



COLLEGIO
DEI TECNICI DELLA
INDUSTRIALIZZAZIONE EDILIZIA

www.cte-it.org

IN COLLABORAZIONE CON



ASSOCIAZIONE ITALIANA
CALCESTRUZZO ARMATO E
PRECOMPRESSO

www.associazioneaicap.it

MEDIA PARTNER



Giuseppe Galassi Sconocchia

21 Marzo 2024

EDIFICI ALTI: PROGETTAZIONE E INDUSTRIALIZZAZIONE EDILIZIA



La progettazione delle fasi costruttive: Torre Allianz (MI) e Torre Regione Piemonte (TO)

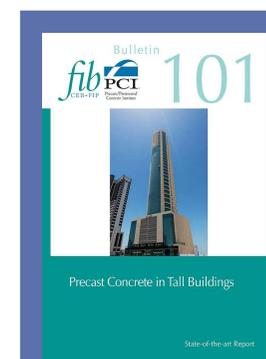
con il patrocinio di



con il contributo incondizionato di



Bollettino fib 101:
Precast Concrete
in Tall Buildings



Torre Allianz (A. Isozaki)

Milano



- Descrizione dell'opera
- Effetti prodotti dalla reologia del materiale (viscosità e ritiro)
- Quinta di facciata con travi di cintura

Torre Regione Piemonte (M. Fuksas)

Torino

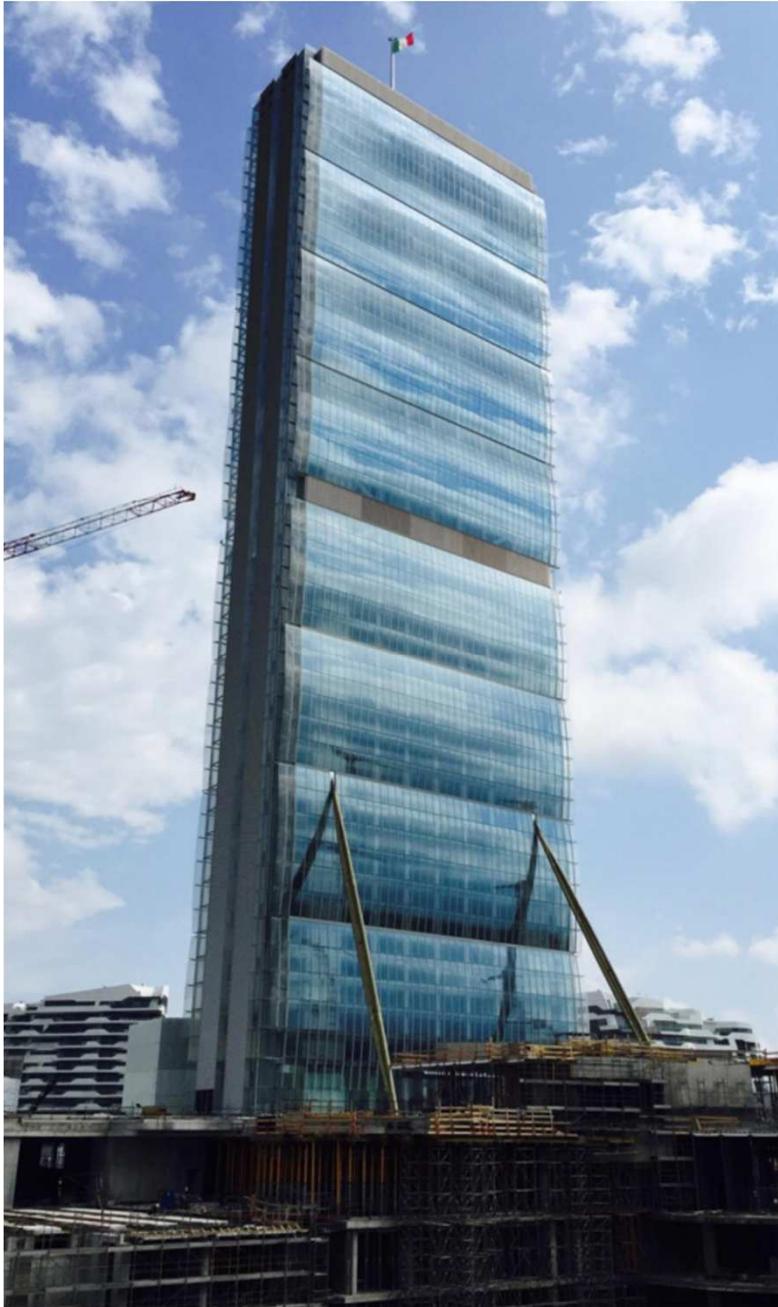


- Descrizione dell'opera
- Getti massivi in calcestruzzo armato
- Progettazione impalcati in aggetto in c.a.p. a cavi aderenti



Torre Allianz

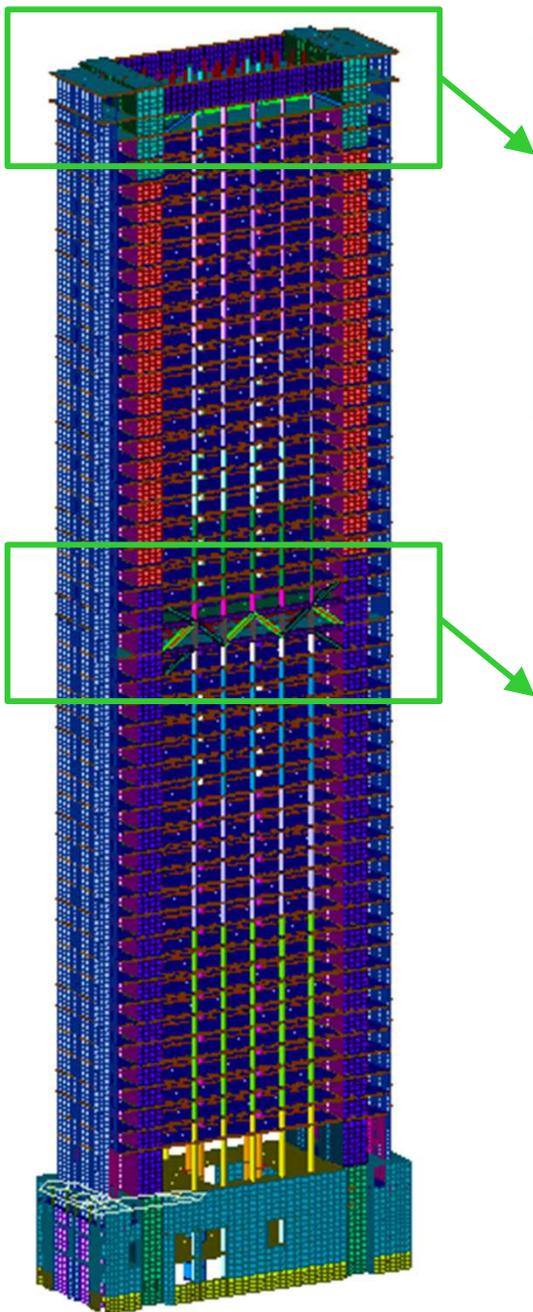
Descrizione dell'opera





Torre Allianz

Descrizione dell'opera



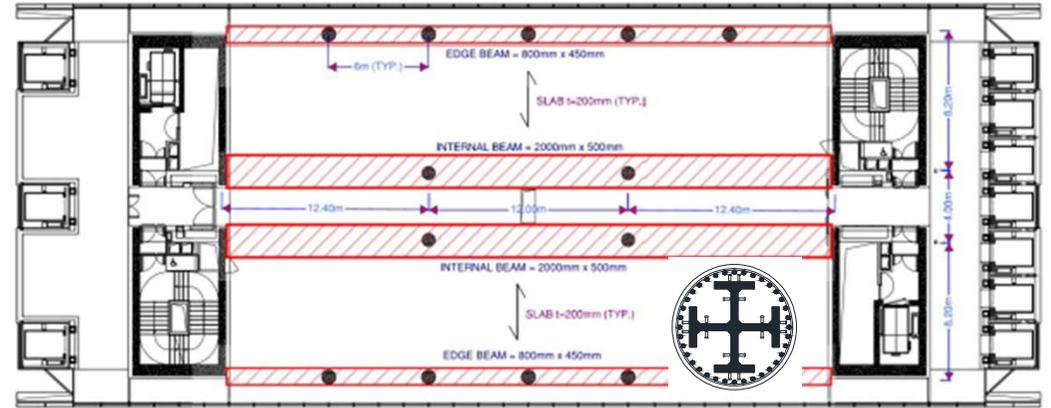
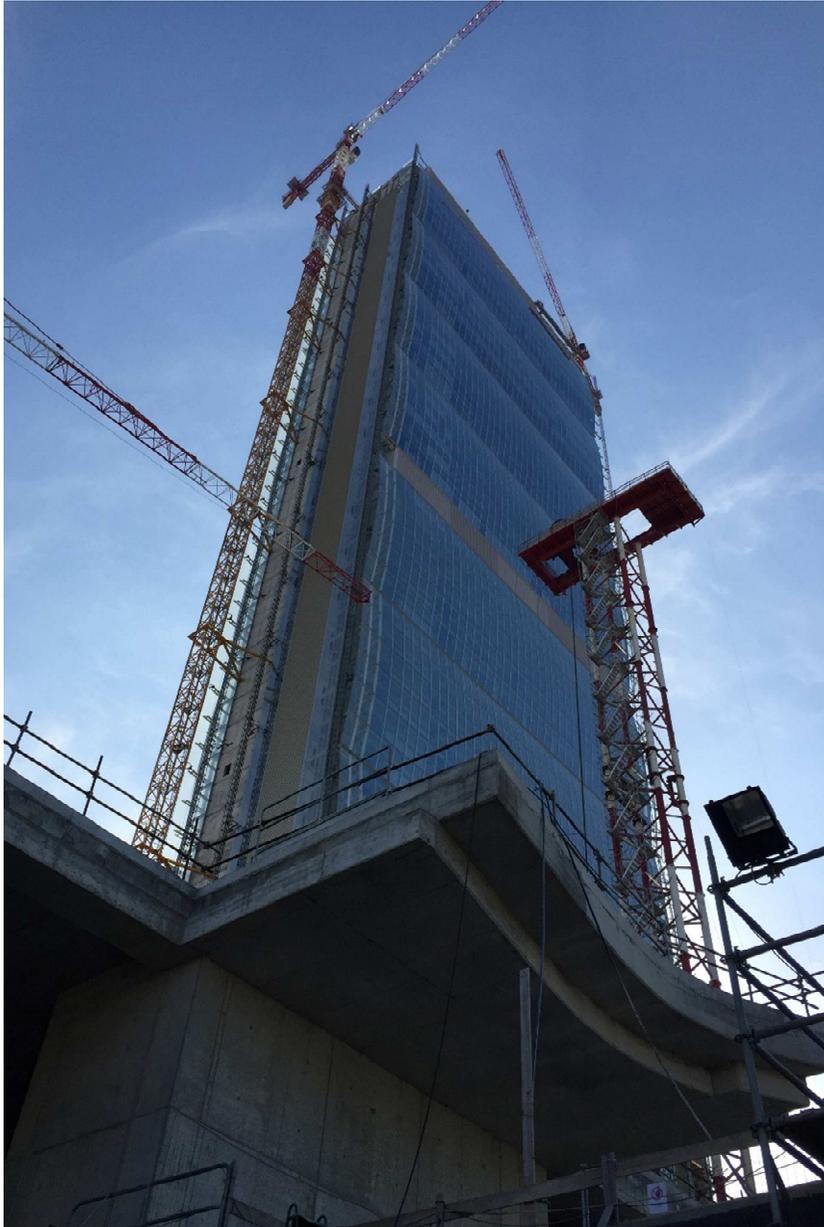
Il sistema strutturale è composto da:

- Due nuclei taglio-resistenti in c.a.
- Due strutture di accoppiamento dei nuclei tipo outrigger
- Quattro puntoni esterni collegati alla base a dissipatori viscosi



Torre Allianz

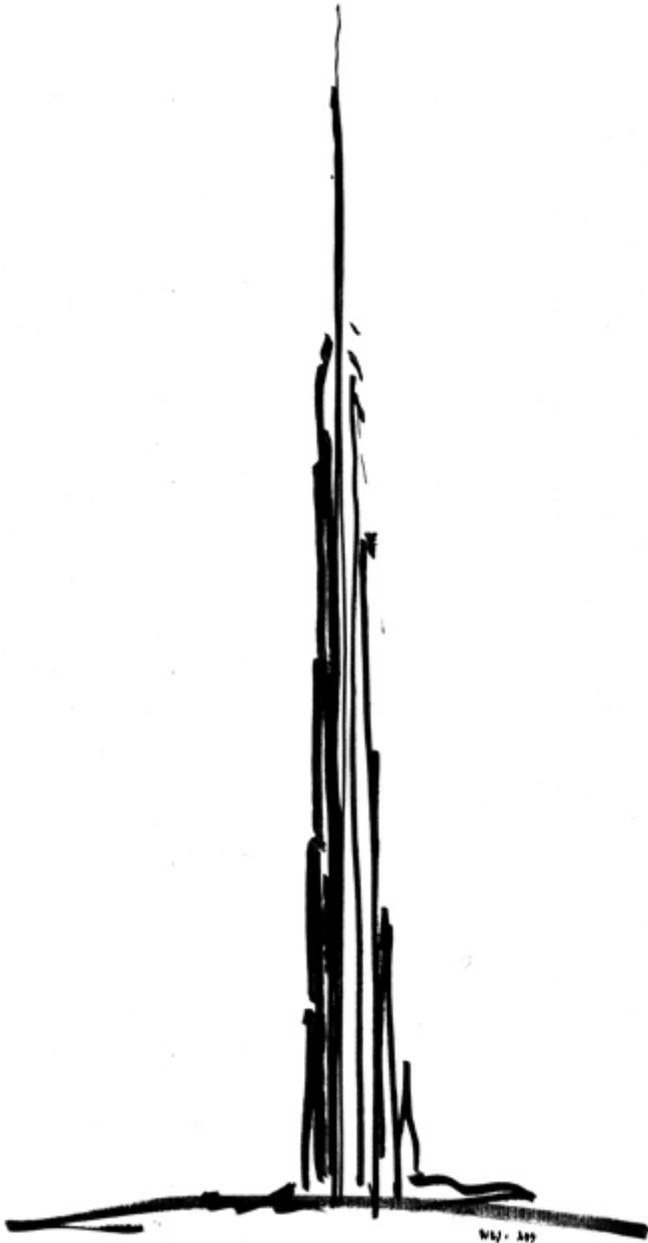
Descrizione dell'opera





Torre Allianz

Problemi strutturali degli edifici alti

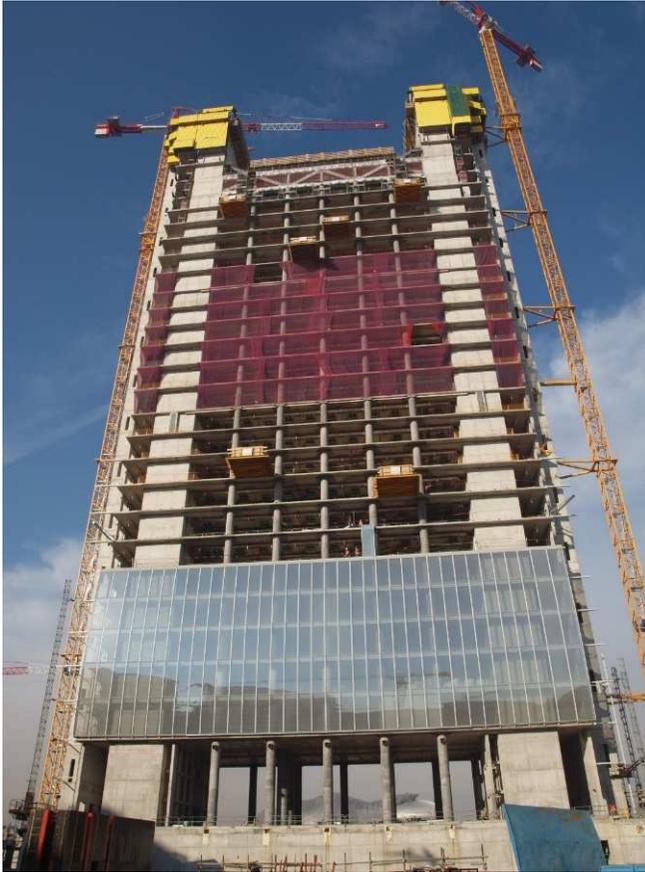


- Schema strutturale e materiali
- Effetti prodotti dalle azioni del vento
- Effetti prodotti dalle azioni sismiche
- Effetti di interazione struttura-terreno
- Effetti prodotti dalla reologia del materiale (viscosità e ritiro)



Torre Allianz

Effetti associati alle deformazioni differite del calcestruzzo



- Accorciamento delle colonne e dei nuclei taglio-resistenti
- Variazione delle sollecitazioni nelle strutture verticali ed orizzontali
- Ridistribuzione delle tensioni nelle sezioni trasversali

Negli edifici alti l'accorciamento degli elementi verticali può essere solo parzialmente corretto durante la costruzione mediante la **compensazione**. In linea generale può essere ulteriormente mitigato introducendo opportuni quantitativi d'**armatura**.



Torre Allianz

Analisi visco-elastiche per fasi con compensazione degli spostamenti

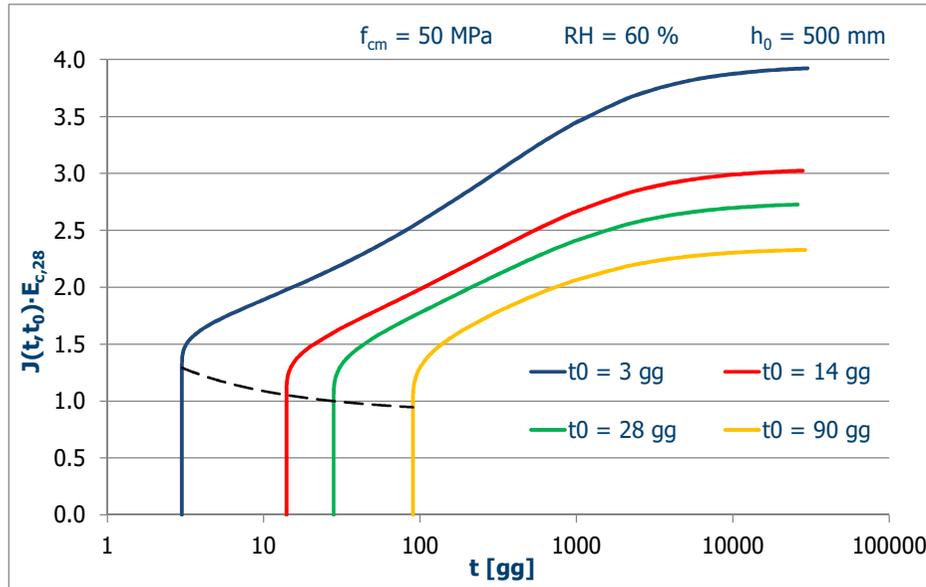


	Asta 1	Asta 2	Asta 3	Asta 4	Asta 5
d [cm]	140	120	100	80	60
l [m]	37	37	37	37	37
h ₀ [mm]	700	600	500	400	300
f _{ck} [MPa]	60	60	50	50	50
P [t]	500	500	500	500	500
t [gg]	0	100	200	300	400
T [gg]	100	200	300	400	500
RH [%]	70				



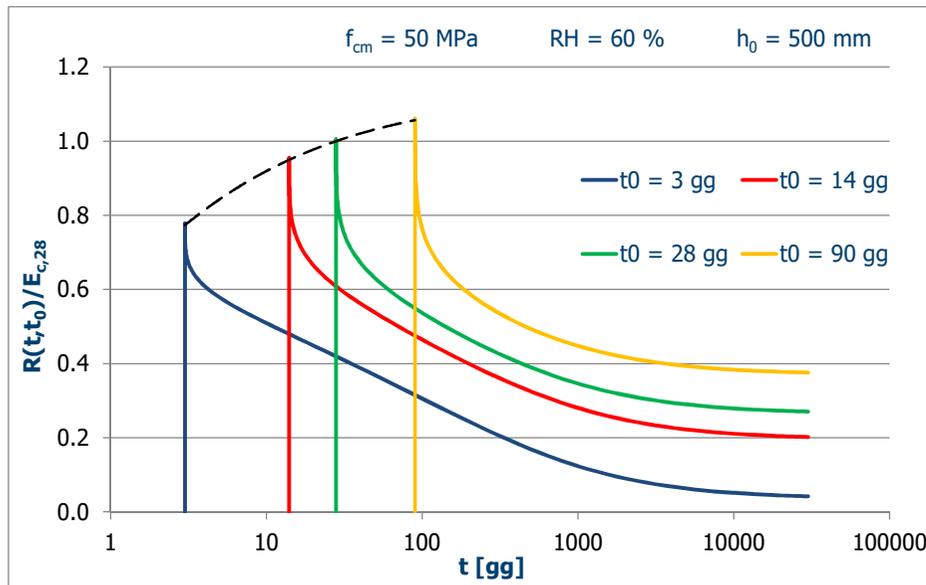
Torre Allianz

Descrizione del comportamento viscoso mediante il modello CEB MC90



$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c,28}}$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0(t_0) \cdot \beta_c(t - t_0)$$



$$\int_0^t \frac{\partial R(t', t_0)}{\partial t'} \cdot J(t, t') \cdot dt' = 1$$

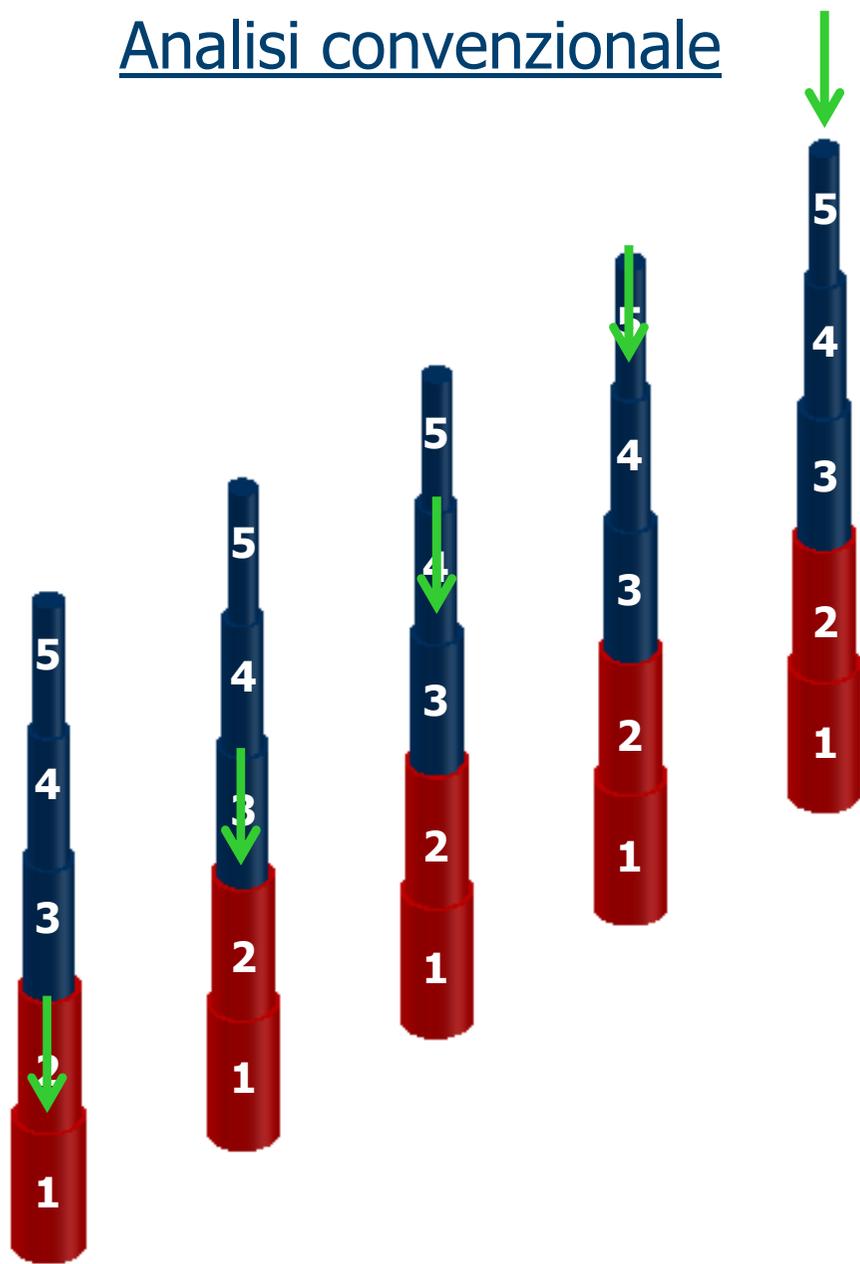
$$\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} \cdot [J(t_{k-1}, t_i) + J(t_{k-1}, t_{i-1})] \cdot \Delta R(t_i) = 1$$



