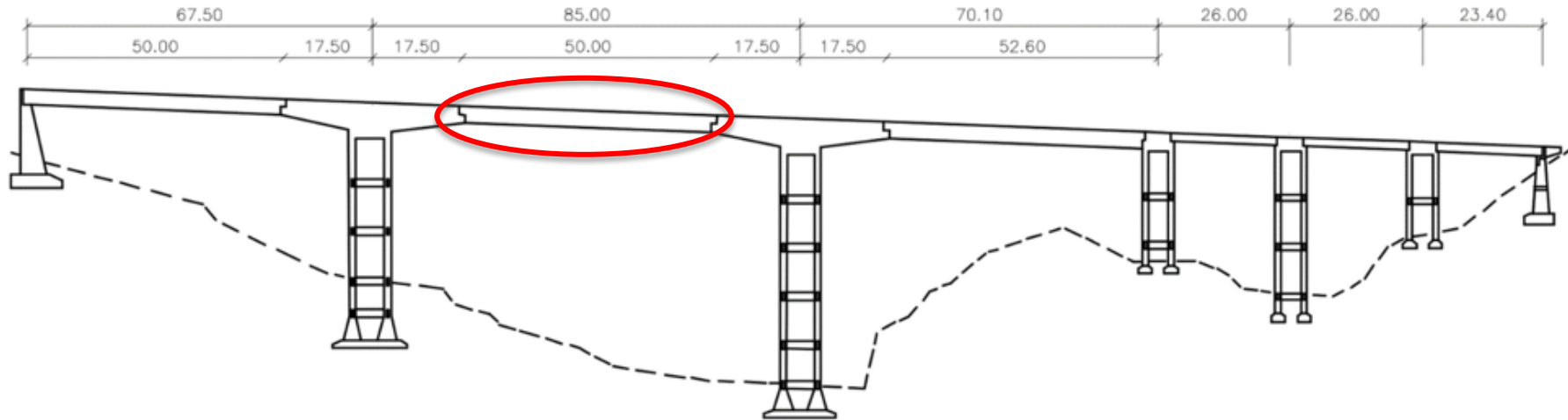
Esempio 2: viadotto autostradale in c.a.p. esistente



Politecnico
di Torino



Il caso studio



Porzione analizzata

- Trave su semplice appoggio su selle gerber
- $L=50$ m
- Pila a telaio spaziale

Table 2. Details of the post-tensioned tendons in the 50m deck.

	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4
Tendon 1	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 2	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 3	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 4	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 5	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 6	42 Φ 6	20 Φ 6	20 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 7	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 8	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6	42 Φ 6
Tendon 9	20 Φ 6	[-]	[-]	20 Φ 6
Global Area [mm²]	10066	8878	8878	10066

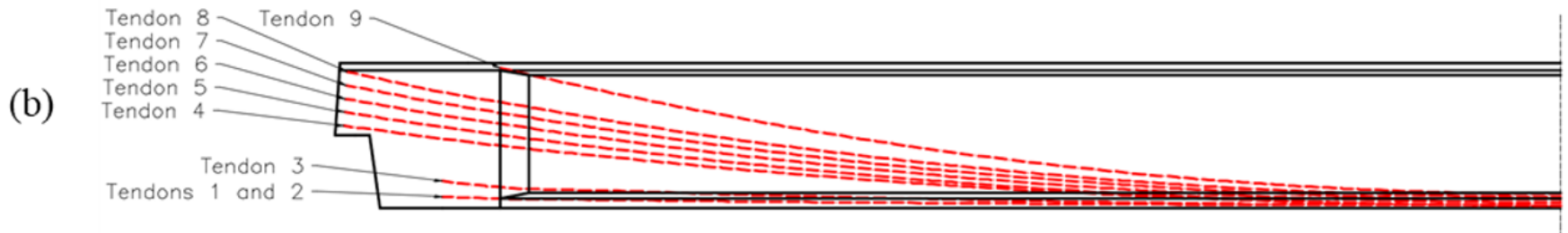


Figure 5. Post-tensioned tendon layout: (a) 20.8 m deck; (b) 50 m deck.