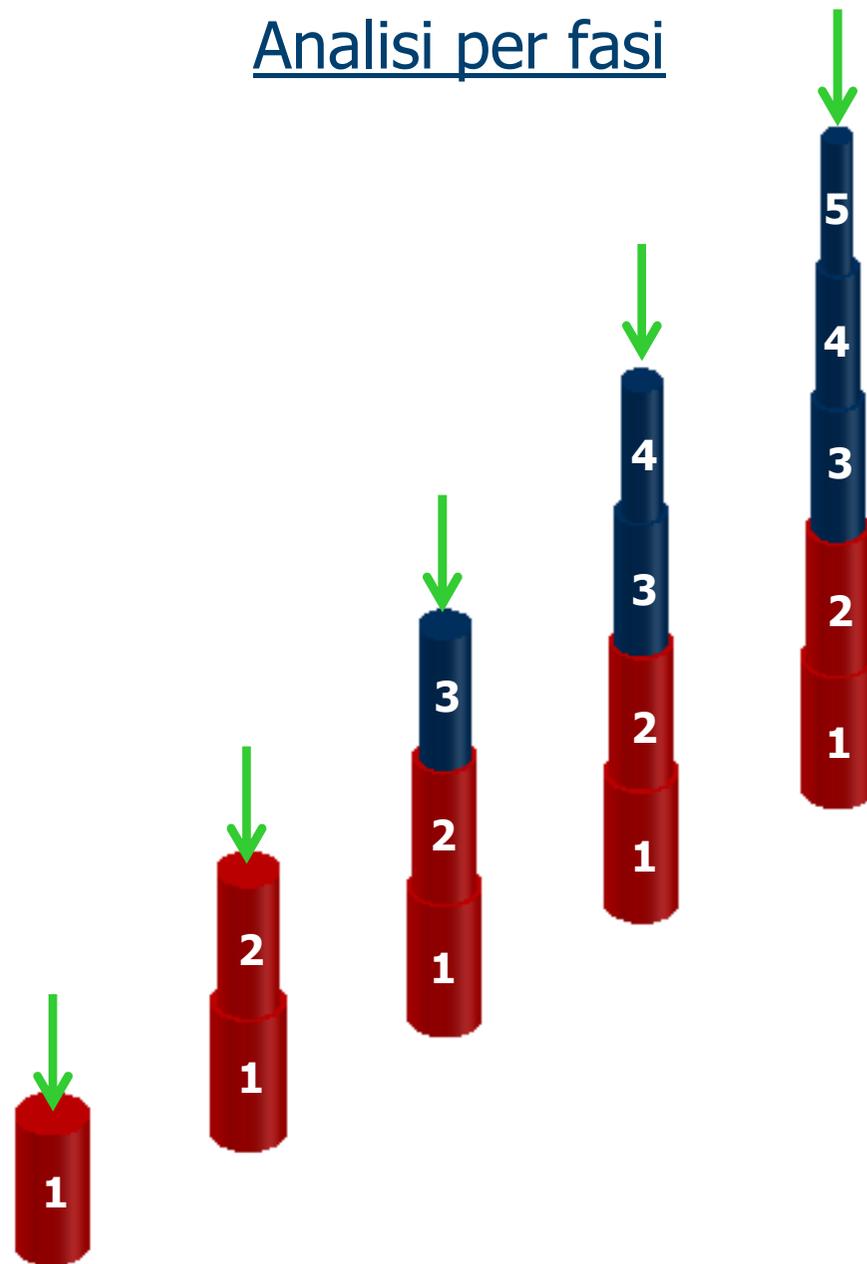
Torre Allianz

Analisi costruttiva sequenziale

Analisi convenzionale



Analisi per fasi

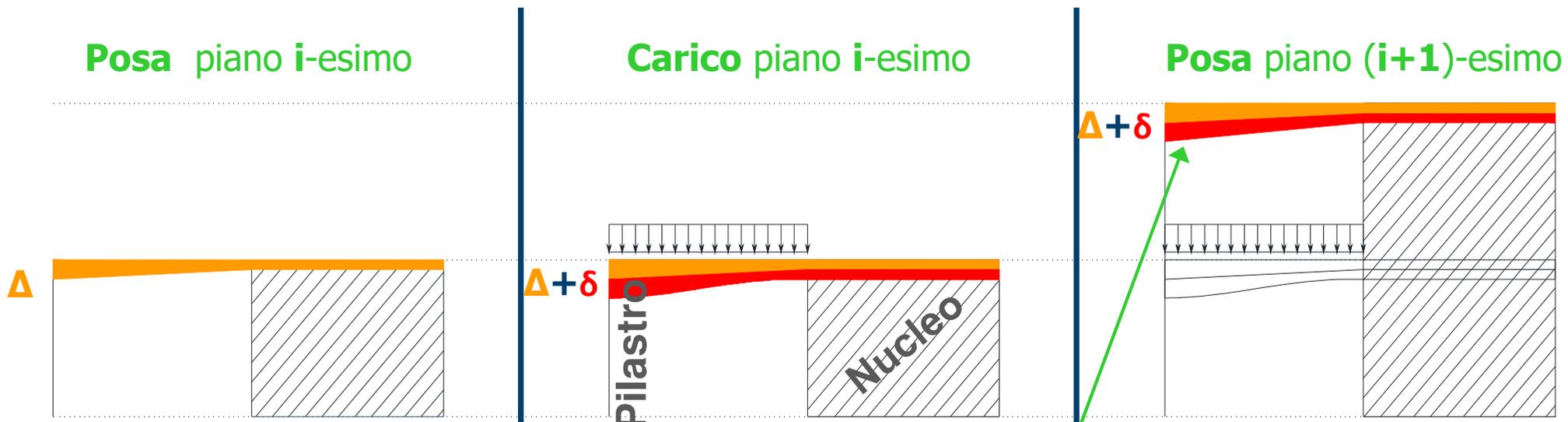




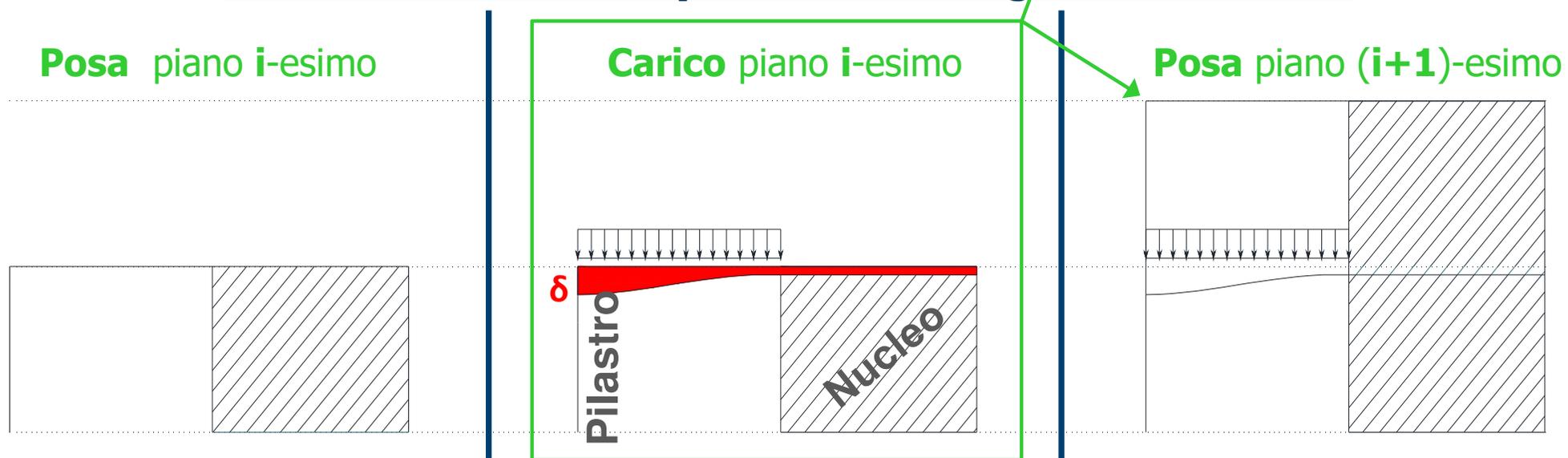
Torre Allianz

Compensazione degli abbassamenti

Costruzione **senza compensazione** degli abbassamenti



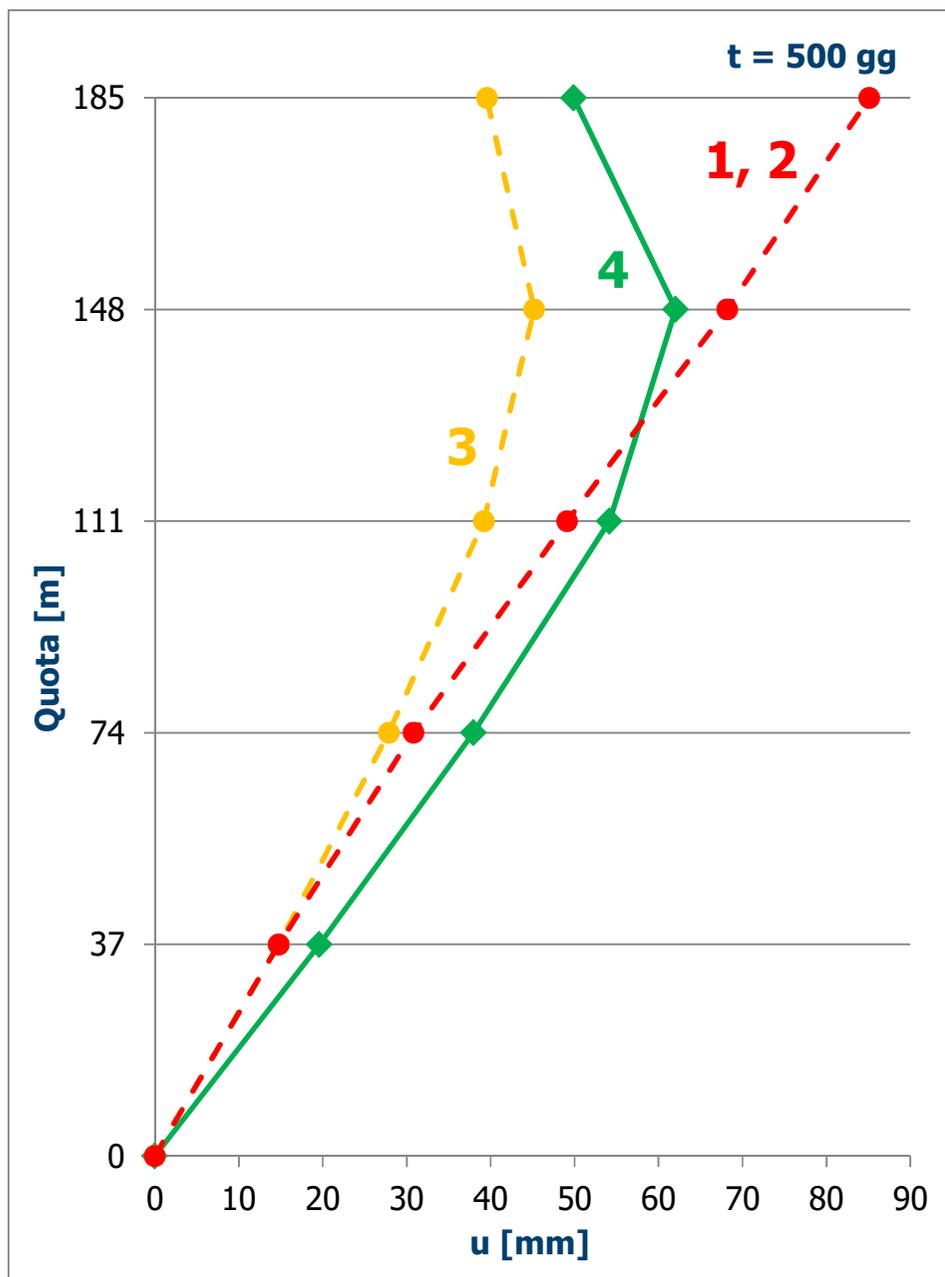
Costruzione **con compensazione** degli abbassamenti





Torre Allianz

Risultati ottenuti con diversi tipi di analisi



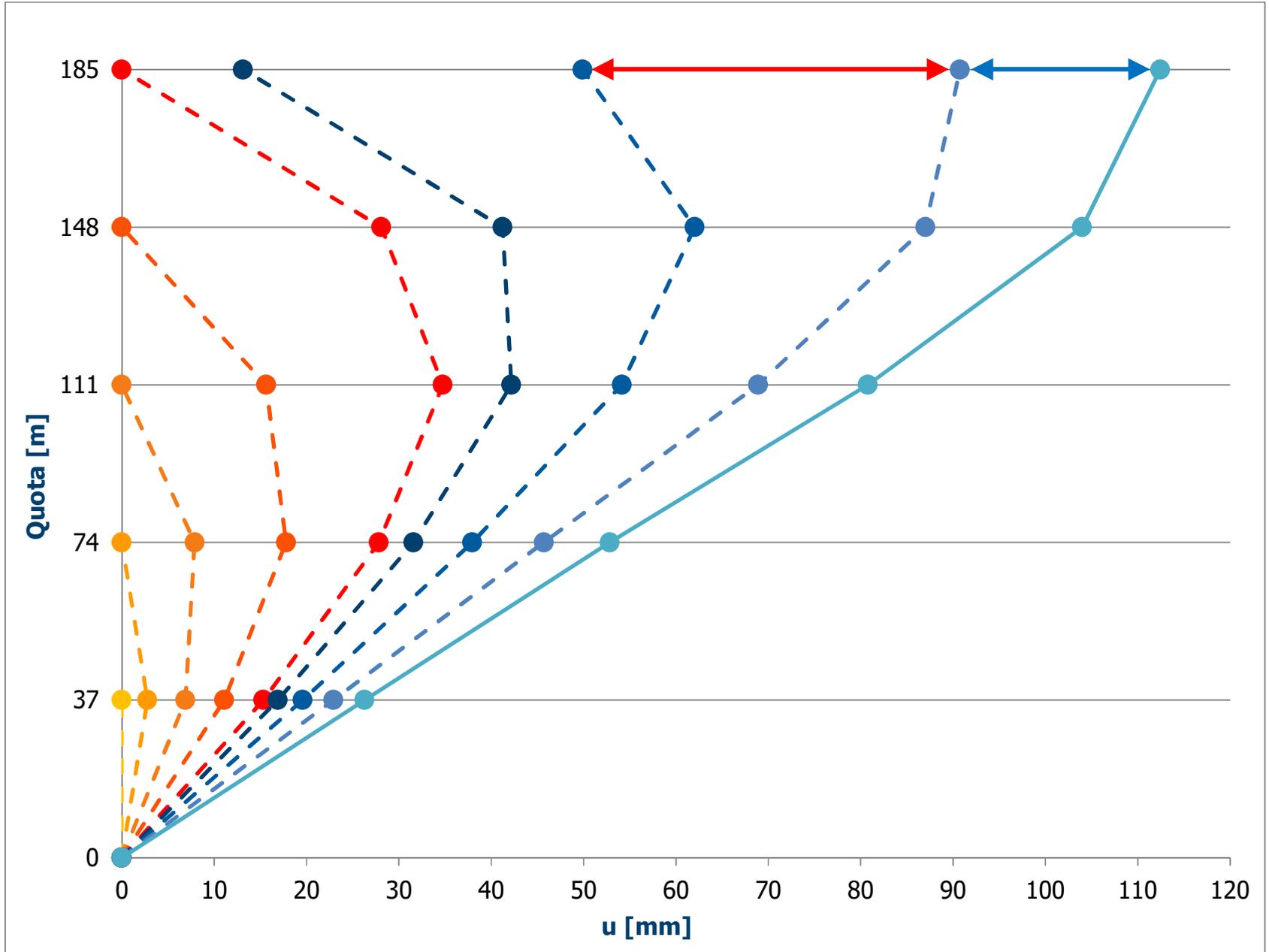
Analisi	1	2	3	4
Elastica	Red	Red	Yellow	Grey
Visco - elastica	Grey	Grey	Grey	Green
Convenzionale	Red	Grey	Grey	Grey
Per fasi	Grey	Red	Yellow	Green
Senza comp.	Red	Red	Grey	Grey
Con comp.	Grey	Grey	Yellow	Green



Torre Allianz

Analisi visco-elastica per fasi con compensazione

t = 30000 giorni





Torre Allianz

Effetto dell'armatura metallica

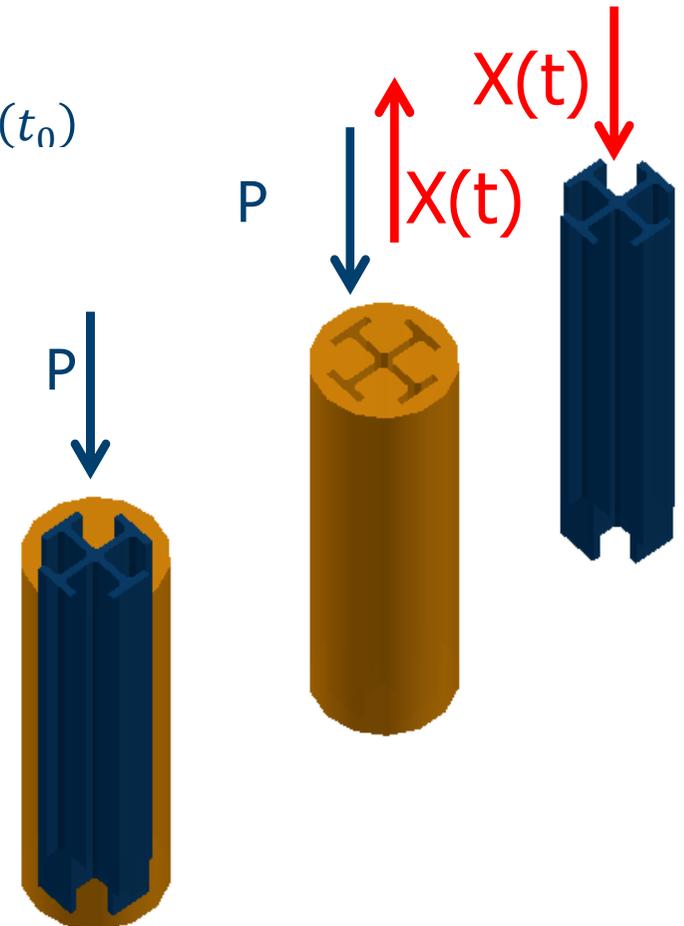


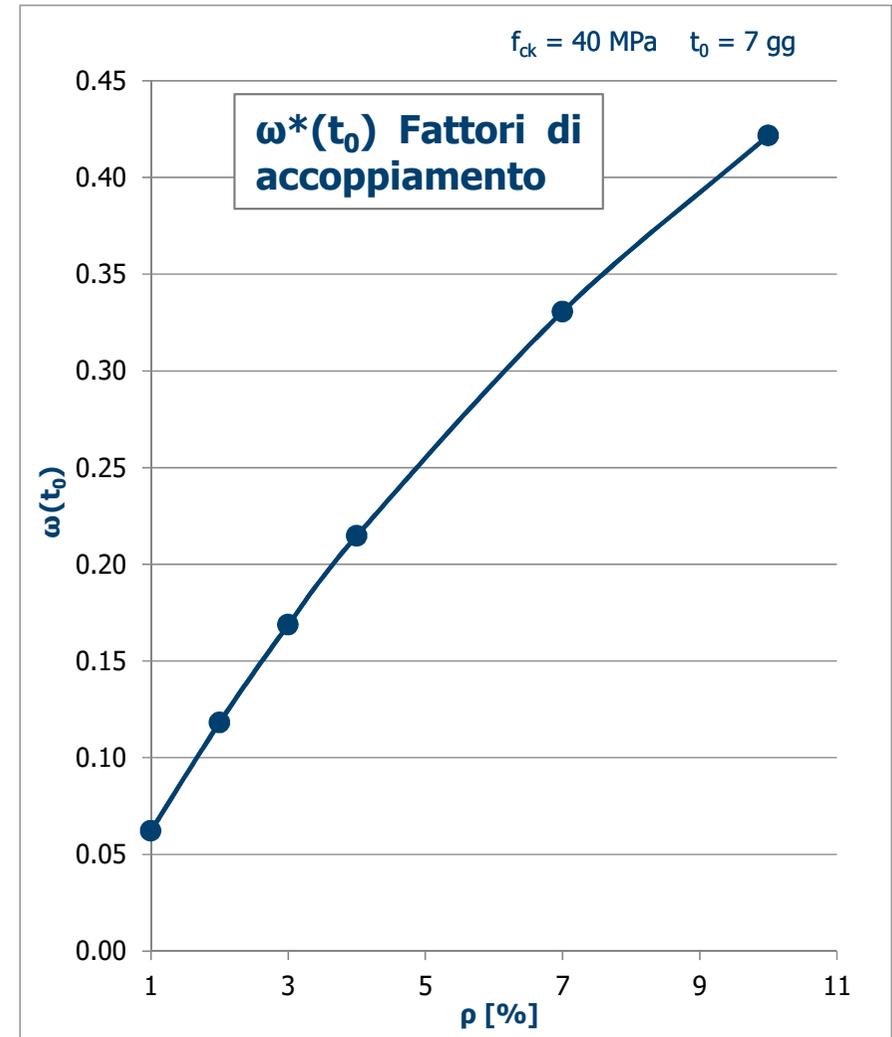
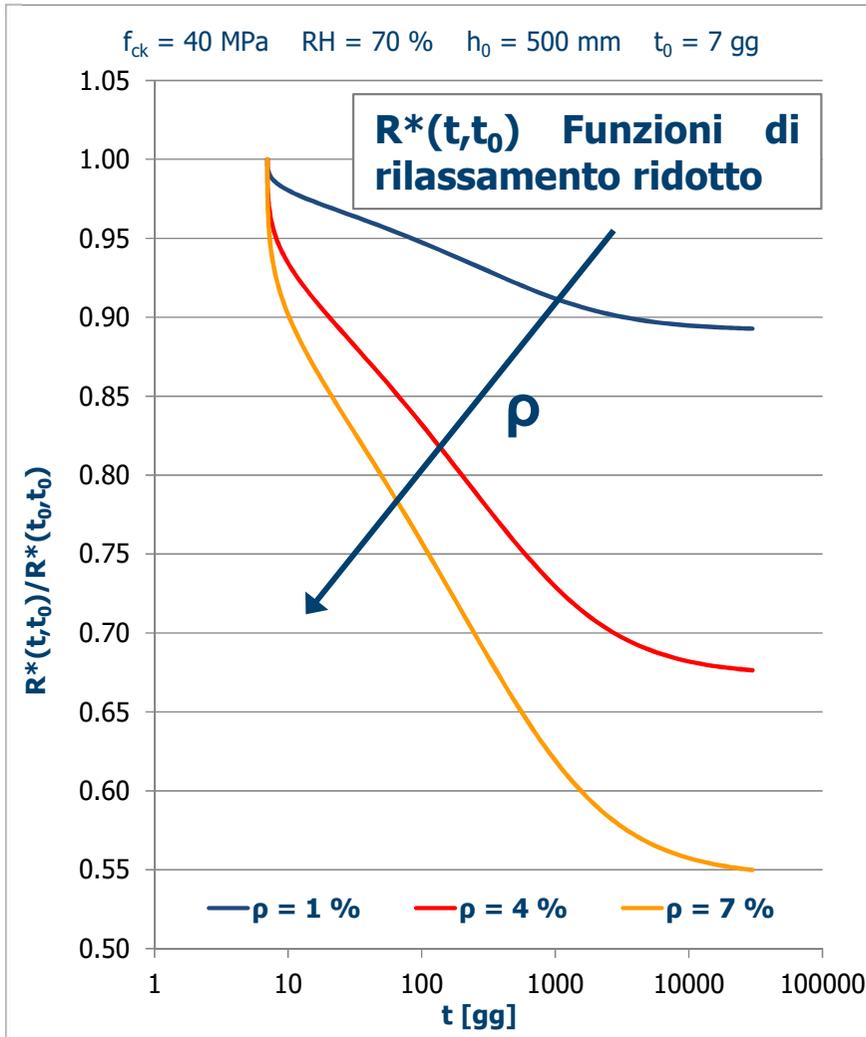
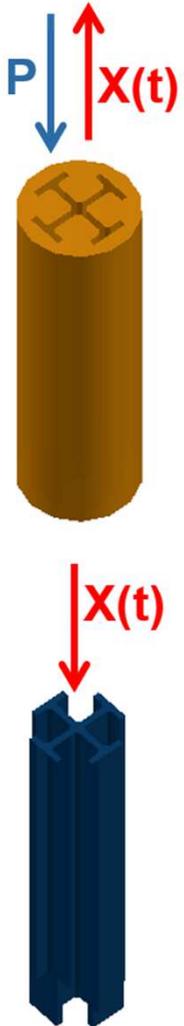
$$\left[\delta_{11}^{(c)}(t_0) \cdot E_c(t_0) \cdot J(t, t_0) + \delta_{11}^{(s)} \right] + \int_{t_0}^t \left[\delta_{11}^{(c)}(t_0) \cdot E_c(t_0) \cdot J(t, t') + \delta_{11}^{(s)} \right] \cdot dX(t') = \\ = \delta_0(t_0) \cdot E_c(t_0) \cdot J(t, t_0) = 0$$

$$E_c(t_0) \cdot J^*(t, t') = \omega(t_0) \cdot E_c(t_0) \cdot J(t, t') + 1 - \omega(t_0)$$

$$\omega(t_0) = \frac{\delta_{11}^{(c)}(t_0)}{\delta_{11}^{(c)}(t_0) + \delta_{11}^{(s)}}$$

$$X(t) = X_{er}(t_0) \cdot \left[1 - R^*(t, t_0) \cdot \frac{1 - \omega(t_0)}{E_c(t_0)} \right]$$



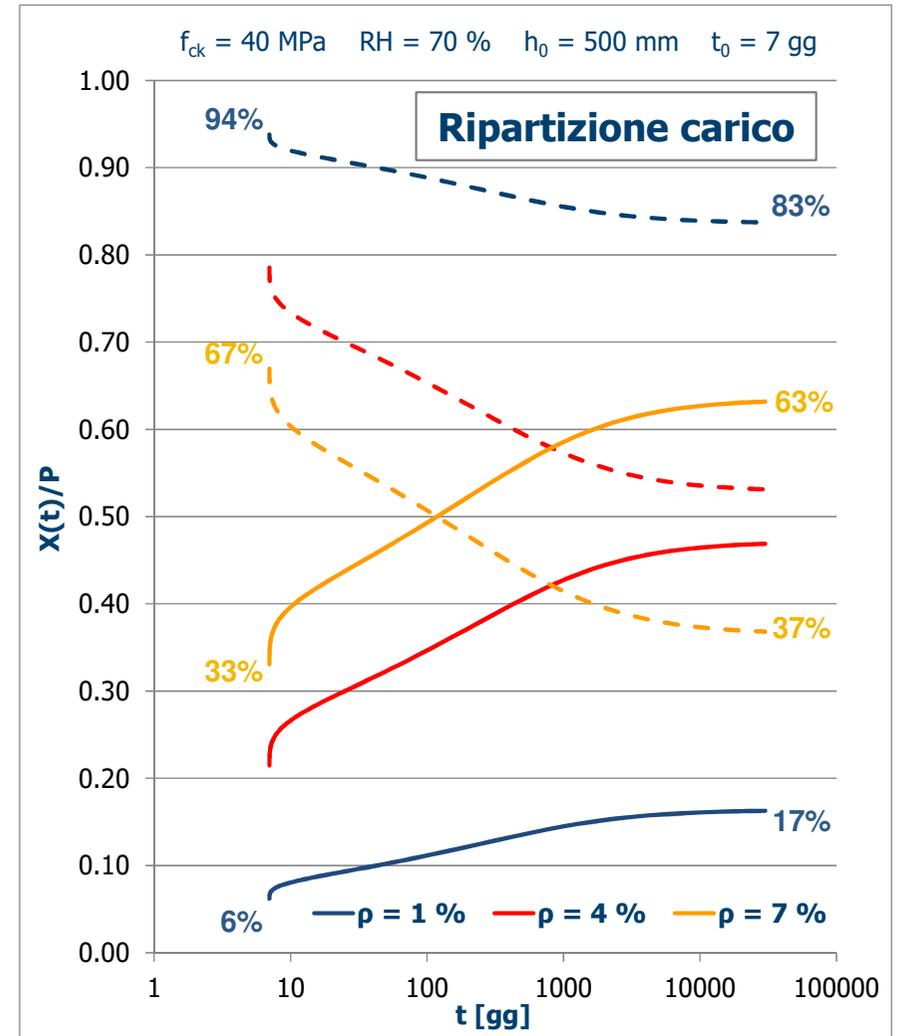
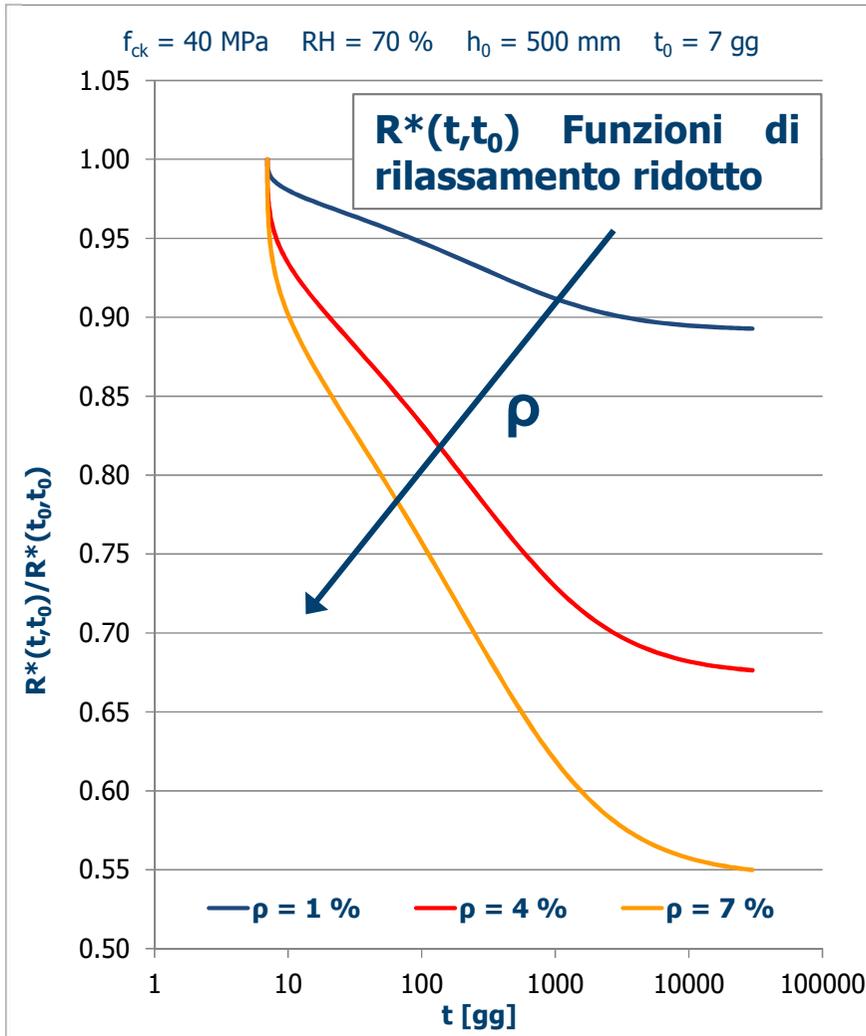
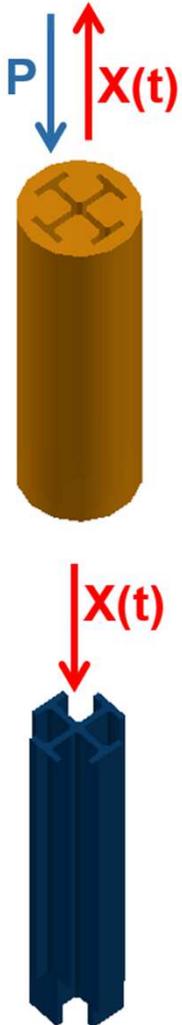


$$X(t) = X_{er}(t_0) \cdot \left[1 - R^*(t, t_0) \cdot \frac{1 - \omega(t_0)}{E_c(t_0)} \right]$$



Torre Allianz

Ripartizione della sollecitazione fra acciaio e calcestruzzo

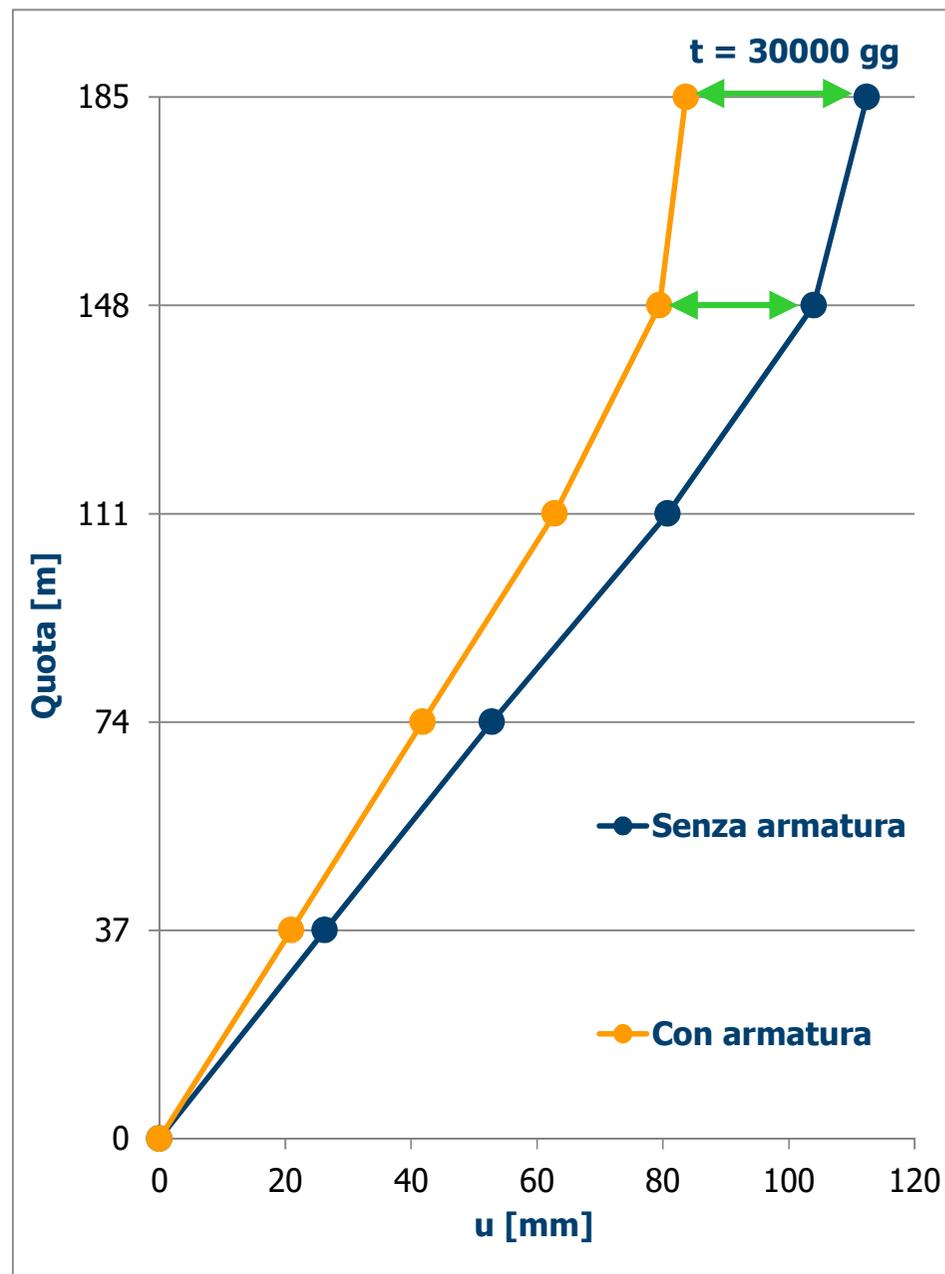
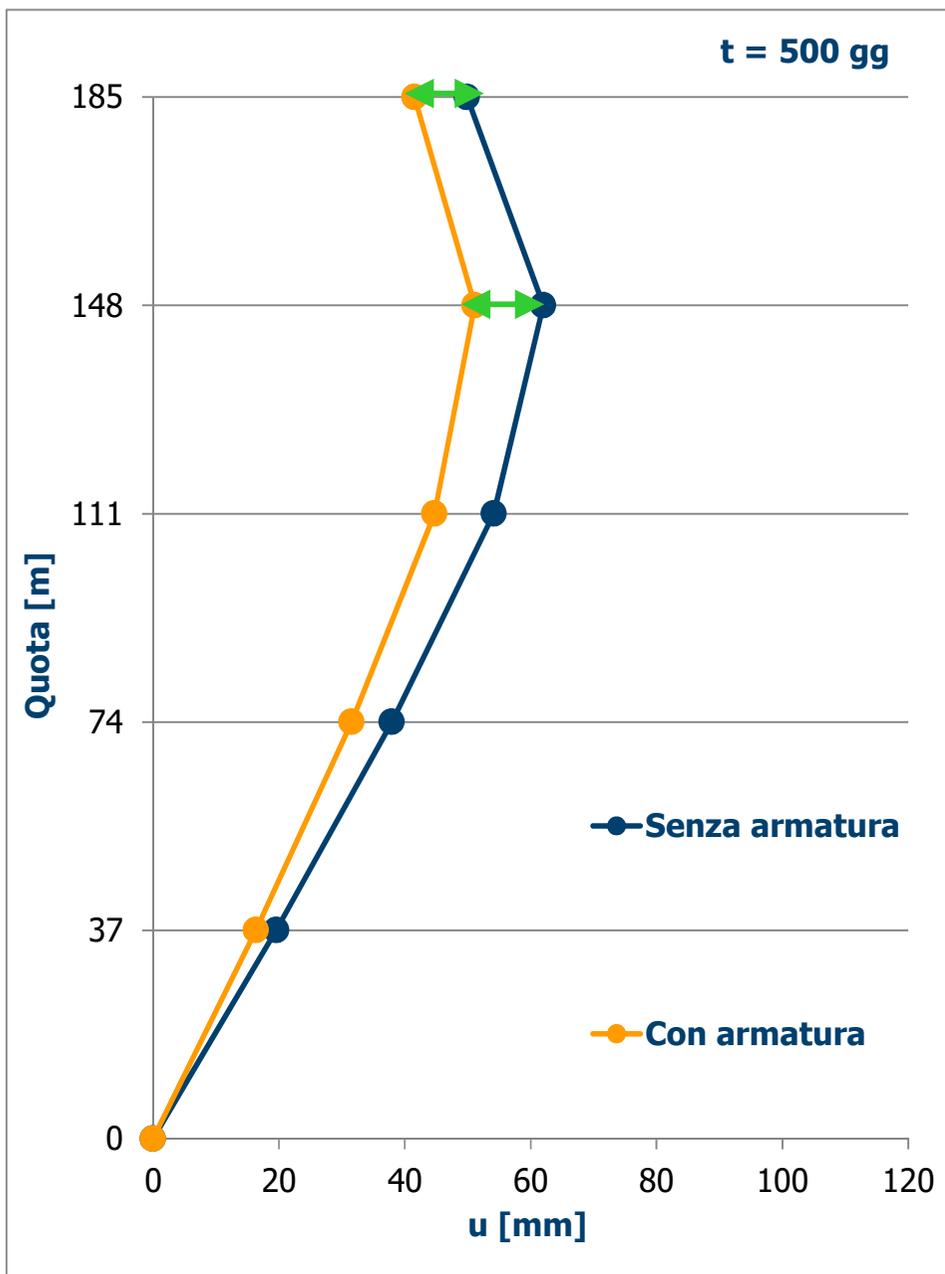


$$X(t) = X_{er}(t_0) \cdot \left[1 - R^*(t, t_0) \cdot \frac{1 - \omega(t_0)}{E_c(t_0)} \right]$$