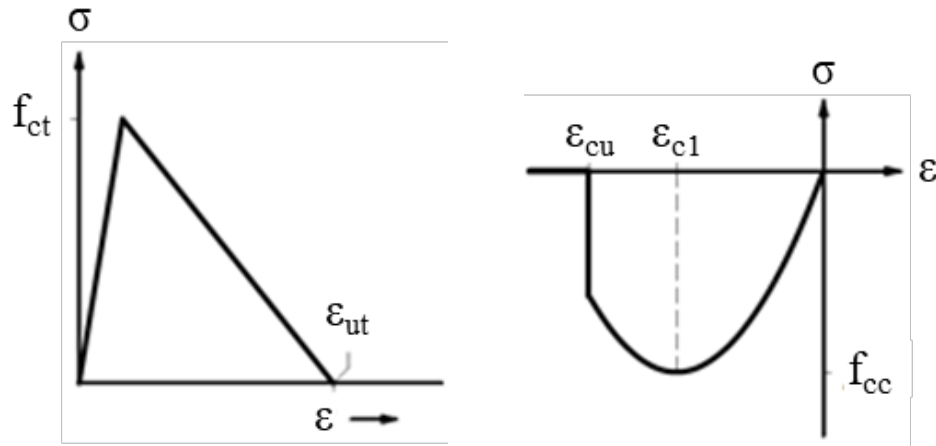
Analisi locale (tradizionale)

		Fattore di sicurezza
		50m deck
Modello FEM lineare	Beam 1	1.08
	Beam 4	
Teoria di Courbon	Beam 1	0.91
	Beam 4	

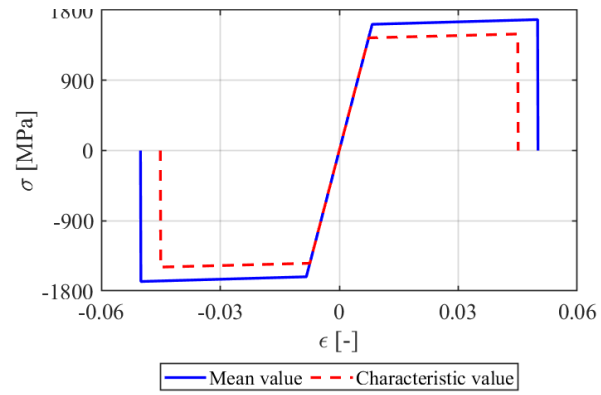
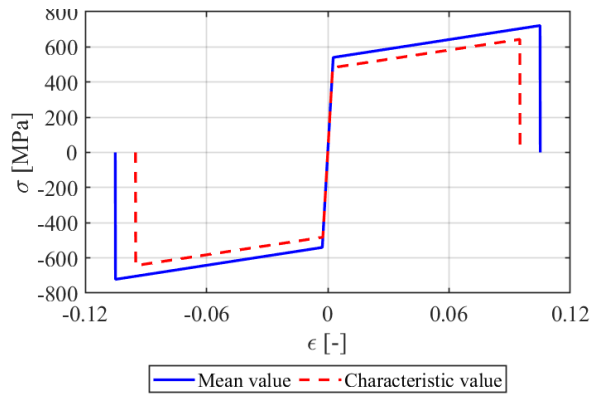
Modello strutturale

- ❖ **DIANA fea** (Displacement ANAlyzer) dal *TNO Delft* pacchetto software multifisico pensato per l'ingegneria civile
- ❖ **Modelli di materiale:**
 - *Calcestruzzo*: materiale CONCRETE in grado di cogliere fenomeni fragili legati alla fessurazione del calcestruzzo, non-linearità in compressione, l'influenza dello stato di compressione triassiale sulla legge costitutiva e sulla resistenza
 - Acciaio: Materiale ELASTO-PLASTICO per rappresentare le armature ed il relativo snervamento
- ❖ **Elementi finiti:**
 - CLS rappresentato da elementi finiti SOLID 3D (brick)
 - Barre di armatura rappresentate da elementi TRUSS



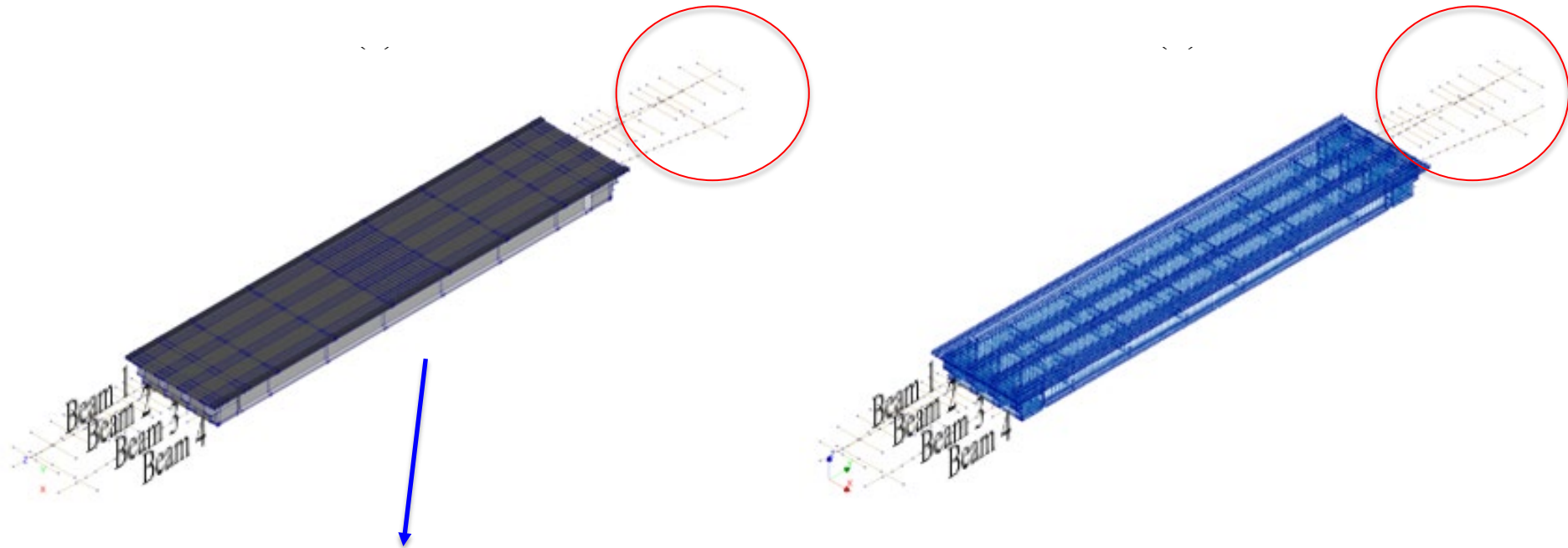


➤ *Calcestruzzo*



➤ *Armatura di acciaio*

Porzione dei trave rigidamente connessa alla pila –
modello elastico lineare con elementi Beam 1D

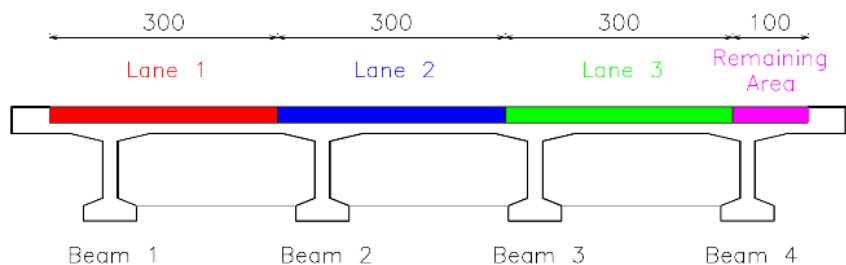


Trave modellata con elementi Brick 3D (calcestruzzo)
ed elementi Truss (armature) – post tensione è stata
applicata tenendo conto delle perdite e cadute

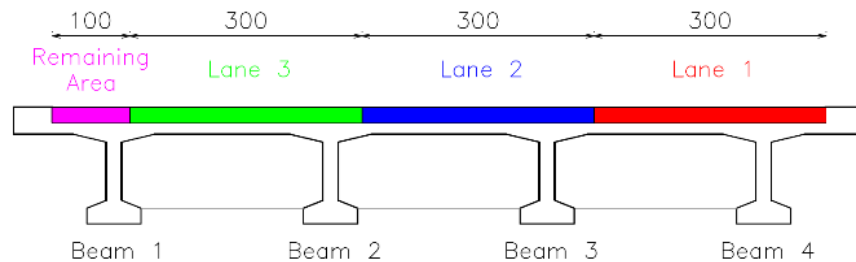
E' fondamentale anche nel NLFEM
modellare accuratamente le **condizioni
al contorno** che influenzano fortemente
il risultato!!