Torre Allianz

Accorciamento della colonna





Analisi visco - elastiche per fasi con compensazione degli abbassamenti, in presenza di azioni statiche e geometriche

- Colonna singola
 - Senza armatura (1)
 - Con armatura (2)
- Quinta di facciata
 - Senza travi di cintura (3)
 - B.T. in acciaio (4)
 - B.T. in calcestruzzo (5)
- Modello Globale (6)

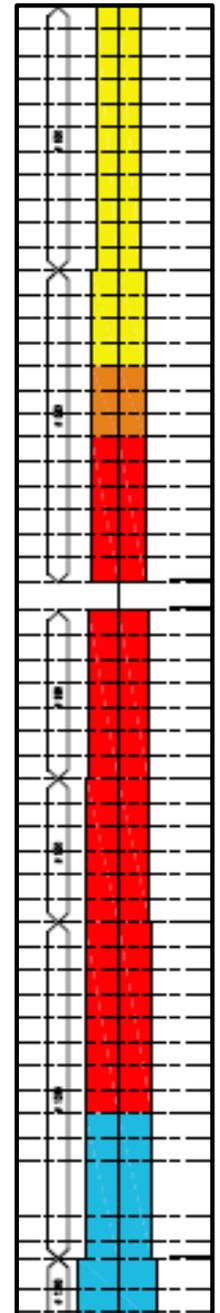
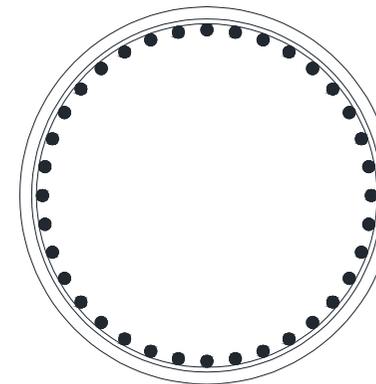
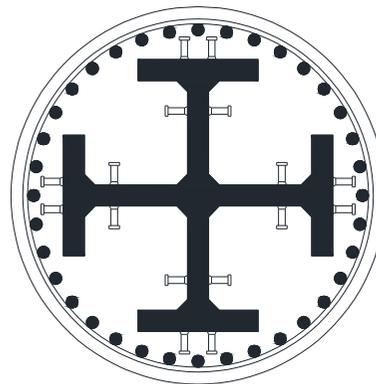
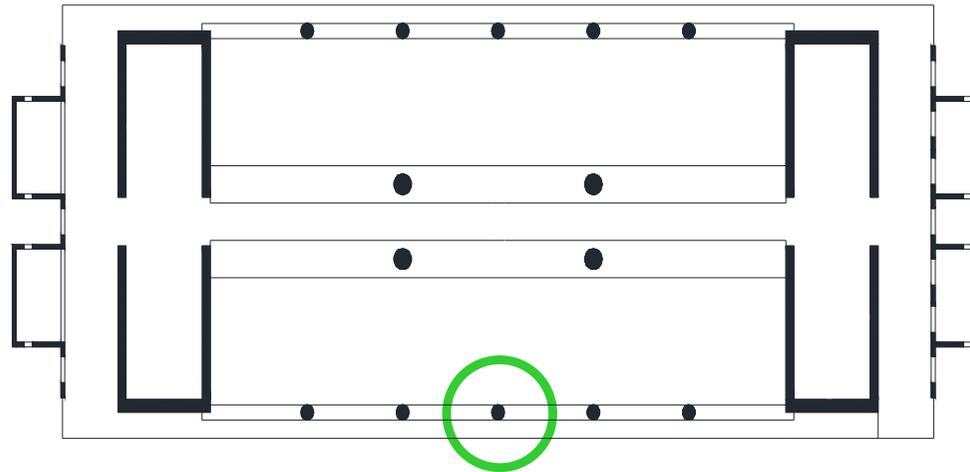


Torre Allianz

Colonna singola (1), (2)



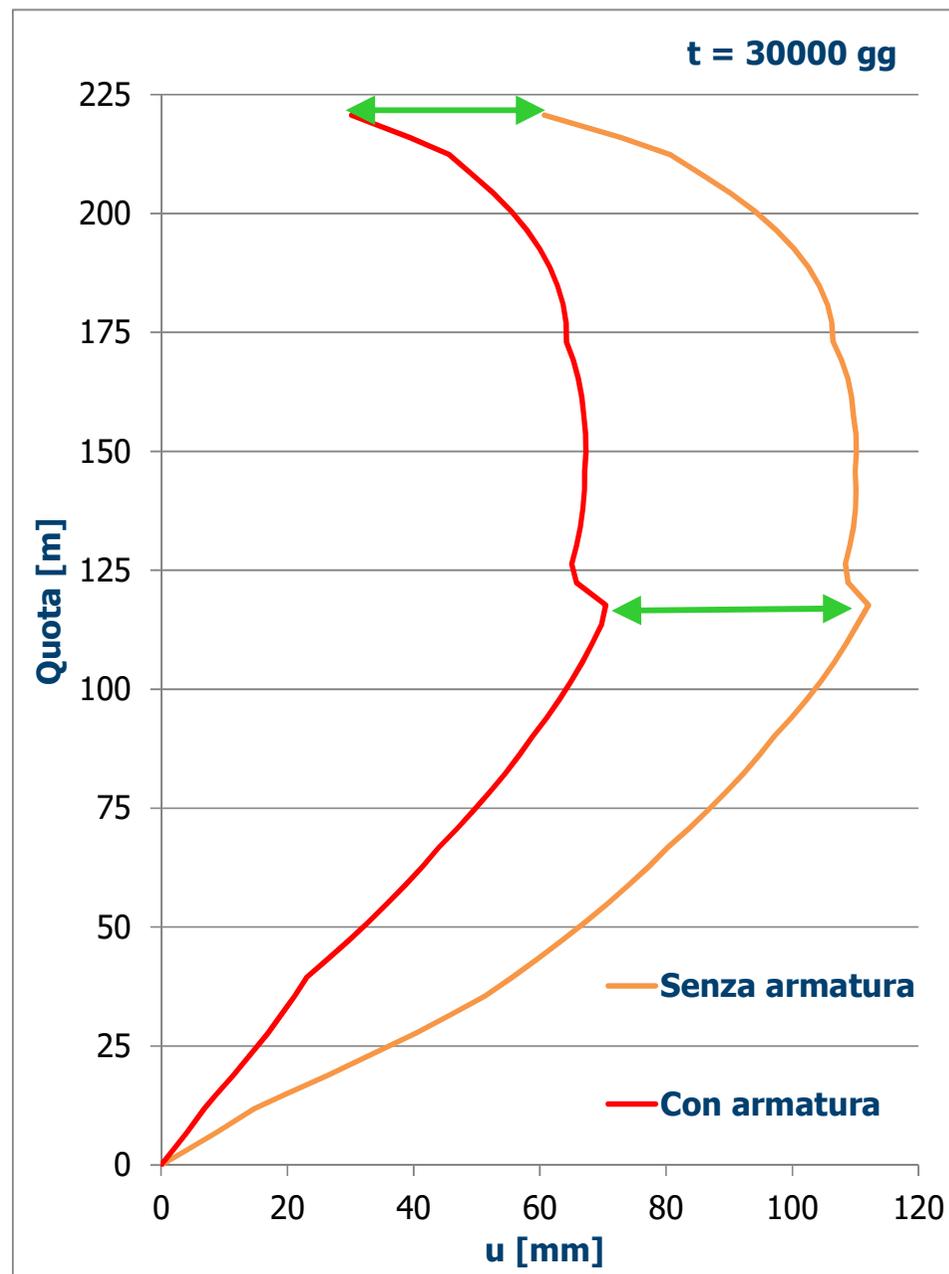
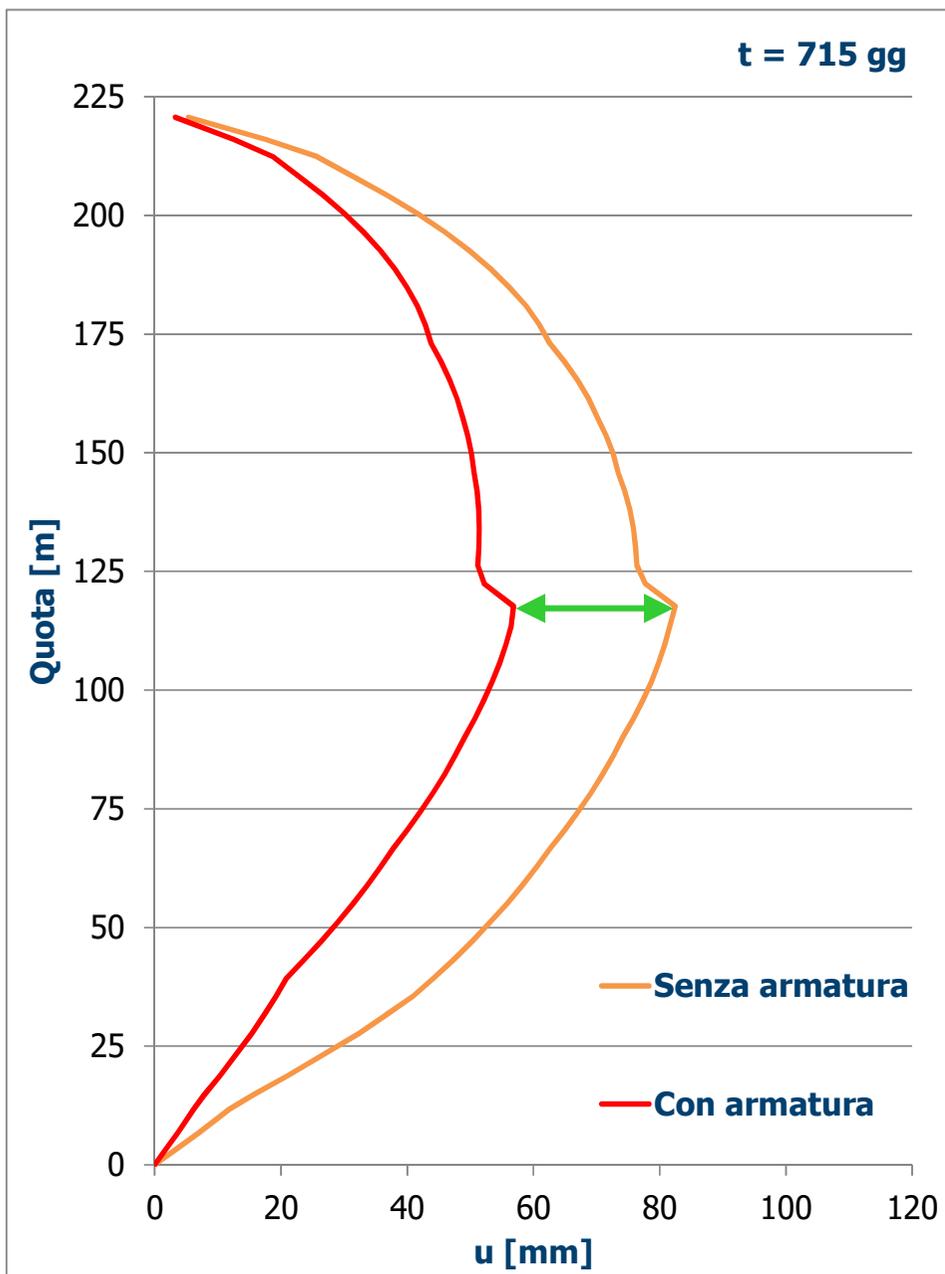
- Senza armatura
- Con armatura





Torre Allianz

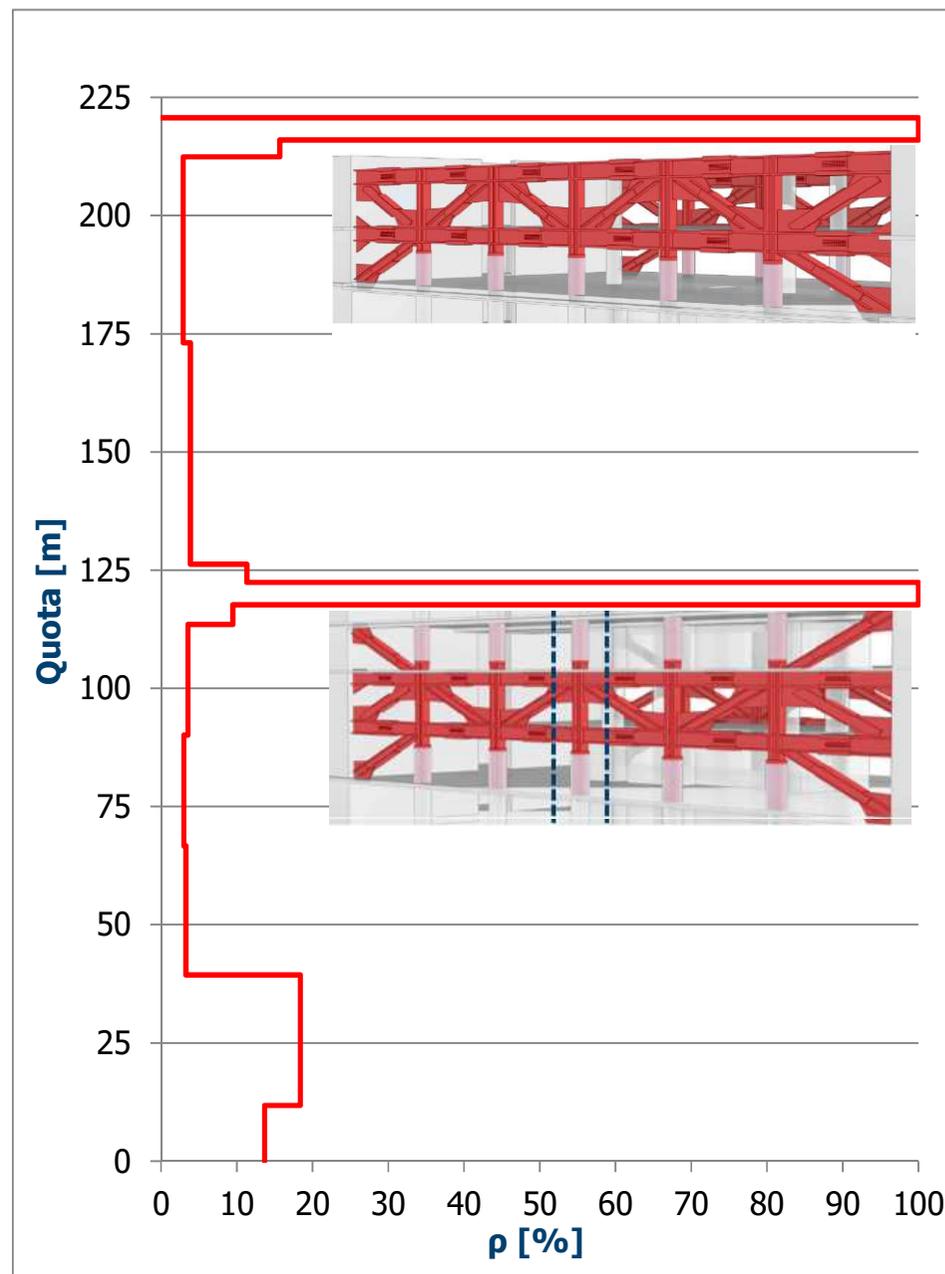
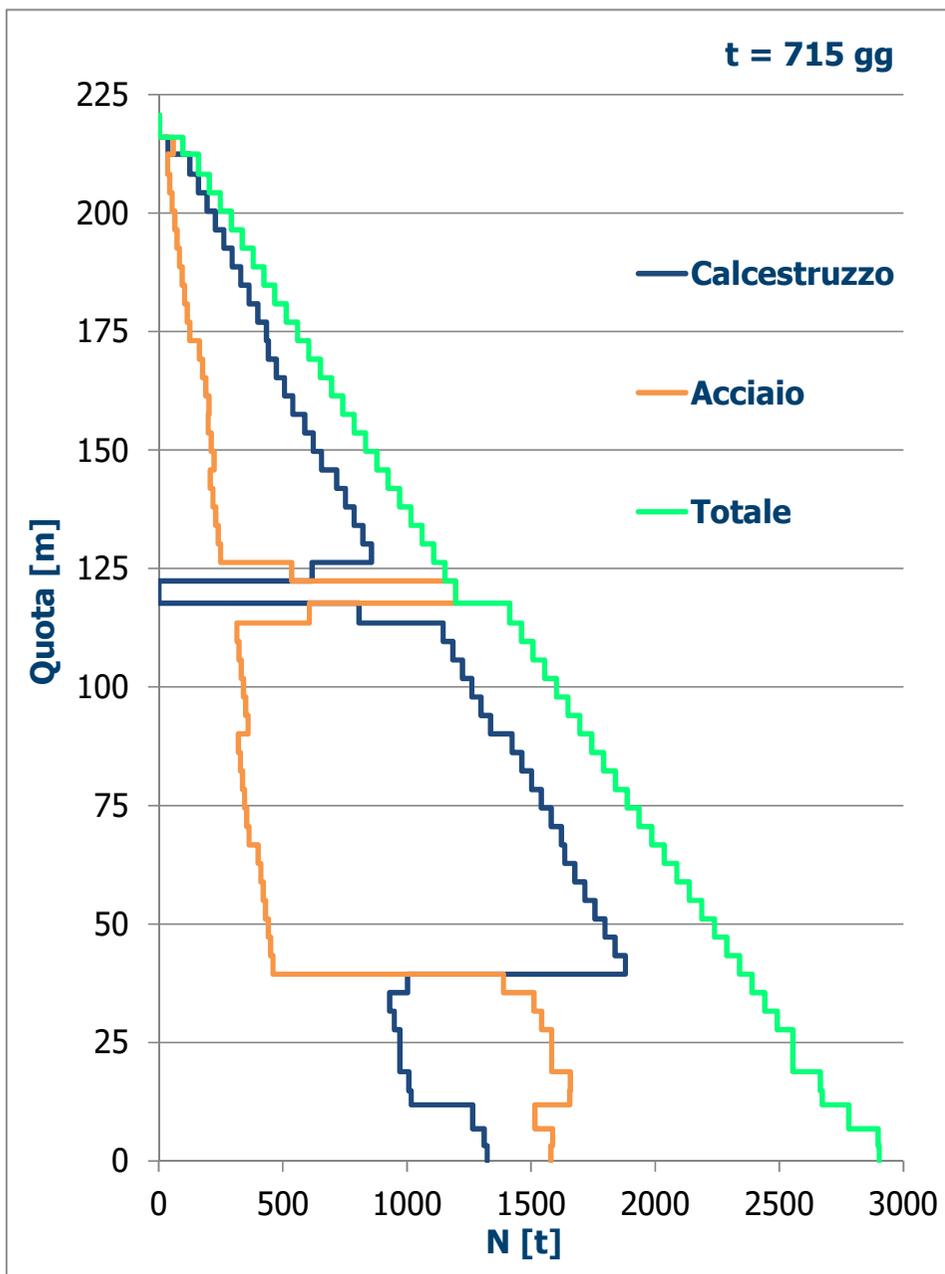
Accorciamento colonna (1), (2)





Torre Allianz

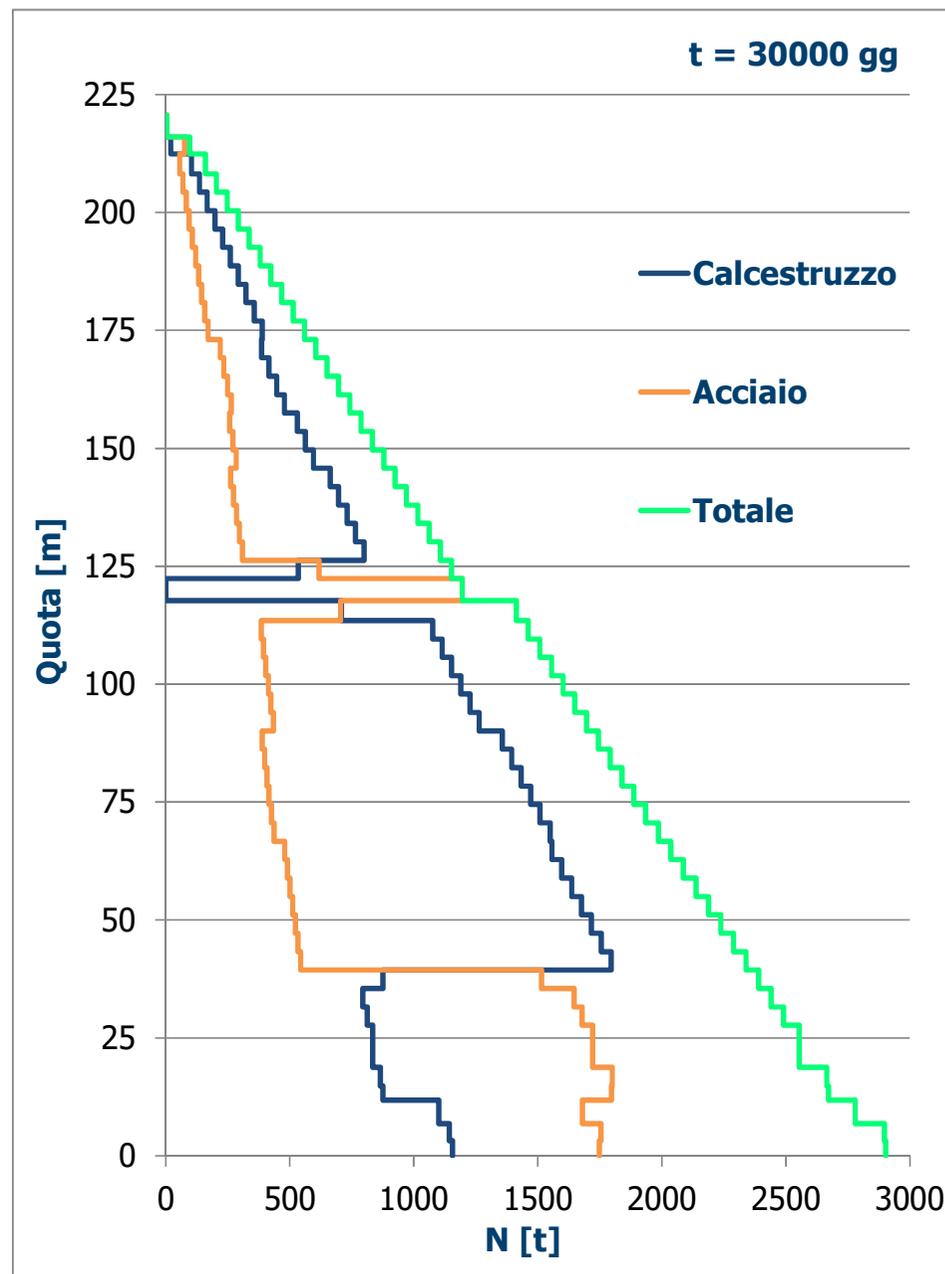
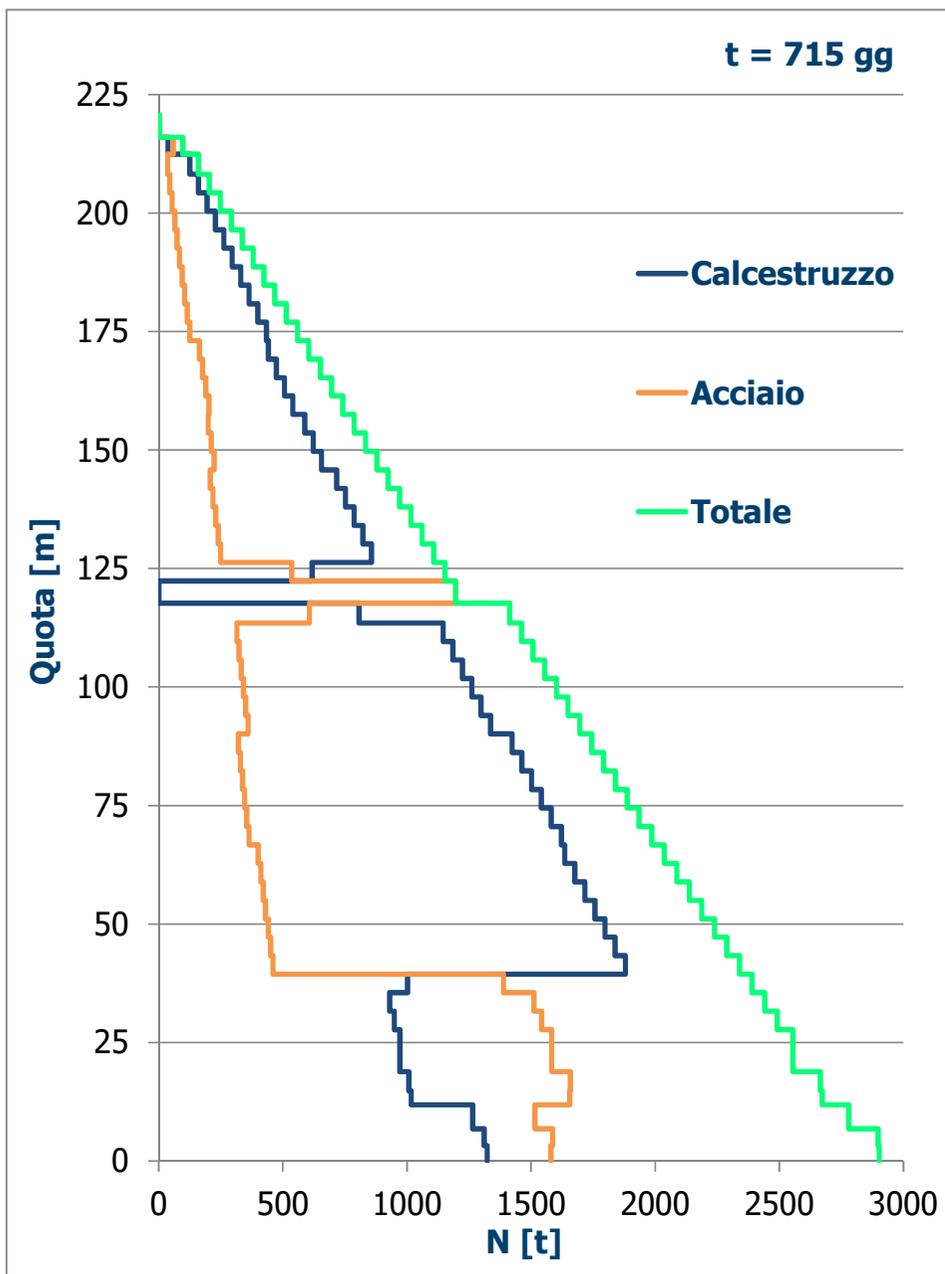
Ripartizione dei carichi (1), (2)





Torre Allianz

Ripartizione dei carichi (1), (2)



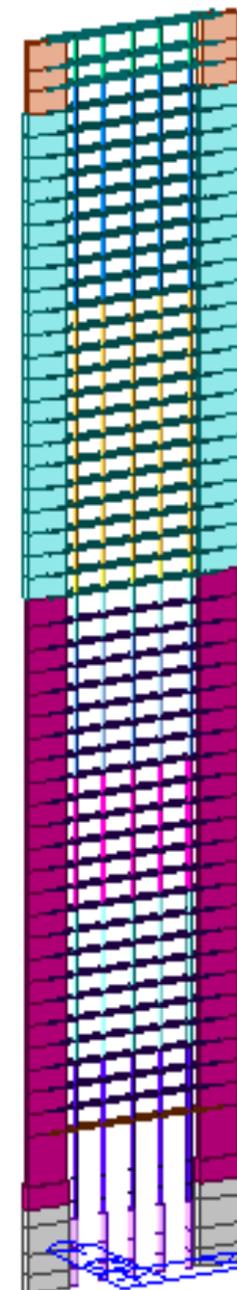
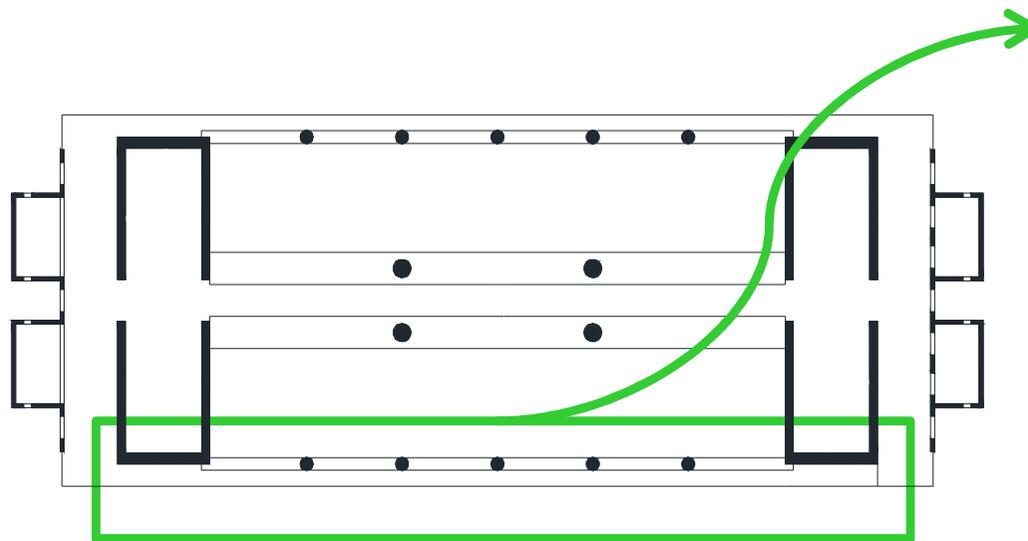


Torre Allianz

Quinta di facciata (3), (4), (5)



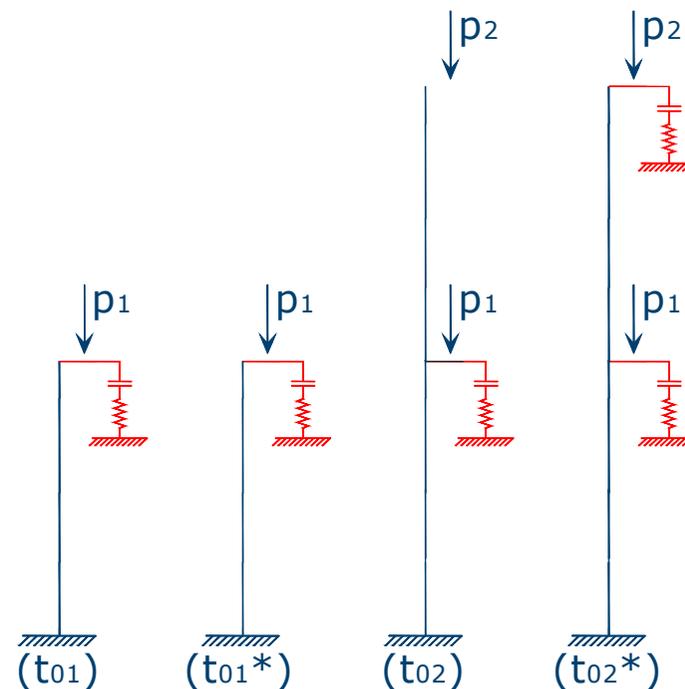
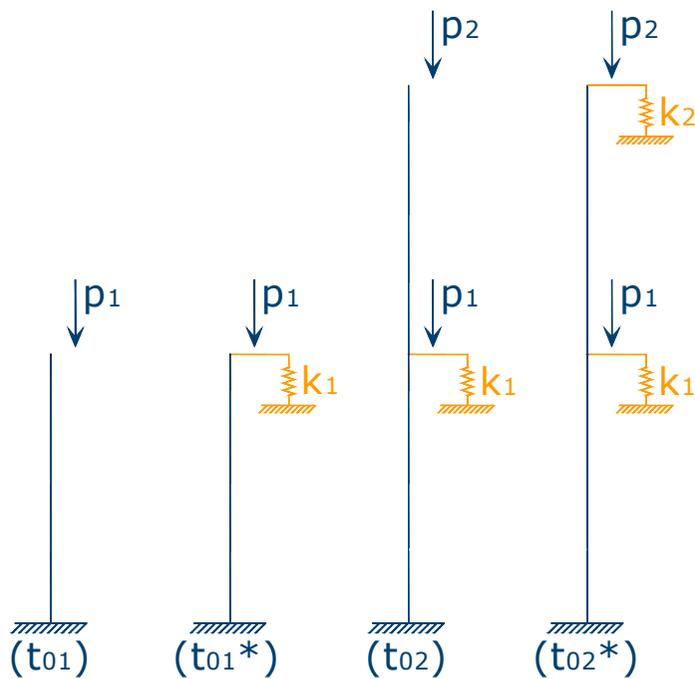
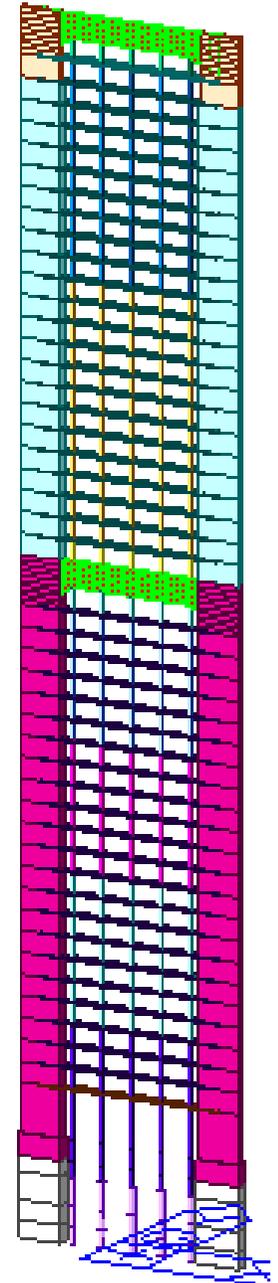
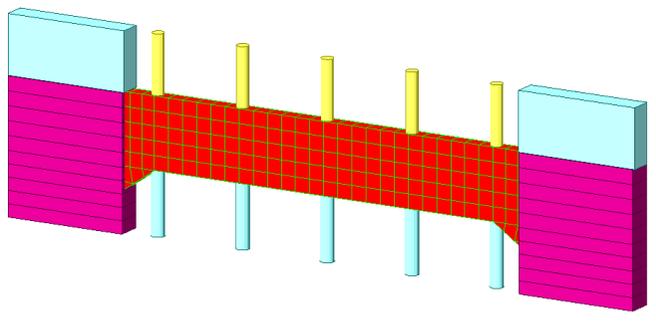
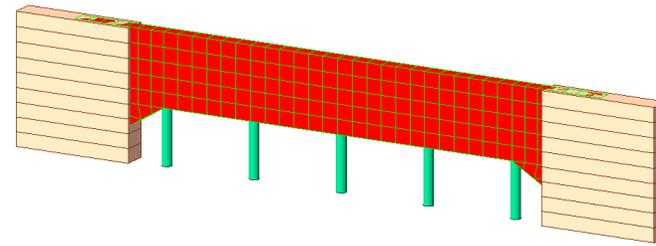
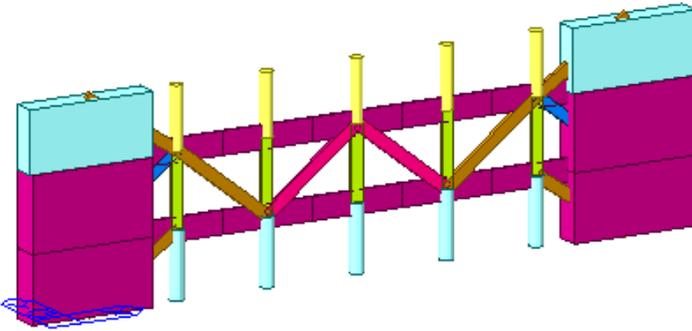
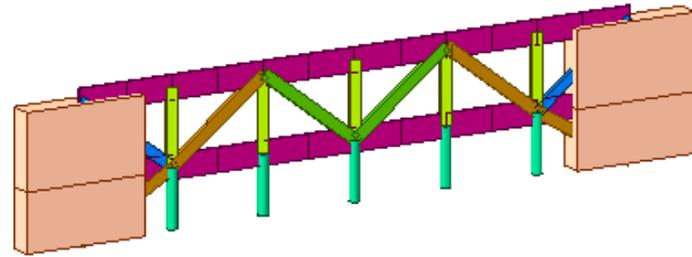
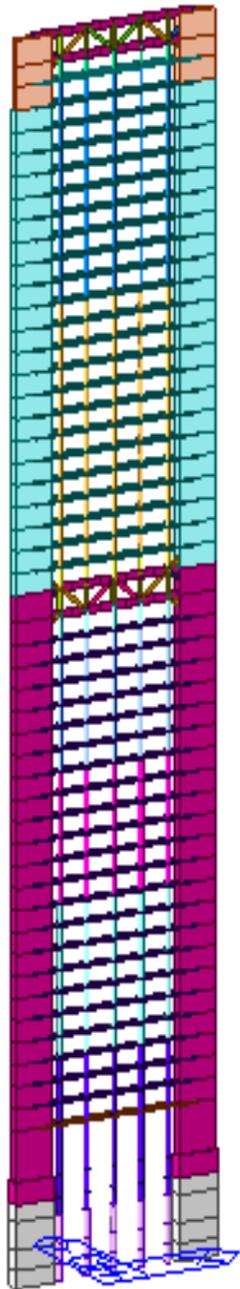
- Quinta senza travi di cintura (3)
- Quinta con B.T. in acciaio (4)
- Quinta con B.T. in calcestruzzo (5)





Torre Allianz

Quinta di facciata con travi di cintura (4), (5)

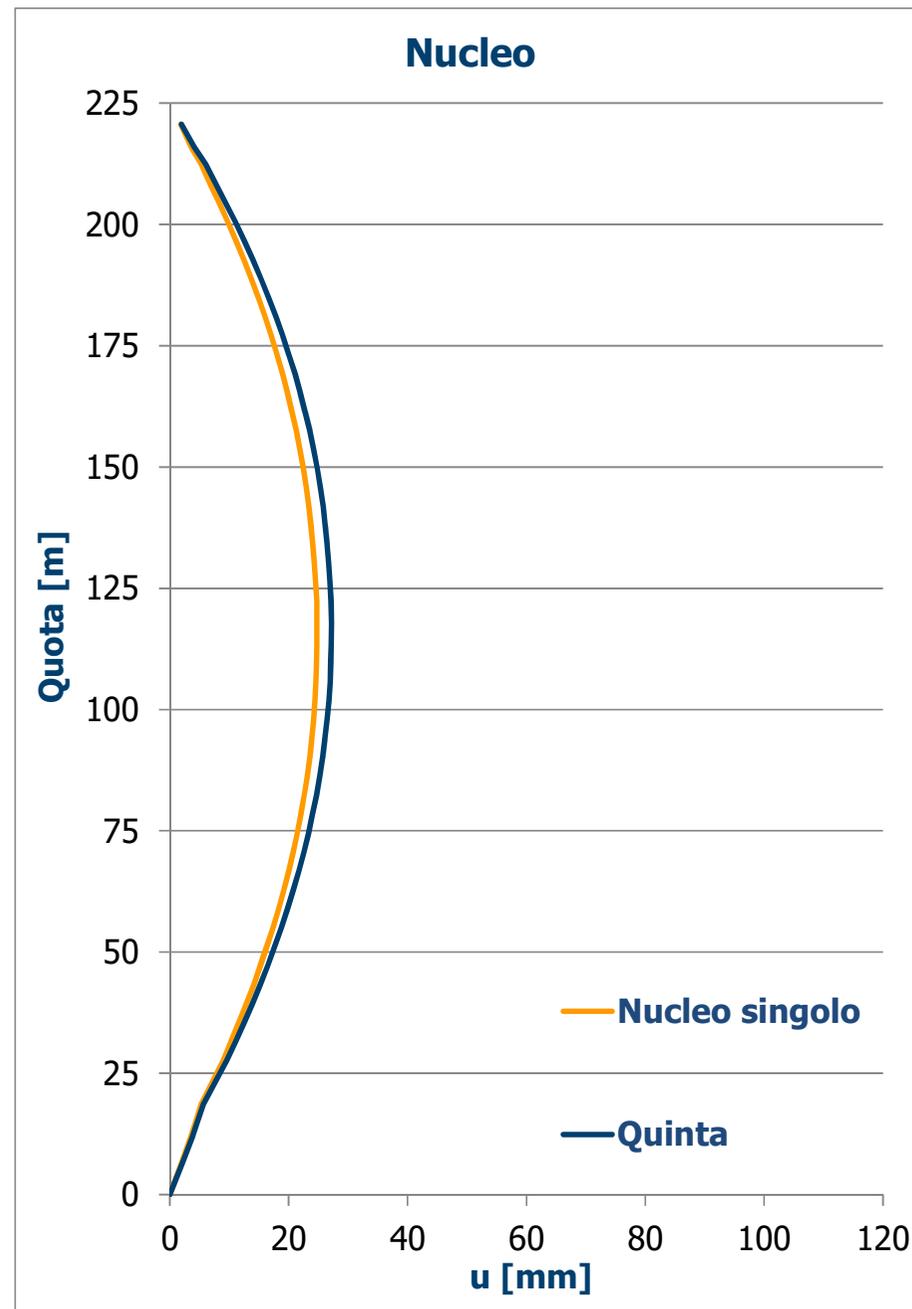
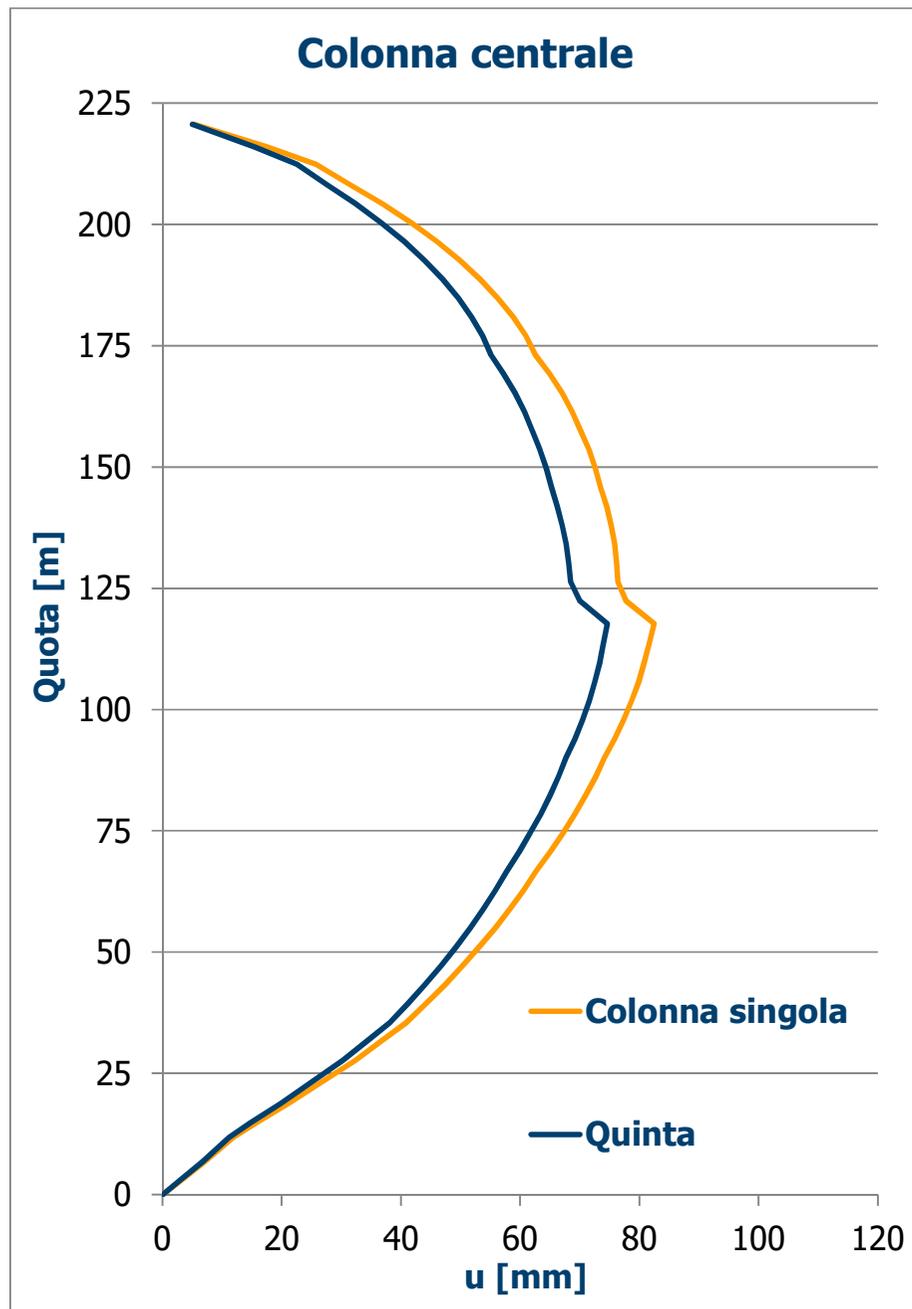




Torre Allianz

Accorciamento degli elementi verticali (1), (3)

t = 715 giorni

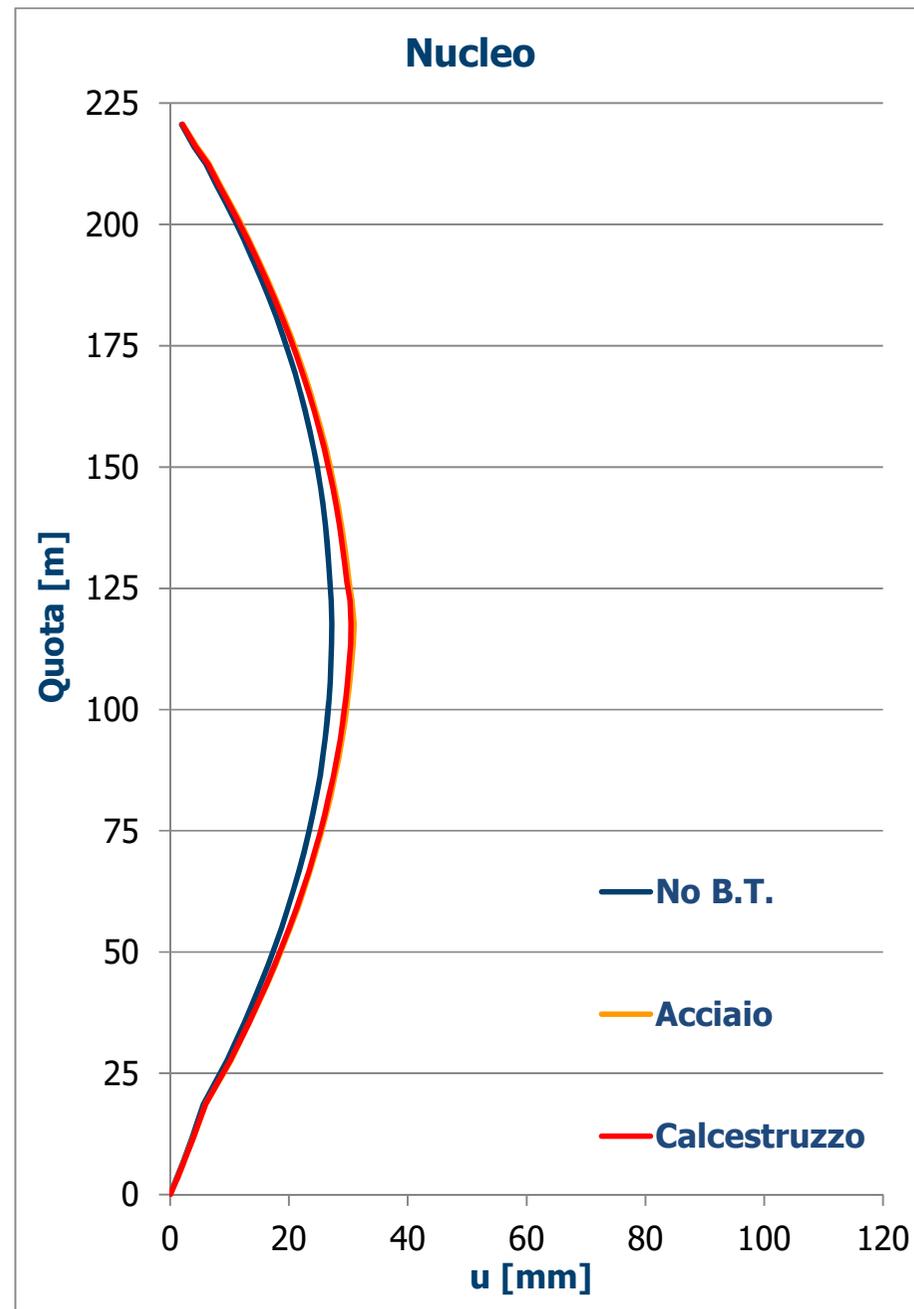
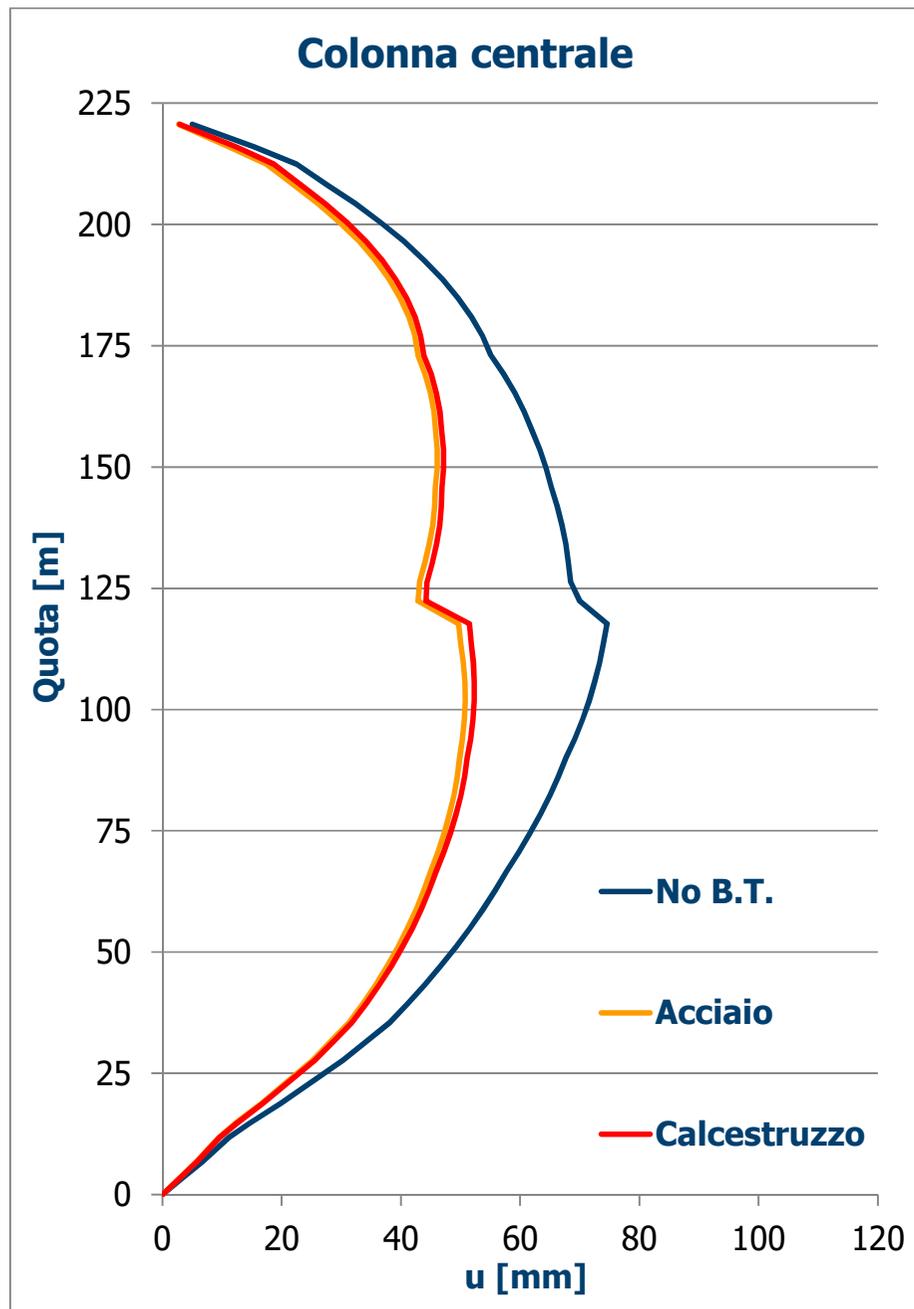




Torre Allianz

Accorciamento degli elementi verticali (3), (4), (5)

t = 715 giorni

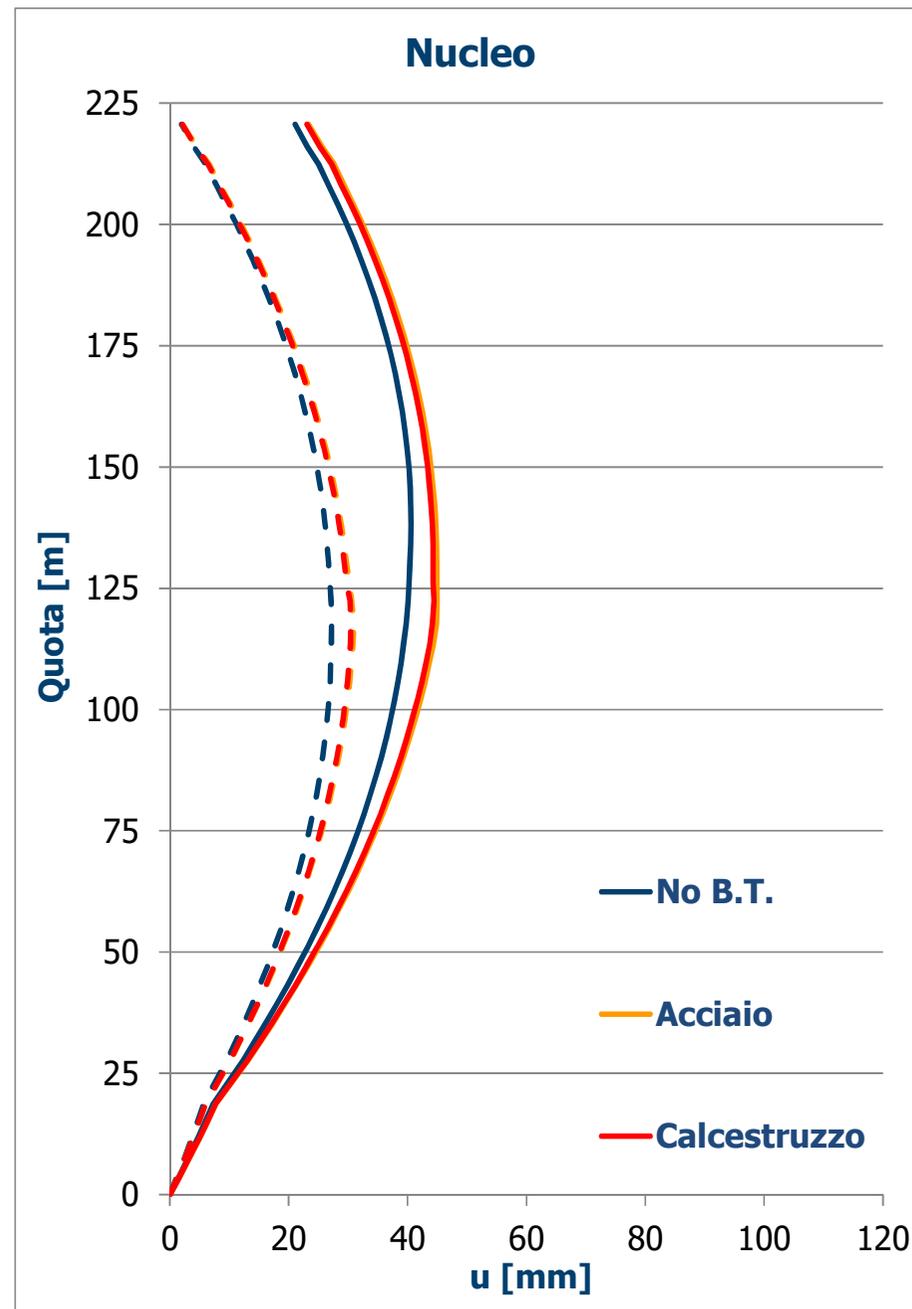
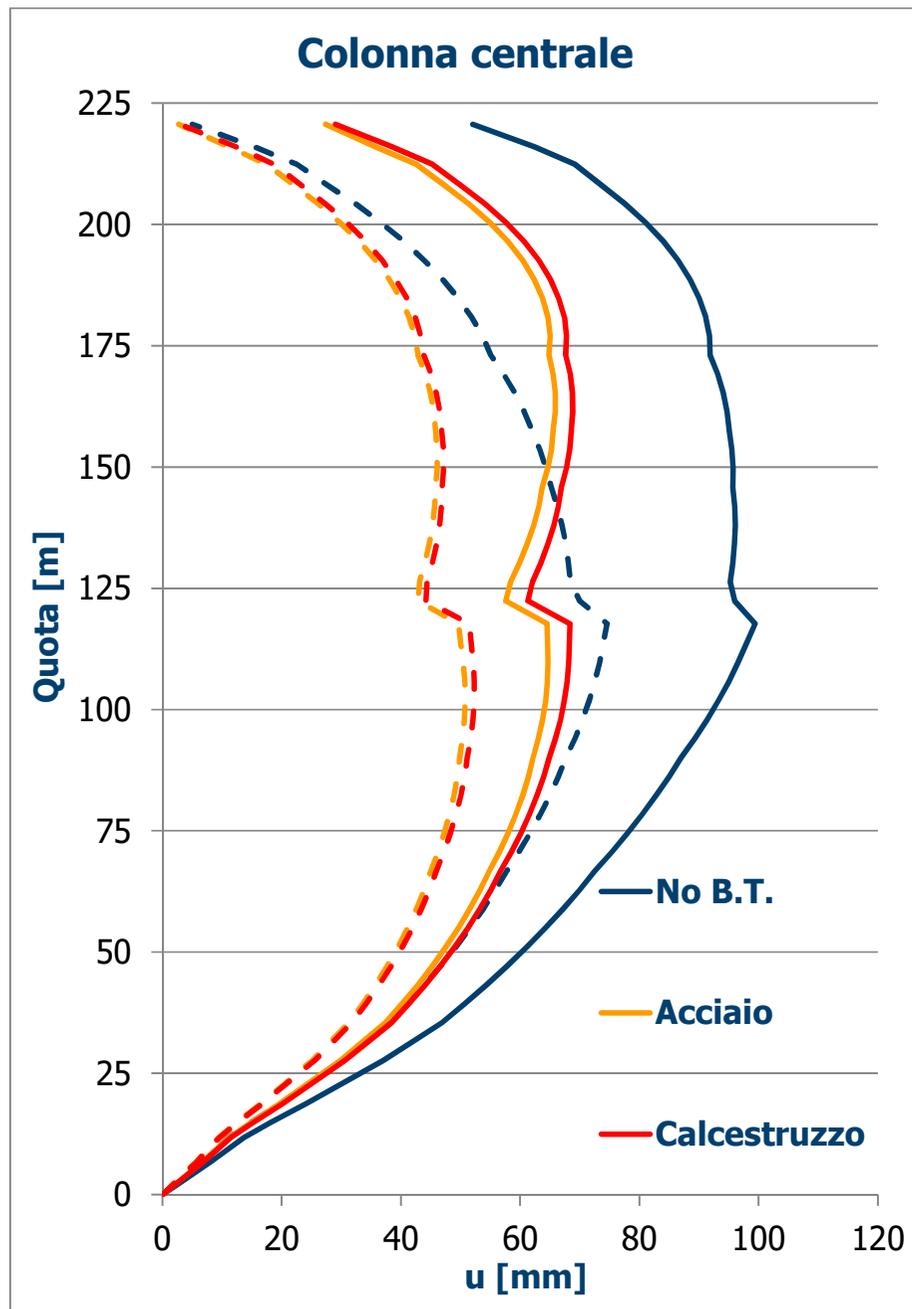




Torre Allianz

Accorciamento degli elementi verticali (3), (4), (5)

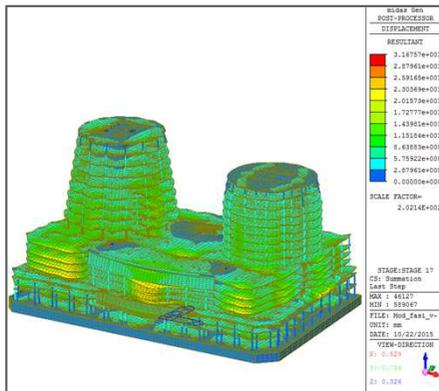
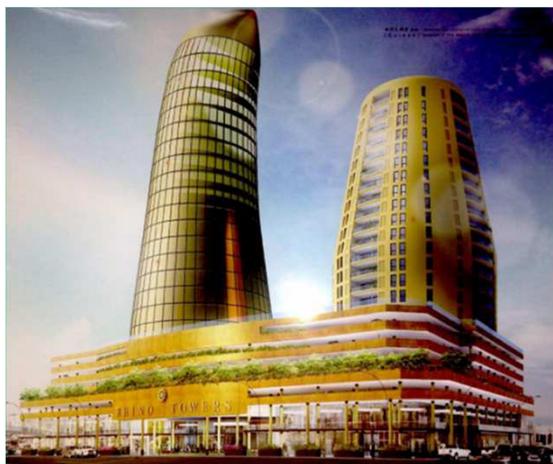
t = 30000 giorni



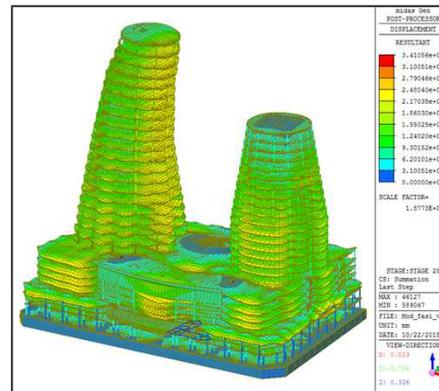


Rhino Towers

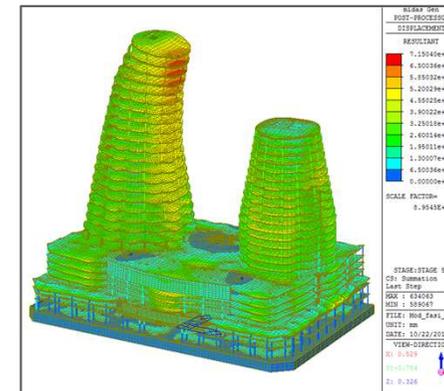
Analisi visco-elastiche per fasi con compensazione degli spostamenti