Condizione di carico

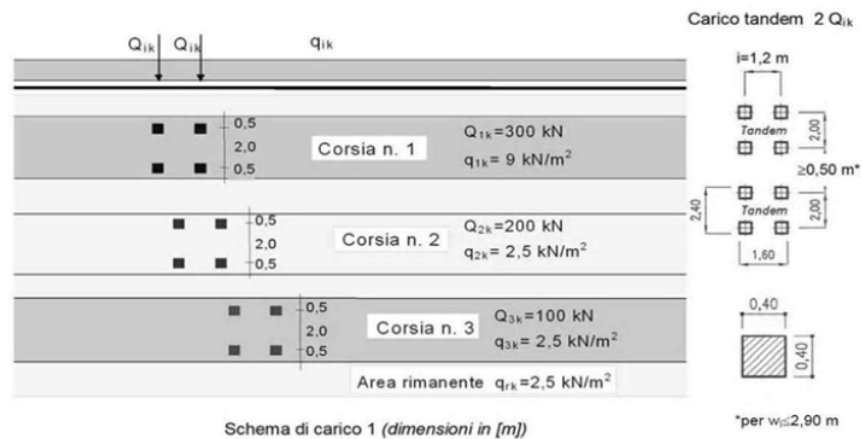
(c)



(d)



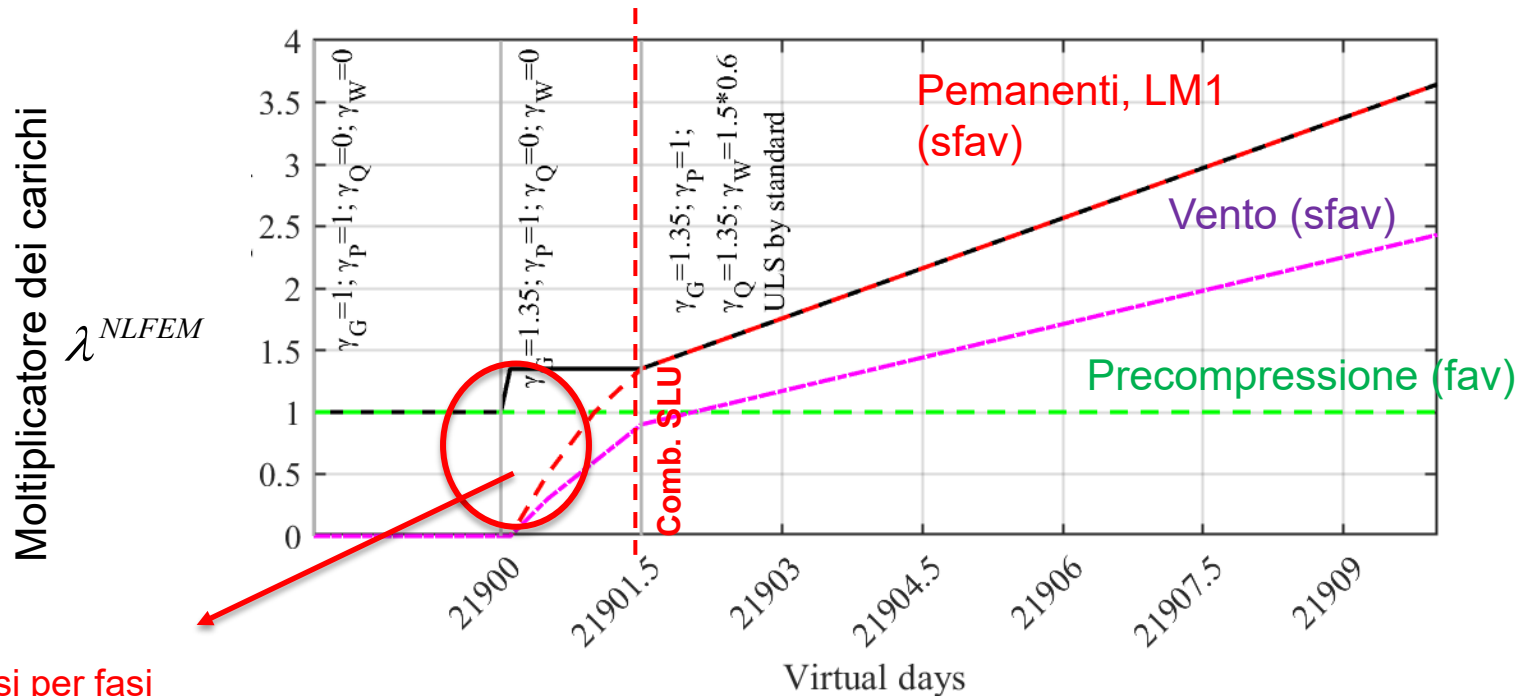
LM1 con massimizzazione del carico su trave 1 e 4 per massimizzare il momento in mezzera