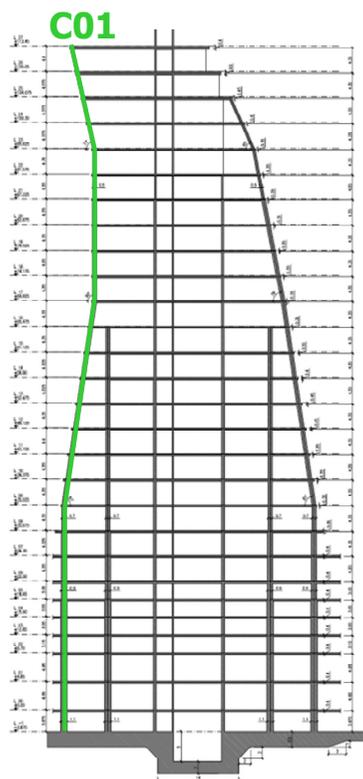
Costruzione L16



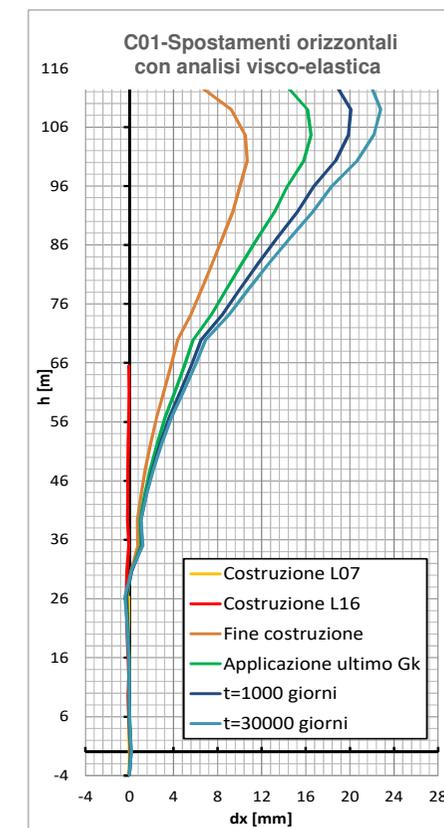
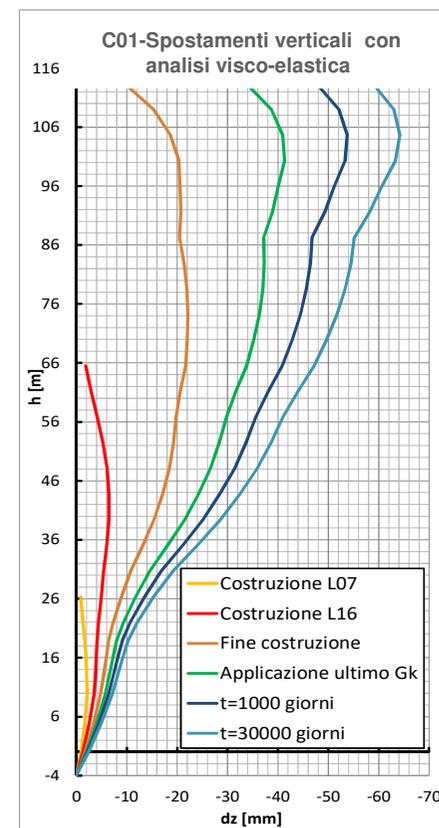
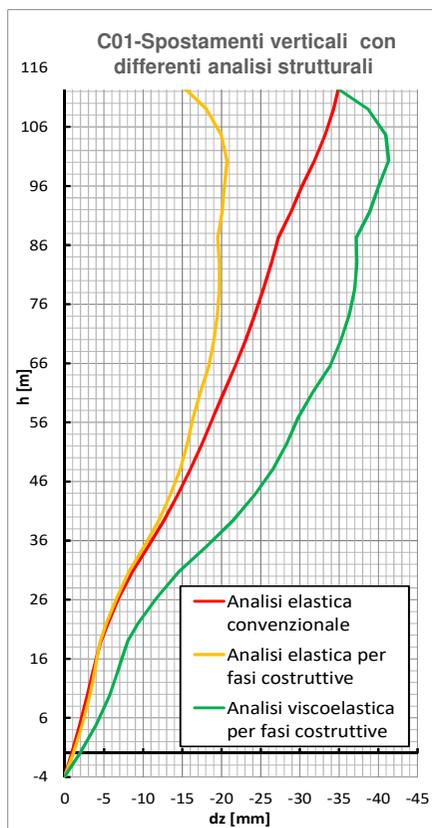
Fine costruzione



30000 giorni



Sezione della Torre Uffici

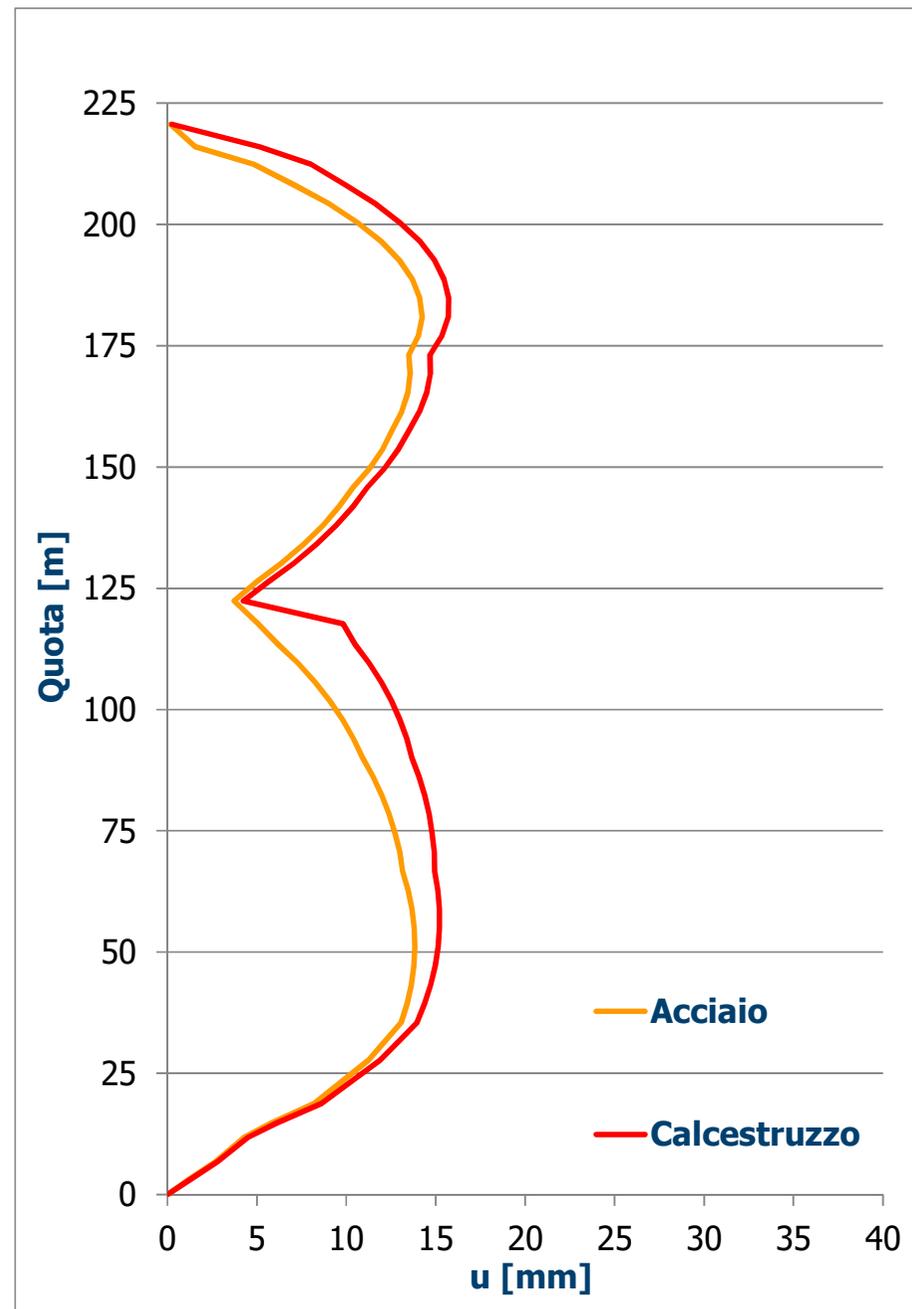
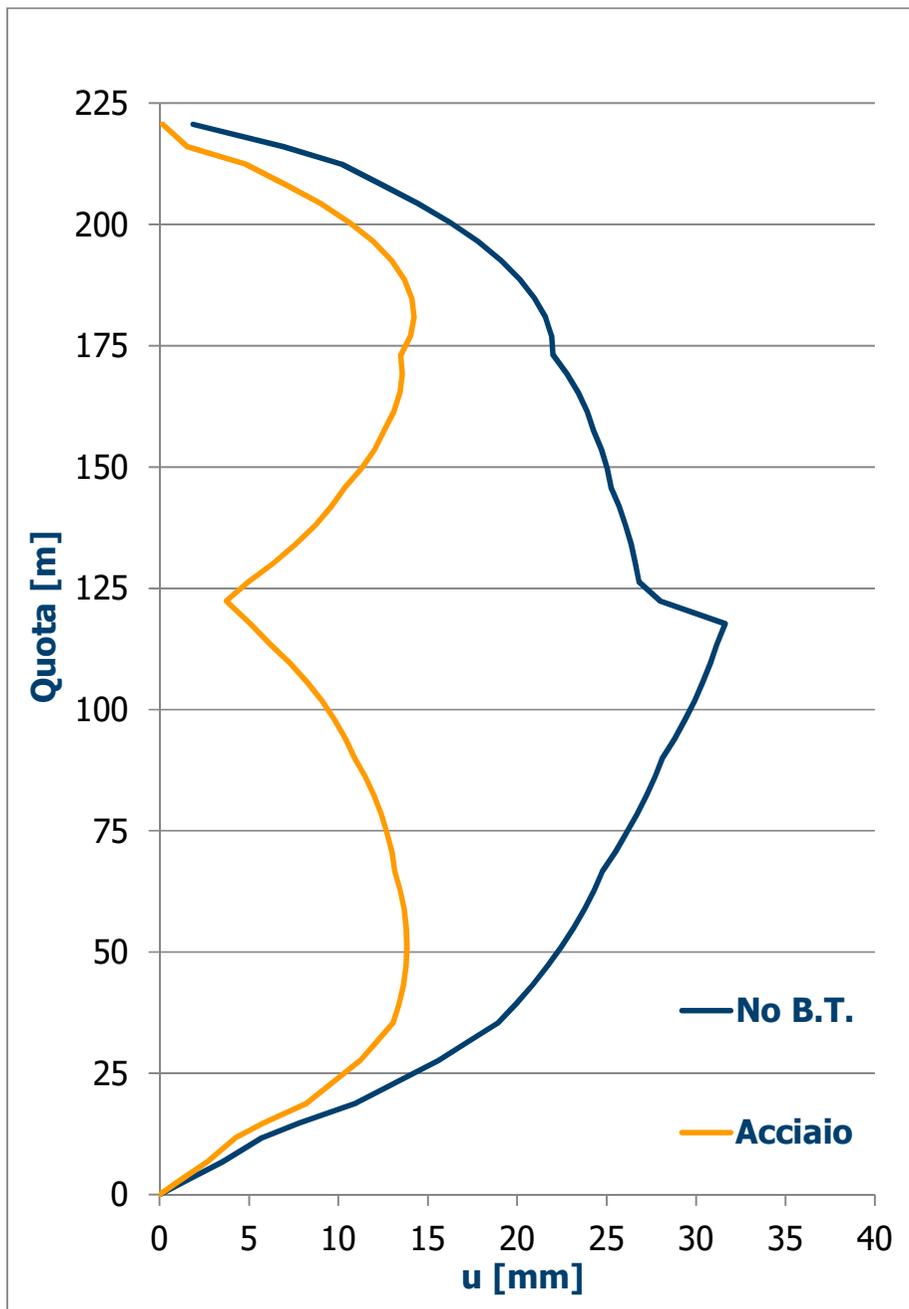




Torre Allianz

Accorciamento differenziale nucleo - colonna laterale (3), (4), (5)

t = 715 giorni

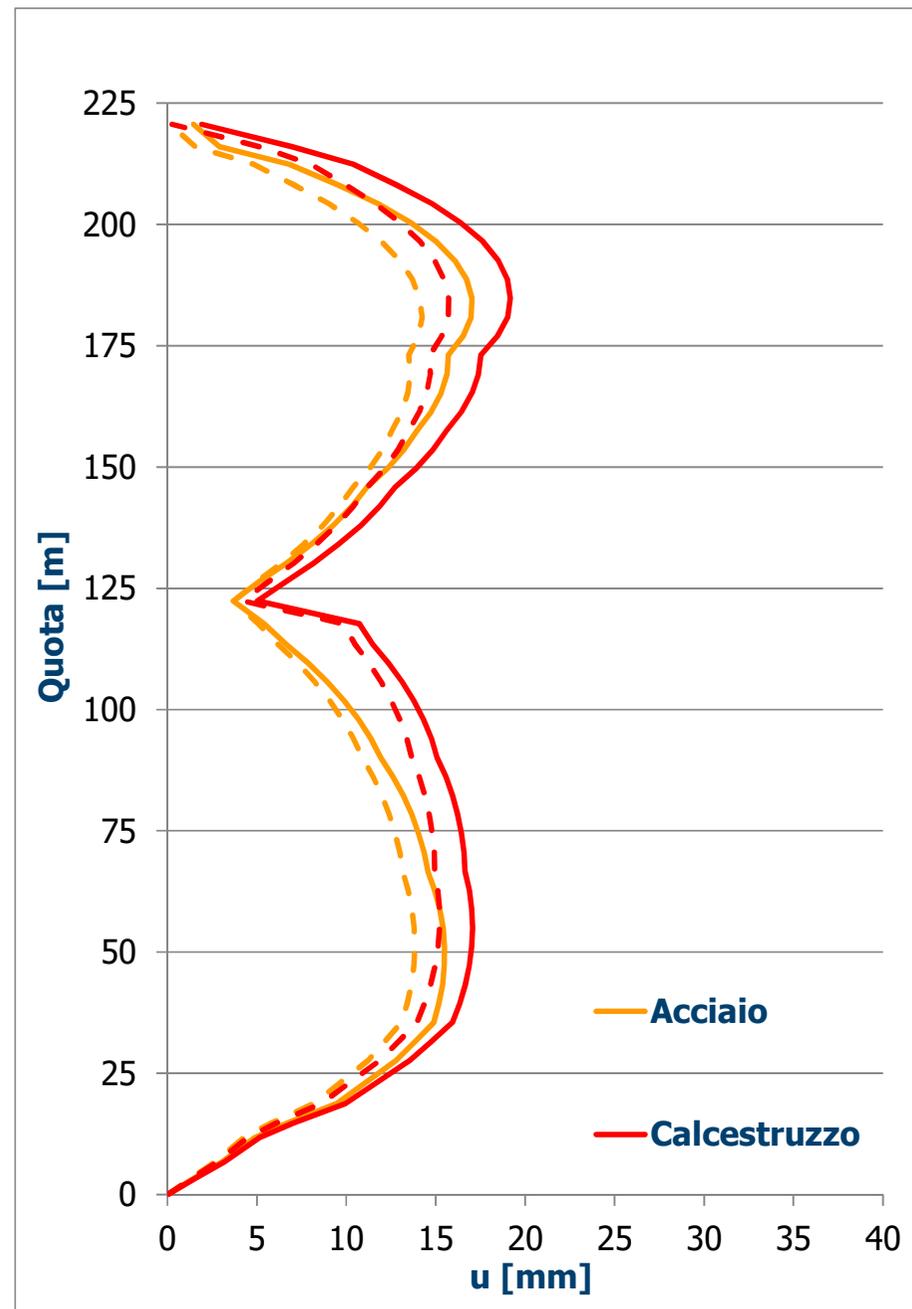
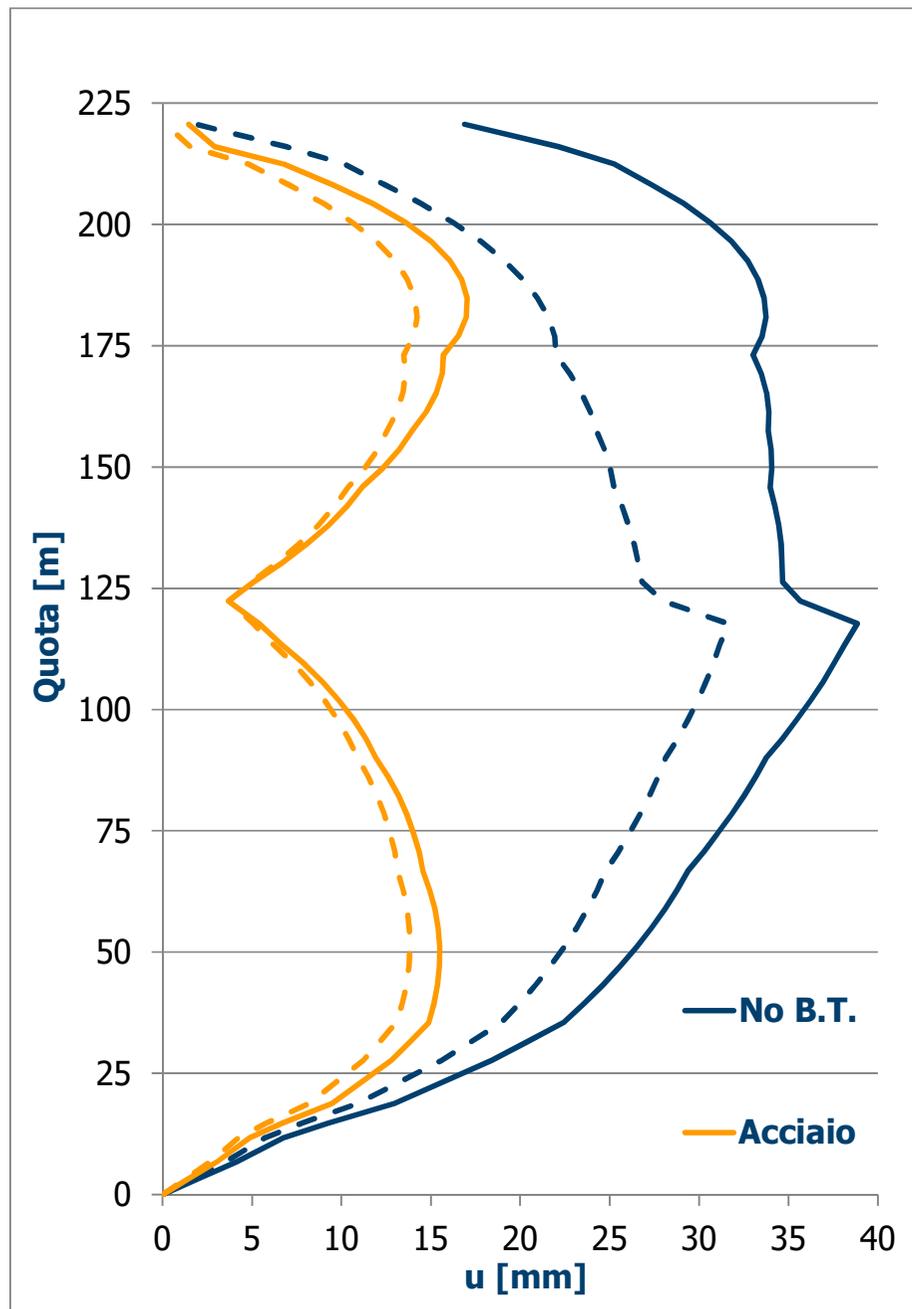




Torre Allianz

Accorciamento differenziale nucleo - colonna laterale (3), (4), (5)

t = 30000 giorni

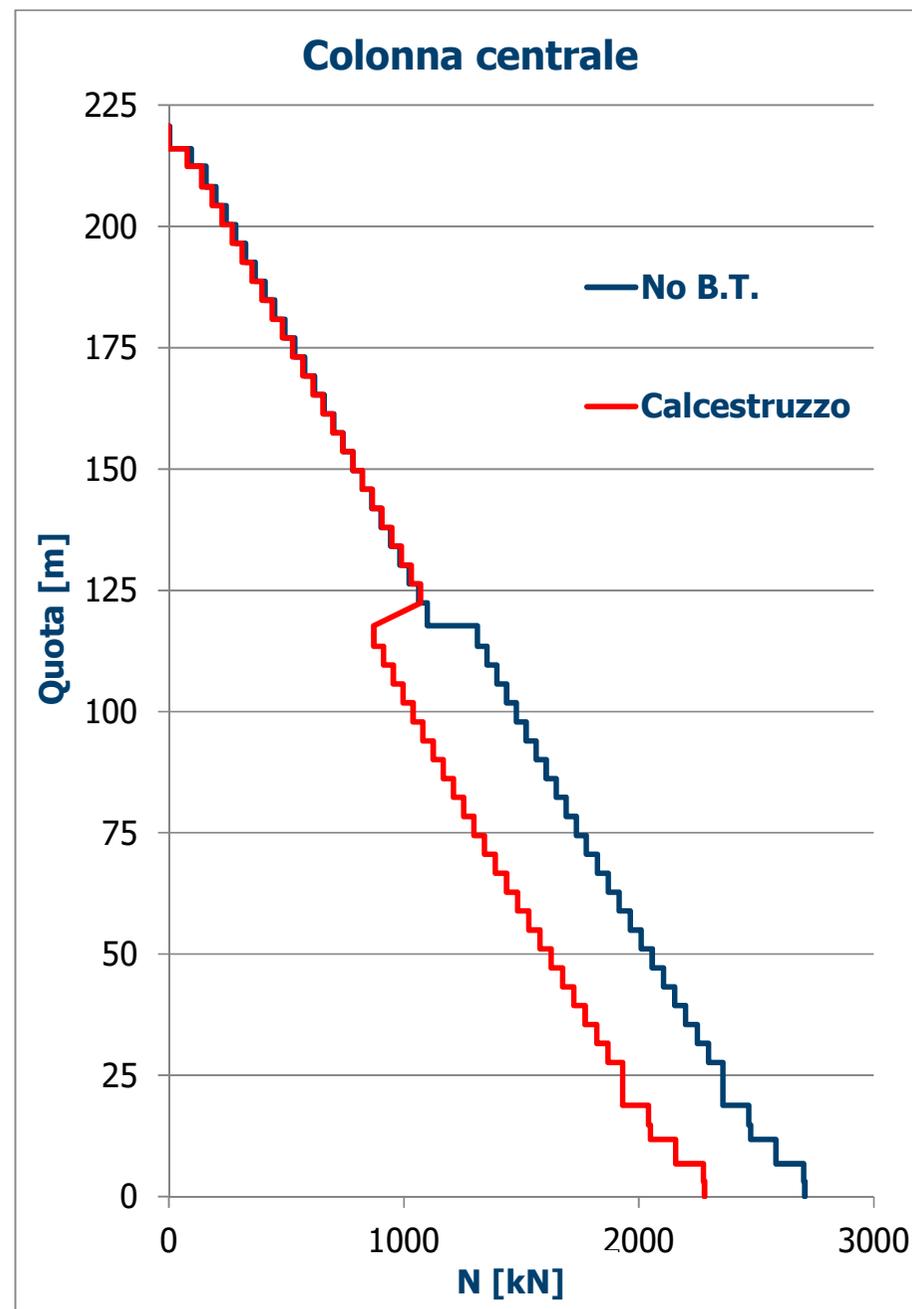
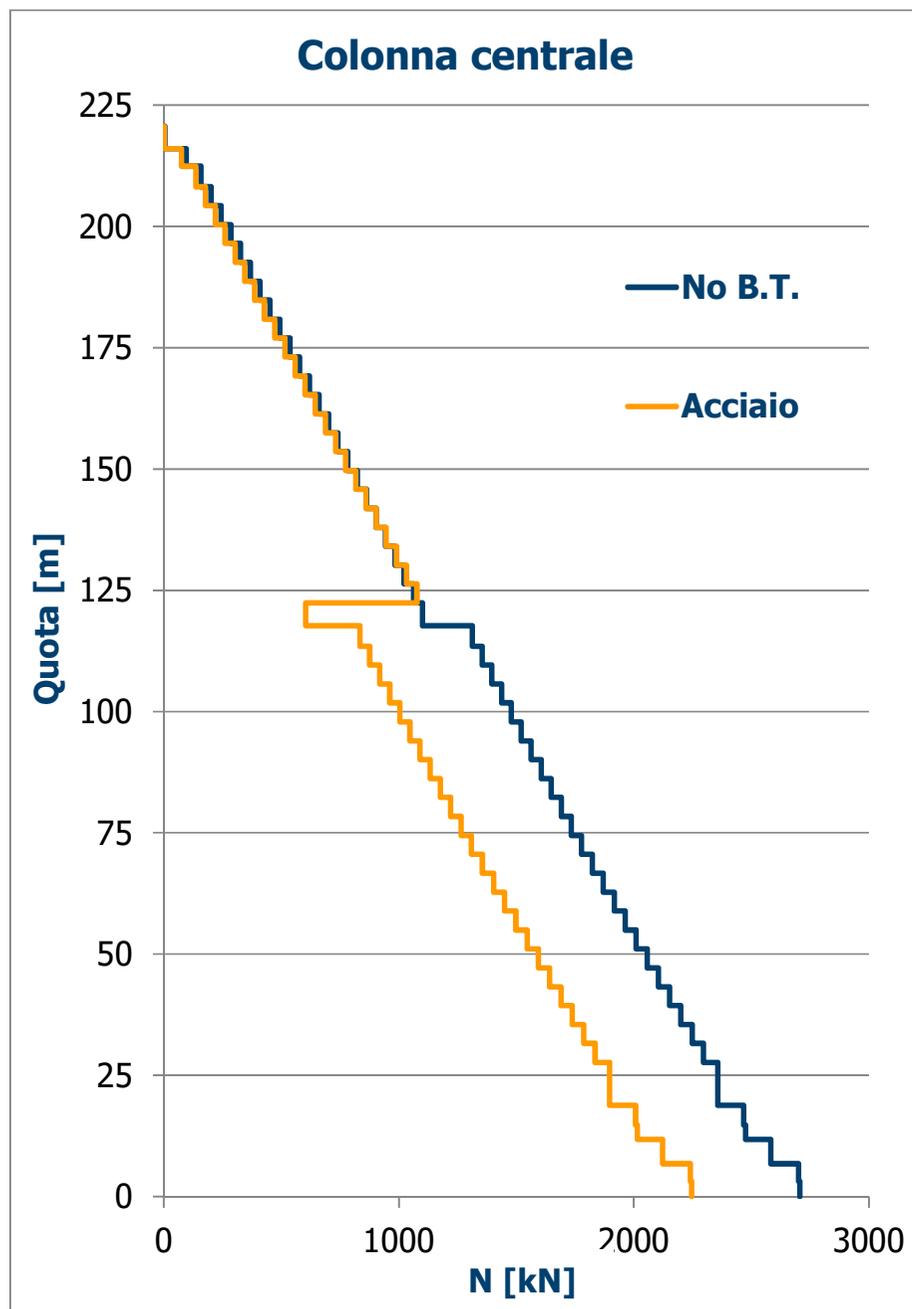




Torre Allianz

Sollecitazioni negli elementi verticali (3), (4), (5)

t = 715 giorni

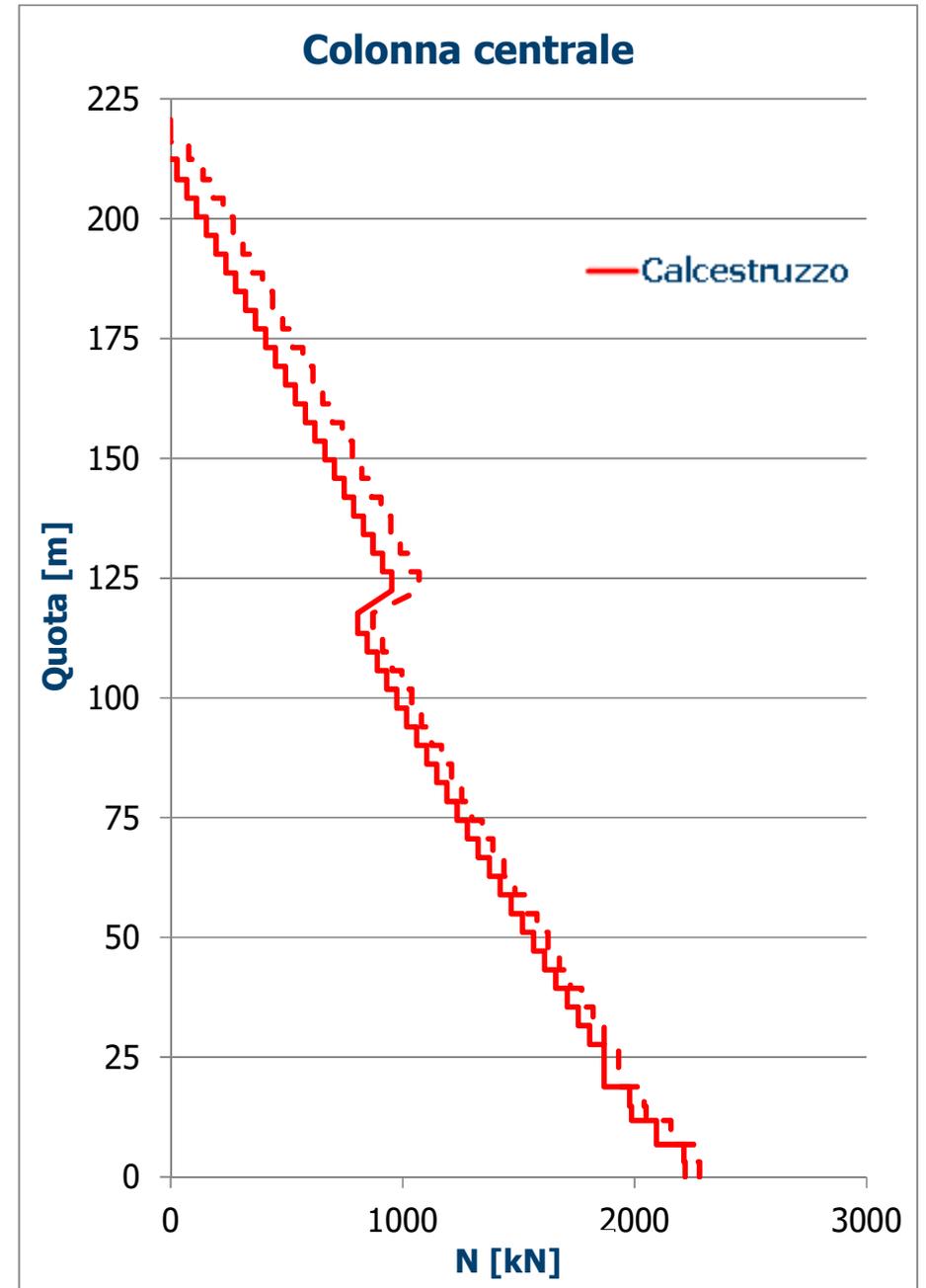
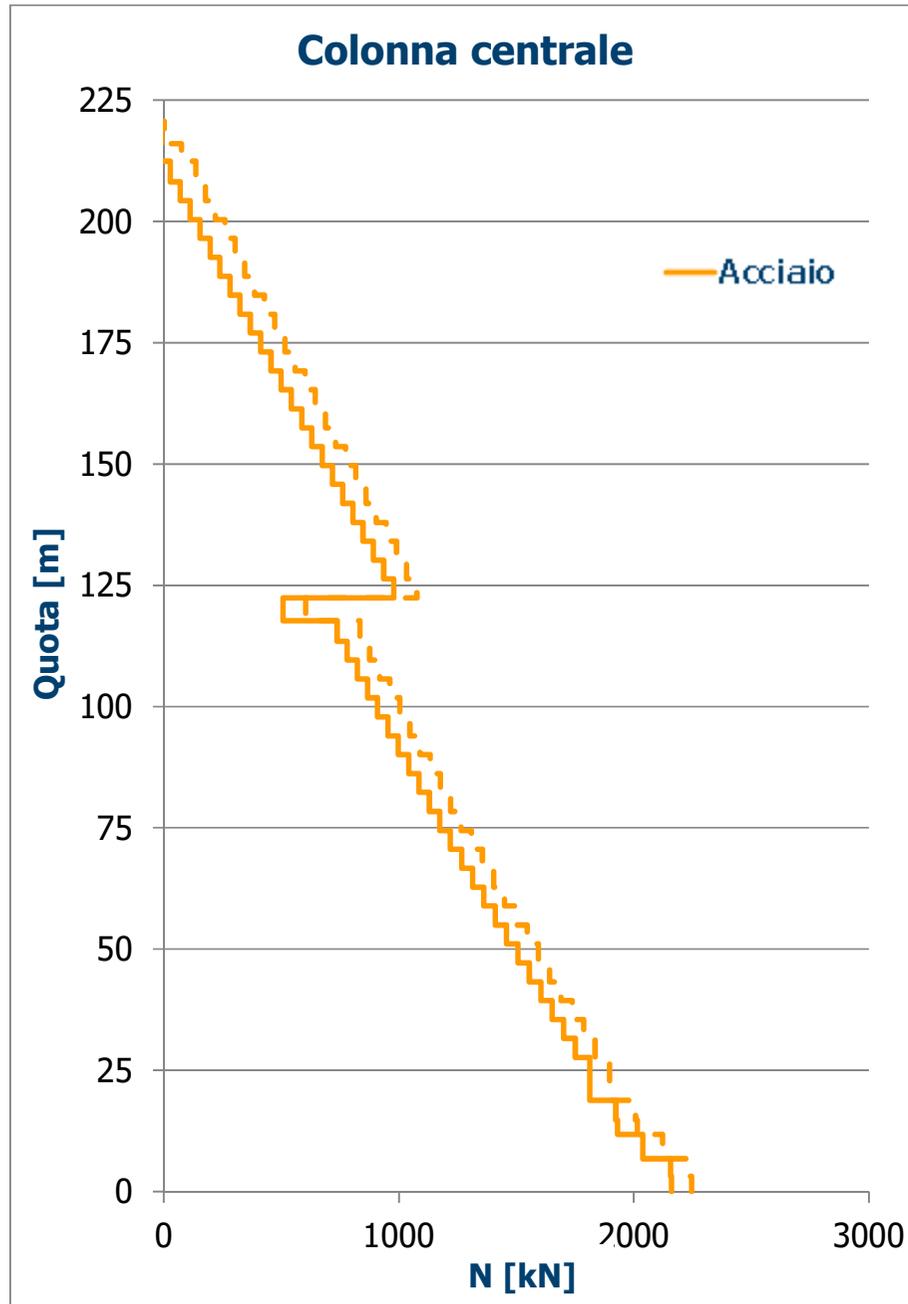




Torre Allianz

Sollecitazioni negli elementi verticali (4), (5)

t = 30000 giorni





Torre Allianz

Indicazioni progettuali

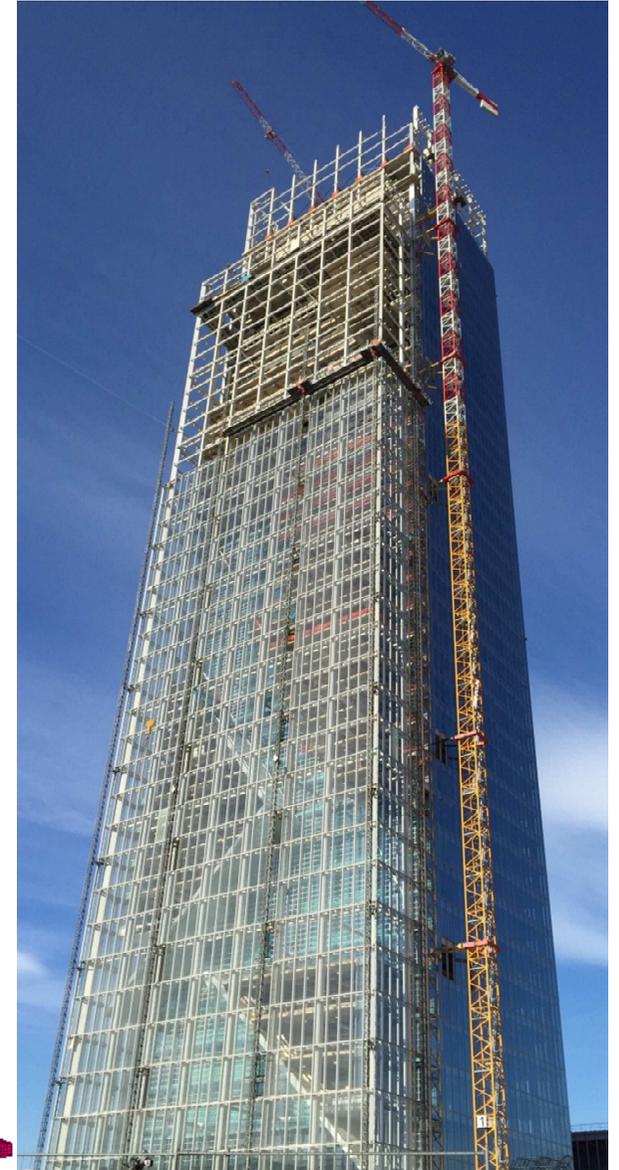
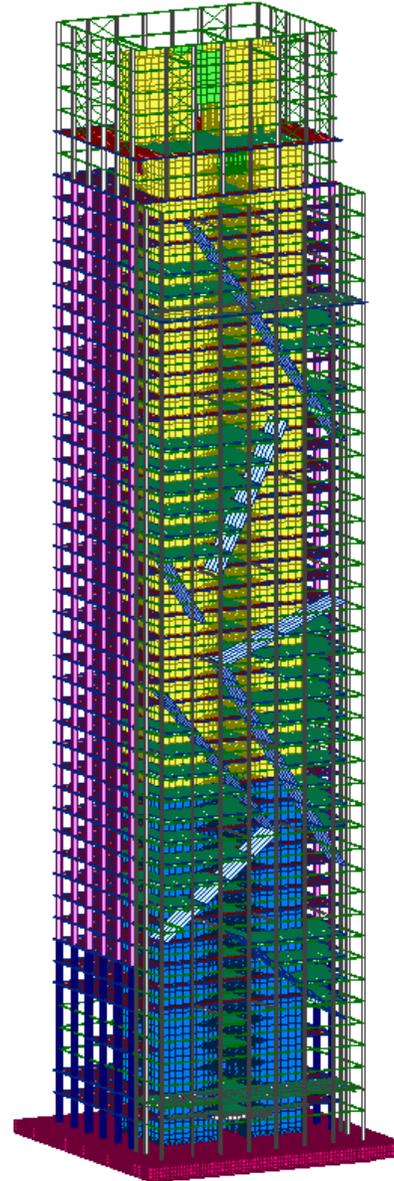
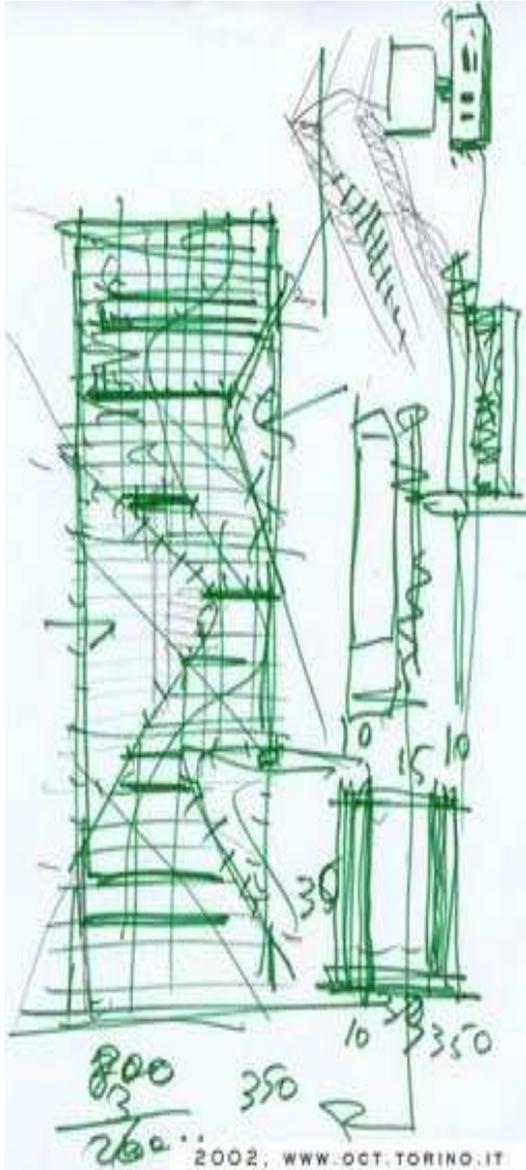
- Il quantitativo d'**armatura** è fattore essenziale per ridurre le deformazioni a lungo termine e deve essere opportunamente elevato
- La differente età dei calcestruzzi deve essere computata in maniera affidabile attraverso un'**analisi per fasi**.
- Gli elementi verticali si possono considerare **isolati** solamente nel caso in cui l'interazione con il solaio è modesta
- E' indispensabile tenere in conto della **compensazione** per limitare gli spostamenti totali delle colonne e le interazioni tra elementi portati e portanti
- Un'analisi affidabile del comportamento differito di edifici alti in c.a. deve essere condotta mediante formulazioni raffinate e complesse, basate su **programmi di calcolo automatico** precedentemente validati





Torre Regione Piemonte

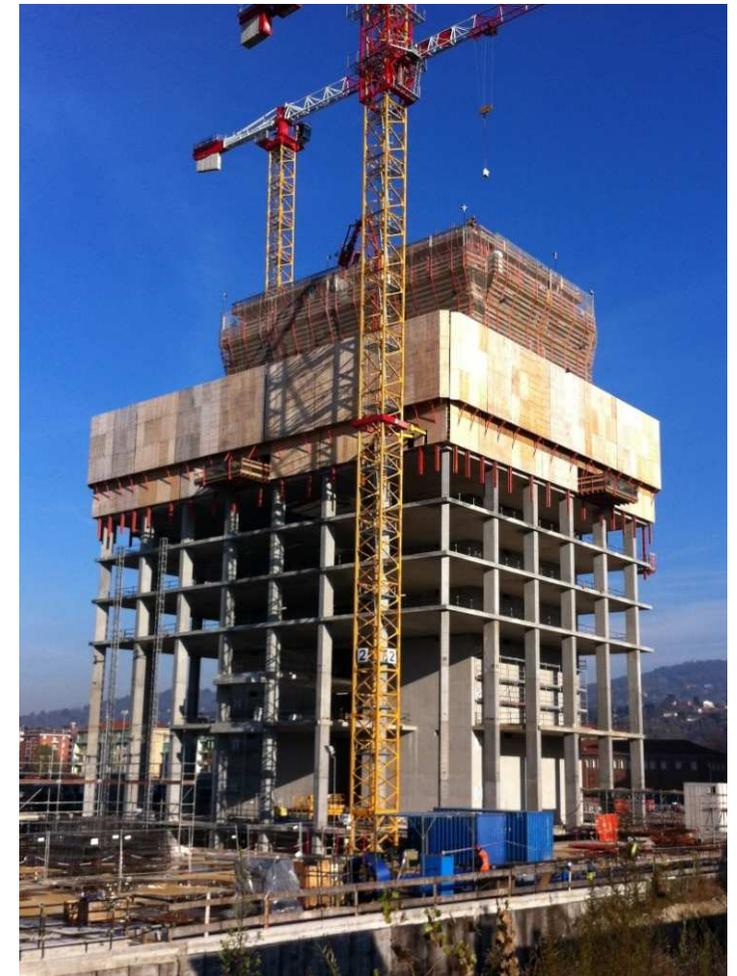
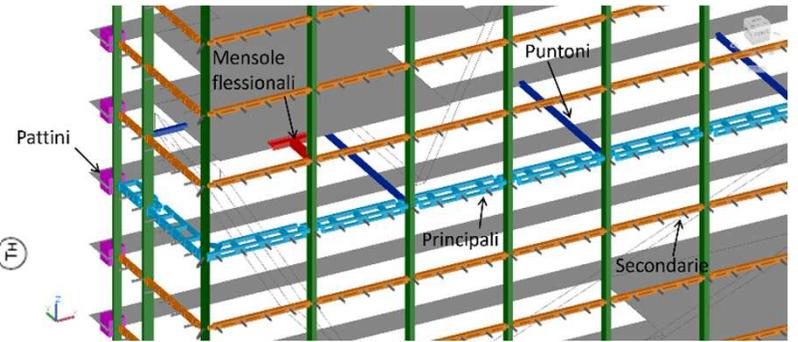
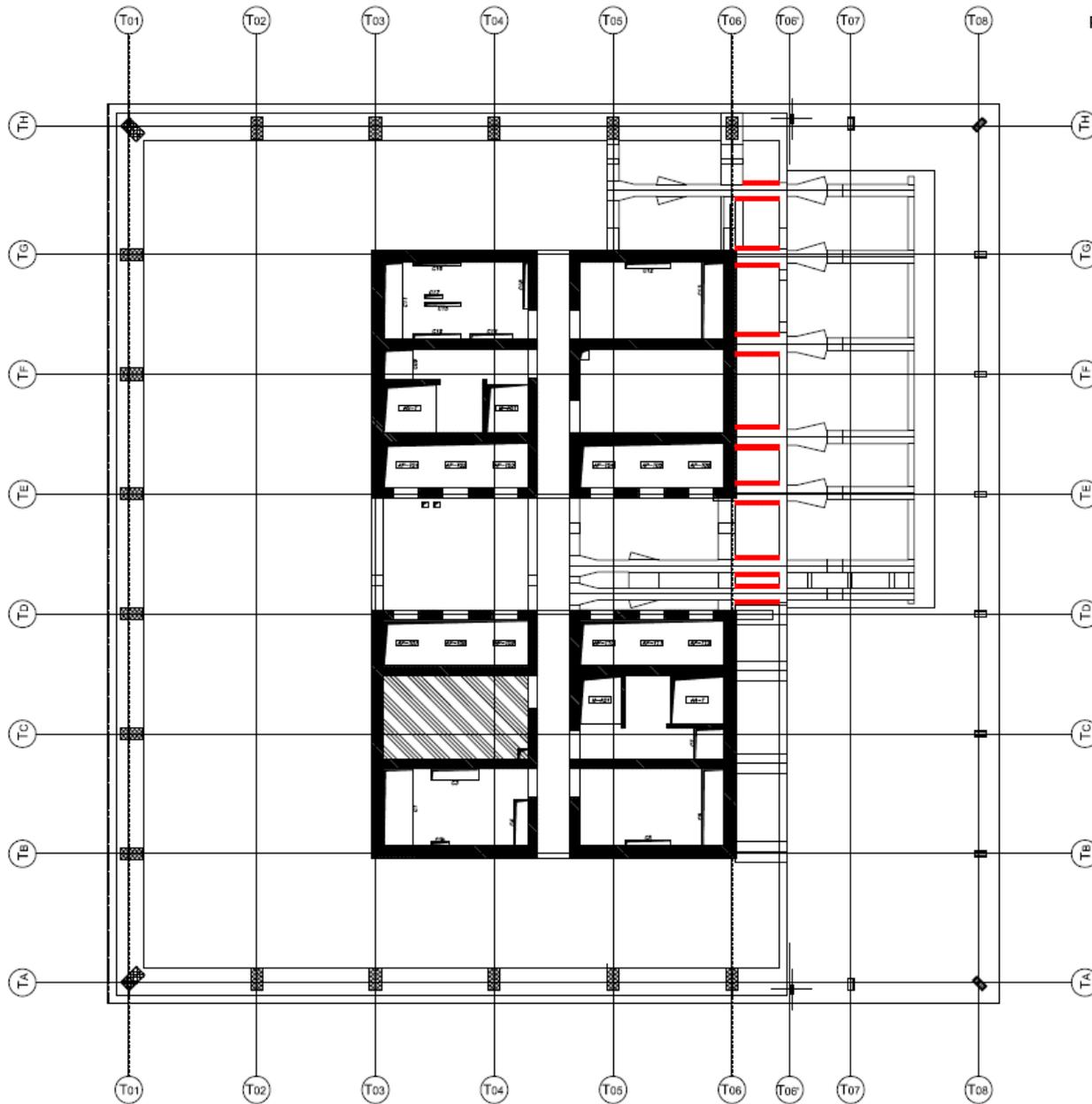
Descrizione dell'opera





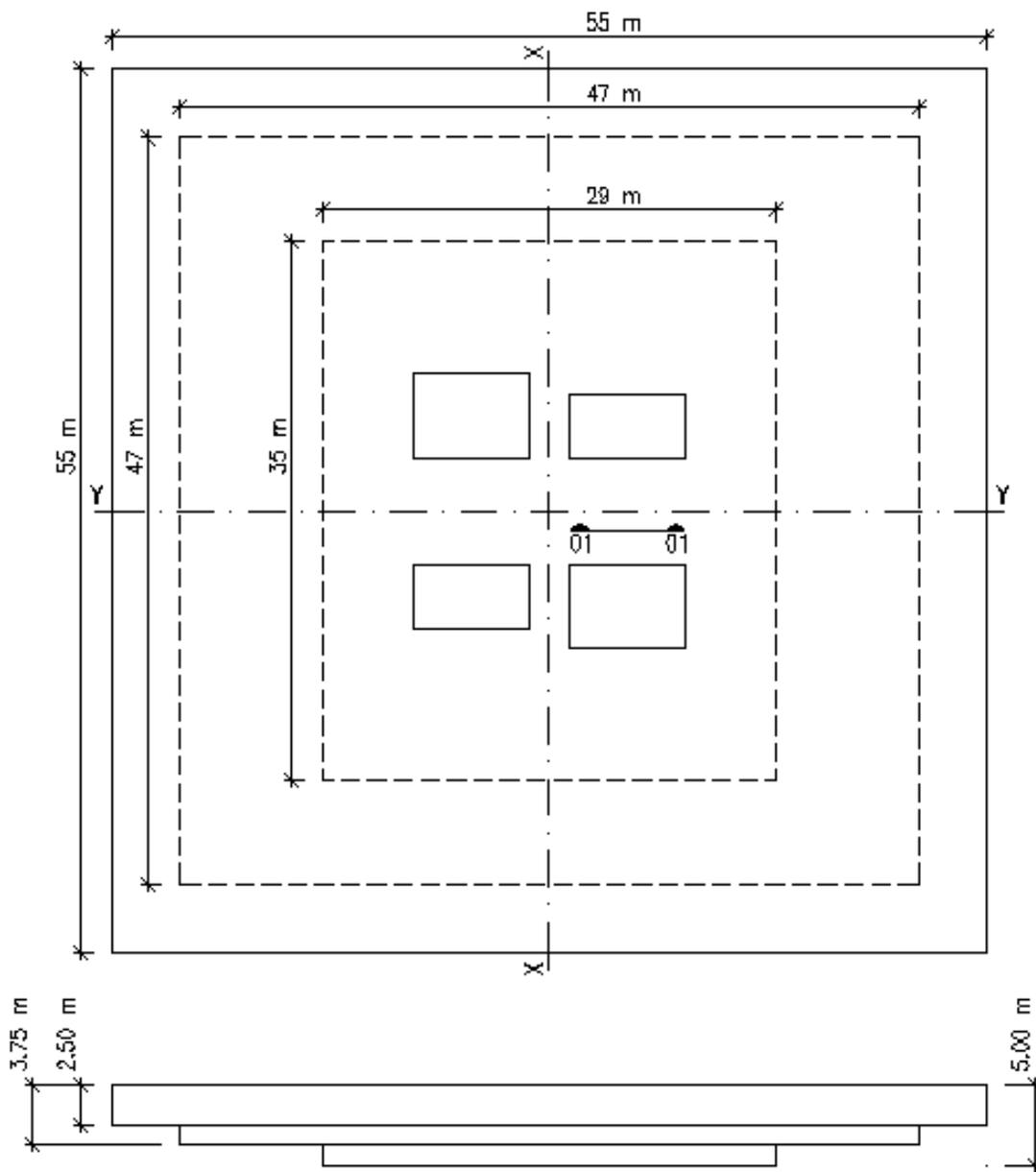
Torre Regione Piemonte

Descrizione dell'opera



Torre Regione Piemonte

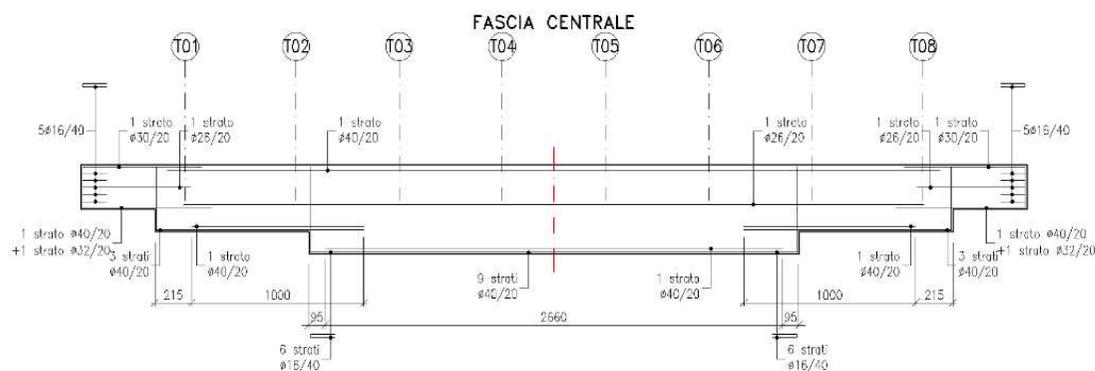
Descrizione dell'opera - Piastra di fondazione



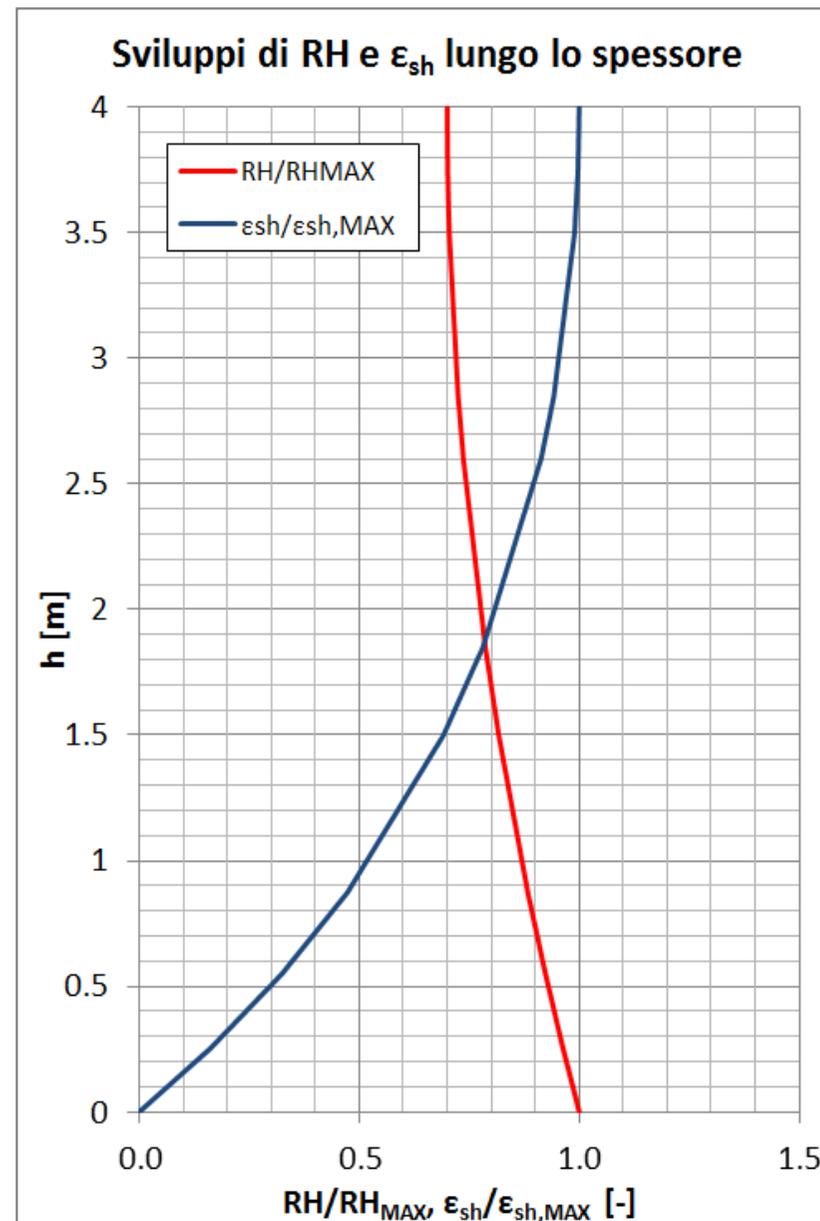
Volume totale del getto = circa 11000 m³

Prerequisiti	
Classe di resistenza a compressione	C32/40
Classi di esposizione ambientale	XC4+XF1
Delta termico adiabatico massimo	$\Delta T \leq 45^\circ\text{C}$
Ritiro igrometrico	$\leq 500 \mu\text{m/m}$
Materiale	
Classe di Consistenza	SCC
Slump flow di riferimento	750±50 mm
Tempo di efflusso (V-funnel)	6 ± 2 s
ΔSF con anello a J (J-ring)	PJ ≤ 10 mm
Dimensione nominale dell'aggregato	D ≤ 20 mm
Cura	
Presenza di acqua [T]	15 C°
Tempo di presenza d'acqua	12 giorni





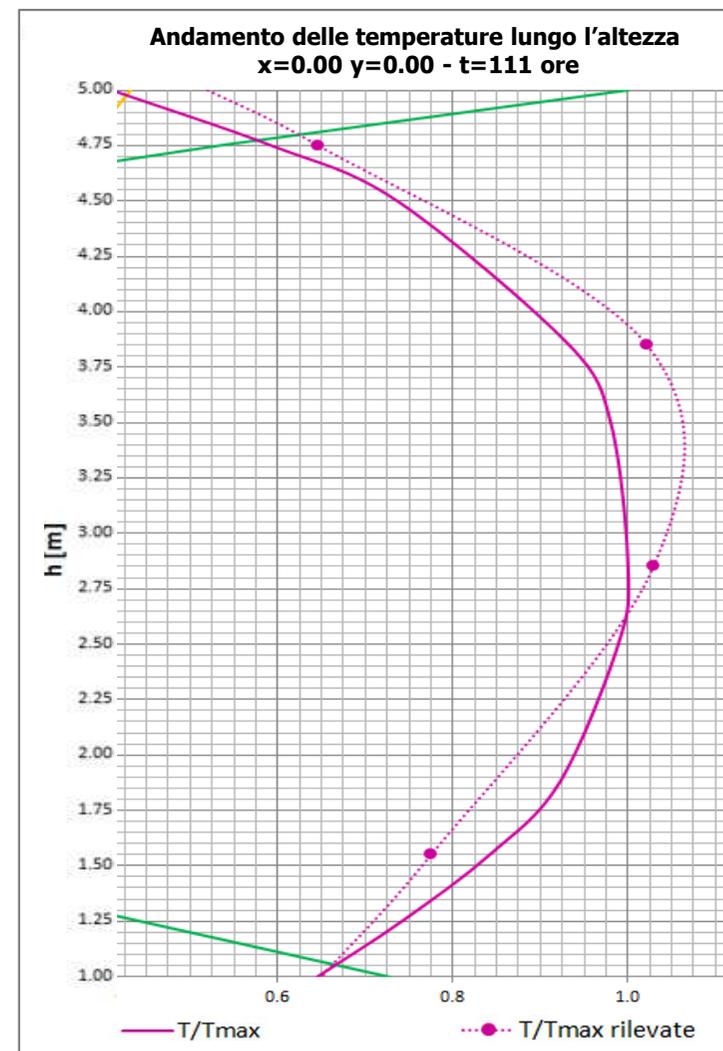
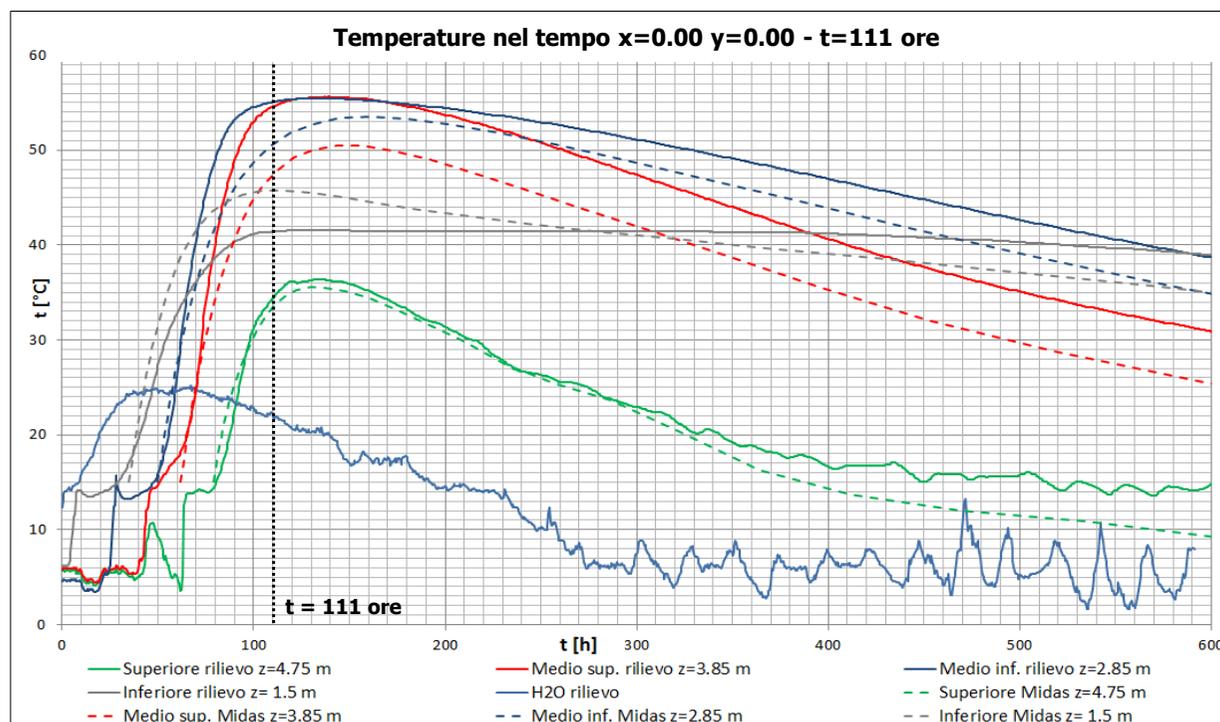
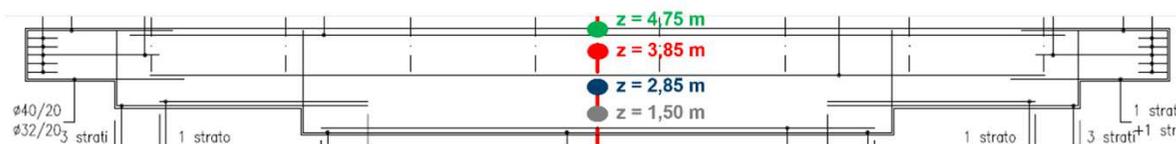
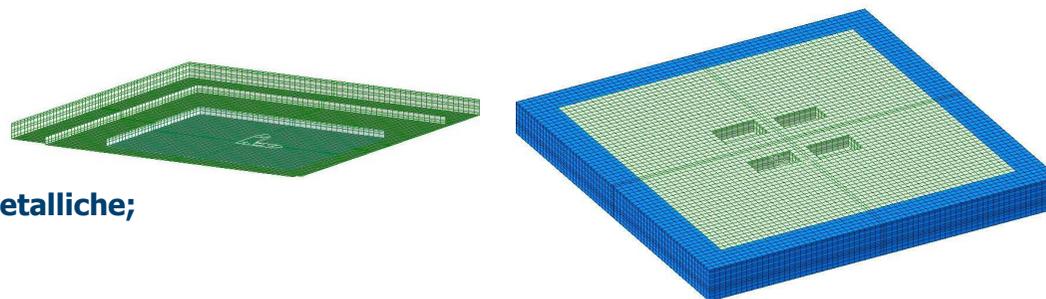
Presenza delle armature