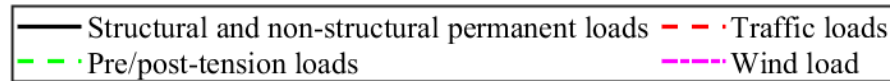
Analisi strutturale globale

➔ Simulazione eseguita con i valori medi delle proprietà dei materiali

$$R_{NLNA}(f_m; a_n) \rightarrow \lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_{nom}) = 1.70$$

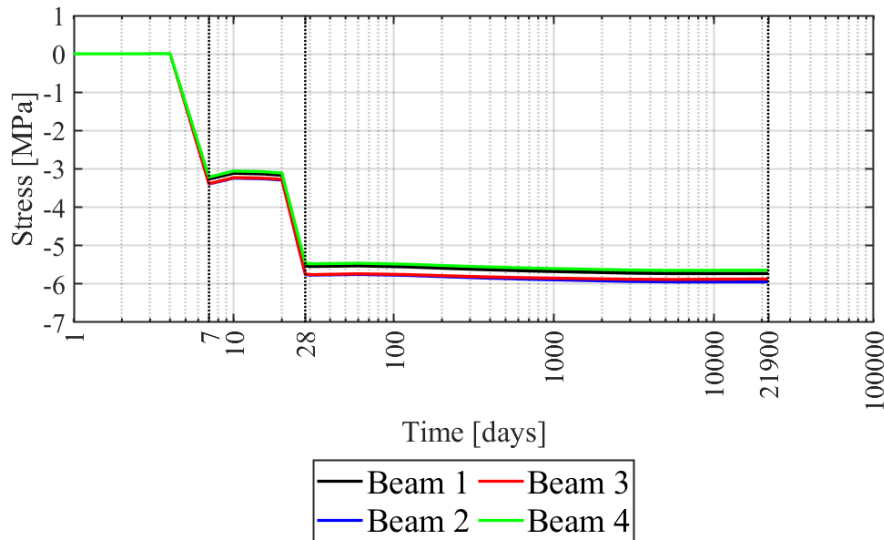


Analisi per fasi costruttive nel tempo (creep, ritiro, perdite e cadute di precompressione) fino al raggiungimento della combinazione QP a tempo infinito

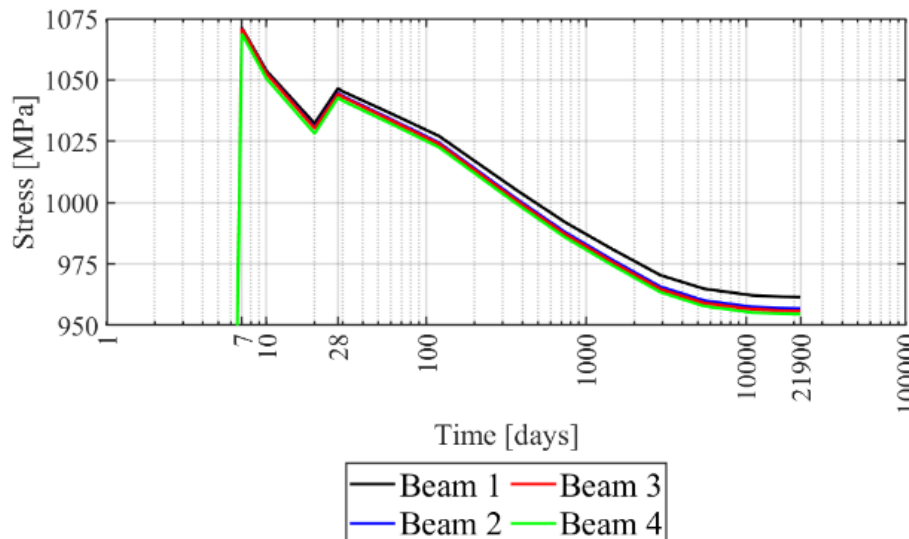


$$SLU \quad F_d = \gamma_G \cdot G + \gamma_P \cdot P + \gamma_{QT} \cdot Q_T + \psi_W \cdot \gamma_{QW} \cdot Q_W$$