Differenti modalità con cui si sviluppa la deformazione da ritiro

IPOTESI ASSUNTE NELL'ANALISI:

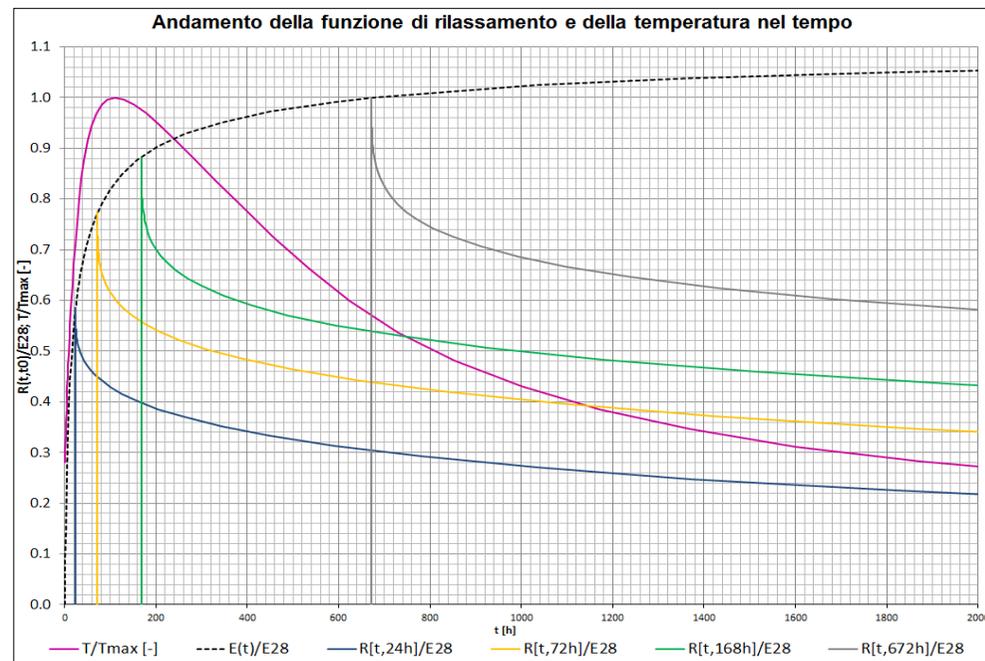
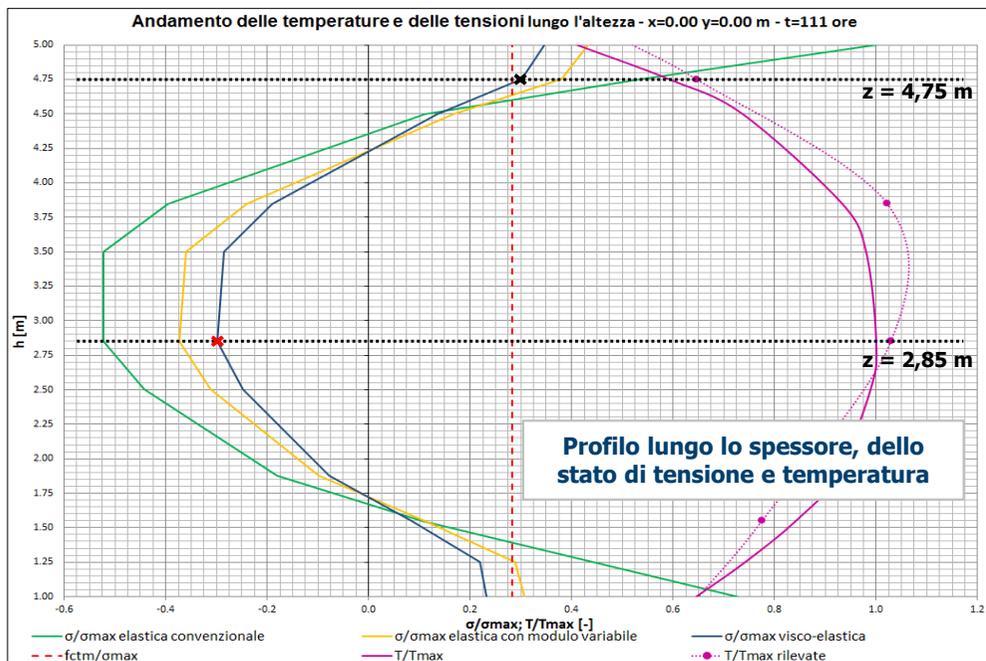
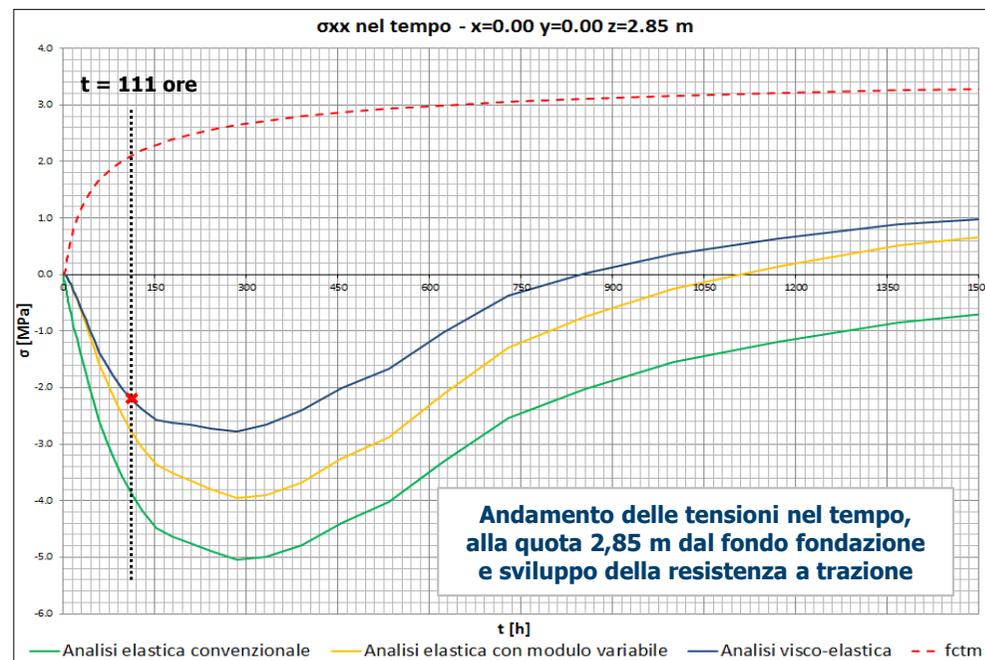
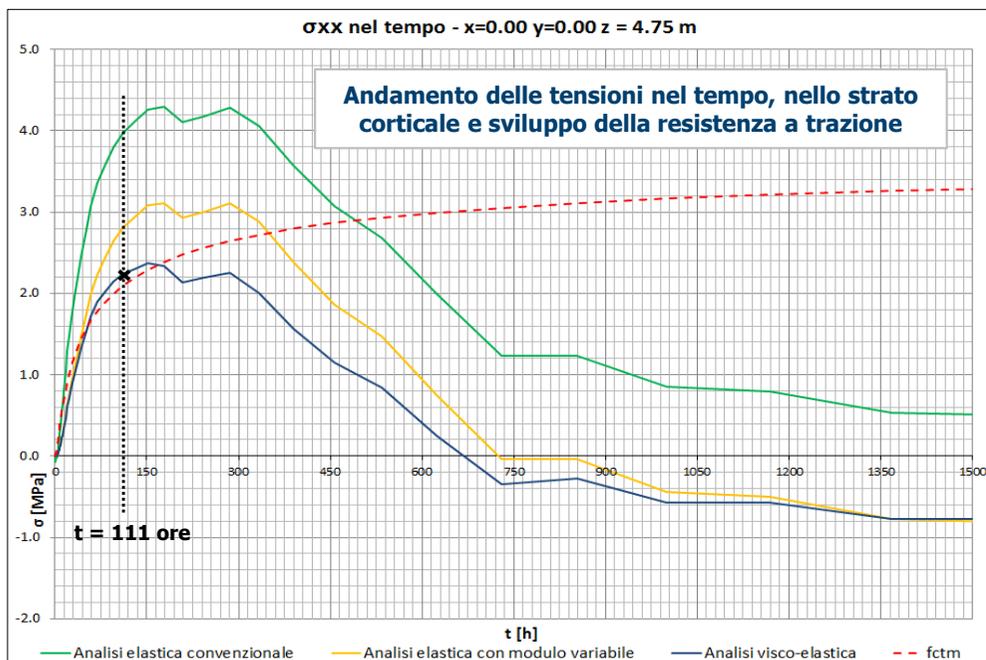
- Omogeneità reologica del materiale calcestruzzo;
- Si trascurano i vincoli interni rappresentati dalle armature metalliche;
- Si trascura il peso proprio;
- Superfici laterali libere da vincoli;
- Si trascura l'interazione meccanica con il terreno sottostante.

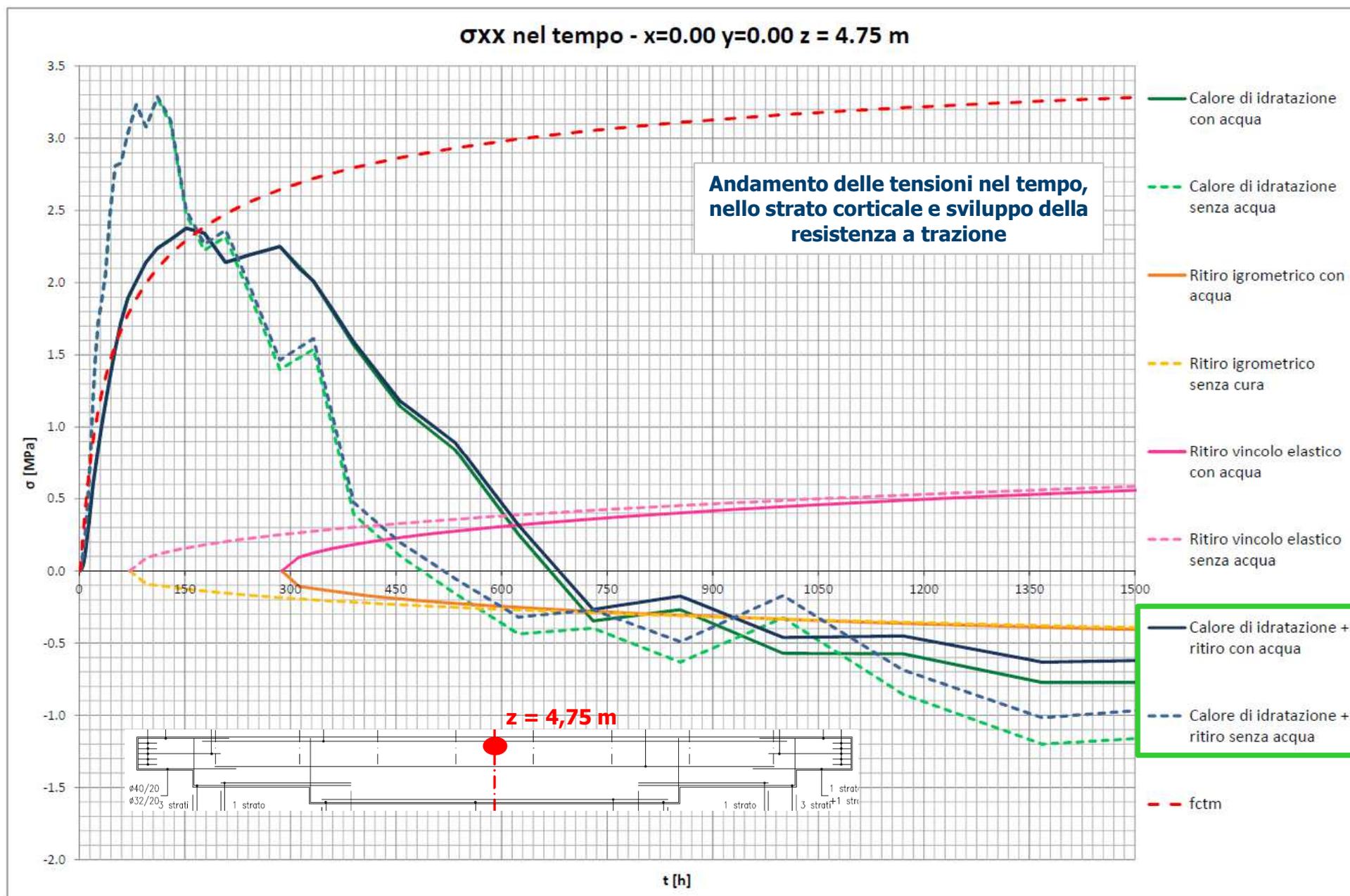




Torre Regione Piemonte

Controllo dello stato fessurativo in getti massivi in c.a.

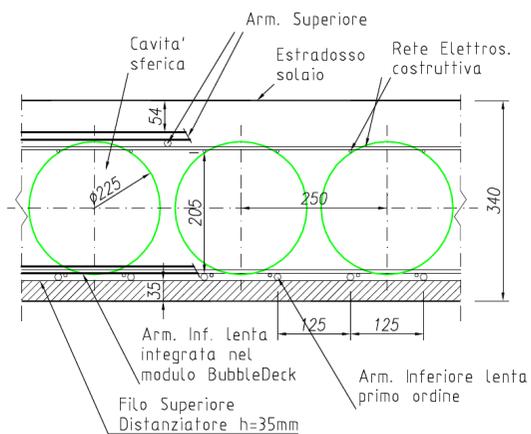
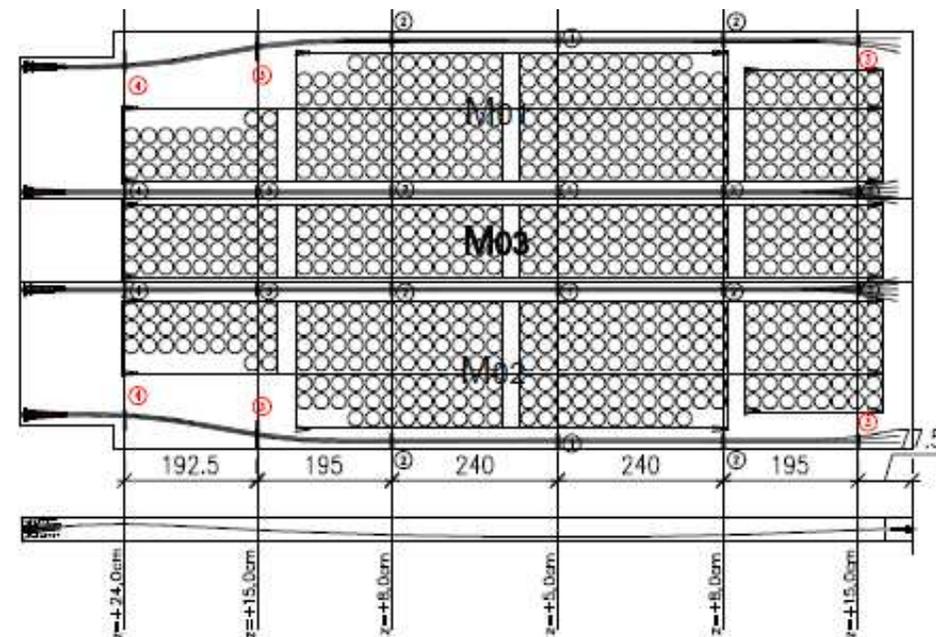
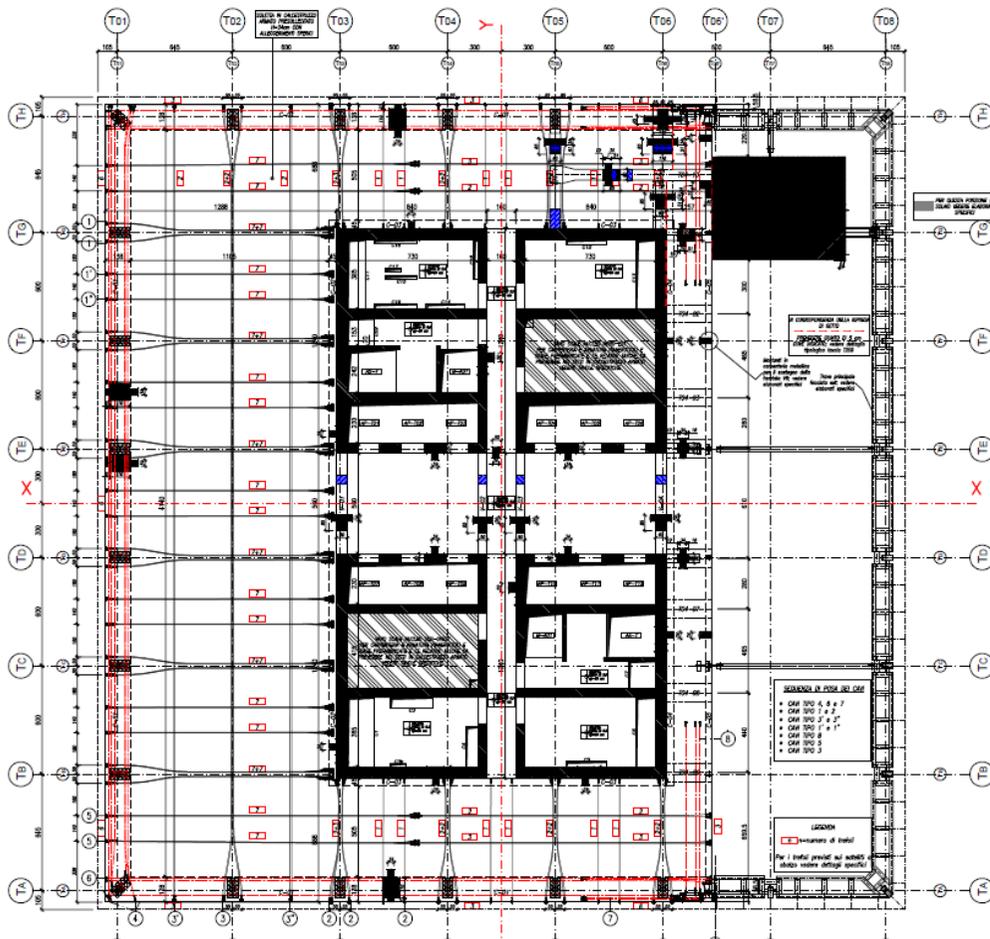






Torre Regione Piemonte

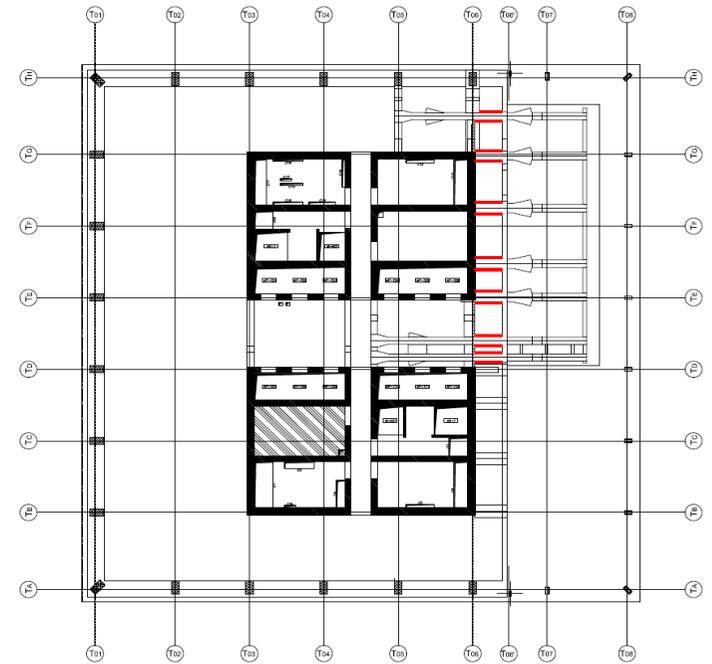
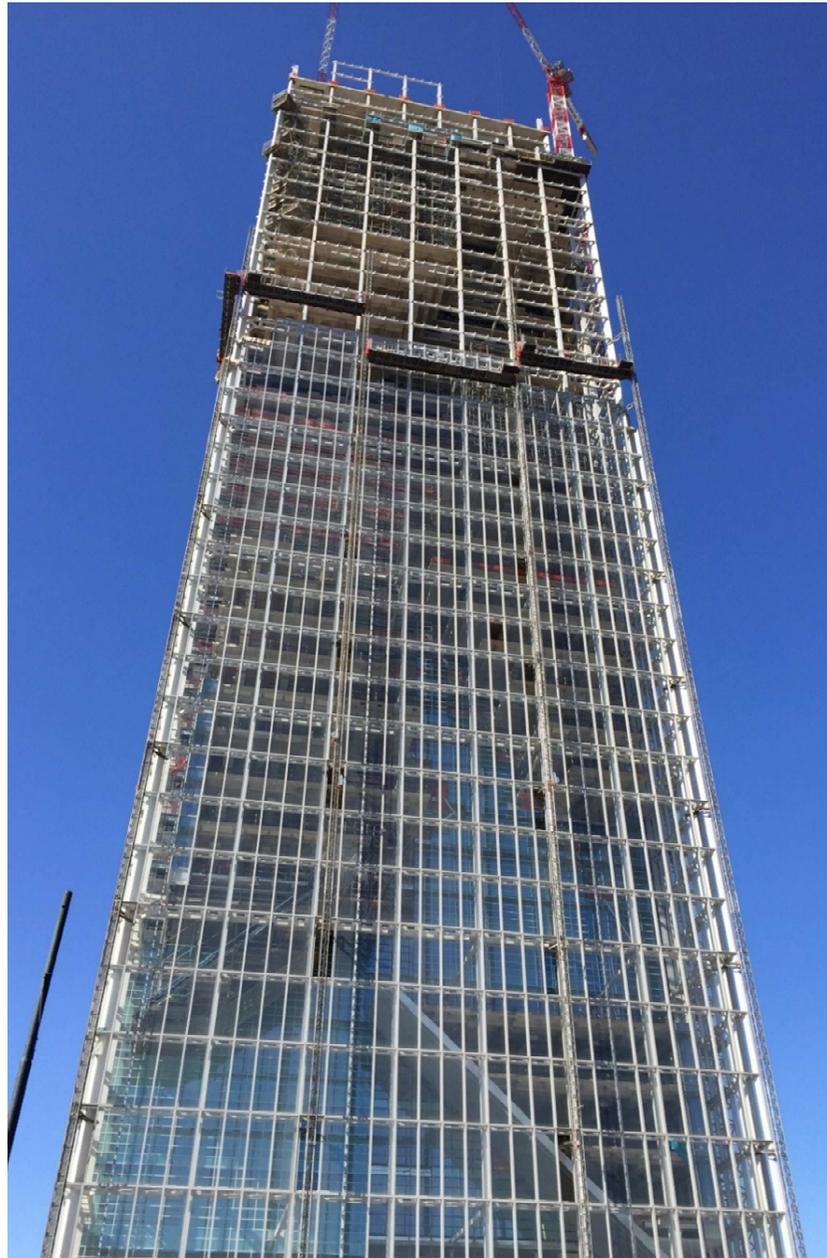
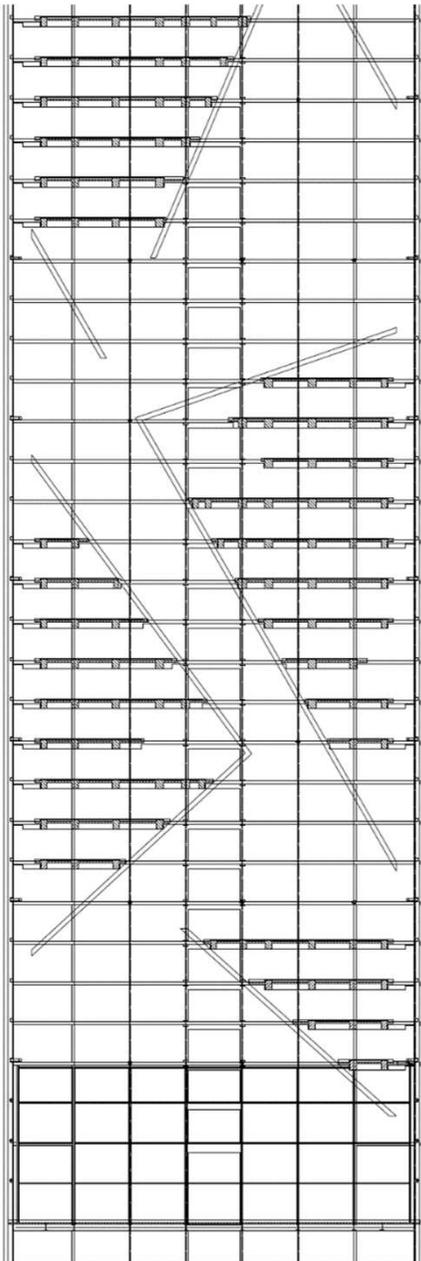
Soletta alleggerita presollecitata con trefoli non aderenti

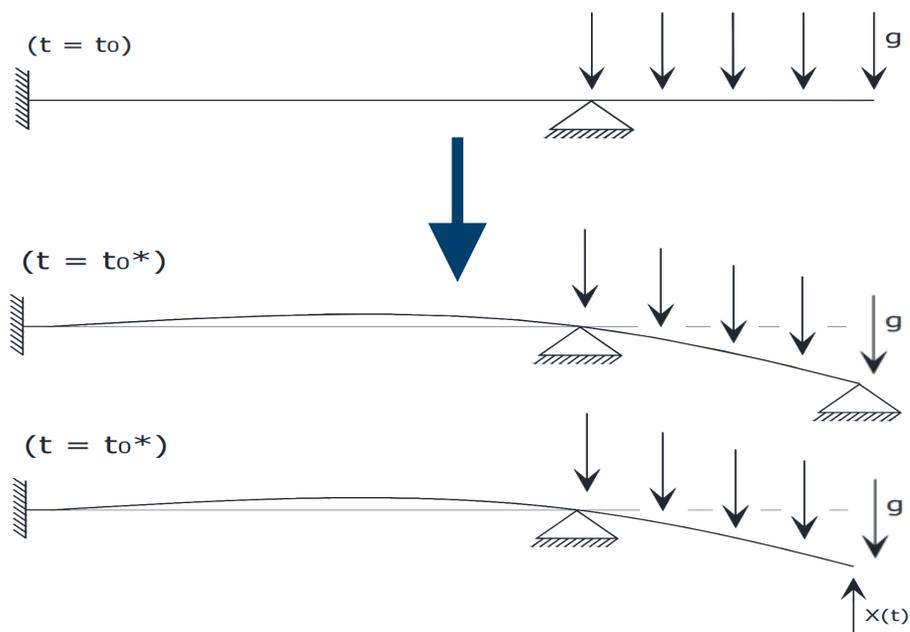




Torre Regione Piemonte

Impalcati aggettanti in c.a.p. a cavi aderenti

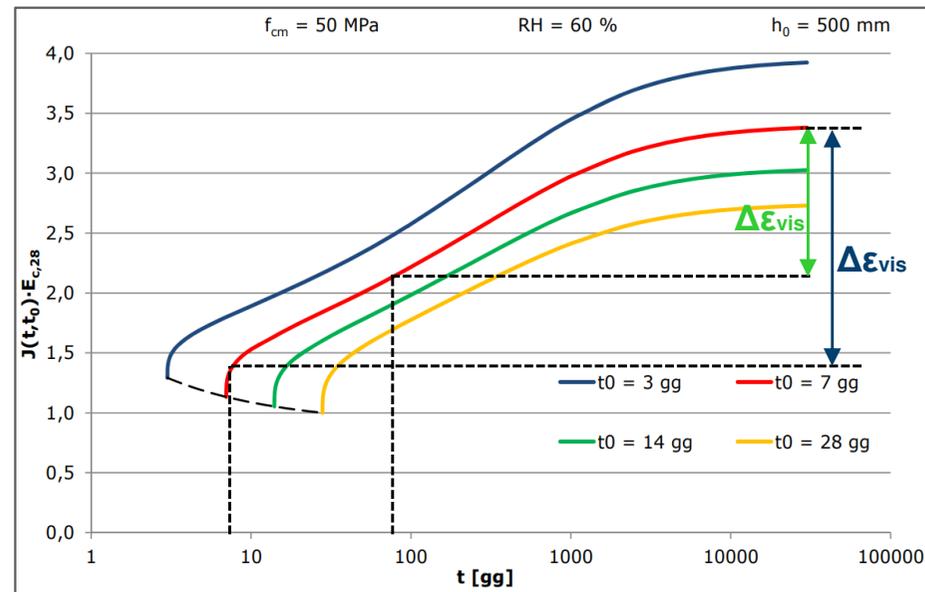
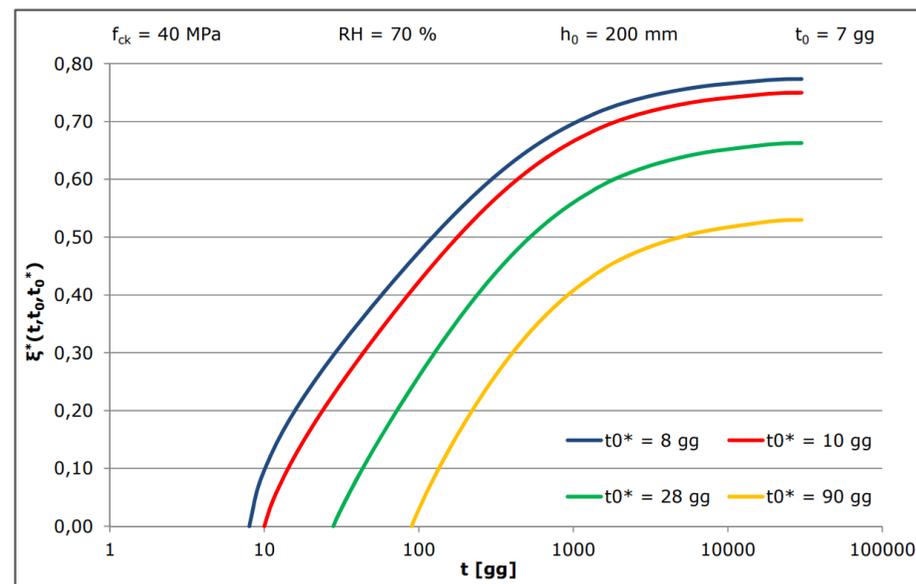




A seguito della variazione dello schema statico iniziale, come ad esempio l’inserimento di un vincolo, lo stato sollecitativo della struttura tende nel tempo ad assumere gli stessi valori che esso avrebbe avuto se il vincolo fosse stato preesistente all’applicazione del carico

$$X_1(t) = X_{1e} \cdot \int_{t_0^*}^t \frac{\partial \varphi(t', t_0)}{\partial t'} \cdot \frac{R(t, t')}{E(t_0)} \cdot dt' = X_{1e} \cdot \xi(t, t_0, t_0^*)$$

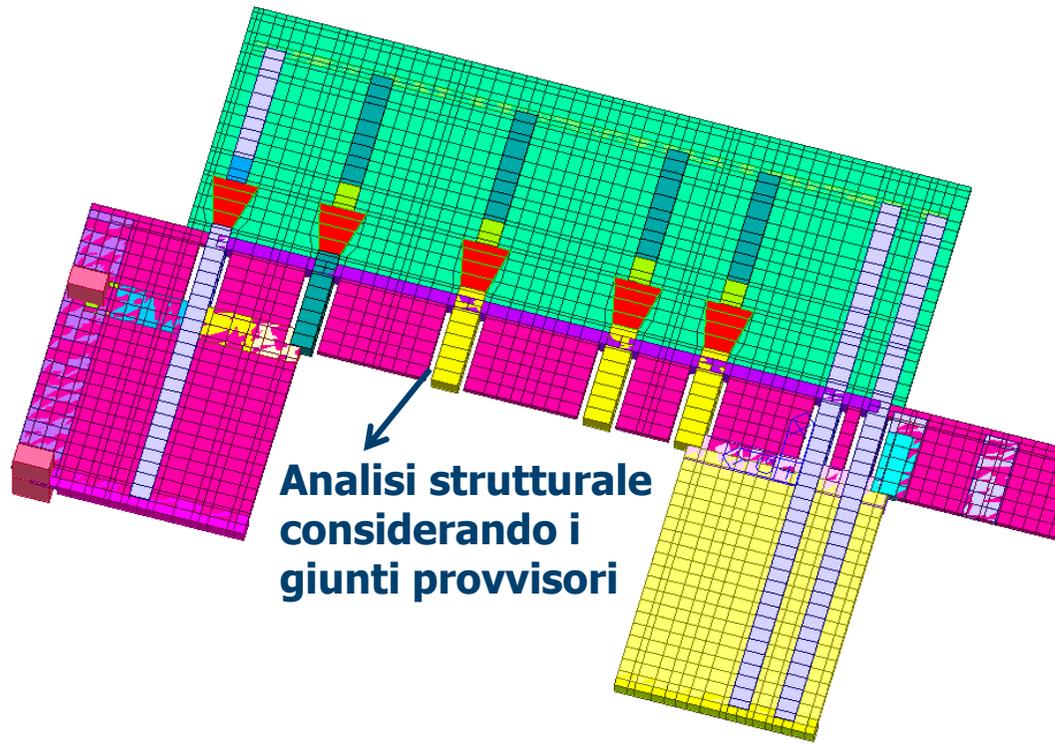
$\xi(t, t_0, t_0^*)$ è la funzione di riacquisto e dipende dagli istanti di messa in carico, applicazione del vincolo posticipato e di lettura. Il riacquisto è maggiore se $t \rightarrow \infty$ e $t_0^* \rightarrow t_0^+$.