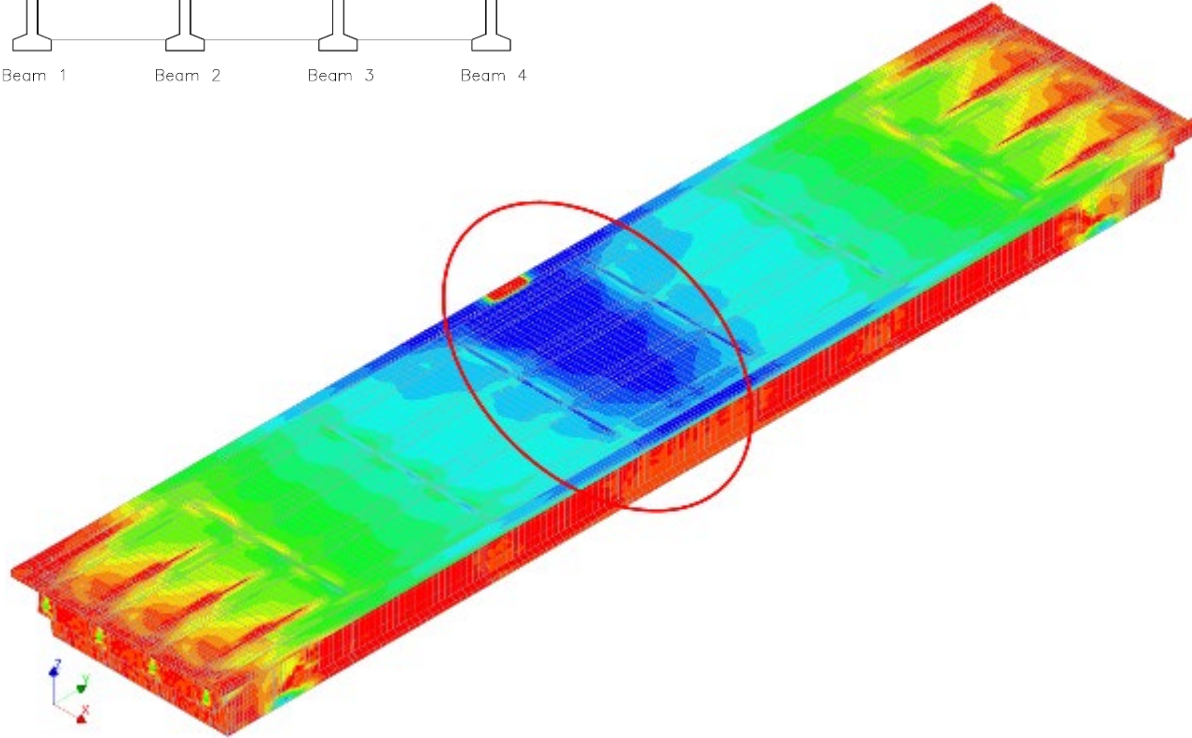
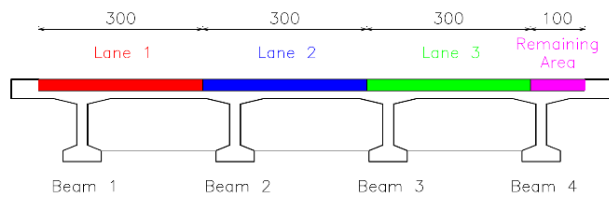
➔ **Analisi per fasi nel tempo con fenomeni differiti**



➤ *Evoluzione delle tensioni nel calcestruzzo ad estradosso trave (mezzeria)*



➤ *Evoluzione delle tensioni nei cavi da precompressione (mezzeria)*



- *Meccanismo di collasso flessionale alla SLU con cavi snervati e crisi del calcestruzzo in compressione*

Formati per la sicurezza utilizzati (Annex F - EC2)

- Metodo del fattore globale (GFM)

Applicato in analogia a caso precedente utilizzando il metodo ECoV per stimare $V_{R,m}$

$$V_{R,m} = \frac{1}{1.65} \ln \left(\frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_{nom})}{\lambda_u^{NLFEM}(f_k; a_{nom})} \right) = \frac{1}{1.65} \ln \left(\frac{1.64}{1.43} \right) = 0.082$$

$$V_R = \sqrt{V_{R,m}^2 + V_{R,g}^2} = \sqrt{0.082^2 + 0.05^2} = 0.096$$

$$\gamma_R = \frac{\exp(\alpha_R \beta_t \cdot V_R)}{\delta_R} = \frac{\exp(0.8 \cdot 3.8 \cdot 0.096)}{1.00} \approx 1.30$$

$$\gamma_{Rd} \approx 1.15$$

- Metodo dei coefficienti parziali (PFM)