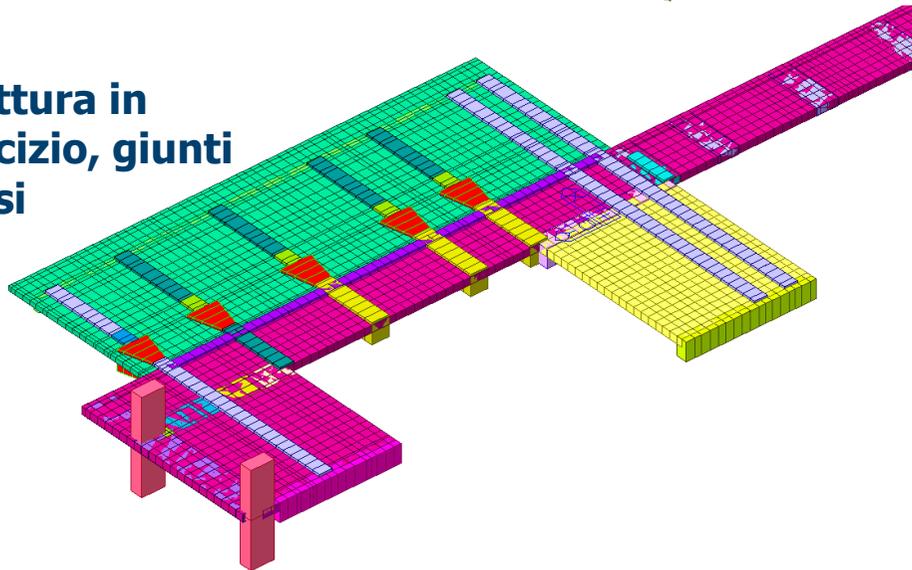
Torre Regione Piemonte

Impalcati aggettanti in c.a.p. a cavi aderenti



Analisi strutturale considerando i giunti provvisori

Struttura in esercizio, giunti chiusi

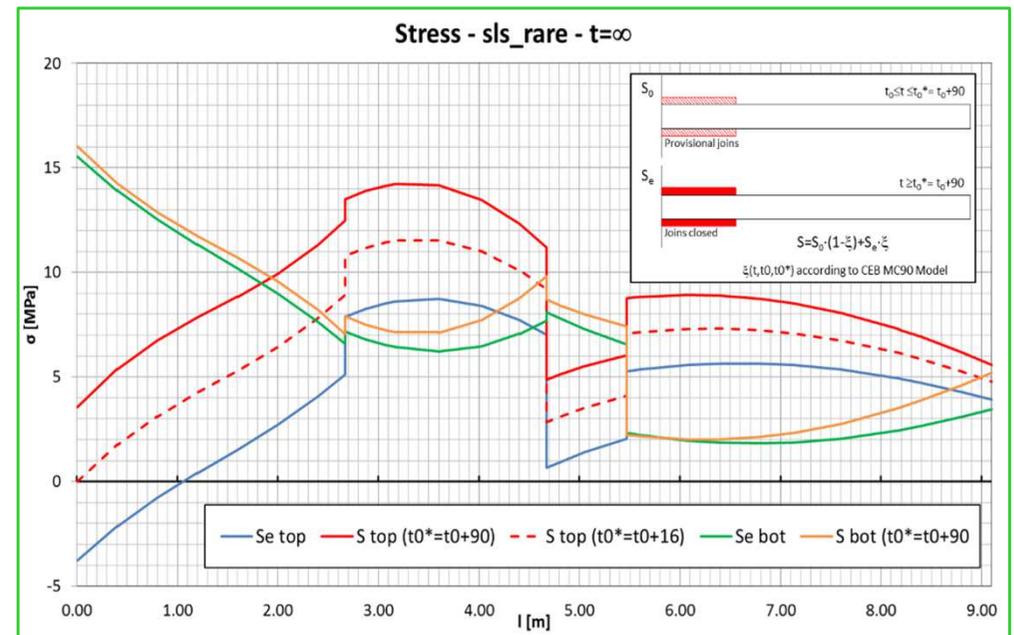
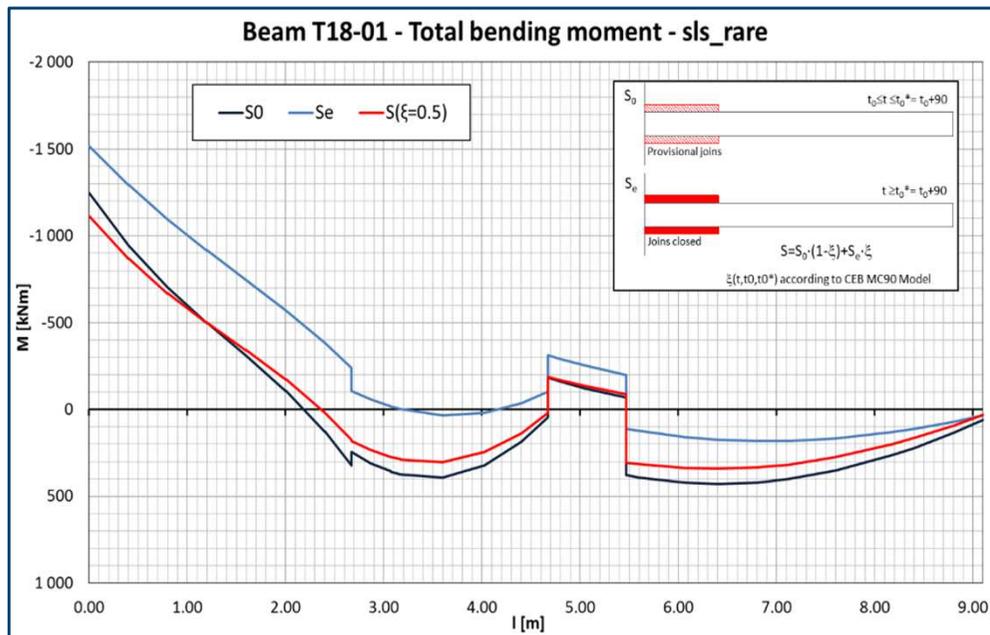
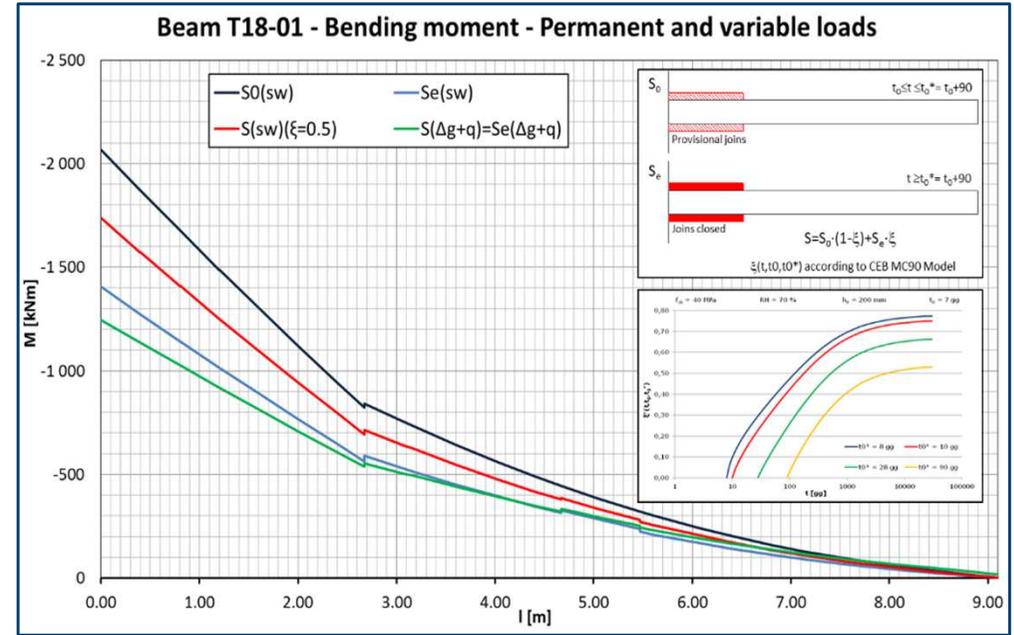
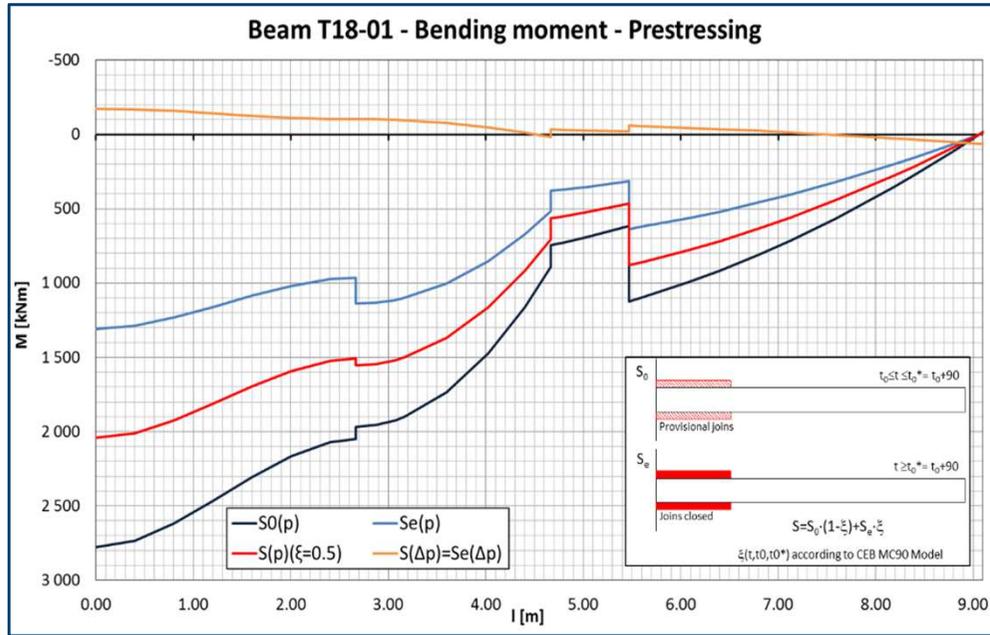


$$S = S_0(1 - \xi) + S_e \xi$$



Torre Regione Piemonte

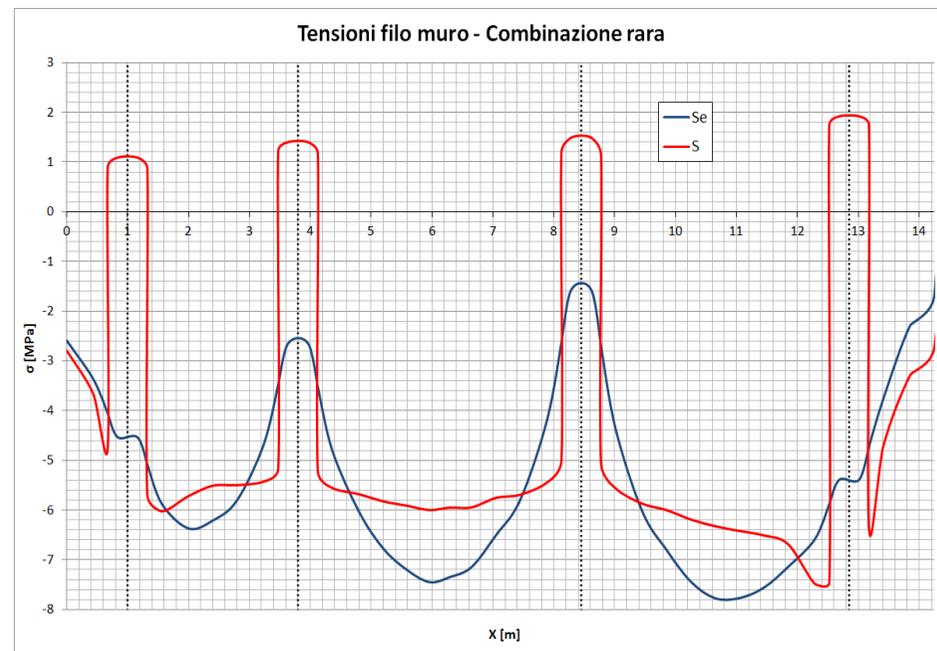
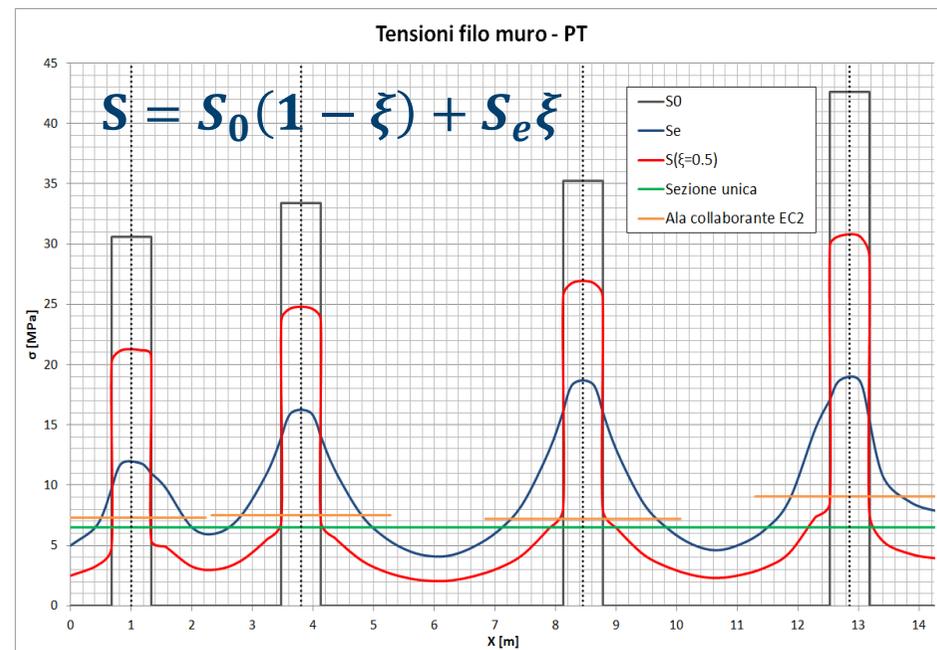
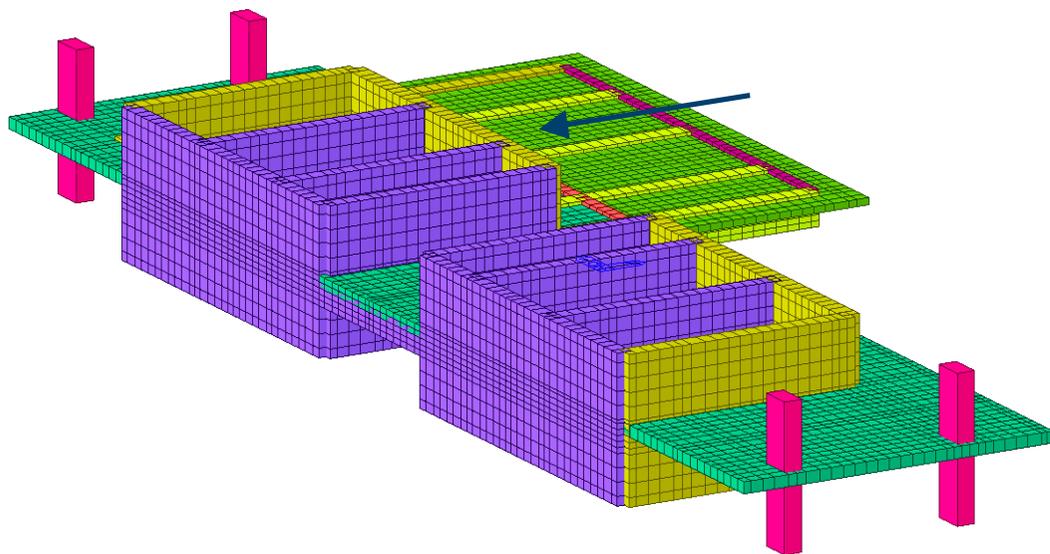
Impalcati aggettanti in c.a.p. a cavi aderenti





Torre Regione Piemonte

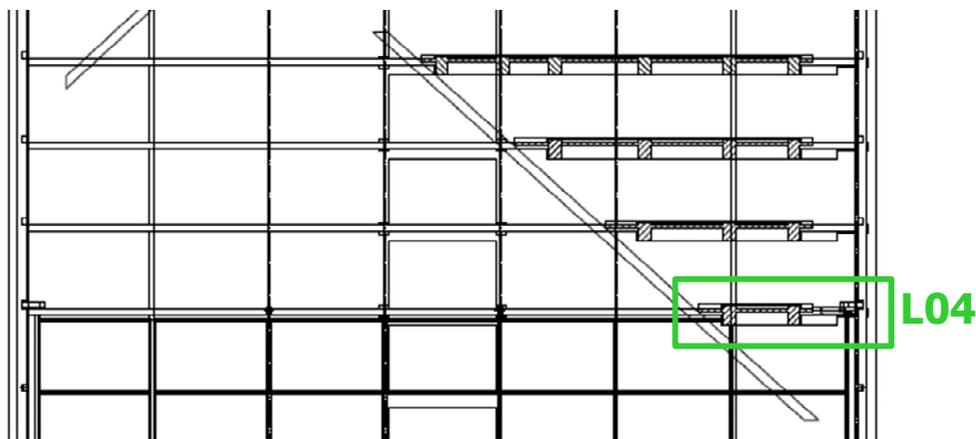
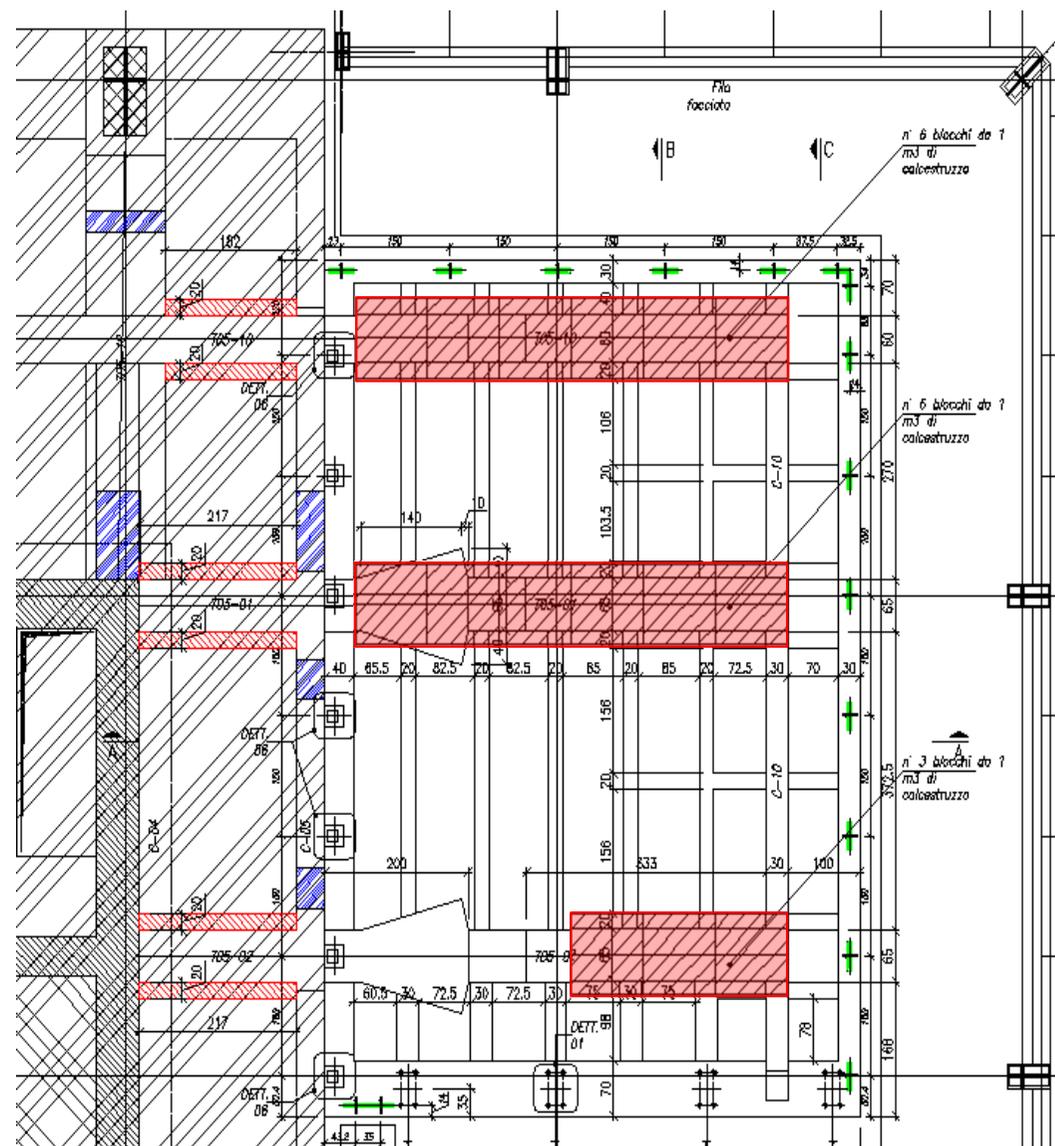
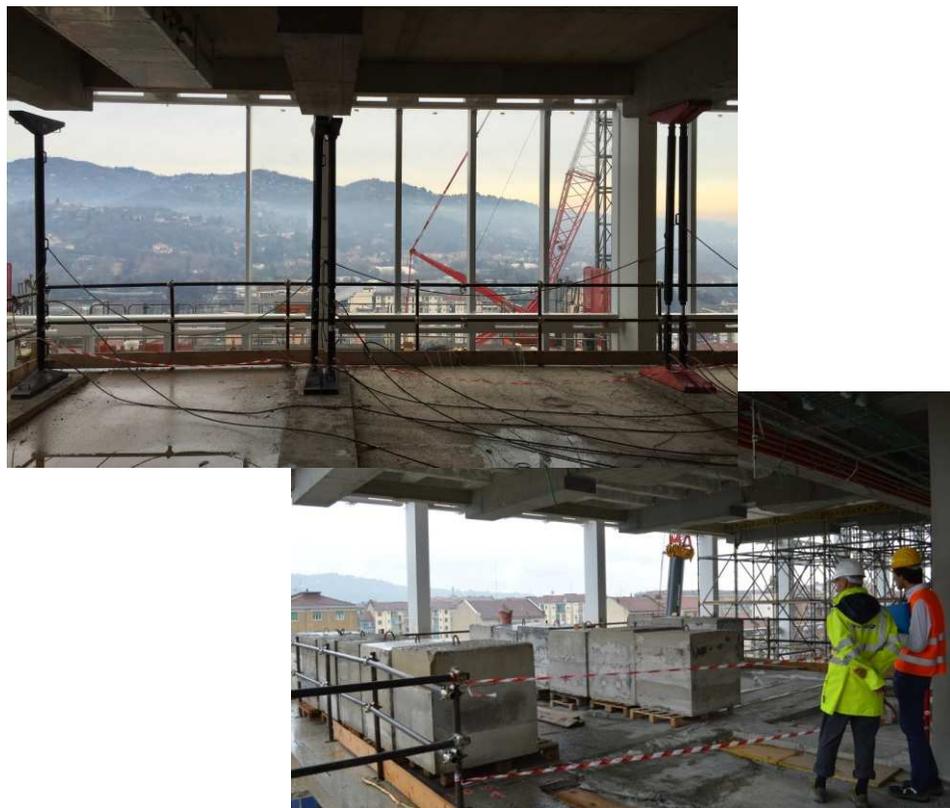
Impalcati aggettanti in c.a.p. a cavi aderenti





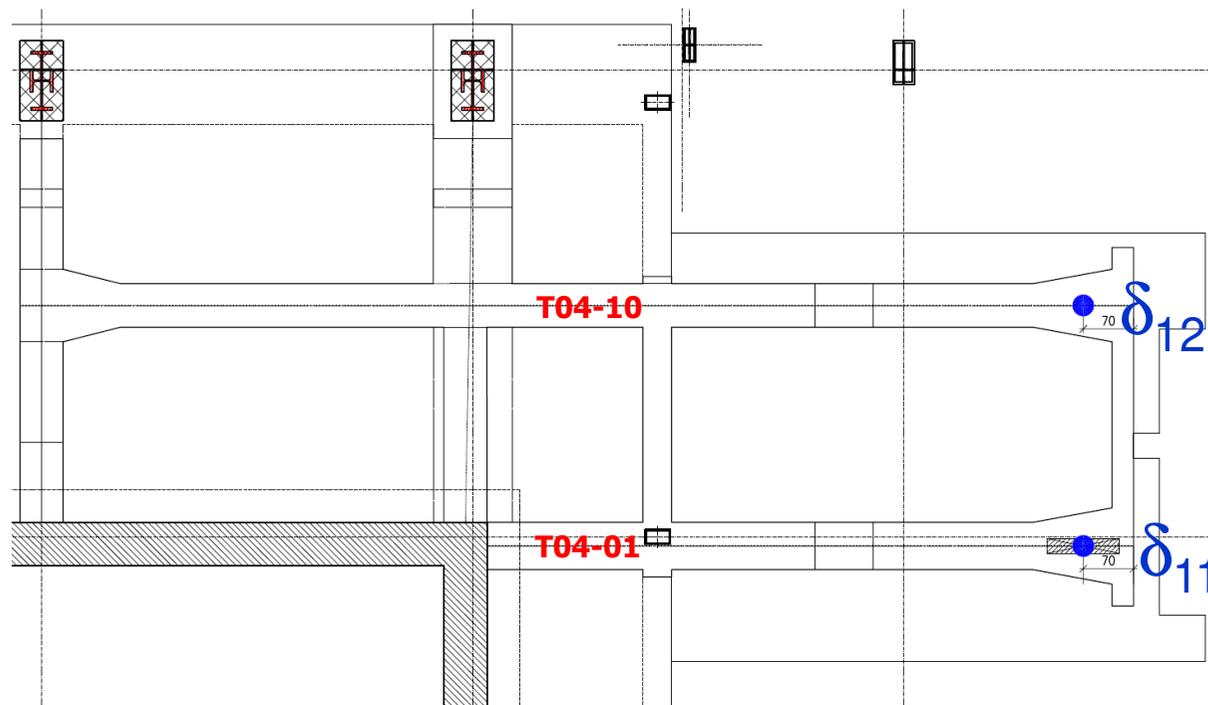
Torre Regione Piemonte

Prova di collaudo – Prova di collaudo delle travi in aggetto



Prospetto facciata lato est

Posizionamento delle zavorre di contrasto sull'impalcato in aggetto del Livello 05 – lato est



Teorema di Maxwell: date due forze di uguale intensità applicate in due punti qualsiasi del continuo lo spostamento del punto in cui è applicata la prima forza nella sua stessa direzione per effetto della seconda forza è uguale allo spostamento del punto in cui è applicata la seconda forza nella sua stessa direzione per effetto dell'applicazione della prima forza.

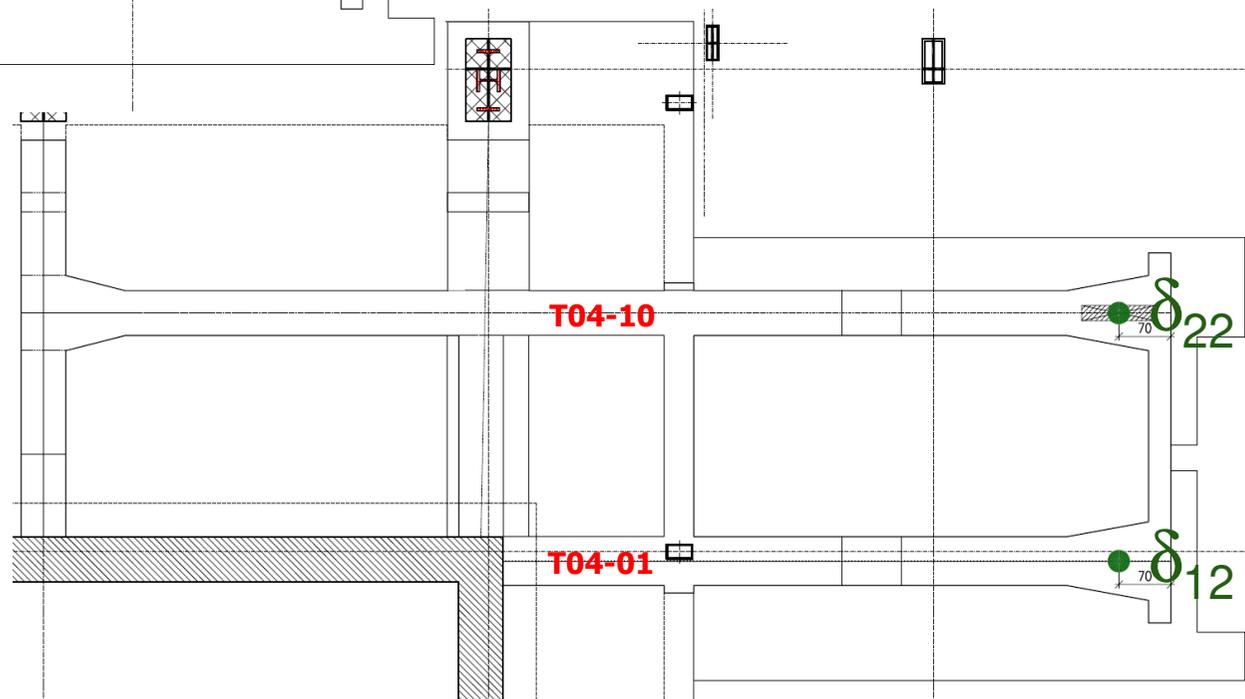
$$F_1 = F_2 = 150 \text{ kN}$$

Risultati teorici

$$\begin{bmatrix} 7,63\text{mm} & 5,79\text{mm} \\ 5,79\text{mm} & 8,73\text{mm} \end{bmatrix}$$

Risultati sperimentali

$$\begin{bmatrix} 7,49\text{mm} & 5,64\text{mm} \\ 5,81\text{mm} & 8,69\text{mm} \end{bmatrix}$$





*Hubert
Rusch*



*Fritz
Leonhardt*



*Ulrich
Finsterwalder*

La corretta progettazione sulle spalle dei giganti



*Franco
Levi*



Edme Campenon



*Carlo Cestelli
Guidi*



*Riccardo
Morandi*



Silvano Zorzi



Franco Mola



*Eugène
Freyssinet*



Abhin Alimchandani

Grazie per l'attenzione