Questo metodo consente di fare una singola simulazione utilizzando i valori di Progetto delle proprietà dei materiali.

$$F_d \leq R_d \text{ where } R_d = \frac{R_{NLNA}(f_d; a_{nom})}{\gamma_{Rd}} \quad \longleftrightarrow \quad \lambda_d^{NLFEM} = \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_d; a_n)}{\gamma_{Rd}} \geq 1$$

Valori di calcolo f_d valutati in accordo con Annex A EC2 e depurati del contributo dell'incertezza di modello (diversi rispetto quelli usati per le verifiche locali)

➔ Annesso F permette di effettuare la verifica anche nel seguente modo, a patto che l'incertezza di modello legata al NLFEM non sia dominante:

$$F_d \leq R_d \text{ where } R_d = R_{NLNA}(f_d; a_{nom}) \quad \longleftrightarrow \quad \lambda_d^{NLFEM} = \lambda_u^{NLFEM}(f_d; a_d) \geq 1$$

Valori di calcolo come da NTC18 o EC2 come per le verifiche locali



Seguendo il secondo approccio, I *valori di progetto* delle proprietà dei materiali sono stati valutati in accordo con NTC18 considerando un “**livello di conoscenza 3**”:

$$f_d = \min \left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_m}; \frac{f_k}{FC} \right) \quad FC = 1.00$$

Risultati verifiche

Analisi globale (NLFEM) - GFM

$$\lambda_d^{NLFEM} = \frac{\lambda_u^{NLFEM}(f_m; a_n)}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}} \geq 1 \quad \frac{1.64}{1.30 \cdot 1.15} = 1.09 \geq 1.00$$

Fattore di
sicurezza $F_S=1.09$

Analisi globale (NLFEM) - PFM

$$\lambda_d^{NLFEM} = \lambda_u^{NLFEM}(f_d; a_d) \geq 1 \quad 1.05 \geq 1.00$$

Fattore di
sicurezza $F_S=1.09$

Analisi locale

$F_S = 1.08$ FEM elastico lineare

$F_S = 0.91$ Courbon

Conclusioni

*"La vita è come andare in bicicletta.
Per mantenere l'equilibrio, devi continuare a muoverti."*
Albert Einstein



- ➔ L'analisi NLFEM globale può essere uno strumento molto efficace per la valutazione della sicurezza delle strutture (ad esempio *ponti esistenti*), soprattutto nel caso l'analisi locale tradizionale porti alla luce delle criticità
- ➔ Il margine di sicurezza legato alla verifica non dipende solo dalla bontà del modello NLFEM ma anche dal grado di accuratezza col quale vengono applicati i formati per la sicurezza
- ➔ E' importante comprendere i limiti ed i rischi nell'utilizzo di tali metodi avanzati ed integrare opportunamente i concetti di affidabilità e sicurezza strutturale al fine di eseguire le verifiche in accordo con i livelli di affidabilità richiesti

Gino D., Miceli E., Castaldo P., Recupero A., Mancini G. *Strain-based method for assessment of global resistance safety factors for NLNAs of reinforced concrete structures*, **Engineering Structures**, 304 (2024), 117625

Allaix DL, Carbone VI, Mancini G. *Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures*. **Structural Concrete** 2013; 14(1): 29-42.

Castaldo, P., Gino, D. and Mancini, G. 2019. "Safety formats for non-linear analysis of reinforced concrete structures: discussion, comparison and proposals." **Engineering Structures**, 193: 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.041>.

Engen M, Hendriks MAN, Monti G, Allaix DL. *Treatment of modelling uncertainty of NLFEA in fib Model Code 2020*. **Structural Concrete**. 2021; 22:3202–12. <https://doi.org/10.1002/suco.2021004203212ENGENET AL>.

Ferrara M., Gino D., Miceli E., Giordano L., Malavisi M., Bertagnoli G. 2024. *Safety assessment of existing prestressed RC bridge decks through different approaches*, **Structural Concrete**, DOI: 10.1002/suco.202301049

EN1992:2021 Eurocodice 2 (gen. 2.0)

Grazie!!

Diego Gino

diego.gino@polito.it



**Politecnico
di Torino**

